

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**NÁVRH VYTLAČOVACÍ HLAVY EXTRUDERU**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

DAN BACHTÍK

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Jana Skočilase, Ph.D. a uvedl(a) jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne .....

.....

Jméno a Příjmení

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Skočilasovi Ph.D., který mi vyšel vstříc a byl mým vedoucím bakalářské práce. Zároveň bych mu chtěl poděkovat za konzultace a pomoc při řešení některých zapeklitých problémů v práci. Také bych chtěl poděkovat za možnost použití extruderu ústavu.

Další poděkování je k panu Ing. Tomáši Vlachovi, díky kterému jsem mohl mít takto zajímavé zadání bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat pánům Jiřímu Coufalovi a Vítu Tauchmanovi, kteří mě zasvětili do celého procesu opláštění a přidali rady a postřehy z praxe, které jsou nedílnou součástí konstrukčního návrhu.

# Anotační list

**Jméno autora:** Dan

**Příjmení autora:** Bachtík

**Název práce česky:** Návrh vytlačovací hlavy extruderu

**Název práce anglicky:** Extruder head design

**Rozsah práce:** počet stran:85  
počet obrázků:45  
počet tabulek:13  
počet příloh:9

**Akademický rok:** 2018/2019

**Jazyk práce:** čeština

**Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky

**Studijní program:** Energetika a procesní technika

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

## **Anotace česky:**

V této práci jsou popsány druhy vytlačovacích strojů a proces vytlačování materiálu, včetně popisu všech nezbytných parametrů. Hlavní zaměření práce je na oplášťovací hlavu. Práce obsahuje popis komponent hlavy a také návrh hlavy včetně výpočtů a výkresové dokumentace. Zároveň je zde obsažen experiment, který se týká zjištění parametrů vytlačovaného materiálu.

## **Anotace anglicky:**

In this thesis, types of extruders and material extrusion process including all important data are described. The main focus of this thesis is on cable coating head. The thesis contains description of head components and head design including calculations and blueprints. Experiment that is about finding parameters of extrusion material is also presented.

## **Klíčová slova:**

Vytlačovací hlava, Extruder, Vytlačovací stroj, Pinola

# Obsah

Úvod	9
I. Teoretická část	10
1. Úvod do zpracování plastů	10
1.1. Dělení plastů dle chování za tepla	10
1.1.1. Plasty teplem tavitelné	10
1.1.2. Plasty teplem tvrditelné	10
1.2. Metody zpracování plastů	10
1.2.1. Válcování	10
1.2.2. Vstřikování	11
1.2.3. Tvarování	11
2. Vytlačování	11
2.1. Princip vytlačování	12
2.2. Vytlačovací stroje	12
2.2.1. Pístové vytlačovací stroje	12
2.2.1.1. Jednopístové vytlačovací stroje	14
2.2.1.2. Dvoupístové vytlačovací stroje	15
2.2.2. Diskové vytlačovací stroje	16
2.2.2.1. Stupňovitý diskový extrudér	17
2.2.2.2. Bubnový extrudér	17
2.2.2.3. Spirálový vytlačovací stroj	18
2.2.3. Šnekové vytlačovací stroje	18
3. Šnekové vytlačovací stroje	19
3.1. Jednošnekové vytlačovací stroje	19
3.1.1. Šneky pro jednošnekové vytlačovací stroje	20
3.2. Dvou a vícešnekové vytlačovací stroje	23
4. Hlavy pro šnekové vytlačovací stroje	25
4.1. Rozdělení vytlačovacích hlav	25
4.1.1. Hlavy přímé	25
4.1.1.1. Přímé hlavy pro vytlačování trub	25
4.1.1.2. Přímé hlavy pro vytlačování profilů	26
4.1.2. Hlavy nepřímé	27
4.1.3. Hlavy širokoštěrbínové	28
4.1.4. Hlavy pro vytlačování sítí	29

5.	Vytlačování v kabelářském průmyslu	30
5.1.	Princip opláštění	30
5.1.1.	Opláštění přetlakem	30
5.1.2.	Opláštění podtlakem	31
5.2.	Vytlačovací stroj	31
5.2.1.	Přístřikové extrudéry	31
5.3.	Materiály	32
6.	Vytlačovací hlava	33
6.1.	Popis konstrukce vytlačovací hlavy	33
6.1.1.	Tělo hlavy	34
6.1.2.	Pinola	35
6.1.3.	Špička	36
6.1.4.	Miska	36
7.	Materiály izolací, jejich vlastnosti a reologické chování	37
7.1.	Reologické vlastnosti materiálů	37
7.1.1.	Základní veličiny popisující reologické vlastnosti	37
7.1.1.1.	Viskozita	37
7.1.1.2.	Hustota	38
7.1.1.3.	Index toku taveniny	40
7.1.2.	Modely popisující vlastnosti tekutin	41
7.1.2.1.	Newtonské látky	41
7.2.	Materiály pro opláštění	45
7.2.1.	Polyvinylchlorid	45
7.2.2.	Polyethylen	45
7.2.3.	Polytetrafluorethylen	45
7.2.4.	Další materiály	46
7.3.	Materiály jader	46
8.	Závěr a shrnutí teoretické části práce	47
II.	Praktická část	48
9.	Experimentální měření vytlačovaného materiálu	48
9.1.	Použitá zařízení	48
9.1.1.	Extruder BOCOMATIC EB-L 30/27	48
9.1.2.	Snímače	51
9.1.3.	Další pomůcky	51

9.2. Vlastní měření	52
9.2.1. Příprava měření	52
9.3. Vyhodnocení měření a závěr	54
9.3.1. Postup výpočtu	54
9.3.2. Výsledky výpočtu: čistá tavenina polyethylenu	56
9.3.3. Výsledky výpočtu: PE + HFFR	58
9.3.4. Závěr	59
10. Konstrukce vytlačovací hlavy	60
10.1. Extruder	60
10.2. Návrhy konstrukčního uspořádání	61
10.2.1. Návrh 1	61
10.2.2. Návrh 2	62
10.2.3. Návrh 3	63
10.3. Sestava popis	64
10.4. Připojovací příruba	64
10.5. Upínací matice	64
10.6. Miska	64
10.7. Špička	65
10.8. Upínací deska	65
10.9. Tělo hlavy	65
10.10. Pinola	65
10.10.1. Návrh geometrie	66
10.11. Pevnostní výpočty šroubů	68
Závěr	75
Seznam použitých symbolů a značení	76
Seznam použité literatury	80
Seznam Obrázků	82
Seznam Tabulek	84
Seznam Příloh	85

# Úvod

V této práci se budu zabývat návrhem vytlačovací hlavy pro opláštění vodičů. Cíle práce jsou:

1. Zpracovat literární rešerši, kde se zaměřím na vytlačování a popíši vytlačovací stroje a vytlačovací hlavy. Typy hlav a jejich součásti.
2. Popsat stroj, na který budu hlavu navrhovat. Dále se v této části se budu zabývat strojem, na který hlava přijde namontovat. Popíši stroj a také vypíši jeho parametry, které jsou pro návrh vytlačovací hlavy velmi důležité.
3. Provedu konstrukci hlavy a také k této konstrukci provedu další nezbytné procesní pevnostní a návrhové výpočty. Jedná se především o výpočet geometrie a pevnostní výpočty spojovacího materiálu hlavy. Nakonec vytvořím výkresovou dokumentaci.

Práci rozdělím na dvě části teoretickou a praktickou. Dále se v teoretické části budu zabývat procesem vytlačování, vytlačovacími stroji a jejich součástmi a vytlačovacími hlavami. Popíši všechny součásti hlavy. Tato část je nezbytná k pochopení dané problematiky. V další části popíši materiály a jejich vlastnosti, protože návrh hlavy a vytlačovaný materiál jsou úzce spjaty. Následně zpracuji závěr celé teoretické části a malé shrnutí. Praktickou část rozdělím na 2 hlavní části. První částí bude experiment, díky kterému získám požadované materiálové vlastnosti. Druhou částí bude vlastní konstrukce a výpočty. Zde si nejprve popíši stroj, na který budu hlavu navrhovat. Poté zvolím varianty řešení pro tento daný případ, a následně zvolím část parametrů a dopočítám geometrii pinoly. Popíši všechny součásti konstrukce a sestavu hlavy. Na závěr přepočítám pevnost šroubů a stanovím bezpečnost, zda jsem volil vhodné šrouby. Vše shrnu v závěru práce a zhodnotím, zda práce dopadla dle mého očekávání.



# I. Teoretická část

## 1. Úvod do zpracování plastů

Plasty můžeme dělit do různých skupin několika způsoby, a to podle výchozích surovin pro jejich přípravu, mezi které patří *polosyntetické* a *plně syntetické hmoty*. Dle jiného kritéria můžeme dělit plasty: *na bázi kondenzačních produktů, na bázi polymeračních produktů a na bázi přírodních produktů*. Také můžeme plasty rozlišovat dle jejich chování za tepla. Toto rozdělení bude dále rozvedeno níže.[1]

### 1.1. Dělení plastů dle chování za tepla

Plasty můžeme dělit dle chování za tepla na skupiny:

#### 1.1.1. Plasty teplem tavitelné

Skupina tzv. termoplastů. Tyto plasty mění vlastnosti s měnící se teplotou a to tak, že pokud zvyšujeme teplotu, tak plasty měknou popř. se taví. Po následném ochlazení se plasty opět vrací do původního stavu a tuhnou. U těchto plastů narozdíl od jiných druhů lze proces opakovat i vícekrát. [1]

#### 1.1.2. Plasty teplem tvrditelné

Skupina tzv. reaktoplastů (duroplastů). V případě těchto plastů je to obdobné jako u termoplastů během procesu zahřívání, kdy plasty tají, ale s další vzrůstající teplotou se plasty již stávají netavitelnými v důsledku tzv. vytvrzování. Toto je způsobeno chemickou reakcí, kdy dochází ke změnám vlastností plastů. [1]

### 1.2. Metody zpracování plastů

Zpracování plastů vyžaduje různé stroje a jiná výrobní zařízení, která jsou využívána pro různé účely. Zaprvé to jsou zařízení obecného charakteru, jako jsou sušárny, míchací zařízení, a další. Zadruhé to jsou různé specifické stroje a strojní zařízení např. lisy, konfekční stroje na pneumatiky, a další. Každý takový stroj využívá jinou techniku zpracování, dle jeho konstrukce a možností. [2]

#### 1.2.1. Válcování

Jedná se o tváření plastů popř. různých směsí např. kaučukových v úzké štěrbině mezi dvěma otáčejícími se válci. Pro toto zpracování se používají

válcovací stroje, buď dvouválcové nebo víceválcové s různými uspořádáními válců. [2]

### 1.2.2. Vstřikování

Jde o zpracování plastů, kdy se tavenina připraví natavením v tavicí komoře vstřikovací jednotky, a následně je vstříknuta do formy, kde poté zatuhne. Po ztuhnutí nastává otevření formy a “výstřik” je vyhozen. Pro tuto metodu se používají vstřikovací stroje, které jsou z převážné většiny ovládané hydraulicky.[2]

### 1.2.3. Tvarování

Tvarování je proces, při kterém se zpracovávají desky a folie. Deska je ohřata na teplotu tvarování, a poté je vytvarována příslušným způsobem. Lze použít buď tvarovacího lisu, kde se deska zahřeje na příslušnou teplotu, a následně se vylisuje do příslušného tvaru, který je určený tvárnicí a tvárníkem. Můžeme také použít tzv. vyfukovací stroje, tímto způsobem můžeme vyrábět duté výrobky. Dutý polotovar je vložen do nahřáté formy, a následně je do polotovaru vehnán tlakový vzduch, který polotovar vytvaruje do požadovaného tvaru. Po schladnutí je dvoudílná forma rozpojena a výrobek je vyjmut. Tvarováním lze vytvářet velké množství výrobků, ale v porovnání se vstřikováním nelze vytvářet složité tvary s různými tloušťkami stěn.[2]

## 2. Vytlačování

Vytlačování neboli extruze je proces, při kterém dochází k vytlačování taveniny polymeru z hlavy vytlačovací stroje tzv. extrudéru. Extrudér je nesporně nejdůležitějším kusem strojního vybavení v průmyslu zpracovávajícím polymery. Vytlačováním se myslí vytlačit ven. Materiál je vytlačován, když je tlačěn skrz otvor. Příkladem může být vytlačování zubní pasty z tuby i v tomto případě se jedná o extruzi. Část stroje, která obsahuje otvor skrz, kterým je materiál tlačěn do určitého tvaru, se nazývá vytlačovací hlava. Jak materiál prochází skrz hlavu, dostává tvar otvoru vytlačovací hlavy. Extrudovaný výrobek se nazývá extrudát. Během extruze můžeme používat spoustu různých materiálů, mimo polymery to mohou být také kovy, keramika, jíla a v neposlední řadě také polotovary potravin. Dále se budu zabývat pouze extruzí polymerů, o kterých jsem již psal výše.

Polymery jsou extrudovány převážně v roztaveném stavu, kdy tomuto případu říkáme taveninová extruze. Během této extruze funguje extrudér pouze jako pumpa zajišťující tlak nezbytný pro vytlačení polymeru hlavou. Některé aplikace ale vyžadují extruzi ve stavu pevném. Když je extruder naplněn polymerem v pevném stavu, tak je materiál roztaven pohybem šroubu extrudéru z násypky do vytlačovací hlavy a ohřevem topnými tělesy pracovního válce resp. pracovní komory stroje, tomuto procesu říkáme plastifikační extruze. V tomto případě extrudér zastává, kromě běžné vytlačovací funkce, další funkci, a to tavení.[3]

## 2.1. Princip vytlačování

Během extruze je tavenina polymeru tlačena skrz vytlačovací hlavu a formována do profilu. Profilem může být deska, vrstva izolace, trubka nebo jiný další profil. Jedná se o kontinuální proces. Vytlačovací proces může být založen na generování tlakového gradientu. Na tomto principu také pracuje zubové čerpadlo široce používané v procesním průmyslu. Jako druhá možnost je zde “šnekový” extrudér, který pracuje jako viskozni pumpa založená na tlakovém gradientu generovaného třením granulátu v těle extrudéru v části, kde je umístěn šnek.[4] Extrudér je granulátem plněn násypkou, kde je využívána převážně gravitace popř. je možné použít dopravu materiálu šnekem.

## 2.2. Vytlačovací stroje

Vytlačovací stroje můžeme dělit na tři hlavní skupiny: pístové, diskové a šnekové.

### 2.2.1. Pístové vytlačovací stroje

Pístové vytlačovací stroje mají jednoduchou a robustní konstrukci. Jsou schopny vyvíjet velmi vysoké tlaky. Vzhledem k přerušovanosti operací pístových vytlačovacích strojů jsou ideální pro procesy v cyklech podobně jako vstříkávání. Pístové vytlačovací stroje jsou limitovány z důvodu vratného pohybu. Dvě hlavní omezení jsou:

- a) omezená kapacita taveniny,
- b) špatná jednotnost teploty polymerní taveniny.

V současnosti jsou pístové vytlačovací stroje používány v malém měřítku během různých speciálních operací, kde jsou použity charakteristiky kladného posuvu a možnosti vytvářet vysoké tlaky. Máme dva hlavní typy pístových vytlačovacích strojů: jednopístové a dvoupístové.[3]

Pohon pístu může být buď mechanický nebo hydraulický. Stroj se skládá z pohonné a pracovní části. Pohonnou část stroje tvoří několik částí. Hydraulický válec s pístem, kde spojení s pracovní částí stroje zajišťuje pístnice, která je vedena v příčniku. Ve stroji je dvoutlaký hydraulický obvod, kde nižší tlak zabezpečuje pomocné a přípravné posuny při dodávkách velkého množství hydraulické kapaliny a tlak vyšší v rozmezí 15 až 30 MPa pracovní pohyb pístu. Pracovní část je tvořena pracovním válcem, dále pístem, a samozřejmě vytlačovací hlavou. Materiál určený pro vytlačování vkládáme do pracovního válce stroje. Pracovní válec i vytlačovací hlava jsou opatřeny topnými pásy pro ohřev.

Tlak, který působí v hydraulickém obvodu, musí zajistit správné poměry pro vytlačování a také musí překonat všechny odpory. Lze uvažovat vztah v ustáleném stavu:

$$P_p S_p - \sum F_r - pS = 0$$

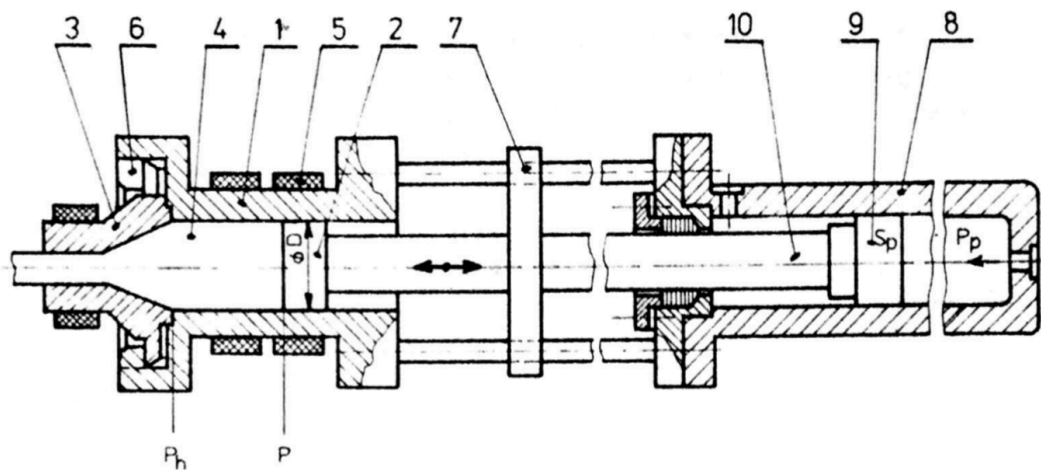
kde:

$P_p$	tlak hydraulické kapaliny
$S_p$	plocha hydraulického pístu
$p$	tlak v pracovním válci
$S$	plocha pracovního pístu
$F_r$	pasivní odpory

Velikost pístového vytlačovacího stroje je určena hlavně maximální vytlačovací silou, dále průměrem pracovního pístu a zdvihem pracovního pístu. Pístový vytlačovací stroj dokáže vyrábět profily, které jsou v úzkých tolerancích.[2]

### 2.2.1.1. Jednopístové vytlačovací stroje

Používají se v různých procesech. Jeden z procesů, kde se tyto stroje používají, je vytlačování nepoddajných polymerů jako např. polyethylenu s velmi vysokou váhou molekul (UHMWPE) nebo polytetrafluorethylenu (teflonu PTFE). Tyto polymery nejsou považovány za tavitelné na konvenčních strojích.

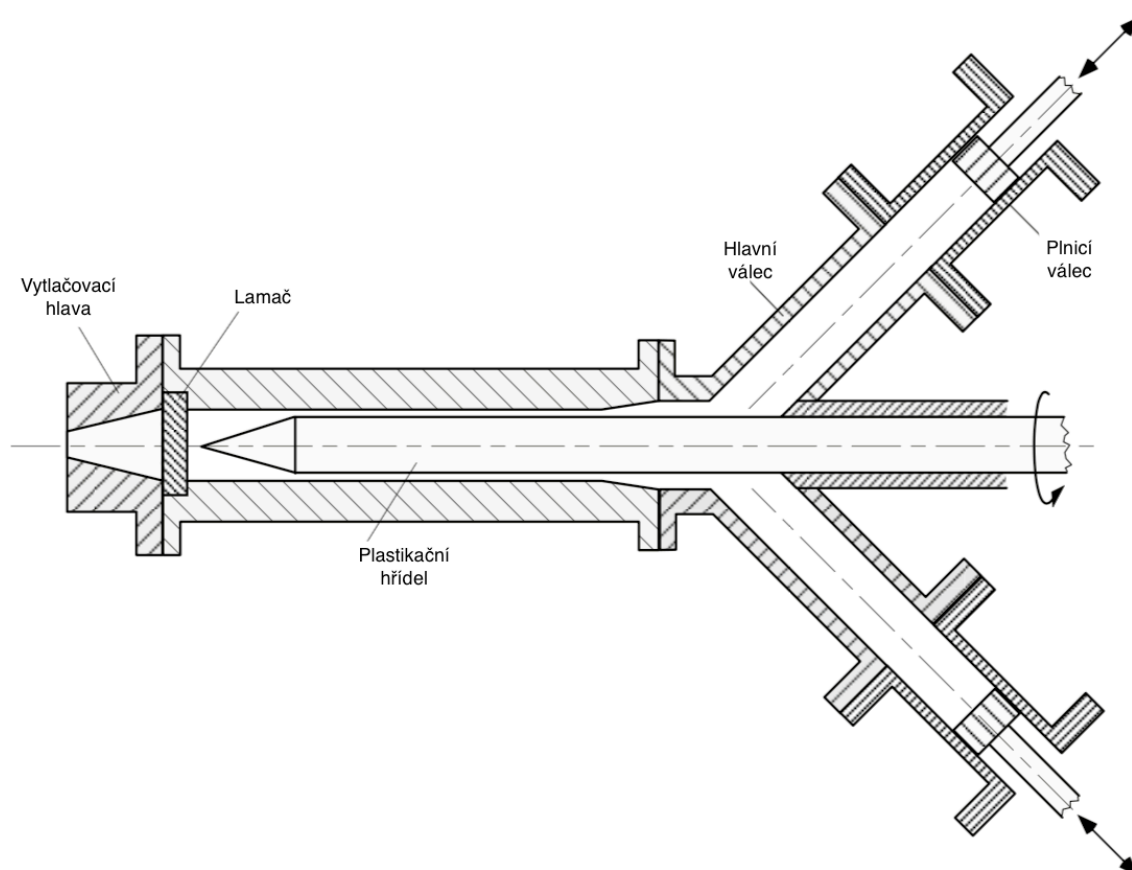


1 - pracovní válec, 2 - pracovní píst, 3 - vytlačovací hlava, 4 - vytlačovaný materiál, 5 - topná tělesa, 6 - bajonetový uzávěr, 7 - vedení pístnice, 8 - hydraulický válec, 9 - píst, 10 - pístnice

Obr. 2.1 Jednopístový vytlačovací stroj [2]

### 2.2.1.2. Dvoupístové vytlačovací stroje

Tyto stroje byly navrženy proto, že jednopístové stroje, jak již bylo zmíněno výše, mají nevýhody při kontinuální výrobě. Vícepístové vytlačovací stroje dokáží produkovat taveninu kontinuálně. Nejznámější konfigurací je dvoupístový vytlačovací stroj, který má uspořádání do V, kde dva písty tlačí do jedné společné části, ve které je plastikační hřídel, která se otáčí. Tím pádem dochází k dopravě pevných látek ve dvou oddělených pístech, k plastifikaci a dopravě taveniny dochází v prstencové oblasti mezi válcem a plastikační hřídelí. Stroj je schopen vytlačovat; avšak propustnost je špatná. Výkon by se pravděpodobně zlepšil, kdyby byla plastifikační hřídel vybavena spirálovitým kanálem. Tímto by se ale stroj stal šnekovým vytlačovacím strojem s podavacím zařízením.[2,3]



Obr. 2.2 Dvoupístový vytlačovací stroj [3]

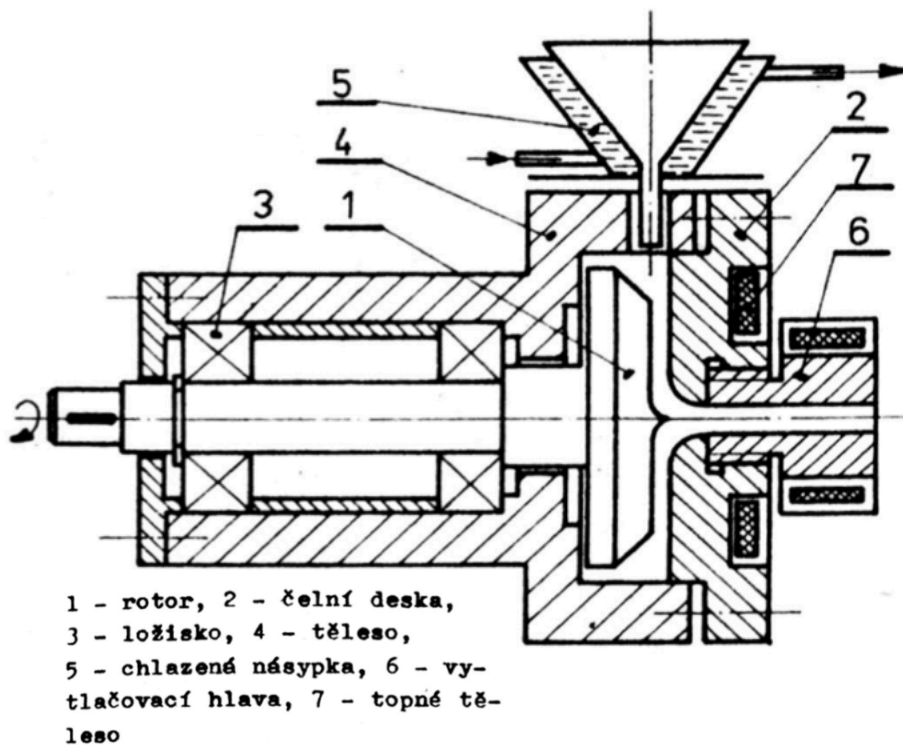
### 2.2.2. Diskové vytlačovací stroje

Je zde velké množství extrudérů, které nepoužívají Archimédův šroub pro transport materiálu, ale stále spadají do kategorie extrudérů s kontinuálním procesem. Někdy se také těmto strojům říká bezšroubé extrudéry. Tyto stroje užívají jakýsi druh disku nebo bubnu pro vytlačování materiálu. Mnoho disků je založeno na viskoelastických vlastnostech materiálu. [17]

U diskových vytlačovacích strojů využíváme zvláštního chování materiálu tzv. Weissenbergova efektu. Hlavními částmi jsou: disk, který je uložený na ložiskách, těleso, přední deska, čelo, štěrbina, chlazená násypka, vytlačovací hubice, topná tělesa. Dosahujeme velmi malých tlaků. Je zde známý vztah pro výkon diskového vytlačovacího stroje:

$$V = f(k_D \cdot D \cdot n \cdot \eta \cdot \rho \cdot \gamma)$$

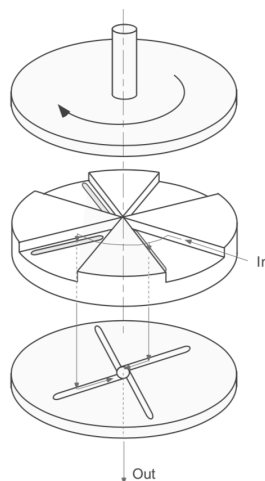
kde  $k_D$  - je tvar pístu, průměr  $D$ , otáčky  $n$ , smykovou rychlostí  $\gamma$ , a vlastnostmi zpracovávaného materiálu  $\eta, \rho$ . [2]



Obr. 2.3 Schéma diskového vytlačovacího stroje [2]

### 2.2.2.1. Stupňovitý diskový extrudér

Tento typ diskového extrudéru byl jedním z prvních diskových extrudérů. Srdcem stroje je odstupňovaný disk umístěný v malé vzdálenosti od plochého disku. Když se jeden z disků otáčí s taveninou polymeru v axiální štěrbině, k vytvoření tlaku dojde díky pohybu ze štěrbiny do štěrbin o menším rozměru. V případě, že jsou koncové kanály začleněny do odstupňovaného disku; polymer může být vytlačován kontinuálně. Design je založen na Rayleighově analýze hydrodynamického mazání v různých geometriích. Shodl se na tom, že paralelně odstupňovaný disk byl schopen unést větší zatížení. Extrudér s odstupňovaným diskem byl designován v různých konfiguracích používajících změnu gradientu ve štěrbině. Extrudér měl klínovitý disk a rostoucím gradientem tlaku s radiální vzdáleností. Praktickou nevýhodou je fakt, že je zde složitá údržba a čištění stroje kvůli složitému tvaru kanálů ve stupňovitém disku.



Obr. 2.4 Disk stupňového diskového vytlačovacího stroje [3]

### 2.2.2.2. Bubnový extrudér

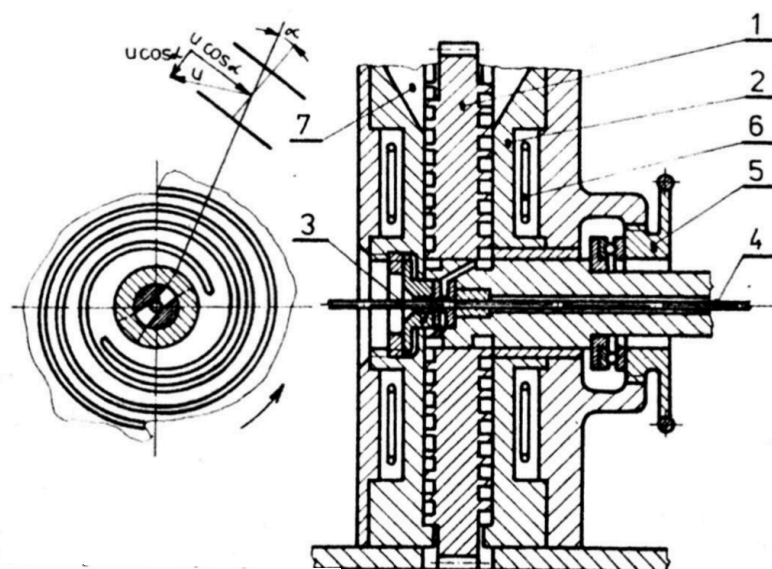
Materiál je plněn násypkou do prstencovitého prostoru mezi rotorem a válcem. Rotačním pohybem rotoru je materiál přepravován po celém obvodu válce. Předtím, než materiál dosáhne násypky, se setká se stírací lištou. Stírací lišta “seškrabuje” polymer z rotoru a odchyluje tok polymeru do kanálu, který vede do vytlačovací hlavy. Na tomto designu bylo použito mnoho patentů.

Jednou speciální vlastností tohoto designu je možnost nastavit místní štěrbinu pomocí upínací lišty podobně jako nastavení štěrbin v ploché hlavě. Upínací lišta v bubnovém extrudéru je aktivována nastavováním tlaku oleje.



### 2.2.2.3. Spirálový vytlačovací stroj

Je dalším typem diskového extrudéru známého již mnoho let. Podobá se klasickým diskovým vytlačovacím strojům. Materiál se pohybuje ve spirálovitě uspořádaném kanálu účinkem rychlostních složek, tedy nikoliv účinkem viskoelastických vlastností taveniny, jak je tomu u vytlačovacích strojů diskových.[2,3]



1 - rotor, 2 - stator, 3 - opláštovací hlava, 4 - vodič, 5 - ruční kolo, 6 - topné těleso, 7 - plnicí kanál

Obr. 2.5 Spirálový vytlačovací stroj [2]

### 2.2.3. Šnekové vytlačovací stroje

Šnekovými vytlačovacími stroji se budu podrobněji zabývat v kapitole 3.

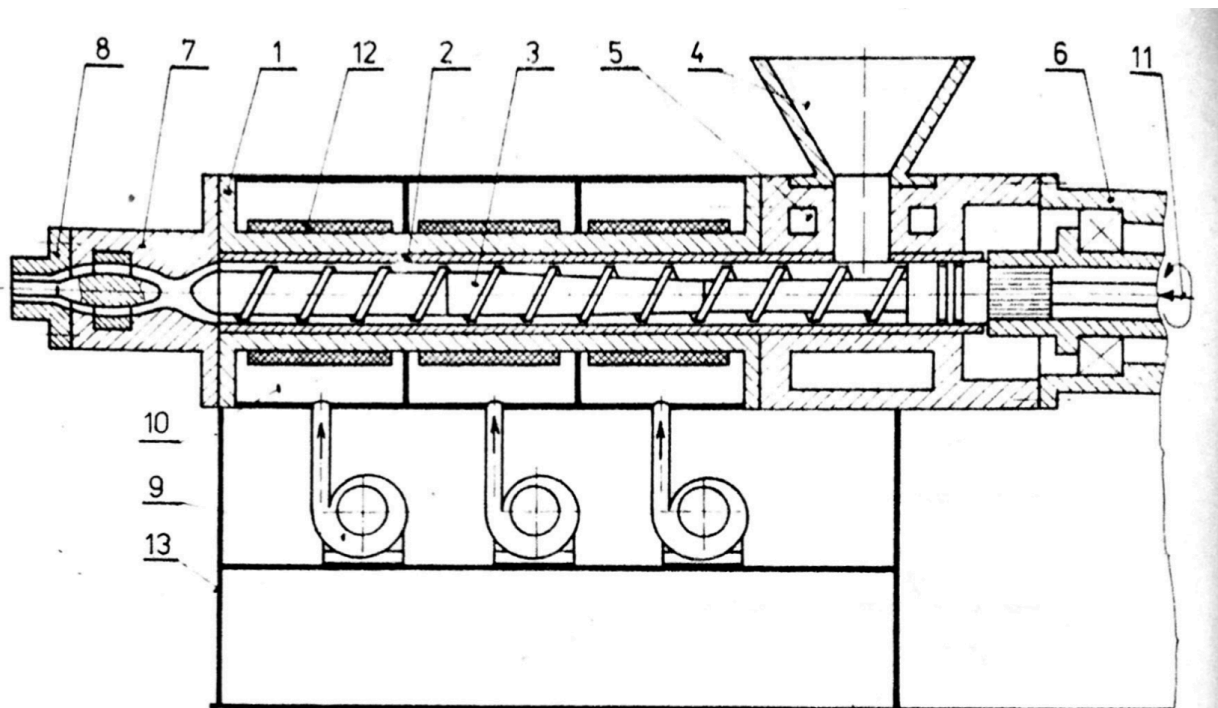
### 3. Šnekové vytlačovací stroje

Šnekové vytlačovací stroje mohou existovat v různých provedeních. Hlavní skupinou jsou jednošnekové extrudéry, ale dalšími variantami stroje mohou být i dvoušnekové, či vícešnekové vytlačovací stroje. Šnekové vytlačovací stroje se skládají z násypky, šneku, pracovního válce, topných pásů, ložiskové skříně, chladicího ventilátoru, stojanu.

#### 3.1. Jednošnekové vytlačovací stroje

Jednošnekové vytlačovací stroje, jak již z názvu vyplývá, obsahují uvnitř pracovního válce pouze jeden šnek. Jsou vyráběny v různých rozměrech, kde velikosti jsou dány průměrem a délkou šneku. Toto tvoří tzv. rozměrovou řadu.

K tradičním výrobkům na jednošnekových strojích patří: trubky, profily, folie, opláštění vodičů, atd. Při výrobě se uplatňuje princip vytlačování, který byl již popsán v kapitole 2.



1 - pracovní válec, 2 - vložka pracovního válce, 3 - šnek, 4 - násypka, 5 - chladicí kanálky, 6 - ložisková skříně, 7 - vytlačovací hlava, 8 - vytlačovací hubice, 9 - chladicí ventilátor, 10 - chladicí kanály, 11 - přívod temperačního média, 12 - topné pásy, 13 - stojan

Obr. 3.1 Jednošnekový vytlačovací stroj, schéma [2]

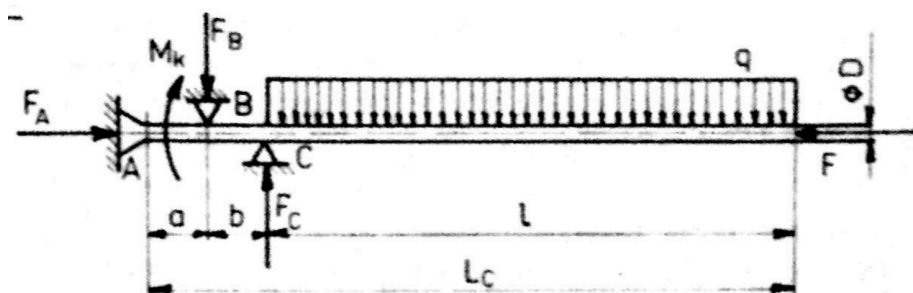
### 3.1.1. Šneky pro jednošnekové vytlačovací stroje

Šnek je základním funkčním prvkem šnekového extrudéru. Můžeme mít více variant šneků, kde pro každý materiál je specifická geometrie a také velice důležitá veličina: kompresní poměr.

Kompresní poměr šneku je poměr objemů profilu šneku a to pro jedno stoupání ve dvou místech šneku, těmito místy je obvykle konec šneku a šnek v místě pod násypkou. Kompresní poměr je možné měnit díky změně hloubky šnekového profilu. Šneky mohou mít různé zakončení.

Šneky jsou části extrudéru, které jsou velmi namáhané jak axiálně, tak i radiálně, a také krutem, proto musíme mít ložiska, která dokáží všechna tato namáhání zachytit. Síly v ložiscích lze dopočítat ze vztahů

$$F_A = \frac{\pi D^2}{4} p ; F_B = \frac{ql^2}{2b} ; F_C = \frac{ql}{2b}(l + 2b)$$

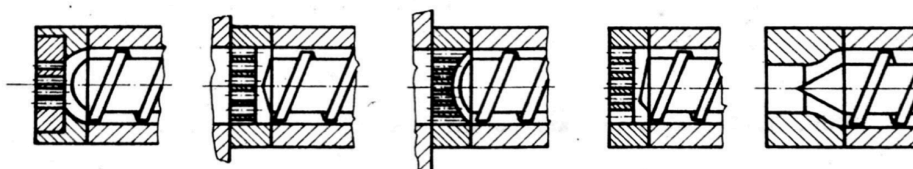


Obr. 3.2 Zatížení šneku [2]

a výsledný moment na šneku [2]

$$M_K = 159,2 \frac{P}{n}$$

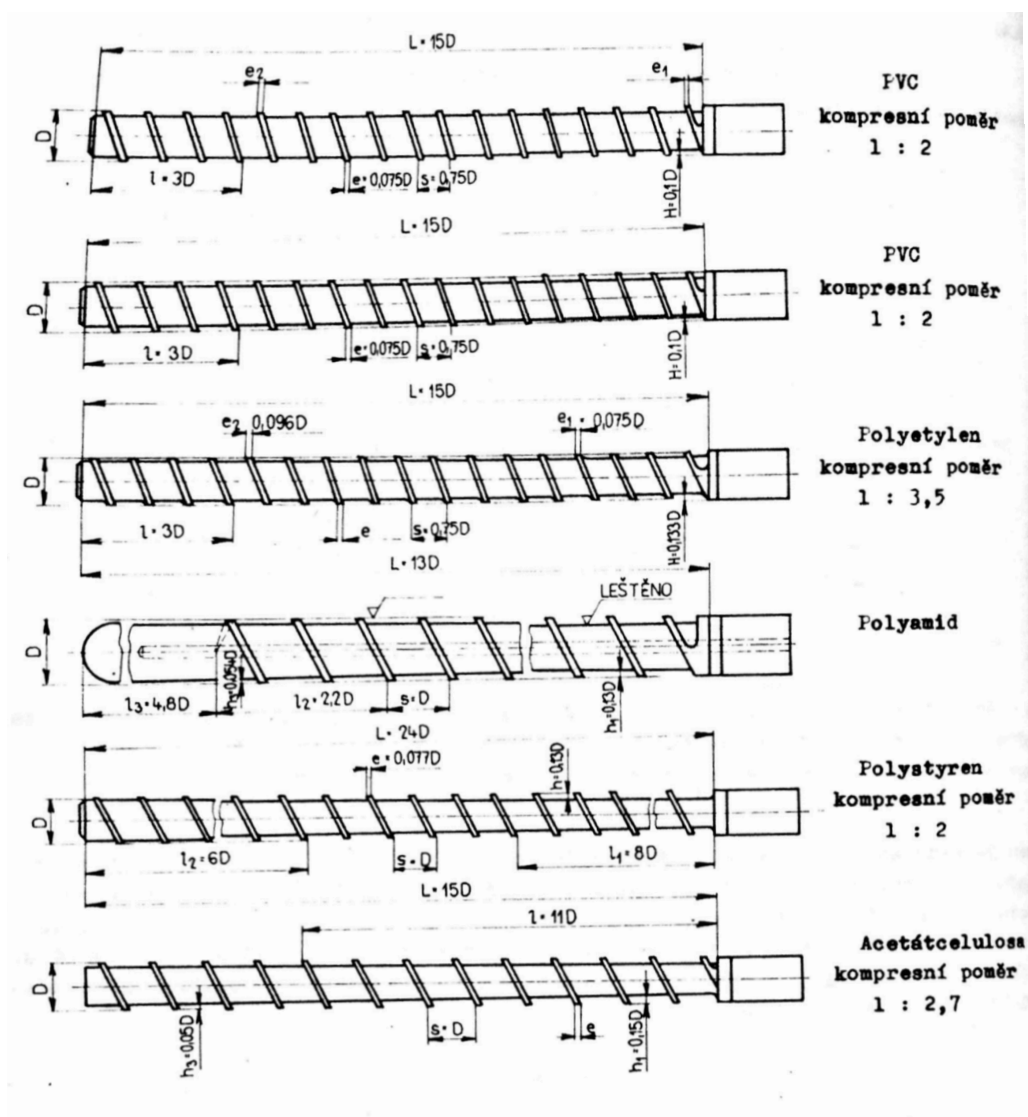
kde: P-maximální přenášený výkon šneku (kW), n-minimální otáčky šneku (1/s)



Obr. 3.3 Příklad některých zakončení šneků [2]

Vzhledem k namáhání šneku musí být šnek extrudéru odolný vůči opotřebení, mít vysokou pevnost a také chemickou odolnost. Běžným

materiálem pro výrobu šneku je nitridační ocel. Ve většině případů je šnek tepelně povrchově upraven. Důležité je, aby šnek do pracovního válce pasoval a tavenina nepronikala kolem šneku do místa, kde jsou ložiska, proto musí být tento prostor oddělen těsněním, ne jen proto, aby nevnikala tavenina do tohoto prostoru, ale také aby nepronikalo mazivo do taveniny a neznečišťovalo ji. [2]



Obr. 3.4 Přehled geometrií jednochodých šneků pro různé materiály [2]

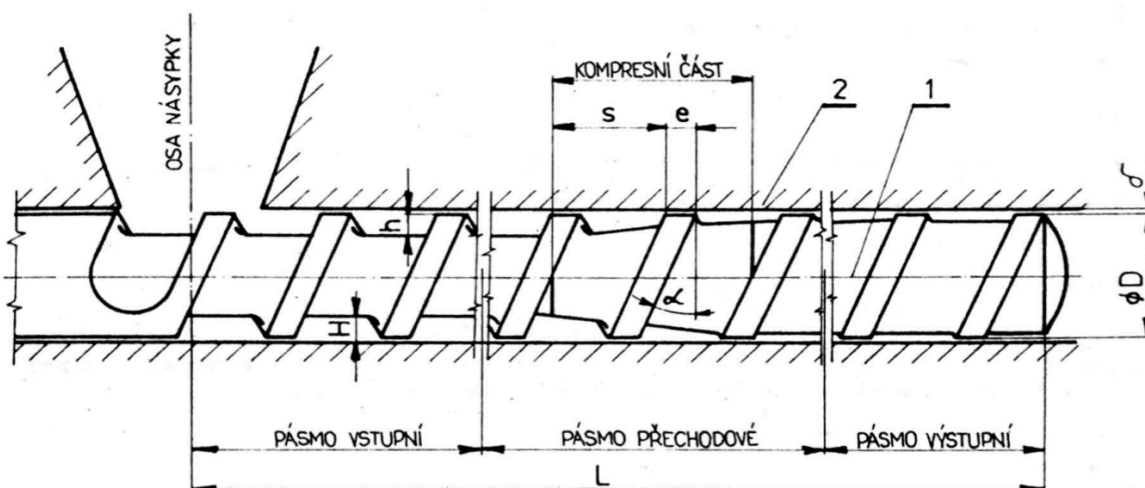
### 3.1.1.1. Pracovní pásma šnekového vytlačovacího stroje

A) Vstupní pracovní pásmo - zde vstupuje do stroje plast ve formě prášku nebo granulí. Materiál do stroje podáváme násypkou, odkud materiál samovolně gravitací “padá” do stroje, a následně je zachytáván šnekem. Z tohoto místa se materiál následně posouvá vpřed směrem k vytlačovací hlavě pomocí třecích sil. Materiál je se změnou profilu šneku stlačován, ale také ohříván pomocí topných pásů umístěných kolem pracovního válce. Materiál musí mít přesnou teplotu,

aby mohl postupovat směrem vpřed, v opačném případě, když bude teplota vyšší než požadovaná, bude materiál tzv. klouzat na místě a nebude se pohybovat dále směrem k vytlačovací hlavě. V případě, že má tavenina optimální teplotu, postupuje směrem k vytlačovací hlavě a s rostoucí vzdáleností také roste tlak.

B) Přechodné pracovní pásmo (tzv. zóna tavení) - V těchto místech dochází k tavení materiálu díky teplotě, které přivádíme pomocí topných pásů. Teplota také vzniká třením materiálu mezi pracovním válcem a šnekem a smykovým namáháním v pracovním válci. Bohužel u jednošnekových vytlačovacích strojů dochází k potížím, které způsobují částice materiálu, které nepřišly do styku se šnekem popř. pracovním válcem, a zároveň nejsou namáhány smykem. Kvůli tomu ve stroji vznikají dlouhé provazce nehomogenního plastu. Schopnost těchto strojů pracovat kontinuálně je proto omezená a musíme přistoupit k různým řešením: např. úprava hloubky profilu šneku, vícechodé šneky a další.

C) Výstupní pracovní pásmo (tzv. vytlačovací zóna) - toto je konečná část šnekového vytlačovacího stroje. Zde by se měla nacházet pouze tavenina. Tato část je již přímo napojena na vytlačovací hlavu, a následně dochází k vytlačení požadovaného tvaru popř. nanesení vrstvy např. na vodič. [1]

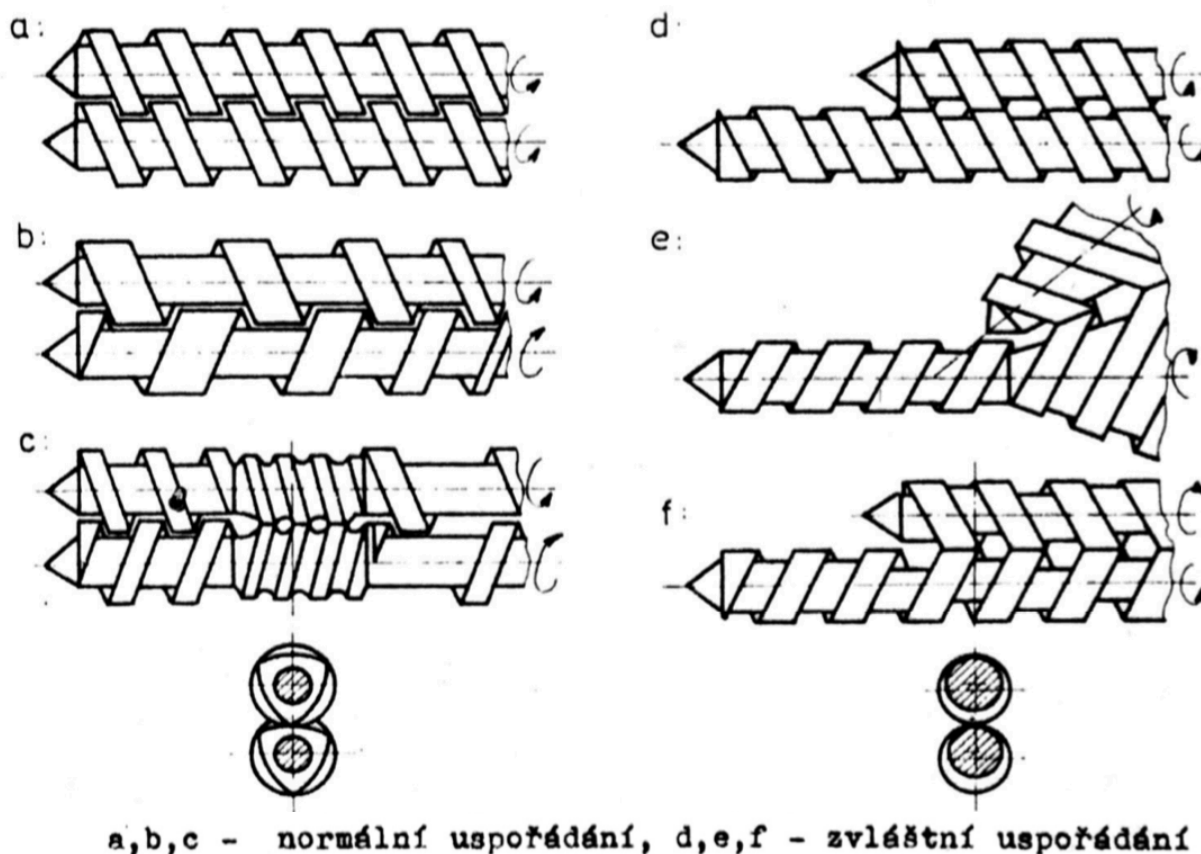


1 - šnek, 2 - pracovní válec, D - průměr šneku, L - délka šneku, s - stoupání závitu, e - vodící plocha závitu, h - hloubka šnekového profilu, H - hloubka šnekového kanálu,  $\delta$  - poloviční vále,  $\alpha$  - úhel stoupání závitu

Obr. 3.5 Schéma rozdělení jednošnekového vytlačovacího stroje na pracovní pásma [2]

### 3.2. Dvou a vícešnekové vytlačovací stroje

Tyto vytlačovací stroje jsou podstatně složitější a technicky náročnější než v předchozím případě zmiňované jednošnekové stroje. U dvoušnekových vytlačovacích strojů do sebe oba šneky zasahují a tím vytvářejí řadu šterbin a komor, pomocí kterých materiál nuceně dopravujeme směrem k vytlačovací hlavě. Vše závisí na směru otáčení šneků ve stroji. V případě, že se šneky otáčejí proti sobě je hnětací účinnost nižší než v případě, kdy jdou šneky stejným směrem.

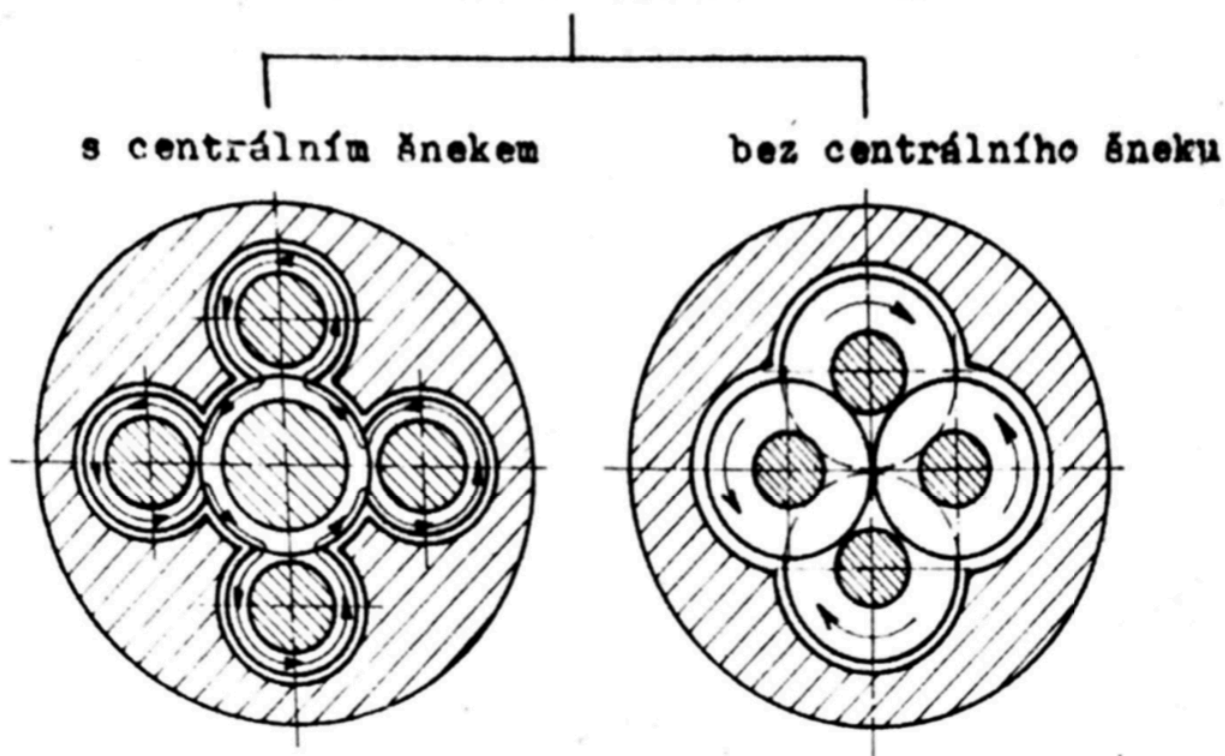


Obr. 3.6 Uspořádání šneku ve dvoušnekovém vytlačovacím stroji [2]

Tyto stroje jsou velmi namáhané hlavně v ložiskách, pokud jde o axiální síly. Dávkování materiálu do pracovního válce většinou usnadňuje dávkovací šnek uvnitř násypky. Tato konstrukce brání přetížení šneku, a také zajišťuje rovnoměrné zásobování vytlačovací hlavy extruderu.

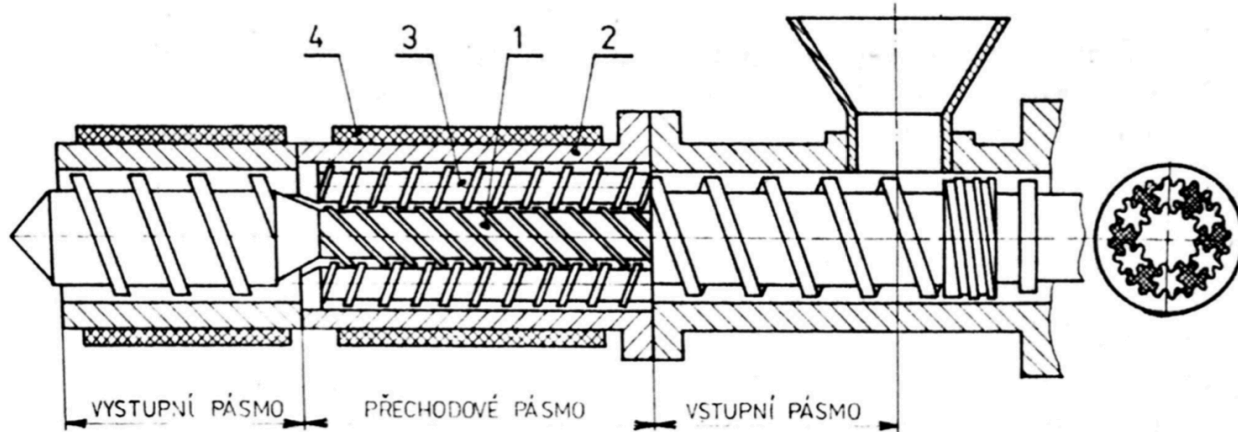
U dvoušnekových strojů se stejným smyslem otáčení zajišťujeme pohon obou šneků přes ozubené kolo, ale v případě protibežných šneků, otáčení zajišťují pastorky se šikmým ozubením, kde poháníme první šnek přímo a na druhý šnek přenášíme krouticí moment přes druhý pastorek s opačnými zuby.

## VÍCEŠNEKOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE



Obr. 3.7 Rozdělení vícešnekových vytlačovacích strojů [2]

Rozdělení pásem u vícešnekových vytlačovacích strojů je řešeno stejně jako u jednošnekových vytlačovacích strojů viz. kapitola 3.1.1. [1,2]



1 - centrální šnek, 2 - pracovní válec, 3 - satelitní šneky, 4 - topné těleso

Obr. 3.8 Pásma vícešnekového vytlačovacího stroje [2]

## 4. Hlavy pro šnekové vytlačovací stroje

Tyto součásti jsou po šneku velice důležitou součástí nejen šnekového vytlačovacího stroje. Hlavy nám určují konečný tvar, který vznikne vytlačením taveniny. Jsou připojeny k pracovnímu válci buď přímo a nebo přes různé redukce, v případě, že do vytlačovací hlavy je připojeno více výstupů extrudérů. Mezi hlavou a extruderem bývá často umístěn tzv. lamač.

Lamač je sítko, které naposledy homogenizuje plast před vstupem do vytlačovací hlavy. Také se používá jako opěra pro sadu čistících sít, pomocí kterých se plast zbavuje nečistot, a také díky odporu vzrůstá tlak na konci šneku.

### 4.1. Rozdělení vytlačovacích hlav

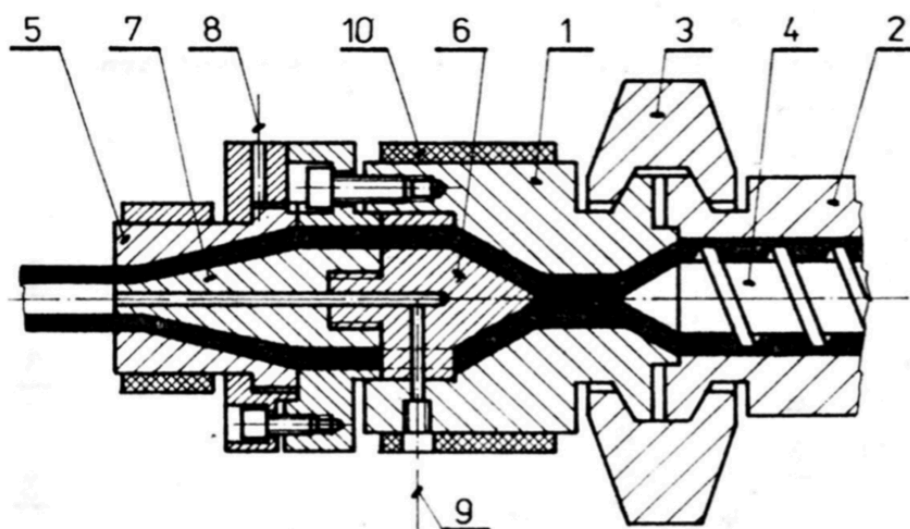
Hlavy můžeme dělit dle konstrukce na několik základních typů.

#### 4.1.1. Hlavy přímé

Tyto hlavy se používají obvykle při výrobě tyčí, profilů, trubek, folií apod. Většinou mají kruhový symetrický průřez, popř. složitější členitý průřez pro vytlačování profilů.

##### 4.1.1.1. Přímé hlavy pro vytlačování trub

Rozměr vytlačené trubky je určen pomocí výměnného trnu a hubice uvnitř vytlačovací hlavy. Hubici můžeme vzhledem k ose trnu regulovat stavěcími šrouby. Tímto dosáhneme rovnoměrné tloušťky stěny vytlačené trubky.



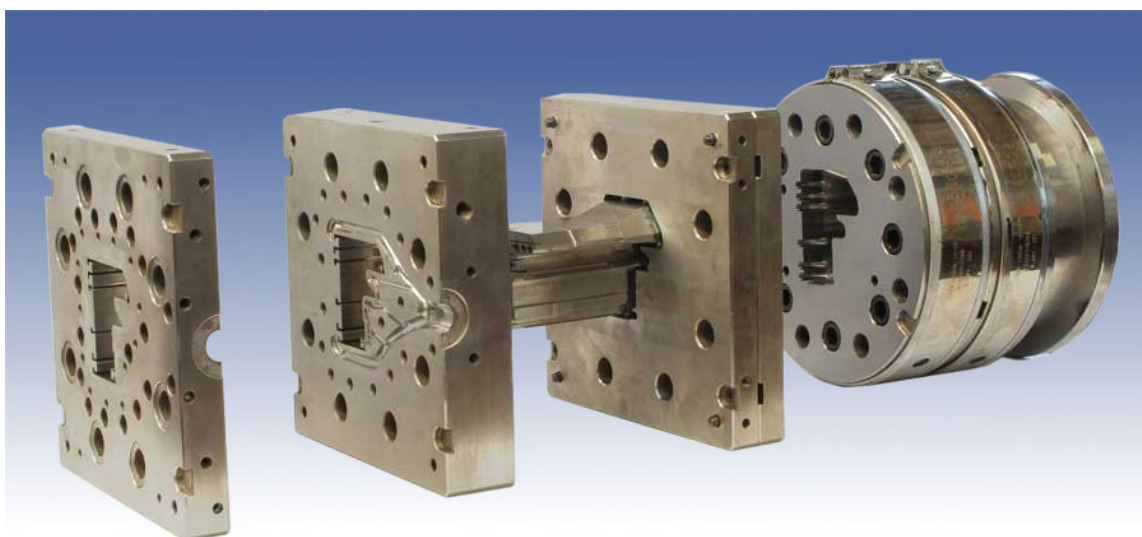
1 - těleso vytlačovací hlavy, 2 - pracovní válec, 3 - objímka, 4 - šnek, 5 - vytlačovací hubice, 6 - rozdělovač, 7 - trn, 8 - seřizovací šrouby, 9 - přívod vzduchu, 10 - topení

Obr. 4.1 Přímá vytlačovací hlava pro vytlačování trubek [2]



#### 4.1.1.2. Přímé hlavy pro vytlačování profilů

Tyto hlavy jsou náročné na konstrukci vzhledem ke složitějším vytlačovaným tvarům. V tomto případě i přes dlouholeté snahy uplatňujeme spíše zkušenosti a funkční principy. V případě jednoduchých profilů je negativ profilu pouze vyfrézován do desky a upnut do stroje. Toto řešení je velice levné, ale z hlediska proudění taveniny nevýhodné.

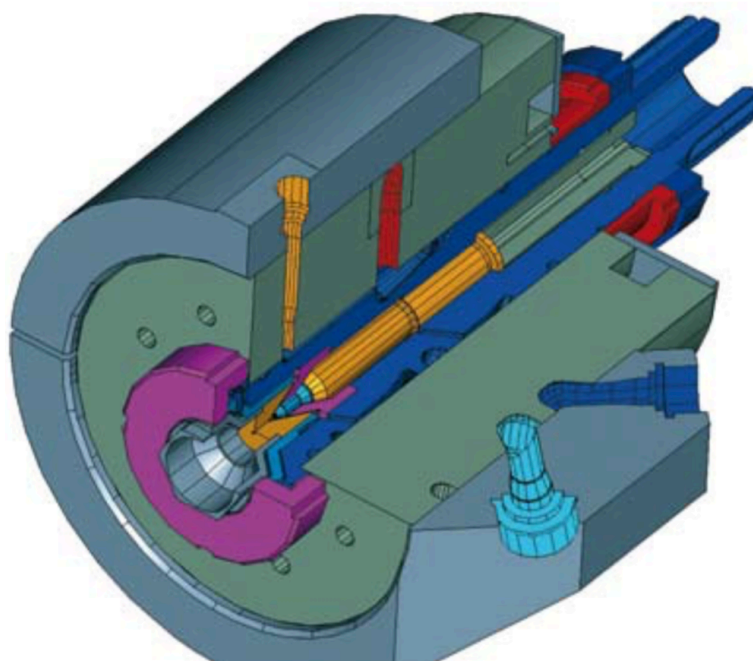


*Obr. 4.2 Vytlačovací hlava pro okenní profily [10]*

#### 4.1.2. Hlavy nepřímé

Tyto hlavy můžeme dále dělit na příčné a šikmé. Nejčastějším využitím těchto hlav je v kabelářském průmyslu pro opláštění vodičů, či profilů. Odklon od osy šneku je různý. U hlav příčných je to  $90^\circ$ , u šikmých hlav od  $30^\circ$  do  $60^\circ$ .

S rostoucím úhlem vzrůstají potíže s tokem taveniny. Proto musíme “škrtit” tok taveniny. Nejběžnější provedení je hlava, ve které je umístěn spirálový trn. Díky tomuto řešení se tavenina rozdělí na několik proudů a dojde k tlakovému vyrovnání.



Obr. 4.3 Nepřímá vytlačovací hlava pro opláštění vodičů [6]



Obr. 4.4 Trn [5]

#### 4.1.3. Hlavy širokoštěrbinové

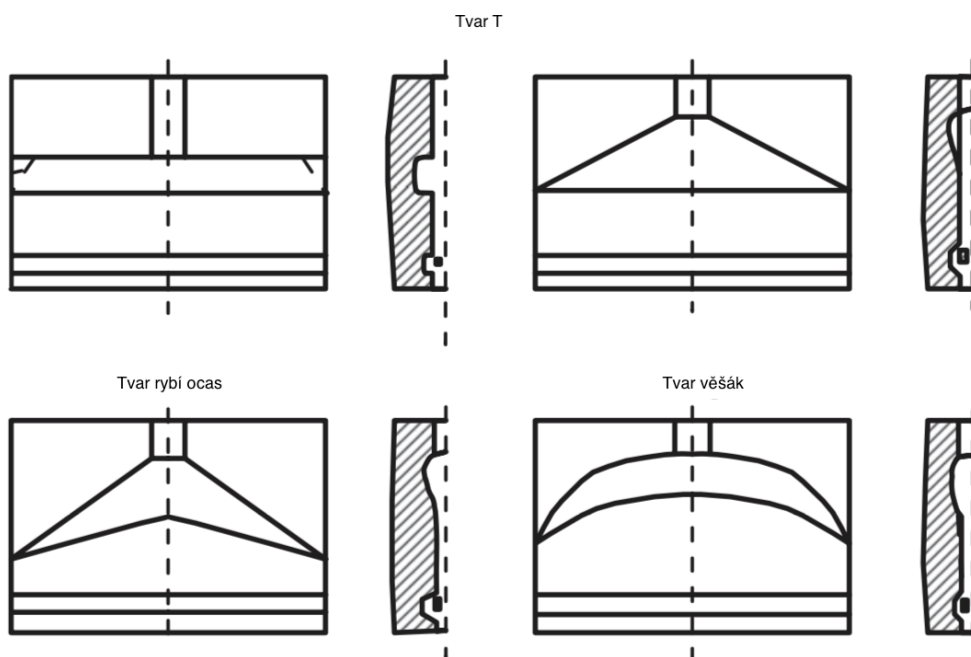
Širokoštěrbinové hlavy se využívají hlavně pro vytlačování folií a desek. V této hlavě je hmota rozváděna v celé šíři štěrbině pomocí příčného rozvodného kanálu. Tok lze regulovat pomocí brzdného můstku a stavěcími šrouby tak, že přiškrtneme střední část hlavy, a tím zvýšíme odpor. Hlavy mohou mít několik tvarů, kde každý tvar se hodí pro vytlačování jiného materiálu. Základními tvary jsou:

a) Tvar rybího ocasu

Tento tvar hlavy je vhodný pro vytlačování PVC-desek díky tomu, že nevznikají mrtvé prostory. Bohužel vzhledem ke složitosti tvaru je obtížné nastavit hlavu na změny tokových vlastností taveniny.

b) Tvar T

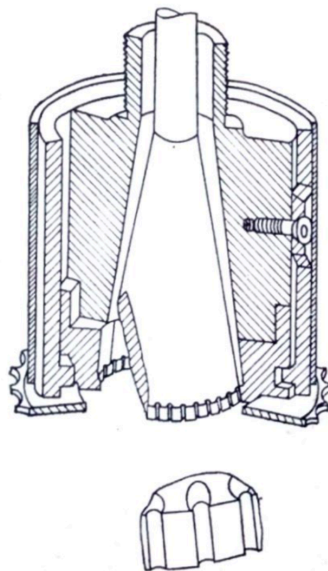
c) Věšákový tvar



Obr. 4.5 Tvary širokoštěrbinových hlav [7]

#### 4.1.4. Hlavy pro vytlačování sítí

“Tyto hlavy umožňují kontinuální výrobu kruhových sítí. Hlava vytlačuje struny na vnějším okraji trnu i na vnitřním okraji hubice, přičemž trn i hubice se otáčejí proti sobě. Jestliže se otvory trnu a hubice setkají, vzniká v síti spoj. Vytlačované sítě se používají v obalové technice” [1]



Obr. 4.6 Hlava pro vytlačování sítí [1]

## 5. Vytlačování v kabelářském průmyslu

V kabelářském průmyslu je vytlačování neodmyslitelnou součástí celého procesu. Pomocí vytlačování tvoříme izolace vodičů. Jedná se o nejběžnější způsob izolování jader vodičů. Izolační vrstvu ve formě taveniny nanášíme na jádro pomocí vytlačovacího stroje, který protlačuje taveninu na jádro skrz vytlačovací kabelovou hlavu. Tato hlava má specifickou konstrukci a udává nám finální podobu izolace vodiče. Pro izolace používáme celou řadu materiálů, které mají různé specifické vlastnosti, u některých je to např. samozhášivost, což je odolnost vůči samovznícení plamenem při přehřátí, zkratu popř. jiném problému s vodičem.

### 5.1. Princip opláštění

Proces opláštění se koná v pracovní hlavě vytlačovacího stroje na extruzní lince. Hlava stroje má svou specifickou konstrukci.

Pevné jádro popř. svazek menších drátků většinou z materiálů jako jsou Cu, Fe, popř. Fe s vrstvou Cu apod. postupuje skrz hlavu od navijáku k odvijáku. Jádro je protahováno skrz hlavu danou silou a rychlostí. Z vytlačovacího stroje přivádíme taveninu ohřátou na teplotu dle pracovního postupu daného materiálu. Tuto taveninu vedeme do hlavy, kde se přes tzv. pinolu rozváděcími kanálky vede až k místu styku taveniny s jádrem. V tomto místě dojde k “unesení” a vytlačení taveniny s jádrem skrz tzv. misku, která nám udává koncový tvar vodiče s tolerancí na smrštění. tzn rozměr misky je dle teplého průměru vodiče.

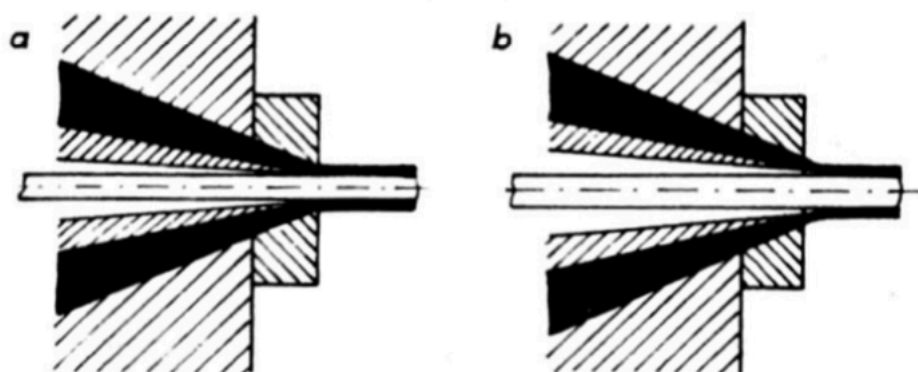
#### 5.1.1. Opláštění přetlakem

K opláštění přetlakem dochází v oplášťovací hlavě. Nazývá se také tzv. vytlačování na tlak. V tomto případě trn neboli špička hlavy je pevně zasunut do pinoly a oproti tomu miska je přitlačena k pridržovací matici. Někdy můžeme nazývat misku také jako matici. Mezi těmito dvěma díly vznikne prostor, do kterého postupuje tavenina. V tomto prostoru probíhá také jádro a tavenina je tedy v přímém styku s jádrem. Během tohoto principu dojde k úplnému vyplnění prostoru vodiče včetně prostorů mezi jednotlivými drátky jádra v případě, kdy jsou jádra tzv. lanová. Poloha špičky a misky nám také udává stejnou tloušťku izolace po celém obvodu, musí být tedy dodržena především souosost. V případě špičky je moderním řešením dodržovat souosost pomocí funkčního kuželu,

kde tyto přípravky nazýváme jako samocentrovací nebo samocentrické. V případě jádra je problematika sousostí složitější.

### 5.1.2. Opláštění podtlakem

Tento princip nazýváme jako vytlačování na trubičku nebo trubičkování. Zde je špička prodloužena dle profilu vodiče a přitlačena k misce, tím vzniká malý prostor pro prostup taveniny a k samotnému opláštění dojde až mimo pracovní prostor vytlačovací hlavy. V tomto případě hmota dosedne pouze po obvodu jádra a již nestihne zatéct do mezer mezi jednotlivými drátky. Ve vytlačovací hlavě musí být v tomto případě vakuum.



a - vytlačování na tlak,  
b - vytlačování na trubičku

*Obr. 5.1 Metody opláštění [11]*

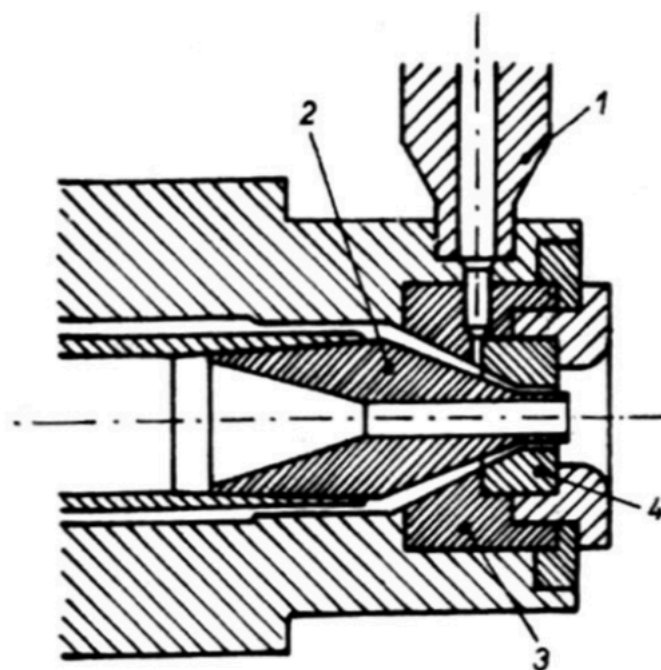
## 5.2. Vytlačovací stroj

Jedná se o běžný vytlačovací stroj. Ve většině případů je stroj jednošnekový s dvouchodým pracovním šnekem. Konstrukce je stejná jako v případě běžných vytlačovacích procesů. Tuto problematiku jsem již popsal v kapitole 3.

### 5.2.1. Přístřikové extrudéry

Zvláštním druhem jsou přístřikové extrudéry. Tyto stroje zajišťují další taveninu v jiné barvě. Pomocí tohoto stroje dokážeme vytvořit tenkou čáru na vodiči, nebo také v případě vícelinkových vodičů vytvořit každou linku z jiné barvy. Nejběžnějším případem může být vodič “červená-černá”. Tenkou čáru

definuje norma. Vytlačování se v tomto případě koná za použití dvou vytlačovacích strojů. První stroj nanáší izolaci vodiče, a právě druhý stroj se stará o tvorbu druhé barvy vodiče. Zde je použit menší šnek než v případě hlavního extruderu. Tyto přístřikové extrudery mohou být umístěny jak horizontálně, tak i ve vertikální popř. jiné specializované poloze. V tomto případě je ve vytlačovací hlavě miska rozdělena na miskou a předmisku. V první části dochází k nanášení izolace na jádro a v druhé je do taveniny na jádře přístříknuta tavenina jiné barvy, která vytvoří na vodiči linku.



1 - přídavný vytlačovací stroj, 2 - trn, 3, 4 - přední a zadní díl matrice

Obr. 5.2 Připojení přístřikového extruderu k vytlačovací hlavě [11]

### 5.3. Materiály

Pro opláštění vodičů používáme řadu materiálů. Materiály volíme dle užití nebo dle potřebných vlastností vodiče. Hlavní skupinou materiálů jsou tzv. plastomery, mezi které se řadí například polyvinylchlorid (PVC), polyethylen (PE) a další.

## 6. Vytlačovací hlava

Vytlačovací hlava je neodmyslitelnou součástí kabelářského průmyslu. Troufám si říci, že je nejdůležitějším článkem v procesu výroby izolací kabelů vytlačováním. Konstrukce hlavy má spoustu řešení a její návrh by se měl řídit určitými pravidly, která byla zjištěna buď zkušenostmi a praxí v průmyslu a v posledních letech také díky počítačovým simulacím tokových vlastností taveniny.

### 6.1. Popis konstrukce vytlačovací hlavy

Hlava se skládá z několika součástí, kde každá má nějakou určitou funkci. Návrh konstrukce hlavy by se měl řídit několika kritérii, která závisí na vytlačovaném materiálu připojeném vytlačovacím stroji, rychlosti, tvaru a rozměru výrobku a další.



Obr. 6.1 Lamač vyjmutý z extrudéru. [autor]

Pozn. Vlevo je patrná ztuhlá tavenina vyjmutá z lamače.

Základními pravidly jsou:

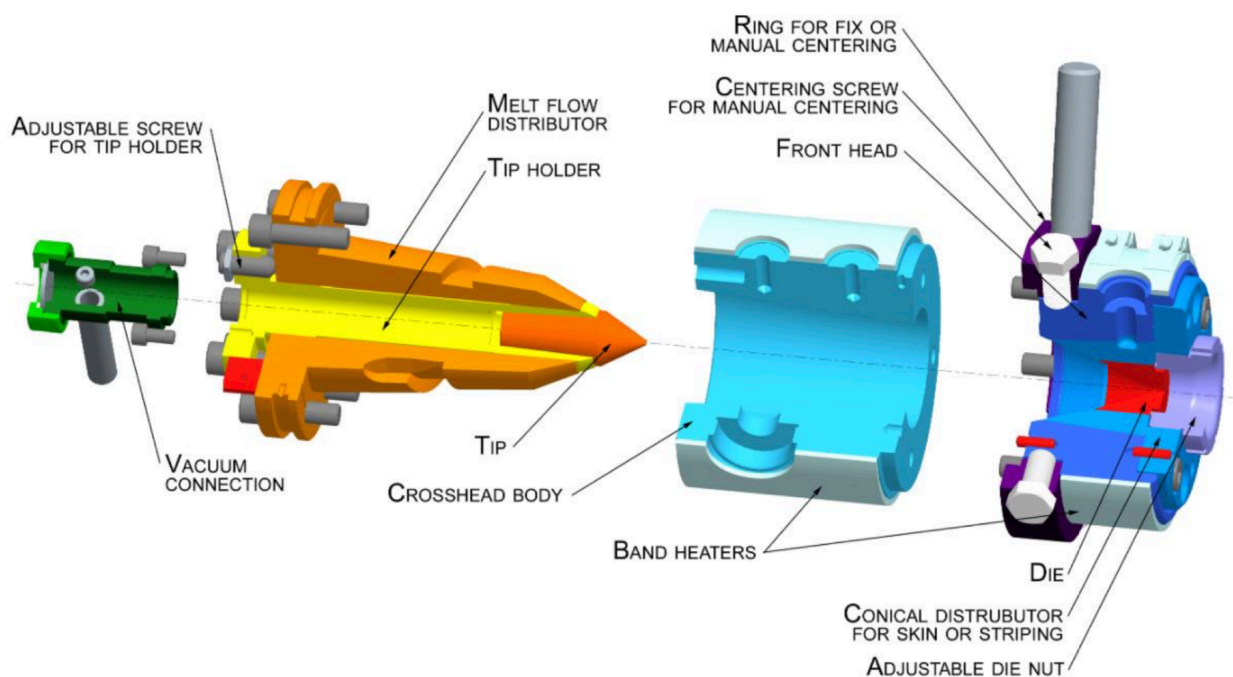
- a. rovnoměrné zmenšování prostoru mezi tělem hlavy a pinolou,
- b. žádné ostré okraje uvnitř pracovního prostoru hlavy - absence rohů,
- c. dobrá smontovatelnost hlavy,
- d. kvalita materiálu a povrchové zpracování - různý interval teplot taveniny dle materiálu,
- e. dodržení některých rozměrů kvůli záměnitelnosti - přípojovací rozměry na extrudér, funkční kužel v pinole,...



### 6.1.1. Tělo hlavy

Vlastní tělo hlavy je vyrobeno nejčastěji z korozi-vzdorných materiálů, které dobře odolávají teplotním změnám. Je základem hlavy a může mít různé tvary nejčastěji však válcové nebo tvary kvádrů popř. krychle. Uvnitř hlavy je komora, dříve válcového tvaru, nyní je moderním řešením používat kuželové tvary. Díky tomu je zajištěna centricita dalších přípravků. Těleso hlavy je k vytlačovacímu stroji připojeno objímkou. Tato objímka je nejčastěji šroubovací, díky tomu máme možnost univerzálně připojit hlavu ke strojům různých rozměrů. Vzhledem k rozměrům u hlav pro výrobu větších průměrů jsou hlavy také vybaveny vlastním držákem, pomocí kterého hlavu připevníme k tělu stroje.

Hlavy můžeme mít buď přímé, příčné nebo šikmé. Nejčastějším typem jsou hlavy příčné, kde je z boku připojen extruder a svírá s tělem hlavy 90 stupňů.



Obr. 6.2 Detail konstrukce vytlačovací hlavy s popisem součástí [12]

### 6.1.2. Pinola

Někdy se jí také říká “torpédo, trn”. Tato součást slouží k rozvodu taveniny uvnitř hlavy. Obsahuje rozváděcí kanálky pro rovnoměrný rozvod taveniny po celém obvodu. V případě jednodušších variant je to pouze hladký kužel. Kanálky mohou mít různé tvary například spirála, nebo souměrné kanálky po obvodu pinoly. Obsahuje funkční kužel pro zasunutí špičky. Dříve byly tyto otvory válcové, což způsobovalo problém s centricitou. Na obr. 6.3 je dobře patrný detail kanálu pro rozvod taveniny, také je zde vidět “slzička” sloužící k rozdělení toku.



*Obr. 6.3 Detail profilu rozvodu taveniny. [autor]*

### 6.1.3.Špička

Zasouvá se do pinoly pomocí funkčního kužele. Při montáži by měly být součásti zahřáté, aby při kontaktu s taveninou nedošlo k teplotnímu šoku a vzniku vůli. Dle rozměru vodiče máme různé rozměry špiček. Čím menší vodič je, tím delší je zužující se část špičky. Skrz špičku probíhá jádro vodiče. Při vytlačování rozvádíme taveninu přes pinolu až ke špičce, kde je již tavenina rovnoměrně rozprostřená na celém obvodu. Na vrcholu špičky dochází ke kontaktu jádra vodiče s taveninou. Vzhledem k vysokým teplotám a abrazi jsou špičky vyrobeny z různých materiálů např. z karbidu wolframu, keramiky, popřípadě v méně náročných případech z ušlechtné oceli. Připojovací rozměry jsou vždy stejné, abychom měli zajištěnou smontovatelnost všech rozměrů špičky s pinolou.



Obr. 6.4 Příklad špiček pro vícežilové kabely [13]

### 6.1.4.Miska

Tento díl se špičkou tvoří tzv. sadu přípravků stroje. Volbu přípravků provádíme dle výrobku. Tomuto dílu se také říká v některé literatuře matrice, hubice. Díl je zvlášť vyhříván odporovým elektrickým výhřevem. Je k tělu hlavy připojen pomocí upevňovací matice, která zajišťuje, že nebude “vyplavena” ven z hlavy taveninou. Tato součást může být také rozdělena na součásti dvě v případě, že používáme přístříkový extrudér viz. kapitola 5.2.1. V tomto případě bychom měli první část misky, ve které by došlo k přístříku taveniny z druhého extrudéru, a následně by byla tavenina protlačena skrz profil v misce. Tím bychom dosáhli požadovaného tvaru a barevné kombinace v případě vícebarevného vodiče. Materiál druhé části - předmisky, je obdobný jako u misky.

## 7. Materiály izolací, jejich vlastnosti a reologické chování

V kabelářském průmyslu můžeme najít různé druhy materiálů. Volba druhu materiálů záleží na prostředí, na požadovaných elektrickoizolačních vlastnostech vodiče, na potřebné životnosti, a také odolnosti vůči neočekávaným vlivům jako jsou například: oheň, různé chemické látky a další. Díky tomuto spektru požadavků na výrobek se můžeme setkat s rozmanitou škálou materiálů. Mezi nejčastěji používané materiály ovšem patří PVC (Polyvinylchlorid), PE (Polyetylen) a další. Předtím než se budeme zabývat konkrétními materiály, je nutné zmínit základní vlastnosti těchto materiálů, díky kterým jsme schopni provést analytické řešení určitého reologického problému, ať už je to tok taveninou v jednotlivých úsecích vytlačovacího stroje nebo návrhu vytlačovací hlavy pro výrobu vodičů.

### 7.1. Reologické vlastnosti materiálů

Pro návrhový výpočet vytlačovací hlavy je dobré popsat materiál jeho reologickým chováním. Toto chování popisují různé veličiny, a zároveň reologické modely.

#### 7.1.1. Základní veličiny popisující reologické vlastnosti

##### 7.1.1.1. Viskozita

Viskozitu dělíme na dvě základní, kinematickou a dynamickou. Pro výpočty vytlačovacích strojů resp. jakýkoliv procesních zařízení pracujících s tekutinou je viskozita důležitým parametrem, je úzce vázána s teplotou, ale závislost na tlaku je ve většině případů zanedbatelná. “Viskozita je schopnost tekutiny přenášet tečná napětí. Je také příčinou odporu proti vzájemnému posunu částic tekutiny a vzniku tečného napětí  $\tau$  na rozhraní mezi tekutinou a stěnou.”[8]

Platí zde tzv. NEWTONŮV ZÁKON

$$\tau_{yz} = \mu \frac{du_z}{dy} \quad [9]$$

kde:

$\tau_{yz}$  ..... tečné napětí

$\frac{du_z}{dy}$  ..... gradient rychlosti

a) Dynamická viskozita

Značíme malým řeckým písmenem  $\mu$

Jednotka:  $Pa \cdot s$

Dynamická viskozita je základní materiálovou vlastností tekutin. Závisí u kapalin na teplotě, kde s rostoucí teplotou klesá. V přenosových jevech je často označována také jako konstanta úměrnosti. Pro vyjádření závislosti na teplotě užíváme tzv. Andradeův vztah.

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

Nebo také

$$\mu = a \cdot e^{-bT}$$

$$\mu = f(T)$$

V těchto empirických formulích jsou konstanty A, B, a, b specifické pro určitou látku a je nutné je nejprve experimentálně určit. Dále se zde vyskytuje teplota T, která je dosazována jako absolutní T [K]. [9]

Tabulka 1: Příklad hodnot dynamické viskozity některých tekutin

VODA	1	$mPa \cdot s$
OLEJ	1	$Pa \cdot s$
MED	10-100	$Pa \cdot s$

b) Kinematická viskozita

Značíme malým řeckým písmenem  $\eta$

Jednotka:  $m^2 \cdot s^{-1}$

Kinematická viskozita je vázána na dynamickou viskozitu vztahem

$$\eta = \frac{\mu}{\rho} \quad [9]$$

7.1.1.2. Hustota

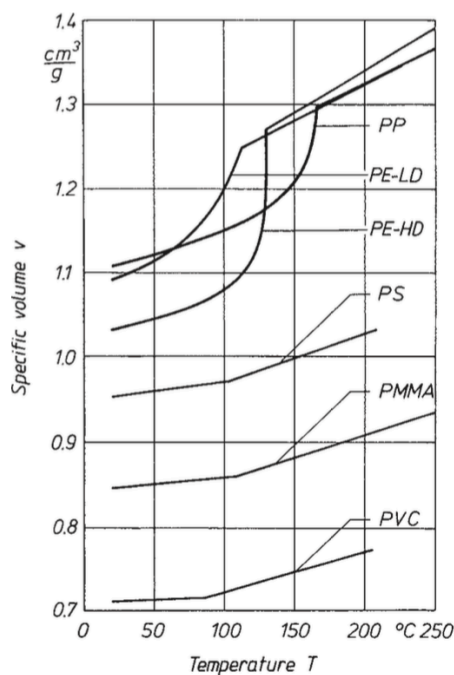
Hustota je vlastnost látky.

Značíme řeckým písmenem  $\rho$

Jednotka:  $kg \cdot m^{-3}$

Hustoty polymerů leží značně pod hustotou kovů. Hodnoty hustoty jsou úzce vázány na teplotu, ale také na zpracovatelský tlak. Často zde definujeme tzv. specifický objem  $\nu$ .

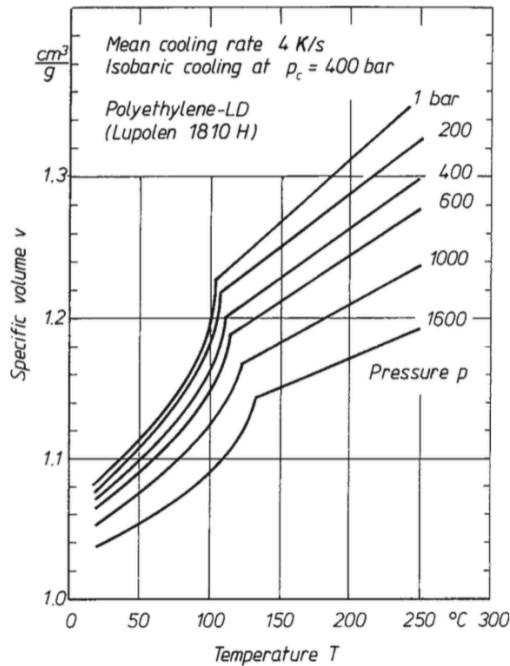
$$\nu = \frac{1}{\rho}$$



Obr. 7.1 Specifický objem funkcí teploty [14]

V grafu je vynesena závislost specifického objemu na teplotě při tlaku  $p = 1 \text{ bar}$ . Pro semikrystalické materiály je v oblasti teploty tavení vidět strmější sklon - rychlejší nárůst specifického objemu. Tento jev je způsoben rychlou expanzí makromolekul materiálu.

Často také kromě diagramu na Obr. 7.1 využíváme tzv.  $p$ - $\nu$ - $T$  diagram. Tento diagram nám umožní vidět závislost specifického objemu tudíž hustoty jak na teplotě, tak také na tlaku. Takovýto diagram je možno vidět na Obr. 7.2 pro semikrystalický materiál PE-LD



Obr. 7.2  $p$ - $v$ - $T$  diagram [14]

Při výpočtech vytlačovacích hlav ale často považujeme materiál za nestlačitelný z důvodu malých tlaků a relativně malých kolísání teplot v tavenině ve vytlačovací hlavě.

Pro přepočet hustoty z referenční teploty na teplotu žádanou lze použít vztah:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot \frac{1}{1 + \alpha(T - T_0)} \quad [14]$$

kde:

$\alpha$  Koeficient lineární teplotní roztažnosti

$\rho(T_0)$  Hustota při referenční teplotě

$\rho(T)$  Hustota při žádané teplotě

### 7.1.1.3. Index toku taveniny

Index toku taveniny je schopnost materiálu proudit v určitém časovém intervalu. Stanovuje se experimentem, dle normy ISO 1133. Dle normy je index toku definován jako míra toku taveniny v gramu během časového úseku 10 minut při standartní tavicí teplotě.

Jinak se mu také může říkat tekutost materiálu. Je určen pomocí přístroje nazývaném tester toku taveniny, ale prakticky ho lze stanovit na dalších přístrojích jako např. extruder. [15]

### 7.1.2. Modely popisující vlastnosti tekutin

Tekutiny můžeme dělit na dva základní modely. Newtonský model, který se řídí newtonovým zákonem, kde do tohoto modelu patří běžné tekutiny jako např. voda a pak můžeme mít model neneutonských látek. Tyto látky dále dělíme na několik podskupin dle vlastností.

#### 7.1.2.1. Newtonské látky

Řídí se Newtonovým zákonem viz. 7.1.1.1. Je zde lineární závislost mezi tečným napětím a rychlostí smykové deformace. Typickými představiteli newtonských látek jsou voda a med. Pro tyto látky je viskozita závislá pouze na teplotě a není závislá na rychlosti smykové deformace. Vyjimkou mohou být látky bighamské, které jsou neneutonské, ale během proudění se mohou chovat newtonsky. [9]

#### 7.1.2.2. Ne-Newtonské látky

Mezi neneutonské látky řadíme většinu tekutin. Mezi hlavní představitele patří polymery, kečup, krev, barvy a další produkty. Hlavním rozdílem oproti newtonským látkám je, že tyto látky nemají lineární závislost mezi tečným napětím a rychlostí smykové deformace. Viskozita těchto látek závisí na smykové rychlosti. Neneutonské chování může způsobovat spoustu faktorů a dějů, které se týkají molekul a jejich uspořádání. V polymerech může docházet k vyrovnání anizotropních řetězců, a tím pádem ke snížení viskozity tekutiny.

Základním nástrojem, jak vůbec vyjádřit neneutonské látky, jsou tzv. konstitutivní rovnice.

Obecný tvar konstitutivní rovnice může vypadat:

$$\vec{\tau} = 2 \cdot \eta \cdot \vec{\Delta}$$

kde:

$$\vec{\tau} \quad \text{tenzor dynamických napětí}$$



$\eta$  neneutonská “zdánlivá” viskozita

$\vec{\Delta}$  tenzor rychlosti deformace

platí, že  $\eta = f(II)$

kde:

$II_{\vec{\Delta}} = \vec{\Delta} : \vec{\Delta}$  jedná se o druhý invariant.

Invariant první a třetí jsou nulové. V případě prvního invariantu je to z toho důvodu, že se jedná o nestlačitelné tekutiny a v případě třetího je také invariant nulový, proto jeho závislost zanedbáváme a zabýváme se tedy pouze závislostí na 2. invariantu.

Pro vyjádření reologického chování užíváme modely [9]

#### a) Mocninový model

Základním model pro vyjádření reologického chování čistě viskozních látek neneutonských kapalin. Jedná se o model, který je tzv. dvoukonstantový.

$$\eta = K \left| \sqrt{2II} \right|^{n-1} \quad [18]$$

Tento název se užívá, protože se zde vyskytují dvě konstanty a to  $n =$  index toku a  $K =$  koeficient konzistence. Index toku může nabývat různých hodnot buď  $n < 1$ ,  $\eta \downarrow$  tzn. že viskozita klesá s rostoucí rychlostí deformace. V tomto případě nazýváme takovéto látky pseudoplastickými. V opačném případě kdy  $n > 1$ ,  $\eta \uparrow$  nazýváme látky dilatantní, ale tyto látky se vyskytují pouze ojediněle.

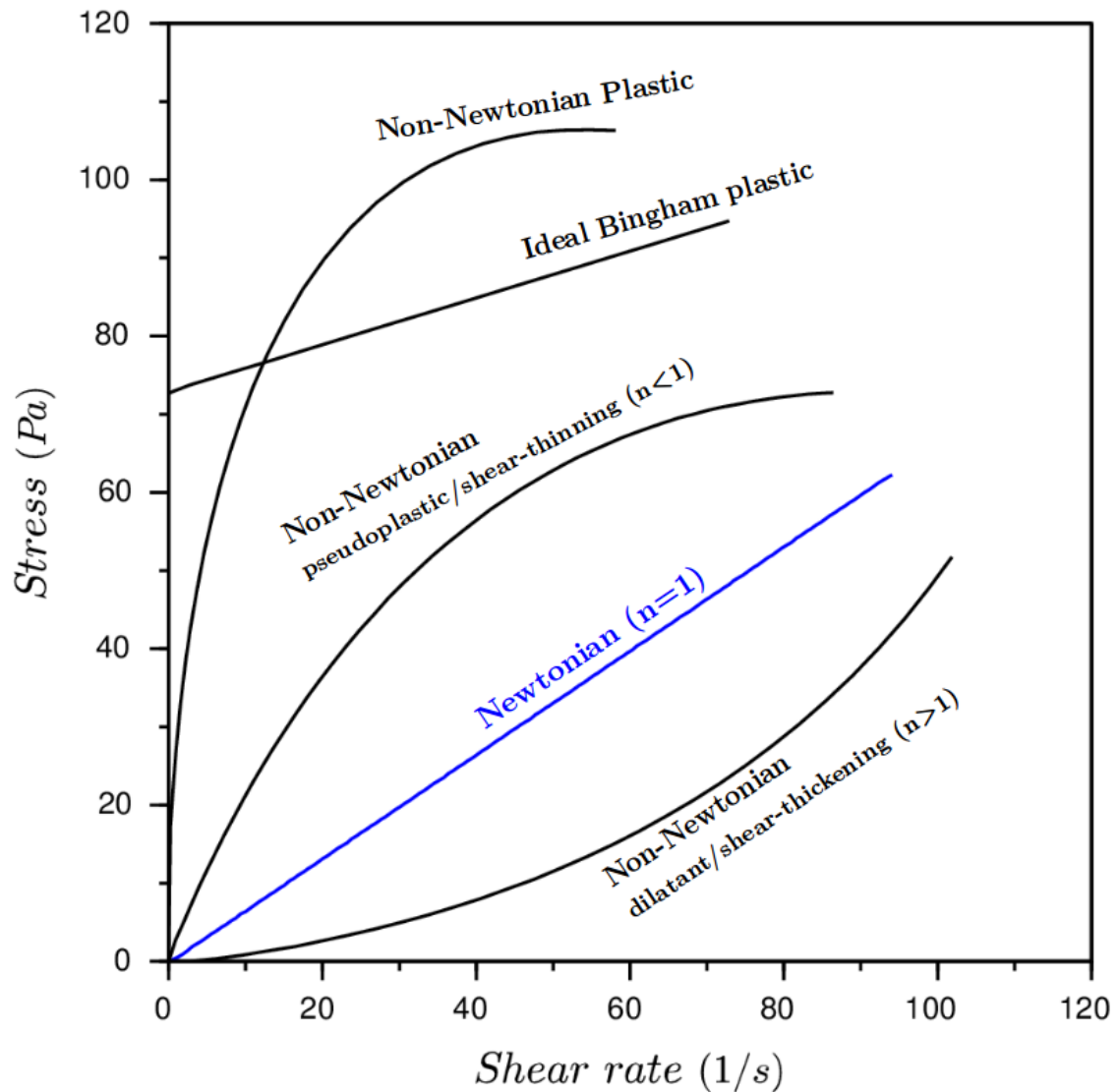
Pseudoplastické chování se vyskytuje u většiny látek. Jedná se hlavně o různé roztoky, taveniny polymerů, suspenze,...

Bohužel nevýhodou mocninového modelu je omezený rozsah platnosti. Pro tento případ byl zaveden tzv. tříkonstantový model.



obr. 7.3. Na tomto obrázku jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými modely. Na ose x máme smykovou rychlost  $\gamma$  a na ose y se poté nachází smykové napětí  $\tau_{yz}$ . V některé literatuře lze také vidět tento diagram s prohozenými osami.

## *Classification of NonNewtonian Fluids*



*Obr. 7.3 Typický graf pro nenewtosnké látky [17]*

Jak lze vidět, modře je označena newtonská tekutina, dále je vidět mocninový model pseudoplastické a dilatantní tekutiny. Je zde dobře patrný průběh pro binghamský model, kde se po dosažení napětí  $\tau_0$  začne látka chovat skoro newtonsky.

## 7.2. Materiály pro opláštění

Nejrozšířenějšími materiály z hlediska izolování kabelů jsou termoplastické materiály. Jak již bylo popsáno v kapitole 1.1.1 tyto organické makromolekulární látky jsou dobře zpracovatelné za tepla. Zpracovávají se na vytlačovacích strojích a po vytvrzení jsou za působení tepla schopné opět přejít do plastického stavu. Hlavními představiteli jsou Polyvinylchlorid (PVC) a Polyethylen (PE).

### 7.2.1. Polyvinylchlorid

Polyvinylchlorid se zkratkou PVC se používá k izolaci jader kabelů. Nejčastěji je používán měkčený PVC jehož základem je práškové PVC, dále se ze zbylých asi 30 % skládá z dalších příměsí jako jsou změkčovadla, plnidla, různé příměsi pro snížení hořlavosti a v neposlední řadě barviva.

PVC se získává polymerací vinylchloridu. Do kabelářských závodů se následně dodává buď přímo ve formě granulátu, který následně sypeme do vytlačovacích strojů nebo dochází ke granulaci až v jednotlivých závodech, kde dochází k namíchání směsi vhodné pro určitý produkt.

V katalogích chemických výrobců by bylo možné najít spoustu druhů polyvinylchloridů, kde se některé liší pouze obchodním názvem jednotlivých výrobců.

### 7.2.2. Polyethylen

Polyethylen zkráceně PE. Stejně jako PVC a další materiály se používá k izolování jader vodičů a kabelů. Můžeme mít více druhů polyethylenů, kde mezi dva základní se řadí PE-HD (high density) a PE-LD (low density). Polyethylen má mnoho výhod, mezi které se řadí například teplotní stálost resp. použitelnost v širokém teplotním rozsahu až do  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bohužel nevýhodou je jeho hořlavost a jako u všech materiálů horší odolnost vůči chemikáliím, proto jsou přidávána různá aditiva ke zlepšení požadovaných vlastností, dle potřeby závisících na použití výrobku.

### 7.2.3. Polytetrafluorethylen

Zkráceně se tomuto výrobku říká teflon. Je nehořlavý a velmi dobře odolává teplotám v rozsahu *od*  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  *do*  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 7.2.4. Další materiály

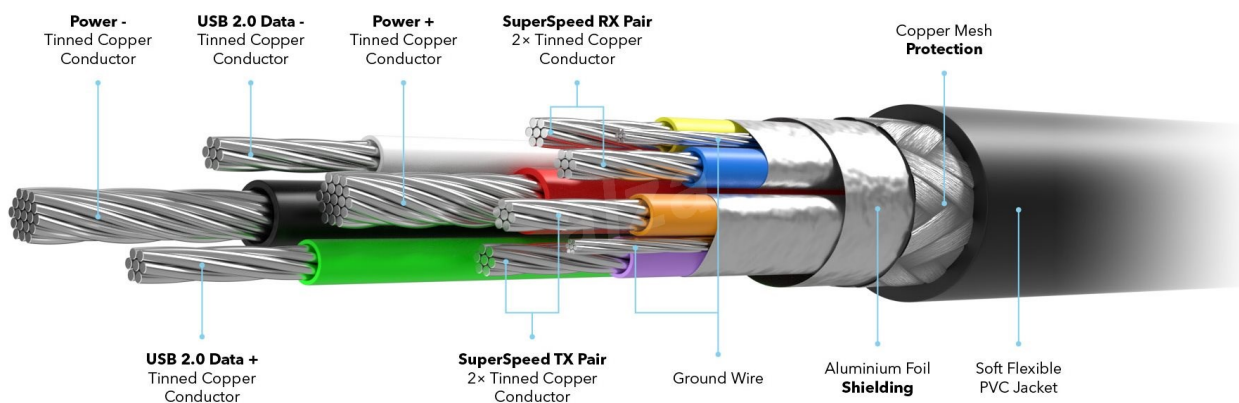
Vývoj materiálů jde kupředu jak ze stránky zlepšení vlastností, tak ze stránky zatížitelnosti životního prostředí, proto existuje široká řada produktů materiálů a jejich výčet a popis přesahuje rámec této práce, proto zde uvádím pár dalších materiálů.

- a) Pryžové směsi a silikon
- b) Textilie
- c) Oplety z různých kovových materiálů - slouží spíše jako ochrana proti opotřebení než jako izolace.
- d) a další ...

### 7.3. Materiály jader

Pro úplnost zde uvádím možné materiály jader. Konstrukce vylačovací hlavy úplně na materiálu jádra nezáleží, ale záleží na uspořádání jader ve vodiči.

- a) Měď
- b) Ocel
- c) Hliník
- d) Ušlechtilé kovy
- e) Slitiny
- f) Ostatní vodivé kovy
- g) Vlákna v případě optických kabelů



Obr. 7.4 Složení datového USB kabelu [19]

## 8. Závěr a shrnutí teoretické části práce

Teoretická část práce je velice důležitá pro pokračování v další praktické části. Na úvod jsme si popsali základní druhy materiálů, které jsme následně na konci teoretické části více rozvinuli do popisu materiálů používaných pro opláštění. Dalším důležitým krokem byl popis technologií, kde jsme si obecně vypsalí a popsali druhy zpracování plastů, a následně jsme se zaměřili na proces vytlačování. V této části jsme popsali možné druhy vytlačovacích strojů a jejich konstrukci, kterou jsme následně pro bližší seznámení představili na doložených nákresech použitých z literatury. Vzhledem k zaměření práce na oplášťování vodičů se dále teoretická část víc zaměřila na šnekové vytlačovací stroje. Princip šnekových vytlačovacích strojů je velice důležitý pro návrh vytlačovací hlavy. Je nutné znát parametry vytlačovacího stroje. Proto byly typy strojů a jejich konstrukce popsány, a také jsme se zaměřili na součásti a konstrukci jednotlivých součástí zejména pak na druhy šneků. Poté co jsem popsal stroje a procesy během zpracování plastů jsem mohl přejít přímo k vytlačovacím hlavám. Tato důležitá součást vytlačovacího stroje je alfou a omegou této práce, proto jsem se zaměřil na popis konkrétních typů resp. konstrukcí. Vše jsem opět doložil na přehledných obrázcích a nákresech. Dále bylo nutné popsat vlastní proces oplášťování, protože tento proces má konat i navrhovaná vytlačovací hlava, proto jsem popsal princip oplášťovacího procesu a zaměřil se na popis dvou metod oplášťování. Dále bylo nutné popsat vytlačovací stroj, protože, jak to již v průmyslové praxi bývá, stroje jsou upravovány pro konkrétní aplikace a kabelářský průmysl není výjimkou. Popsal jsem nejčastější konfiguraci vytlačovacího stroje a přiblížil funkci přístřikového vytlačovacího stroje, který je také velice důležitý v kabelářském průmyslu, zvláště při výrobě některých výrobků. Tímto se dostávám k nejdůležitější části práce, a to k vlastní vytlačovací oplášťovací hlavě. Popsal jsem jednotlivé součásti, a také nastínil aspekty, které má hlava splňovat. Tyto součásti budou dále navrženy a dále probírány v praktické části práce. Vzhledem ke složitosti celého procesu není jen důležité znát jak a proč, ale také co vytlačuji, protože vytlačovaný materiál je velice důležitou součástí celého procesu, a proto také popisují jaké materiály jsou nejčastěji používány pro oplášťování, a jaké vlastnosti mají. Bylo nutné si zadefinovat veličiny, a také jednotlivé modely. Díky těmto znalostem můžeme následně provést návrhové výpočty hlavně z hlediska tokových vlastností materiálů a chování uvnitř hlavy pomocí kterého můžeme určit geometrii hlavy. Všechny tyto parametry budou pro budoucí návrh velice důležité a podrobně se jimi budeme zabývat v praktické části. Na závěr je nutno dodat, že byl splněn cíl a došlo k vypracování literární rešerše. Dalšími cíli se už bude zabývat praktická část práce.

## II. Praktická část

V této části práce se budu zabývat vlastním návrhem komponentů vytlačovací hlavy. Zároveň zde přesně popíšu parametry stroje a také linky, na kterou bude hlava navrhována. Před vlastním návrhem a konstrukcí hlavy je ale nutné znát vlastnosti vytlačovaného materiálu a výrobek, který má vzniknout. Bohužel všechna data nejsou známa, proto jsem provedl laboratorní měření pro určení parametrů vytlačovaného materiálu. Toto měření popíšu v následující kapitole č. 9.

### 9. Experimentální měření vytlačovaného materiálu

Pro zjištění potřebných vlastností materiálu jsem provedl laboratorní měření. Jedná se o polyethylen, který je tzv. HD neboli high density. Tento polyethylen je dodáván ve formě granulátu. Zároveň jsem také provedl měření polyethylenu s přísadou neboli tzv. HFFR koncentrátem. Tento koncentrát zajišťuje zabarvení polyethylenu do správného odstínu, a zároveň, jak již zkratka napovídá HFFR (Halogen Free Flame Retardant), zajišťuje snížení hořlavosti materiálu. Měření jak čistého tak polyethylenu s HFFR jsme provedli, proto abychom zjistili, jestli se mohou reologické vlastnosti přidáním koncentrátu změnit.

Kromě různých elektrických vlastností a materiálních vlastností známe z hlediska reologie pouze vlastnosti uvedené v Tabulce 2.

Tabulka 2: Vlastnosti uvedené v materiálovém listu

Hustota	Density	$945 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Hmotnostní tok taveniny	Melt Flow Rate resp. MFI	$0.7 \text{ g} \cdot 10\text{min}^{-1}$
Teplota taveniny	Melt temperature	$220 - 250^\circ\text{C}$

#### 9.1. Použitá zařízení

Měření jsem provedl v laboratoři ústavu Procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT, za asistence a pomoci Ing. Jana Skočilase PhD, který je zároveň vedoucím mé práce.

##### 9.1.1. Extruder BOCOMATIC EB-L 30/27

Pro měření jsme použili tento laboratorní extrudér od firmy BOCO Pardubice. Extrudér pro měření postačoval, ale v případě, že bychom chtěli

měřit také při vyšších otáčkách, museli bychom použít většího extruderu, který by dokázal ustát vzniklý tlak v komoře.

Parametry extruderu jsou dostupné na webových stránkách výrobce, pro úplnost je příkládám v následující tabulce včetně fotografie stroje pořízené v laboratoři ústavu.

*Tabulka 3: Parametry laboratorního extruderu [20]*

Výkon extruderu	$2 - 10 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$
Průměr šneku a komory	30 mm
Pracovní délka šneku	27 L/D
Celkový příkon	9 kW
Výkon hlavního motoru	5.5 kW

Na následujících fotografiích je patrný vzhled stroje. Na Obr. 9.3 je vidět ovládací panel stroje, který je plně dotykový. Na pravé straně panelu je pak červené nouzové tlačítko a modré tlačítko start bezpečnosti.



*Obr. 9.1 Laboratorní extruder v laboratoři ústavu Procesní a zpracovatelské techniky [autor]*





Obr. 9.2 Detail na bok extruderu s panelem a snímači [autor]



Obr. 9.3 Detail na řídicí panel stroje [autor]

### 9.1.2. Snímače

Extruder používá tlakové snímače od firmy Dynisco

snímač A: DYNISCO TDT432F-1/2-1M-15/46A

snímač B,C: DYNISCO MDT460F-1/2-1M-15-SIL2



Obr. 9.4 Detail snímače na stroji [autor]

### 9.1.3. Další pomůcky

Pro měření jsem dále použil digitální stopky pro měření časových intervalů. Pro vážení vytlačeného vzorku byla použita laboratorní váha, koš na studené vzorky, plastová deska, na které byly vzorky vytlačovány, odměrný kalíšek pro vsypání granulátu do násypky extruderu. Vlastní zkoušený granulát, který se skládal z čistého granulovaného polyethylenu a dále jsme použili dvě příměsy oranžový HFFR koncentrát a červený HFFR koncentrát. Flash disk, na který extruder každé 3s zapisoval data, a také zápisník, do kterého jsme zapisovali data ručně pro každé měření. Součástí extruderu je reologická hlava opatřena tlakovými snímači z bodu 9.1.2. Tvar kapiláry uvnitř hlavy je obdelníkový.

## 9.2. Vlastní měření

### 9.2.1. Příprava měření

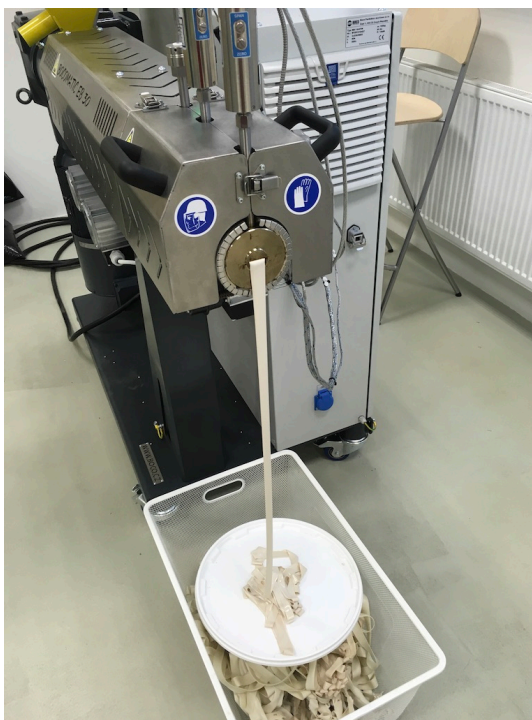
V první fázi jsme si přichystali stroj. Stroj byl zapnut a čekalo se než dojde k nahřátí stroje na požadovanou teplotu. Zároveň jsme připravili další pomůcky nezbytné pro měření jako jsou váhy a stopky. Zvážili jsme si hmotnost desky, na kterou jsme materiál vytlačili a váhy vynulovali, aby nám ukazovaly pouze hmotnost vytlačeného materiálu. Do stroje byl zapojen flash disk a nastaven interval měření, který byl defaultně nastaven na 3 sekundové intervaly.

Po ohřátí extruderu jsme nasypali neměřenou část polyethylenu do extruderu, zapnuli šnek a čekali než bude extruder vyčištěn od předchozího materiálu, který byl extruderem vytlačován dříve. Po ustálení a plném vyčištění komory a šneku jsme mohli začít s vlastním měřením.

### 9.2.2. Měření experiment

Měření se skládalo z několika částí. Prvním krokem bylo nastavit otáčky stroje na požadovanou velikost. Následně jsme čekali na ustálení tlaku, o kterém nás informovali tři tlakové snímače. Teplota byla nastavena na všech zónách a během měření nebyla měněna. První měření probíhalo pouze s čistým polyethylenem.

Měření probíhalo při 10, 15, 20, 25 a 30  $ot \cdot min^{-1}$ . Průběh měření byl následující. Nastavili jsme otáčky stroje, počkali na ustálení. Poté, co jsme považovali stroj resp. tlaky za ustálené, začali jsme měřit. Zapnuli jsme stopky a po dobu přibližně 7 minut sbírali vytlačený materiál. Po uplynutí času jsme materiál zvážili a vše pečlivě zapsali. Zároveň vše zapisoval stroj na flash disk. Poté jsme opět zvedli otáčky a celý proces opakovali. Po změření pro všechny otáčky jsme přidali do polyethylenu ve správném poměru koncentrát, zamíchali, a následně nasypali do násypky extruderu a opět čekali na ustálení. Proces měření se následně opakoval jako u čistého polyethylenu. Jak může být zřejmé se vzrůstajícími otáčkami při stejném časovém úseku se množství vytlačeného materiálu měnilo a materiálu bylo víc. Po měření mohla následovat část vyhodnocení a závěru.



*Obr. 9.5 Průběh experimentu [autor]*

Na Obr. 9.5 je patrný čistý vytlačovaný materiál a také deska, na kterou byl materiál vytlačován. Pod deskou je sběrný koš na použité vzorky.



*Obr. 9.6 Polyethylen s příměsí HFFR [autor]*



Obr. 9.7 Detail na kapiláru vytlačovací hlavy a vytlačovaný polyethylen s příměsí HFFR [autor]

### 9.3. Vyhodnocení měření a závěr

Pro vyhodnocení měření jsem si z flash disku stáhl soubor .CSV, který řídicí systém extruderu vygeneroval. Pro jistotu jsem porovnal hodnoty časů s hodnotami v souboru, abych se ujistil, že systém zaznamenával správně. Všechny hodnoty jsem převedl do tabulky v programu Numbers. Vytvořil jsem si přehlednou tabulku a rozdělil na jednotlivé úseky dle otáček a začátku měření. Pro vyhodnocení jsem také kvůli porovnání použil program Matlab.

#### 9.3.1. Postup výpočtu

Připravili jsme si hodnoty do přehledné tabulky a dopočítali další potřebné hodnoty.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty

Tlak taveniny A [bar]	Tlak taveniny B [bar]	Tlak taveniny C [bar]	Otáčky šneku [min <sup>-1</sup> ]	Hmotnost [g]	Čas [s] (dt)
245,380	216,604	24,940	20,000	162,34	434

Tlaky, které jsme použili pro výpočet, byly získány ze souboru CSV. Pro každé otáčky jsem vyhodnotil průměrný tlak každého snímače.

- a) Výpočet tlakového rozdílu snímačů B a C

$$dp = (p_B - p_C) \cdot 100000 = (216,604 - 24,940) \cdot 100000 = 19166438,36 \text{ Pa}$$

Násobení rozdílu tlaků je z důvodu převodu na Pa (snímače měří v barech)

- b) Převod hmotnosti vzorku z g na kg

$$dm = \frac{m}{1000} = \frac{162,34}{1000} = 0,16 \text{ kg}$$

- c) Výpočet hmotnostního průtoku taveniny

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{0,16234}{434} = 3,74 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

- d) Objemový průtok taveniny

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{3,74055 \cdot 10^{-4}}{945} = 3,96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

- e) Smyková rychlost

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \dot{V}}{b \cdot h^2} \cdot \left(2 + \frac{1}{n}\right) = \frac{2 \cdot 3,958257138 \cdot 10^{-7}}{0,02 \cdot 0,001^2} \cdot \left(2 + \frac{1}{0,5}\right) = 158,33 \text{ s}^{-1}$$

kde:

$n$  index toku (pro první výpočet zvolen 0,5)

$b$  šířka kapiláry vytlačovací hlavy (20 mm)

$h$  výška kapiláry vytlačovací hlavy (1 mm)

- f) Tečné napětí

$$\tau = \frac{h \cdot dp}{2 \cdot L} = \frac{0,001 \cdot 19166438,356}{2 \cdot 0,13} = 73717,07 \text{ Pa}$$

kde:

$L$  vzdálenost mezi tlakovými snímači na stroji (130 mm)

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty pro  $n=20$  ot/min

Rozdíl tlaků	$dp$	19166438,36 Pa
Hmotnostní průtok	$\dot{m}$	$3,74 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Objemový průtok	$\dot{V}$	$3,96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Smyková rychlost	$\dot{\gamma}$	158,33 $\text{s}^{-1}$
Tečné napětí	$\tau$	73717,07 Pa

### 9.3.2. Výsledky výpočtu: čistá tavenina polyethylenu

Provedli jsme výpočet pro všechny otáčky a výsledky uvedli v tabulce 6.

Tabulka 6: Vypočtené hodnoty po změněném indexu toku

Smyková rychlost $\dot{\gamma}$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	Tečné napětí $\tau$ [Pa]
175,31	73717,07
269,28	88545,43
225,05	84544,90
136,88	66214,61
92,57	58035,52

Z takto vypočítané tabulky sestrojíme graf pro mocninový model. Graf bude mít stejné osy jako na Obr. 7.3 a závislost by měla mít podobný průběh jako pseudoplastická závislost.

Hodnoty koeficientu konzistence a indexu toku vychází z rovnice pro mocninový model

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

$$y = a \cdot x^b$$

kde:

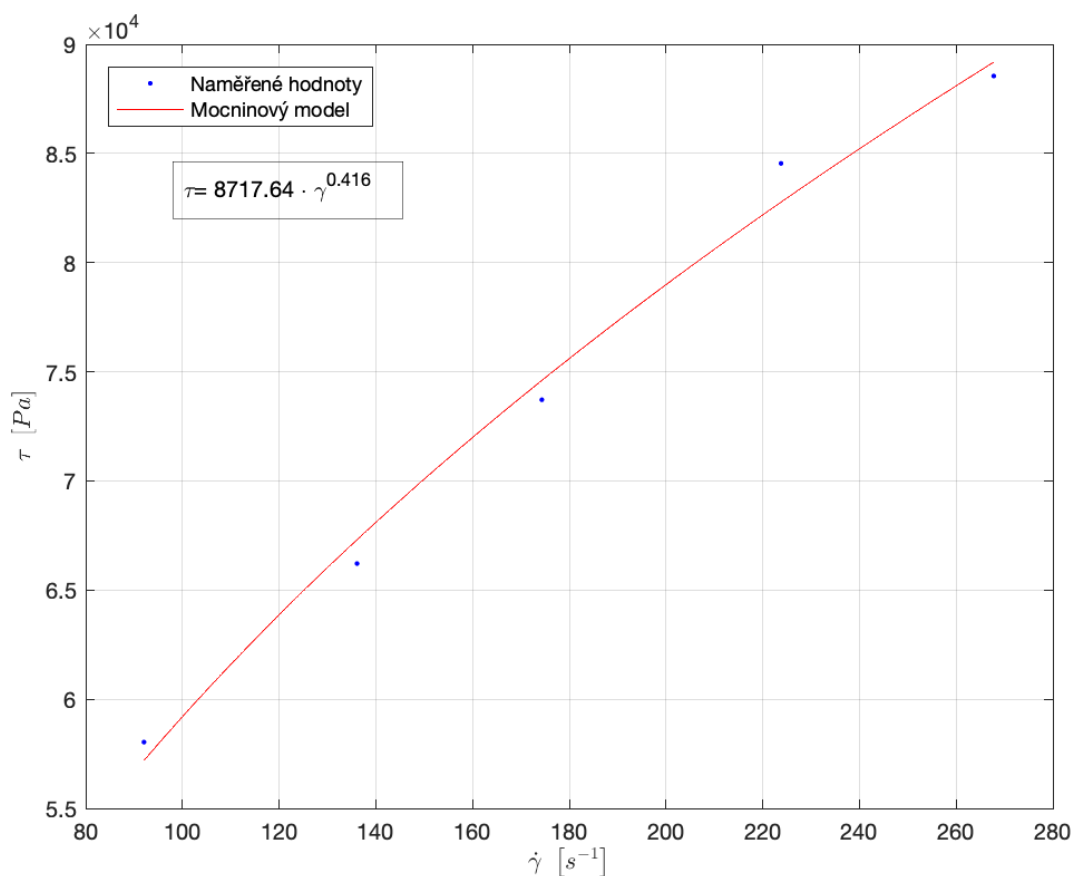
$\tau$  tečné napětí - hodnoty na ose y

$\dot{\gamma}$  smyková rychlost - hodnoty na ose x

$K$  koeficient konzistence - konstanta  $a$  v rovnici pro mocninou závislost

$n$  index toku - konstanta  $b$  v rovnici pro mocninou závislost

Na ose x máme smykovou rychlost  $\dot{\gamma}$  která má rozměr  $s^{-1}$  a na ose y tečné napětí  $\tau$  s rozměrem  $Pa$ . Modré tečky jsou vypočtené hodnoty zanesené do grafu a červená křivka je proložení bodů mocninou závislostí. Regresní analýzou jsem zjistil parametry modelu, index toku a koeficient konzistence. Následně jsem použil index toku pro výpočet nové smykové deformace a iterací s regresní analýzou zopakoval. Pro stanovení indexu toku stačily dvě až tři iterace uvedeného postupu. Skript výpočtu je součástí práce jako příloha č.1



Obr. 9.8 Graf mocninového modelu pro čistý PE [autor]

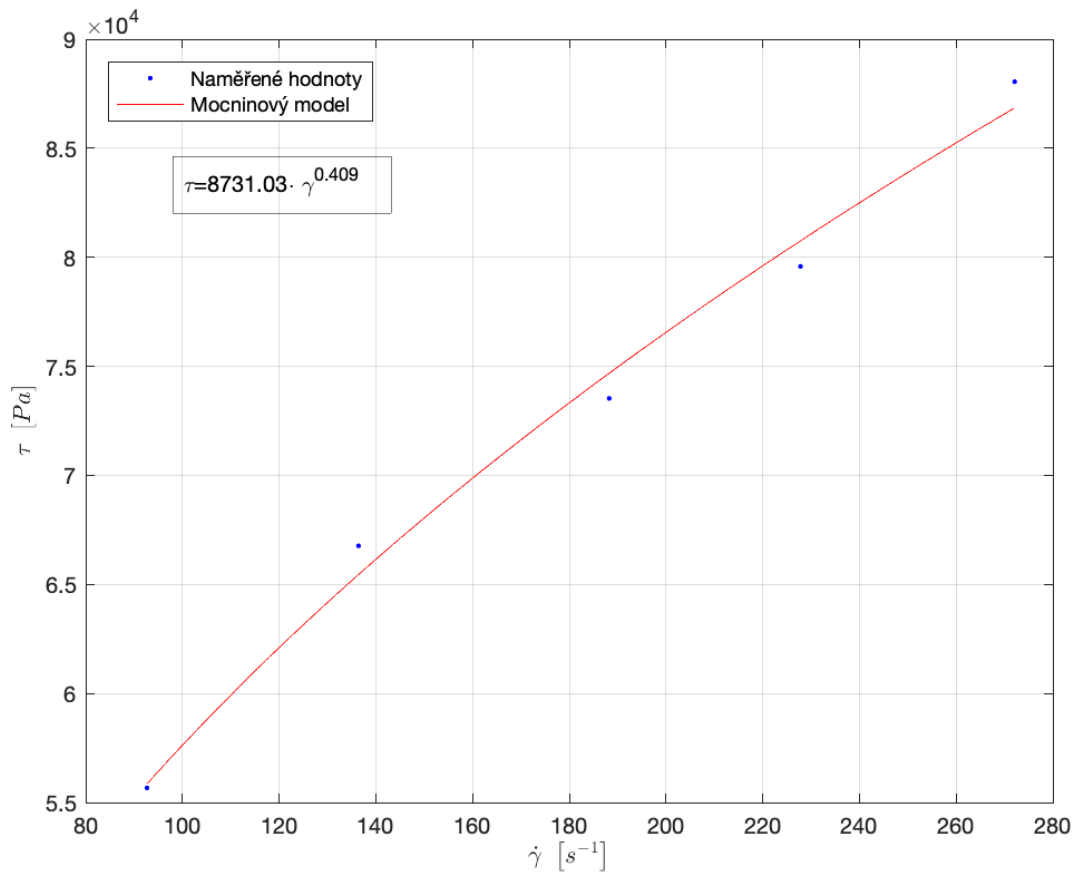


### 9.3.3. Výsledky výpočtu: PE + HFFR

Výpočet a postupy jsou stejné jako v případě předchozím pro čistý polyethylen. Skript s výpočty je součástí práce jako příloha č.2

Tabulka 7: Vypočtené hodnoty PE+HFFR

Smyková rychlost $\dot{\gamma}$ [ $s^{-1}$ ]	Tečné napětí $\tau$ [Pa]
272,97	88049,42
228,54	79580,64
188,85	73528,94
136,85	66768,57
92,98	55671,32



Obr. 9.9 Graf mocninového modelu pro PE+HFFR [autor]

### 9.3.4.Závěr

Výpočet včetně tvorby grafů jsem provedl v programu Matlab. Pro kontrolu jsem ten samý výpočet provedl také v programu Numbers. Čísla především koeficientu konzistence se liší přibližně o 2%. V této práci prezentuji výsledky pouze z programu Matlab. Hodnoty čistého PE a PE+HFFR se liší pouze o desetiny procent, takže na tokové vlastnosti nemá HFFR koncentrát velký vliv. Hodnoty vyšly přesně podle mých představ a pohybují se v intervalu hodnot polyethylenů od jiných výrobců, u kterých vlastnosti známe. Pro další výpočty budeme uvažovat hodnoty pro PE+HFFR, které jsou v následující tabulce označeny žlutě.

Tabulka 8: Výsledné hodnoty z experimentu

Materiál	Koeficient konzistence $K$	Index toku $n$	Výsledná rovnice
čistý PE	8717,64	0,416	$\tau = 8717,64 \cdot \dot{\gamma}^{0,416}$
PE + HFFR	8731,03	0,409	$\tau = 8731,03 \cdot \dot{\gamma}^{0,409}$

## 10. Konstrukce vytlačovací hlavy

V této kapitole popíšu konstrukci a výpočty všech komponent navrhované vytlačovací hlavy.

### 10.1.Extruder

Na lince je použit extruder od firmy CHODOS. Jedná se o starý stroj datovaný do 80. let. Stroj má průměr šneku 32 mm. Má třífázové vyhřívání pracovního válce resp. pracovní komory stroje.

Tabulka 9: Teploty v extruderu

Komora	Teplota [°C]
Komora 1	190
Komora 2	200
Komora 3	210

Otáčky stroje jsou pro výrobní rychlost  $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  stanoveny na  $n = 115 \text{ min}^{-1}$ .



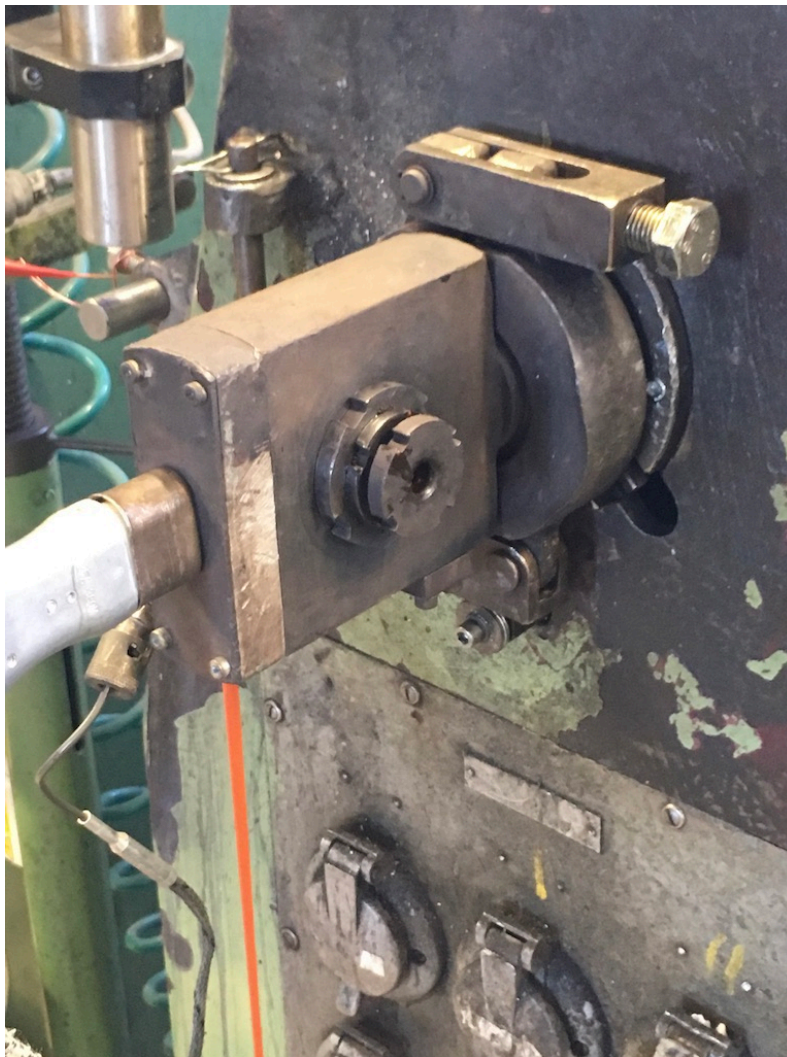
Obr. 10.1 Stroj CHODOS 32 [autor]

## 10.2.Návrhy konstrukčního uspořádání

Dle zadání mám zpracovat tři varianty možného řešení a ten nejlépe vyhovující dále navrhnout a důkladně spočítat.

### 10.2.1.Návrh 1

Nejjednodušší varianta. Hranaté tělo s vnitřní válcovo kuželovou dírou o zmenšujícím se průměru. Pinola hladká bez rozváděcích kanálů. Nejlevnější varianta na výrobu vzhledem k jednoduchým tvarům. Centricita misky zajišťována pomocí 4 stavěcích šroubů po obvodu tělesa hlavy. Šrouby jsou rozmístěny po 90°. Nynější varianta pro výrobu produktu. Zastaralá konstrukce s problémovým centrováním. Centrování se provádí šrouby a k správnému vycentrování je zapotřebí zkušeného operátora.

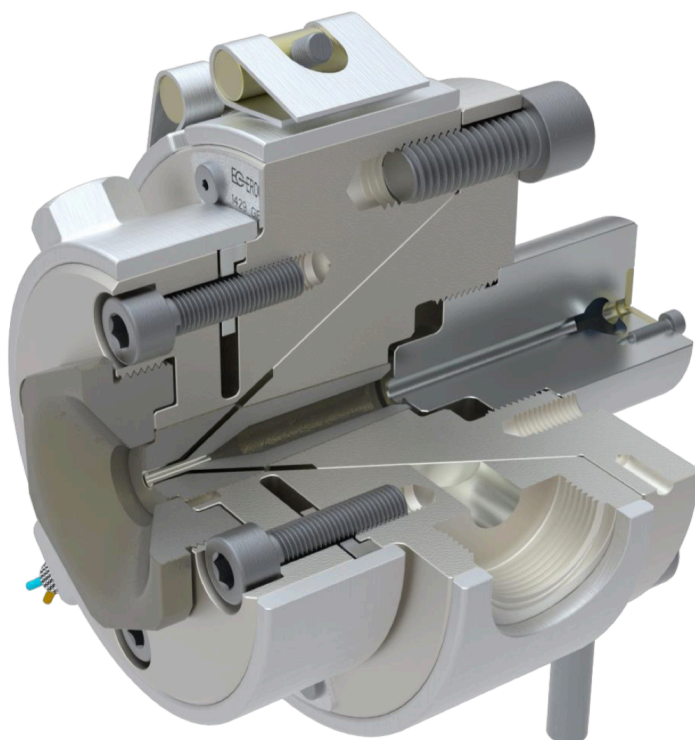
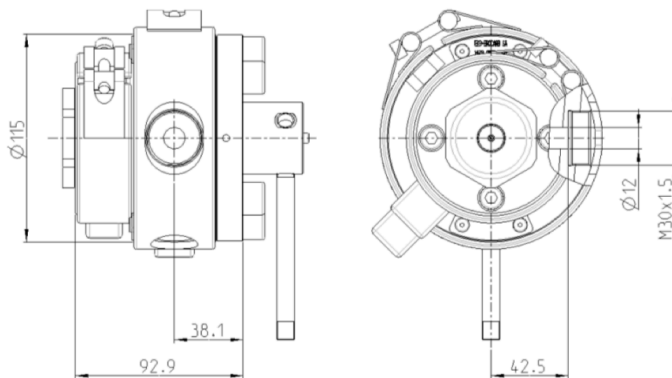


*Obr. 10.2 Stávající vytačovací hlava [autor]*

## 10.2.2.Návrh 2

Složitější konstrukce. Bez složitých rozváděcích kanálů. Centrování pomocí kuželu. Levnější varianta než navrhovaná a modernější varianta než stávající stav. Výrobce: Erocarb CH. Jedná se o produkt E4BN10.

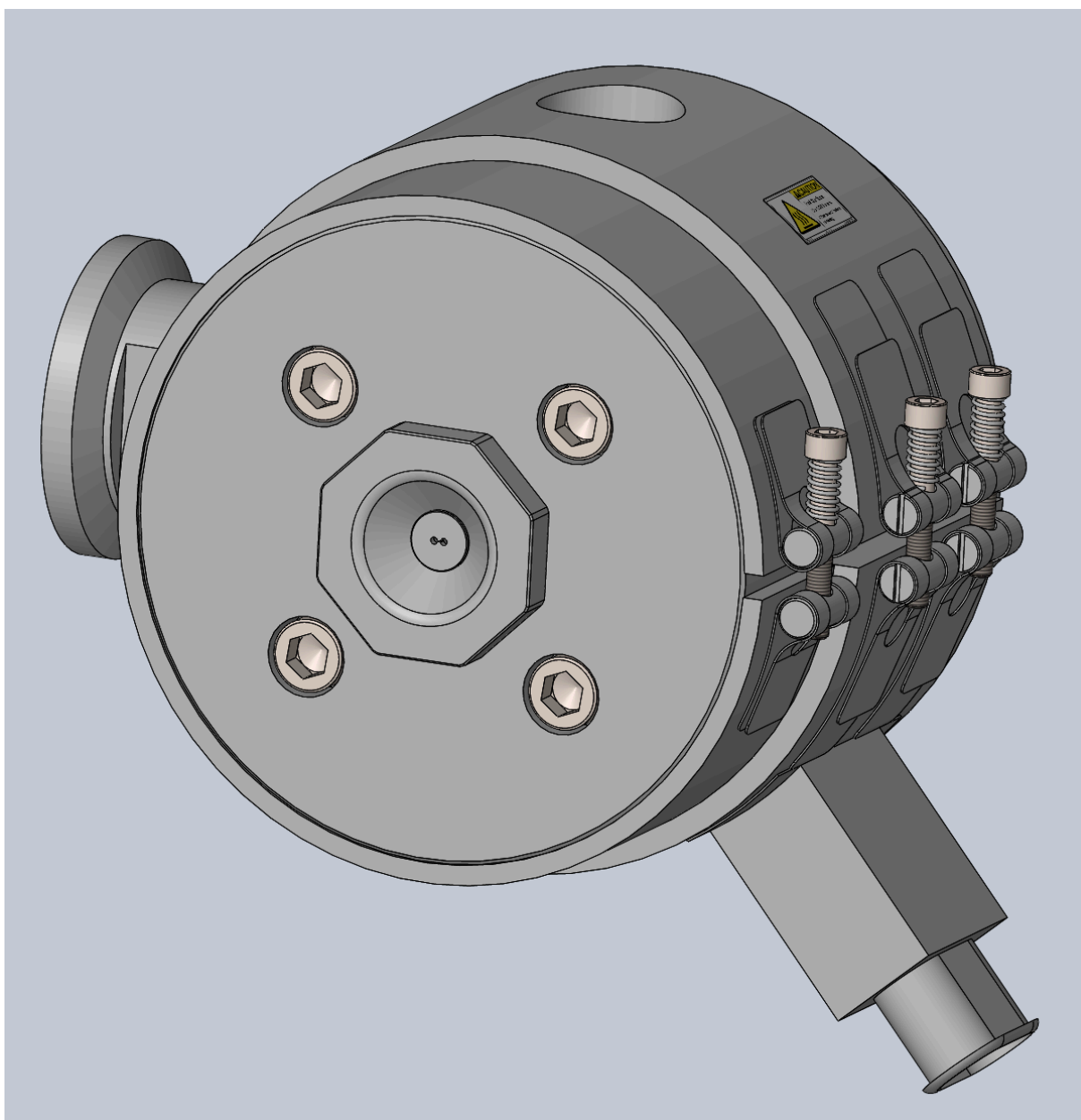
### E4BN10 FINE TUNING CENTRING



Obr. 10.3 Erocarb E4BN10 [12]

### 10.2.3.Návrh 3

Můj návrh vytlačovací hlavy. Pinola má rozváděcí kanálky. Vytápění hlavy a tepelná sonda. Mnou navrhnutá geometrie kanálů pro rozvod taveniny hlavou. Jednoduchá čistitelnost a smontovatelnost. Jednodušší nastavení resp. samocentrování, pro které není nutné zkušené oko operátora. Vlastní sada přípravků. Viz popis 10.3.



*Obr. 10.4 3D model sestavy hlavy [autor]*

### 10.3.Sestava popis

Sestava se skládá z několika součástí. Hlavní součástí je tělo hlavy, které je válcového tvaru s vnitřní komorou pro montáž pinoly. Další částí hlavy je pinola. Tato součást zajišťuje rozvod taveniny hlavou pomocí rozváděcích kanálků. Také má středem válcový otvor, kterým skrz pinolu vede jádro. Na jejím ústí je funkční kužel pro montáž špičky. Dalším dílem uvnitř hlavy je špička a miska. Tato dvojice se často také nazývá pouze jako přípravky. Špička je usazena pomocí funkčního kuželu v pinole. Miska se montuje do tzv. upínací desky pomocí upínací matice. Hlava je připojena k extruderu přírubou, skrz kterou proudí z extruderu tavenina do hlavy. Posledním dílem hlavy jsou topné pásy zajišťující ohřev komponent hlavy na správnou teplotu. Hlava může být vybavena držákem, který je možné přimontovat do jednoho ze závitů po obvodu těla hlavy a tím “odlehčit” přírubu. Celou konstrukci včetně 3D modelů jsem dělal v programu SOLIDWORKS.

### 10.4.Připojovací příruba

Připojovací příruba slouží k připojení vlastní hlavy ke stroji. Je to takový spojovací článek mezi hlavou a extruderem. Závit pro připojení k tělu hlavy je  $M30 \times 1,5$ . Tento rozměr je standardním rozměrem u většiny výrobců hlav. Proto použijí stejný rozměr. Je vyrobena z konstrukční oceli 11600.

### 10.5.Upínací matice

Pro upevnění misky k hlavě je zepředu hlavy upínací matice. Miska je zde volně vložena a není nijak napevno. Ve chvíli, kdy začne tavenina proudit hlavou, dojde k opření misky o matici a v tu chvíli je zaaretována proti jakémukoliv pohybu ve směru či proti směru tažení. Matice je vyrobena z konstrukční oceli 11600.

### 10.6.Miska

V misce se nachází otvor, kterým kabel vychází ven z hlavy. Určuje finální tvar výrobku. Tvar musí být zvětšen vzhledem ke smrštění výrobku vlivem chladnutí, abychom dosáhli správného finálního rozměru. Profil nebyl navrhnout mnou, ale byl součástí zadání. Materiál misky je jako u všech ostatních vnitřních částí korozivzdorná ocel 1.2083. Materiálový list je součástí práce jako příloha č.8

## 10.7.Špička

Zde po výstupu jádra z útroby dochází k prvnímu kontaktu jádra s taveninou. Špička musí být z vhodného materiálu, aby nedocházelo k abrazi vlivem pohybu taveniny po povrchu. Upevnění špičky do pinoly probíhá pomocí funkčního kužele. Musí být také správně umístěn ve vodorovné poloze, aby byla špička a miska přímo naproti sobě bez možnosti natočení. Materiál špičky je korozivzdorná ocel 1.2083. Materiálový list s vlastnostmi této oceli je součástí práce jako příloha č.8.

## 10.8.Upínací deska

Do této desky se montuje upínací matice držící misku na svém místě. Deska je po obvodu k tělu hlavy připevněna šrouby. Upínací deska je vyhřívána topným pásem. Díky tomu dochází také k ohřevu misky. Pomocí šroubů lze nastavit seřízení centricity. Je vyrobena z konstrukční oceli 11600 s vrstvou tvrdochromu.

## 10.9.Tělo hlavy

Tělo hlavy je základním prvkem. Je k extruderu umístěna v úhlu 90°, tedy přívod taveniny je z boku. Válcové tělo z korozivzdorného materiálu. Po obvodu má 4 díry se závity pro montáž připojovací příruby a jímek termočlánků případně tlakových snímačů. Z čela jsou závitové díry pro montáž upínací desky. Zadní strana těla je uzpůsobena k montáži pinoly. Má v sobě opět závitové díry a také kolík pro správně napolohování pinoly v těle. Ohřev těla hlavy je pomocí keramického topného pásu. Tělo hlavy je vyrobeno z konstrukční oceli 11600, ale její povrch je ošetřen procesem tvrdého chromování, tzv. tvrdochrom.

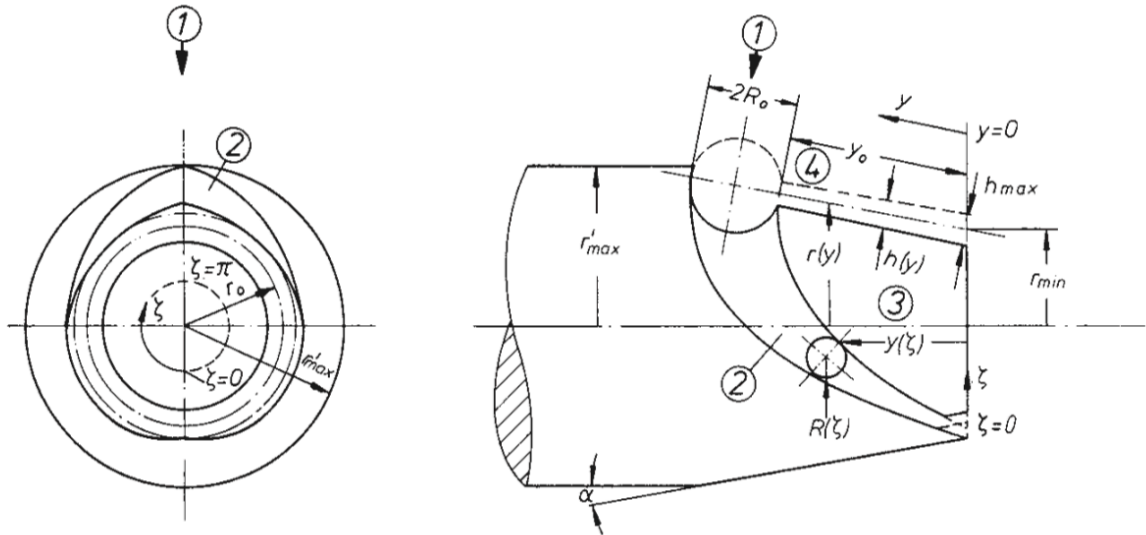
## 10.10.Pinola

Komolý kužel, který v sobě obsahuje štěrbinu. Tato štěrbinu slouží pro správný vyrovnaný rozvod taveniny. Do pinoly je pomocí funkčního kuželu připevněna špička. Pinola je z korozivzdorného materiálu s leštěným povrchem. Upevnění pinoly k tělu je pomocí šroubů po obvodu podstavce pinoly. Materiál pinoly volím korozivzdornou ocel 1.2083. Její materiálový list je přiložen jako příloha 8.



### 10.10.1. Návrh geometrie

Pinola bude skloněna pod úhlem  $\alpha = 32^\circ$  o minimálním poloměru  $r_{min} = 11 \text{ mm}$  a maximální výšce  $h_{max} = 5 \text{ mm}$ . Všechny výpočty jsem provedl v programu Matlab. Skript s výpočty je součástí příloh práce jako příloha č.3. Všechny výpočty geometrie byly provedeny dle literatury [14].



Obr. 10.5 Příložený výkres k postupu výpočtů [14]

#### a) Rozměry na vstupu

Nejprve si musíme stanovit vstupní rozměry a to vstupní poloměr kanálu a vzdálenost od čela.

Minimální poloměr:

$$R_0 = 0.889 \cdot (r_{min} \cdot h_{max}^2)^{\frac{1}{3}}$$

$$R_0 = 0.889 \cdot (11 \cdot 5^2)^{\frac{1}{3}} = 5,781 \text{ mm}$$

Vzdálenost od čela:

$$y_0 = h_{max}^{\frac{1}{3}} \cdot r_{min}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( 6.29 \cdot h_{max}^{\frac{1}{3}} \cdot \sin \alpha + 5.016 \cdot r_{min}^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$y_0 = 5^{\frac{1}{3}} \cdot 11^{\frac{1}{3}} \cdot \left( 6.29 \cdot 5^{\frac{1}{3}} \cdot \sin(32) + 5.016 \cdot 11^{\frac{1}{3}} \right) = 64,099 \text{ mm}$$

#### b) Maximální poloměr pinoly.

$$r'_{max} = r_{min} + (2 \cdot R_0 + y_0) \cdot \sin \alpha + \frac{h_{max}}{2} \cdot \cos \alpha$$

$$r'_{max} = 11 + (2 \cdot 5,781 + 64,099) \cdot \sin(32) + \frac{5}{2} \cdot \cos(32) = 53,214 \text{ mm}$$

c) Rozměr kanálu

Výpočet byl proveden vlastním programem v Matlabu pro souřadnice úhlu  $\xi = \langle 0, \pi \rangle$

Výpočet byl pro krok  $\frac{\pi}{16}$ , v poslední části jsem provedl jemnější krokování, aby došlo k lepšímu přiblížení obou stran kanálu.

Základní vztahy, do kterých jsem dosazoval, byly dva pro vzdálenost kanálu od čela a pro poloměr kanálu.

Poloměr:

$$R(\xi) = R_0 \cdot \left(\frac{\xi}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Vzdálenost:

$$y(\xi) = y_0 \cdot \left(\frac{\xi}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\pi^{\frac{1}{3}} \cdot \xi^{\frac{2}{3}} \cdot h_{max}^3 \cdot r_{min} \cdot \sin \alpha + 4R_0^4}{\pi \cdot h_{max}^3 \cdot r_{min} \cdot \sin \alpha + 4R_0^4}}\right)$$

Výsledkem poté byla tabulka v programu Matlab, která vypsala hodnotu úhlu, průměru kanálu  $D(\xi) = 2 \cdot R(\xi)$ , vzdálenost  $y(\xi)$ , poloměr  $r(y)$ , výšku odebranou oproti původnímu poloměru  $h(y)$ . [14]

kde:

$$r(y) = r_{min} + y \cdot \sin \alpha$$

$$h(y) = \sqrt{\frac{r_{min}}{r(y)}} \cdot h_{max}$$

<b>deg</b>	<b>Dksi</b>	<b>yksi</b>	<b>ryps</b>	<b>hyps</b>
<b>33.75</b>	<b>10.789</b>	<b>53.369</b>	<b>42.14</b>	<b>2.5546</b>

Obr. 10.6 Příklad tabulky z programu matlab s výslednými hodnotami [autor]

## 10.11. Pevnostní výpočty šroubů

Výpočty jsem opět provedl v programu Matlab. Skript je součástí práce jako příloha č.4.

### a) Tlaková ztráta

První výpočty, které bylo nutné udělat, jsou výpočty tlakové ztráty hlavy. Abych byl na straně bezpečnosti, tlakové ztráty jsem sečetl.

$$\Delta p_1 = \frac{2 \cdot K \cdot L_m}{R_m} \left[ \dot{V}_0 \frac{3 + \frac{1}{n}}{\pi \cdot R_m^3} \right]^n$$

kde:

$K$	Koeficient konzistence
$n$	Index toku
$L_m$	Délka vnitřního vybrání misky
$R_m$	Vnitřní poloměr misky
$\dot{V}_0$	Objemový průtok

kde:

Objemový průtok byl stanoven z rychlosti tažení drátu a požadované geometrie pláště.

$$\dot{V}_0 = S_w \cdot u_t$$

kde:

$S_w$	Plocha vytlačeného materiálu
$u_t$	Rychlost tažení drátu

Plochu vytlačeného materiálu jsme dopočítali z geometrie misky při modelování sestavy. Plocha byla dopočítána programem Solidworks. Jde o plochu profilu v misce a od ní odečtená plocha jader vodiče.

Tabulka 10: Parametry pro výpočet objemového průtoku

Plocha misky bez jader	$S_w$	4,562 mm <sup>2</sup>
Rychlost tažení drátu	$u_t$	25 m · min <sup>-1</sup>

$$u_t = 25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = \frac{25}{60} \cdot 1000 = 416,66 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Nyní můžeme dopočítat výsledný objemový průtok:

$$\dot{V}_0 = 4,562 \cdot 416,66 = 1900,8 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet tlakové ztráty misky:

$$\Delta p_1 = \frac{2 \cdot 8731,03 \cdot 29,157}{1,225} \left[ 1900,8 \cdot \frac{3 + \frac{1}{0,409}}{\pi \cdot 1,225^3} \right]^{0,409} = 8898900 \text{ Pa} = 8,89 \text{ MPa}$$

Tlaková ztráta v kanálu:

$$\Delta p_2 = \frac{8 \cdot \dot{V}_0 \cdot \eta_{rep,slit}}{\sin \alpha \cdot \pi \cdot h_{max}^3 \cdot r_{min}^{3/2}} \cdot \left[ (r_{min} + y_0 \cdot \sin \alpha)^{3/2} - r_{min}^{3/2} \right]$$

kde:

$\eta_{rep,slit}$  Viskozita v kanálu pinoly

$$\eta_{rep,slit} = K \cdot \dot{\gamma}_{rep,slit}^{n-1}$$

kde:

$\dot{\gamma}_{rep,slit}$  Smyková rychlost v kanálu

Smyková rychlost v kanálu byla vypočítána dle literatury [14] jako:

$$\dot{\gamma}_{rep,slit} = \frac{6 \cdot \dot{V}_0}{\pi \cdot r(y) \cdot h^2(y)} \cdot e_{\square}$$

kde:

$\dot{V}_0$  Objemový průtok

$r(y)$  Poloměr

$h(y)$  Výška

$e_{\square}$  Poměr výšky kanálu k maximální výšce

Objemový průtok známe, známe také  $r(y)$ ,  $h(y)$  z 10.10.1 - abychom byli na straně bezpečnosti, hledáme, pro jaké hodnoty bude  $\dot{\gamma}_{rep,slit}$  nejvyšší. Tento proces nám opět usnadní program Matlab a nalezne nám nejvyšší  $\dot{\gamma}_{rep,slit}$  pro  $r(y)$ ,  $h(y)$ . V tomto vzorci se také vyskytuje poměr výšek  $e_{\square}$ .

Poměr výšek lze vyjádřit také jako:

$$e_{\square} = \frac{h(y)}{h_{max}}$$

Po dosazení dostáváme vztah pro výpočet smykové rychlosti v kanálu:

$$\dot{\gamma}_{rep,slit} = \frac{6 \cdot \dot{V}_0}{\pi \cdot r(y) \cdot h^2(y)} \cdot \frac{h(y_0)}{h_{max}} = \frac{6 \cdot 1900,8}{\pi \cdot 11 \cdot 5^2} \cdot \frac{5}{5} = 13,2 \text{ s}^{-1}$$

Můžeme vypočítat viskozitu v kanálu jako:

$$\eta_{rep,slit} = K \cdot \dot{\gamma}_{rep,slit}^{n-1} = 8731,03 \cdot 11,575^{0,409-1} = 1900,14 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$$

Následně můžeme dopočítat tlakovou ztrátu:

$$\Delta p_2 = \frac{8 \cdot 1900,8 \cdot 1900,14}{\sin(32) \cdot \pi \cdot 5^3 \cdot 11^{3/2}} \cdot \left[ (11 + 64,099 \cdot \sin(32))^{3/2} - 11^{3/2} \right] = 1,09 \text{ MPa}$$

Celková tlaková ztráta hlavy:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = 8,89 + 1,09 = 9,98 \text{ MPa} \approx 10 \text{ MPa}$$

Tabulka 11: Vypočtené tlakové ztráty

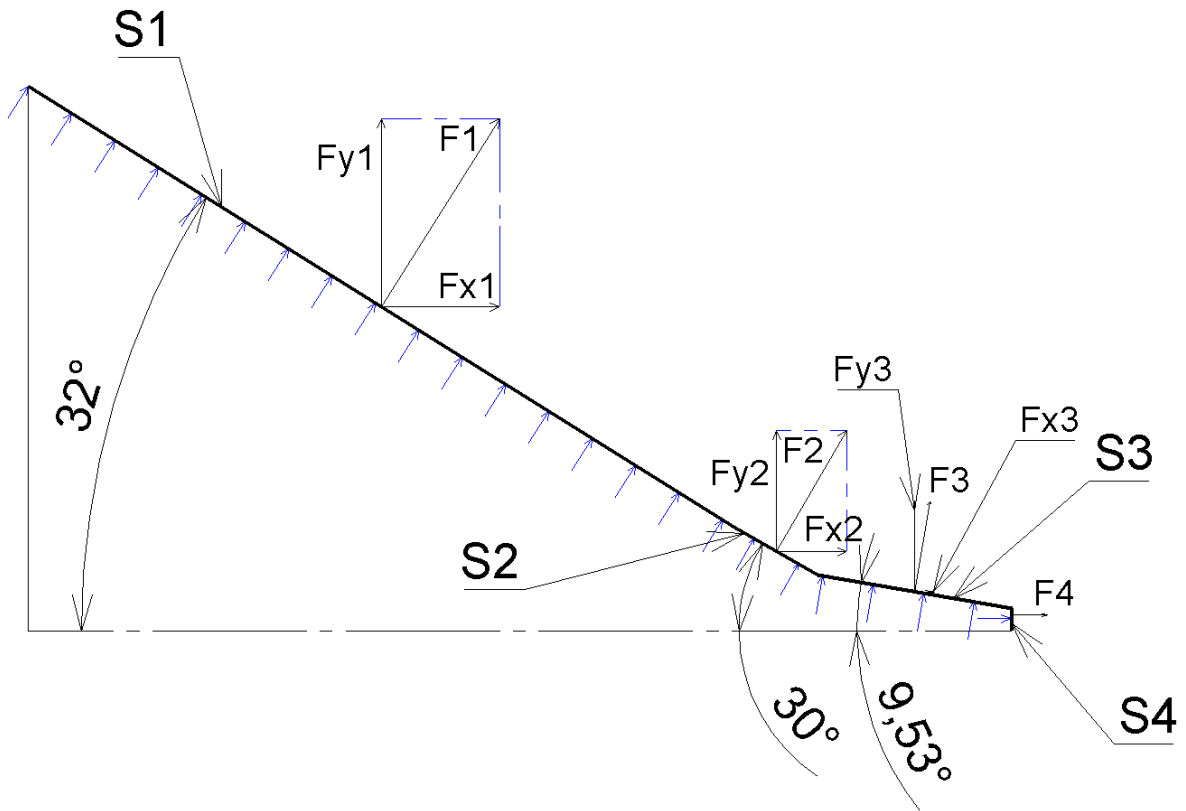
Tlaková ztráta misky	$\Delta p_1$	8,89 MPa
Tlaková ztráta kanálu	$\Delta p_2$	1,09 MPa
Celková tlaková ztráta	$\Delta p$	10 MPa

b) Výpočet šroubů

Nyní budeme dimenzovat šrouby. Zvolil jsem šrouby M12 v pevnostní třídě 12.9. Upínací desku budou držet 4 šrouby o délce 60 mm, pinolu budou držet stejné šrouby pouze s tím rozdílem, že jejich délka bude 40 mm.

Tabulka 12: Vstupní hodnoty pro pevnostní výpočty

Název	Šroub M12x60	
Pevnostní třída	-	12.9
Délka závitu	$l_z$	36 mm
Mez kluzu (250 °C)	$\sigma_k$	875 MPa
Počet šroubů	$n$	4
Celková tlaková ztráta	$\Delta p$	10 MPa
Plocha úseku 1	$S_1$	15875,78 mm <sup>2</sup>
Plocha úseku 2	$S_2$	395,23 mm <sup>2</sup>
Plocha úseku 3	$S_3$	411,87 mm <sup>2</sup>
Plocha úseku 4	$S_4$	8,3 mm <sup>2</sup>
Úhel kužele	$\alpha$	32°
Úhel kužele misky - špičky	$\beta$	30°
Úhel kužele misky - zužení	$\delta$	9,53°
Součinitel zatížení	$a$	0.6
Průměr dřívku šroubu	$d_d$	11,73 mm



Obr. 10.7 Silové schéma [autor]

Na silovém schématu můžeme vidět, jak působí tlak na stěnu a jaké vznikají síly. Úhel  $\alpha = 32^\circ$  je úhel komolého kužele těla a upínací desky. Plocha úseku  $S_1$  je plocha komolého kužele těla hlavy + upínací desky. Dále je zde plocha  $S_2$ , což je plocha kužele misky. Kužel misky je skloněn pod úhlem  $\beta = 30^\circ$ . Plocha  $S_3$  je plocha kužele zúžení misky, tato plocha je skloněna pod úhlem  $\delta = 9,53^\circ$ . Plocha  $S_4$  je čelo misky. Na plochy působí tlak  $p$ . Hodnoty ploch vypočítal program Solidworks z vytvořeného modelu hlavy.

Celková síla vyvolaná tlakem je:

$$F_c = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}$$

$$F_c = \Delta p \cdot S_1 \cdot \sin \alpha + \Delta p \cdot S_2 \cdot \sin \alpha + \Delta p \cdot S_3 \cdot \sin \alpha + \Delta p \cdot S_4$$

kde:

$F_c$  Celková síla na šrouby

$\Delta p$  Celková tlaková ztráta

$S_1$  Plocha úseku 1 (tělo + čelo)

$S_2$	Plocha úseku 2 (miska - kužel)
$S_3$	Plocha úseku 3 (miska - zúžení)
$S_4$	Plocha úseku 4 (miska - čelo)

Po dosazení hodnot dostáváme vztah pro celkovou sílu:

$$F_c = 10 \cdot 15887 \cdot \sin(32) + 10 \cdot 395,23 \cdot \sin(30) + 10 \cdot 411,87 \cdot \sin(9,53) + 10 \cdot 8,3 = 86928,53 \text{ N}$$

Následně vypočítáme sílu na 1 šroub, která se rovná:

$$F_i = \frac{F_c}{n} = \frac{86928,53}{4} = 21732,13 \text{ N}$$

kde:

$F_i$  Síla na jeden šroub

$n$  Počet šroubů

Následně musím vypočítat napětí vznikající ve šroubu:

$$\sigma_t = \frac{F_i}{S_s}$$

kde:

$S_s$  Plocha šroubu

$$S_s = \frac{\pi \cdot d_d^2}{4}$$

kde:

$d_d$  Průměr dřívku šroubu

$$\sigma_t = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot d_d^2} = \frac{4 \cdot 21732,13}{\pi \cdot 11,73^2} = 201,1 \text{ MPa}$$

Na šroubech předpokládáme míjivé zatížení, proto je mez kluzu přenásobena konstantou  $a$ . Z následujícího vztahu získáme dovolené napětí. Toto napětí následně porovnáme s napětím v jednom šroubu a získáme bezpečnost



$$\sigma_D = a \cdot \sigma_k$$

kde:

$\sigma_D$  Dovolené napětí

$a$  Součinitel typu zatížení

$\sigma_k$  Mez kluzu šroubu

Pro součinitel typu zatížení jsme zjistili, že pro míjivé zatížení je jeho hodnota 60 %, tedy  $a = 0,6$

$$\sigma_D = 0,6 \cdot 875 = 525 \text{ MPa}$$

Výsledná bezpečnost:

$$k_k = \frac{\sigma_D}{\sigma_t} = \frac{525}{201,1} = 2,61$$

Nyní můžeme konstatovat, že šroub vyhovuje a naše konstrukce je správná. Vypočtené hodnoty pevnostních výpočtů jsem přehledně zaznamenal do tabulky 12. Tyto výpočty jsem také realizoval pomocí programu Matlab a skript je součástí práce jako příloha č.4.

Tabulka 13: Vypočtené hodnoty pevnostního výpočtu

Celková síla	$F_c$	86928,53 N
Síla na jeden šroub	$F_i$	21732,13 N
Napětí ve šroubu	$\sigma_t$	201,1 MPa
Dovolené napětí	$\sigma_D$	525 MPa
Výsledná bezpečnost	$k_k$	2,61

## Závěr

Práci jsem rozdělil do dvou částí teoretické a praktické. V teoretické části práce jsem se zabýval nejprve obecně procesy na zpracování plastů, a poté konkrétně vytlačováním a popisem vytlačovacích strojů. Popsal jsem vytlačovací hlavy a také popsali jejich součásti. Tyto poznatky jsem doložil na obrázcích a fotografiích pro jasnější pochopení dané problematiky. Následně jsem se zabýval materiály, které jsou pro vytlačování, a převážně pro oplášťování, používány. Popsal jsem také jejich vlastnosti z hlediska reologického. Nakonec této teoretické části jsem udělal takové malé shrnutí resp. závěr teoretické části. Zde jsem shrnul všechny teoretické poznatky.

V praktické části jsem se na úvod zabýval experimentálním měřením tokových vlastností taveniny materiálu. Toto měření jsem prováděl, protože nebyla známa žádná data. Nejprve jsem provedl vlastní měření v laboratoři a následně měření vyhodnotil. Měření dopadlo tak, jak jsem očekával a získal jsem potřebné parametry materiálu (koeficient konzistence a index toku), které jsem potřeboval pro další část výpočtů. Poté jsem popsali stroj, na který budu hlavu navrhovat a také doložil jeho fotografii pro ilustraci. Dále jsem navrhl 3 možná řešení problému. Prvním bylo nechat si stávající hlavu a upravit provozní parametry, druhým koupit vytlačovací hlavu od výrobce a třetím návrh vytlačovací hlavy. Popsal jsem, jak vypadá a z čeho se konstrukčně oplášťovací hlava skládá a jednotlivé části sestavy popsali z hlediska konstrukce. Provedl jsem výpočty geometrie pinoly. Tyto výpočty jsem provedl dle literatury [14]. Výpočty jsou jedna z nejdůležitějších částí návrhu hlavy. Výsledky a rozměry pinoly vycházely přesně podle mých představ. Mohl jsem pokračovat dále a tvořit 3D model sestavy. Na závěr jsem si ověřil, že volené šrouby jsou vhodné a provedl pevnostní výpočet včetně výpočtu tlakové ztráty a ve finále bezpečnosti. Poslední částí práce pak byla tvorba výkresové dokumentace navržené vytlačovací hlavy.

## Seznam použitých symbolů a značení

$a$	Součinitel typu zatížení	[ – ]
$b$	Vzdálenost ložisek uložení šneku	[ $m$ ]
$b$	Šířka kapiláry	[ $m$ ]
$D$	Průměr šneku	[ $m$ ]
$d_d$	Průměr dřívku šroubu	[ $m$ ]
$dm$	Hmotnost vzorku	[ $kg$ ]
$dp$	Tlaková diference	[ $Pa$ ]
$dt$	Časový interval měření	[ $s$ ]
$\frac{du_z}{dy}$	Gradient rychlosti	$\left[ \frac{m \cdot s^{-1}}{m} \right]$
$F_A$	Axiální síla na šnek	[ $N$ ]
$F_B$	Radiální síla na šnek	[ $N$ ]
$F_C$	Radiální síla na šnek	[ $N$ ]
$F_c$	Celková síla na všechny šrouby	[ $N$ ]
$F_i$	Síla na 1 šroub	[ $N$ ]
$F_r$	Pasivní odpory	[ $N$ ]
$h_{max}$	Maximální výška	[ $m$ ]
$h(y)$	Výška kanálu v závislosti na souřadnici $y$	[ $m$ ]
$h$	Výška kapiláry	[ $m$ ]
$K$	Koeficient konzistence	[ – ]
$k_D$	Součinitel tvaru pístu	[ – ]
$k_k$	Bezpečnost pro dovolené napětí ku napětí ve šroubu	[ – ]
$L$	Vzdálenost mezi snímači reologické hlavy	[ $m$ ]
$L_m$	Délka vnitřního vybrání misky	[ $m$ ]

$l$	Vzdálenost konce šneku od ložiska	$[m]$
$l_z$	Délka závitu	$[m]$
$M_k$	Krouticí moment	$[N \cdot m^{-1}]$
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok	$[kg \cdot s^{-1}]$
$n$	Otáčky	$[s^{-1}]$
$n$	Index toku	$[-]$
$n$	Počet šroubů	$[-]$
$P$	Maximální přenášený výkon šneku	$[W]$
$P_p$	Tlak hydraulické kapaliny	$[Pa]$
$p$	Tlak v pracovním válci	$[Pa]$
$p_A$	Tlak na snímači A	$[Pa]$
$p_B$	Tlak na snímači B	$[Pa]$
$p_C$	Tlak na snímači C	$[Pa]$
$\Delta p$	Celková tlaková ztráta	$[Pa]$
$\Delta p_1$	Tlaková ztráta misky	$[Pa]$
$\Delta p_2$	Tlaková ztráta pinola-kanál	$[Pa]$
$q$	Spojité zatížení šneku	$[N \cdot m^{-1}]$
$R$	Poloměr	$[m]$
$R_0$	Vstupní poloměr kanálu	$[m]$
$R_m$	Vnitřní poloměr misky	$[m]$
$R(\xi)$	Poloměr v závislosti na souřadnici $\xi$	$[m]$
$r'_{max}$	Maximální poloměr pinoly	$[m]$
$r(y)$	Poloměr kanálu v závislosti na souřadnici $y$	$[m]$
$r_{min}$	Minimální poloměr pinoly	$[m]$

$S$	Plocha pracovního pístu	$[m^2]$
$S_1$	Plocha úseku 1	$[m^2]$
$S_2$	Plocha úseku 2	$[m^2]$
$S_3$	Plocha úseku 3	$[m^2]$
$S_4$	Plocha úseku 4	$[m^2]$
$S_p$	Plocha hydraulického pístu	$[m^2]$
$S_s$	Plocha šroubu	$[m^2]$
$S_w$	Plocha profilu misky bez plochy jader vodiče	$[m^2]$
$T$	Žádaná teplota	$[K]$
$T_0$	Referenční teplota	$[K]$
$u_t$	Rychlost tažení drátu	$[m \cdot s^{-1}]$
$V$	Výkon diskového vytlačovacího stroje	$[kg \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}$	Objemový průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}_0$	Objemový průtok pro geometrii misky	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$y_0$	Vzdálenost od čela pinoly k hraně kanálu na vstupu	$[m]$
$y(\xi)$	Vzdálenost od čela pinoly k hraně kanálu	$[m]$
$\alpha$	Koeficient lineární teplotní roztažnosti	$[K^{-1}]$
$\alpha$	Úhel kužele pinoly, hlavy, upínací desky	$[^\circ]$
$\dot{\gamma}$	Smyková rychlost	$[s^{-1}]$
$\dot{\gamma}_{rep,slit}$	Smyková rychlost v kanálu	$[s^{-1}]$
$\Rightarrow$ $\Delta$	Tenzor rychlosti deformace	$[s^{-1}]$
$\eta$	Kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\eta$	Nonnewtonská “zdánlivá” viskozita	$[Pa \cdot s]$

$\eta_{rep,slit}$	Viskozita v kanálu pinoly	$[Pa \cdot s]$
$\mu$	Dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
$\mu_p$	Plastická viskozita	$[Pa \cdot s]$
$\nu$	Specifický objem	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
$\xi$	Souřadnice geometrie	$[-]$
$\pi$	Ludolfovo číslo	$[-]$
$\rho$	Hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho(T)$	Hustota při žádané teplotě	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho(T_0)$	Hustota při referenční teplotě	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\sigma_D$	Dovolené napětí	$[Pa]$
$\sigma_k$	Mez kluzu	$[Pa]$
$\sigma_t$	Napětí ve šroubu	$[Pa]$
$\tau$	Tečné napětí	$[Pa]$
$\tau_0$	Mez toku	$[Pa]$
$\tau_{yz}$	Tečné napětí	$[Pa]$
$\vec{\vec{\tau}}$	Tenzor dynamických napětí	$[Pa]$
$II_{\Delta}$	Druhý invariant	$[s^{-2}]$

## Seznam použité literatury

- [1] ŠTĚPEK, Jiří, Antonín KUTA a Jiří ZELINGER. 1.2 Rozdělení Plastů. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy chemickotechnologické, studijní obor 28-10-8 Technologie výroby a zpracování polymerů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989
- [2] MAŇAS, Miroslav a Josef HELŠTÝN. *Výrobní stroje a zařízení: Gumárenské a plastikářské stroje II*. Brno: Vysoké učení technické, 1990, ISBN 80-214-0213-X.
- [3] RAUWENDAAL, Chris. *Polymer extrusion*. 5th edition. Cincinnati: Hanser Publication, 2014, ISBN 978-1-56990-539-5.
- [4] OSWALD, Tim A. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. [1st ed.]. Cincinnati: Hanser, c2006, s. 294. ISBN 978-1-56990-399-5..
- [5] *RX Crosshead series overview* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: [http://www.rosendahlnextrom.com/cable-wire/file/2018/04/Crosshead\\_Overview\\_EN\\_6seitig\\_2018\\_Screen.pdf](http://www.rosendahlnextrom.com/cable-wire/file/2018/04/Crosshead_Overview_EN_6seitig_2018_Screen.pdf)
- [6] *ROCOMAT* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: [http://www.rosendahlnextrom.com/cable-wire/file/2015/08/Rocomat\\_en.pdf](http://www.rosendahlnextrom.com/cable-wire/file/2015/08/Rocomat_en.pdf)
- [7] BAIRD, Donald G. a Dimitris I. COLLIAS. *Polymer processing: principles and design*. Second edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014, s. 214. ISBN 978-0-470-93058-8.
- [8] JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Vyd. 3. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01615-3.
- [9] JIROUT, Tomáš. *Přenosy hybnosti tepla a hmoty. Poznámky z přednášek*. Praha: České vysoké učení technické, 2018.
- [10] *Extrusion tools for window profiles* [online]. [cit. 2019-06-28]. Dostupné z: <https://www.baruffaldi.eu/product-catalogue/extrusion-tools-window-profiles/>
- [11] BUCHLOVSKÝ, Emil. *Výroba kabelů a vodičů pro 2. a 3. ročník středních odborných učilišť*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. SIP 41048/04822.
- [12] EROCARB [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <http://www.ero carb.ch/docs/default-source/default-document-library/catalogue-ero carb.pdf?sfvrsn=58>
- [13] SPIDER INDUSTRIAL CO., LTD. [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://spider.en.taiwantrade.com/product/4-core-cable-wire-extrusion-dies-for-multi-wire-or-cable-1388764.html>

- [14] MICHAELI, Walter a Christian HOPMANN. Extrusion dies for plastics and rubber. 4th Edition. Cincinnati: Hanser Publishers, [2016]. ISBN 978-1-56990-623-1.
- [15] SINGH, R., R. KUMAR a M.S.J. HASHMI. Friction Welding of Dissimilar Plastic-Based Material by Metal Powder Reinforcement. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier, 2017, 2017. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.04159-X. ISBN 9780128035818. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012803581804159X>
- [16] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2933-6.
- [17] Fig. 1: A typical stress-strain plot for Non-Newtonian fluids. In: SimScale [online]. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://clqtg10snjb14i85u49wifbv-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/12/NonNewtonian01.png>
- [18] DOSTÁL, Martin, Karel PETERA, Jiří MORAVEC, Radek ŠULC a Tomáš JIROUT. Dovolené podklady ke zkoušce: Zkouškový pomocník. 2018.
- [19] Datový kabel Eternico AluCore USB-C 3.2 Gen1, 2m Black 7/8. In: Alza.cz [online]. [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: <https://cdn.alza.cz/ImgW.ashx?fd=FotoAddOrig&cd=AET0809-07&i=1.jpg>
- [20] Laboratorní extrudery EB-L. In: BOCO Pardubice [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.boco.cz/extruder-eb-l>



# Seznam Obrázků

Obr. 2.1 Jednopístový vytlačovací stroj [2]	14
Obr. 2.2 Dvoupístový vytlačovací stroj [3]	15
Obr. 2.3 Schéma diskového vytlačovacího stroje [2]	16
Obr. 2.4 Disk stupňového diskového vytlačovacího stroje [3]	17
Obr. 2.5 Spirálový vytlačovací stroj [2]	18
Obr. 3.1 Jednošnekový vytlačovací stroj, schéma [2]	19
Obr. 3.2 Zatížení šneku [2]	20
Obr. 3.3 Příklad některých zakončení šneků [2]	20
Obr. 3.4 Přehled geometrií jednochodých šneků pro různé materiály [2]	21
Obr. 3.5 Schéma rozdělení jednošnekového vytlačovacího stroje na pracovní pásma [2]	22
Obr. 3.6 Uspořádání šneku ve dvoušnekovém vytlačovacím stroji [2]	23
Obr. 3.7 Rozdělení vícešnekových vytlačovacích strojů [2]	24
Obr. 3.8 Pásma vícešnekového vytlačovacího stroje [2]	24
Obr. 4.1 Přímá vytlačovací hlava pro vytlačování trubek [2]	25
Obr. 4.2 Vytlačovací hlava pro okenní profily [10]	26
Obr. 4.3 Nepřímá vytlačovací hlava pro opláštění vodičů [6]	27
Obr. 4.4 Trn [5]	27
Obr. 4.5 Tvary širokoštěrbinových hlav [7]	28
Obr. 4.6 Hlava pro vytlačování sítí [1]	29
Obr. 5.1 Metody opláštění [11]	31
Obr. 5.2 Připojení přístřikového extruderu k vytlačovací hlavě [11]	32
Obr. 6.1 Lamač vyjmutý z extruderu. [autor]	33
Obr. 6.2 Detail konstrukce vytlačovací hlavy s popisem součástí [12]	34
Obr. 6.3 Detail profilu rozvodu taveniny. [autor]	35
Obr. 6.4 Příklad špiček pro vícežilové kabely [13]	36
Obr. 7.1 Specifický objem funkcí teploty [14]	39
Obr. 7.2 p-v-T diagram [14]	40
Obr. 7.3 Typický graf pro newtonské látky [17]	44
Obr. 7.4 Složení datového USB kabelu [19]	46
Obr. 9.1 Laboratorní extruder v laboratoři ústavu Procesní a zpracovatelské techniky [autor]	49
Obr. 9.2 Detail na bok extruderu s panelem a snímači [autor]	50
Obr. 9.3 Detail na řídicí panel stroje [autor]	50
Obr. 9.4 Detail snímače na stroji [autor]	51
Obr. 9.5 Průběh experimentu [autor]	53
Obr. 9.6 Polyethylen s příměsí HFFR [autor]	53
Obr. 9.7 Detail na kapiláru vytlačovací hlavy a vytlačovaný polyethylen s příměsí HFFR [autor]	54
Obr. 9.8 Graf mocninového modelu pro čistý PE [autor]	57
Obr. 9.9 Graf mocninového modelu pro PE+HFFR [autor]	58
Obr. 10.1 Stroj CHODOS 32 [autor]	60

Obr. 10.2 Stávající vytlačovací hlava [autor]	61
Obr. 10.3 Erocarb E4BN10 [12]	62
Obr. 10.4 3D model sestavy hlavy [autor]	63
Obr. 10.5 Přiložený výkres k postupu výpočtů [14]	66
Obr. 10.6 Příklad tabulky z programu matlab s výslednými hodnotami [autor]	67
Obr. 10.7 Silové schéma [autor]	72

## Seznam Tabulek

Tabulka 1: Příklad hodnot dynamické viskozity některých tekutin	38
Tabulka 2: Vlastnosti uvedené v materiálovém listu	48
Tabulka 3: Parametry laboratorního extruderu [20]	49
Tabulka 4: Naměřené hodnoty	54
Tabulka 5: Vypočtené hodnoty pro $n=20$ ot/min	56
Tabulka 6: Vypočtené hodnoty po změněném indexu toku	56
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty PE+HFFR	58
Tabulka 8: Výsledné hodnoty z experimentu	59
Tabulka 9: Teploty v extruderu	60
Tabulka 10: Parametry pro výpočet objemového průtoku	69
Tabulka 11: Vypočtené tlakové ztráty	71
Tabulka 12: Vstupní hodnoty pro pevnostní výpočty	71
Tabulka 13: Vypočtené hodnoty pevnostního výpočtu	74

# Seznam Příloh

Číslo přílohy	Popis	Počet stran	Velikost stran
Příloha č.1	Experiment: výpočet vlastností PE	4	A4
Příloha č.2	Experiment: výpočet vlastností PE+HFFR	4	A4
Příloha č.3	Výpočet geometrie pinoly	6	A4
Příloha č.4	Výpočet tlakových ztrát a pevnost šroubů	3	A4
Příloha č.5	Materiálový list ocel 1.2083	1	A4
Příloha č.6	Sestavný výkres - Vytlačovací hlava	1	A0
Příloha č.7	Výrobní výkres - Pinola	1	A2
Příloha č.8	Výrobní výkres - Miska	1	A3
Příloha č.9	Výrobní výkres - Špička	1	A3

# Příloha č.1

---

```
clear all
close all
clc

%základní parametry
rho=945;
n=0.415965221049472;

%rozm#ry št#rbiny
h=0.001;
s=0.02;
x=h/s;

%vzdálenost mezi sníma#i
L=0.13;

%Nam##ená data z tabulek:

%M##ení 1 - n=20otmin, bez barviva, hmotnost 162,34g #as 7:14
Tp1=63.926;
TZ11=211.4;
TZ21=216.830;
TZ31=222.253;
TZ41=220.043;
TZ51=234.619;
pA1=245.380;
pB1=216.604;
pC1=24.940;
n1=20;
m1=162.34;
t1=434;
dp1=(pB1-pC1)*100000;
mk=m1/1000;
dmdt1=mk/t1;
dVdt1=dmdt1/rho;

%M##ení 2 - n=30otmin, bez barviva, hmotnost 257,82g
Tp2=61.447;
TZ12=210.910;
TZ22=215.409;
TZ32=220.372;
TZ42=220.052;
TZ52=231.305;
pA2=291.659;
pB2=258.978;
pC2=28.760;
n2=30;
m2=257.82;
t2=448.72;
dp2=(pB2-pC2)*100000;
mk=m2/1000;
dmdt2=m2k/t2;
```

---

```
dVdt2=dmdt2/rho;

%M##ení 3 - n=25, hmotnost 209.61g
Tp3=62.167;
TZ13=208.559;
TZ23=216.901;
TZ33=220.028;
TZ43=219.916;
TZ53=230.195;
pA3=278.468;
pB3=247.514;
pC3=27.697;
n3=25;
m3=209.61;
t3=436.52;
dp3=(pB3-pC3)*100000;
m3k=m3/1000;
dmdt3=m3k/t3;
dVdt3=dmdt3/rho;

%M##ení 4 - n=15, hmotnost 125.38g
Tp4=60.637;
TZ14=210.686;
TZ24=214.563;
TZ34=219.472;
TZ44=219.898;
TZ54=231.071;
pA4=221.682;
pB4=195.147;
pC4=22.989;
n4=15;
m4=125.38;
t4=429.3;
dp4=(pB4-pC4)*100000;
m4k=m4/1000;
dmdt4=m4k/t4;
dVdt4=dmdt4/rho;

%M##ení 5 - n=10, hmotnost 84.61g
Tp5=61.847;
TZ15=209.844;
TZ25=214.957;
TZ35=221.276;
TZ45=220.065;
TZ55=229.022;
pA5=195.127;
pB5=171.799;
pC5=20.906;
n5=10;
m5=84.61;
t5=428.35;
dp5=(pB5-pC5)*100000;
m5k=m5/1000;
dmdt5=m5k/t5;
```

---

```

dVdt5=dmdt5/rho;

%Výpočet dat pro konstrukci reogramu
gama1=2*dVdt1/s/h/h*(2+1/n);
gama2=2*dVdt2/s/h/h*(2+1/n);
gama3=2*dVdt3/s/h/h*(2+1/n);
gama4=2*dVdt4/s/h/h*(2+1/n);
gama5=2*dVdt5/s/h/h*(2+1/n);

tau1=h*dp1/2/L;
tau2=h*dp2/2/L;
tau3=h*dp3/2/L;
tau4=h*dp4/2/L;
tau5=h*dp5/2/L;

%Rovnice: gama=2V/b/h/h*(2+1/n), tau=h*dp/2/L
%ru#n# zvolím první nást#el indexu toku n=0,5
%plot(gama1,tau1,'b.',gama2,tau2,'b.',gama3,tau3,'b.',gama4,tau4,'b.',gama5,tau5,'
%z grafu rovnice Tau=K*gama^n

x=[gama1 gama2 gama3 gama4 gama5];
y=[tau1 tau2 tau3 tau4 tau5];

%Fit: 'untitled fit 1'.
[xData, yData] = prepareCurveData( x, y );

% Set up fitype and options.
ft = fitype( 'power1' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.StartPoint = [10338.3939356085 0.382716732438388];

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
coeffvals=coeffvalues(fitresult)

% Plot fit with data.
figure( 'Name', 'untitled fit 1' );
h = plot( fitresult, xData, yData);
legend( h, 'Nam##ené hodnoty', 'Mocninový
model', 'Location', 'NorthWest' );
% Label axes
set(0, 'defaultTextInterpreter', 'latex');

xlabel('$$\dot{\gamma}\sim\left[s^{-1}\right]$$');
ylabel('$$\tau\sim\left[\text{Pa}\right]$$');

grid on

dim = [.2 .5 .3 .3];
str = '\tau= 8717.64 \cdot \gamma^{0.416}';
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

```

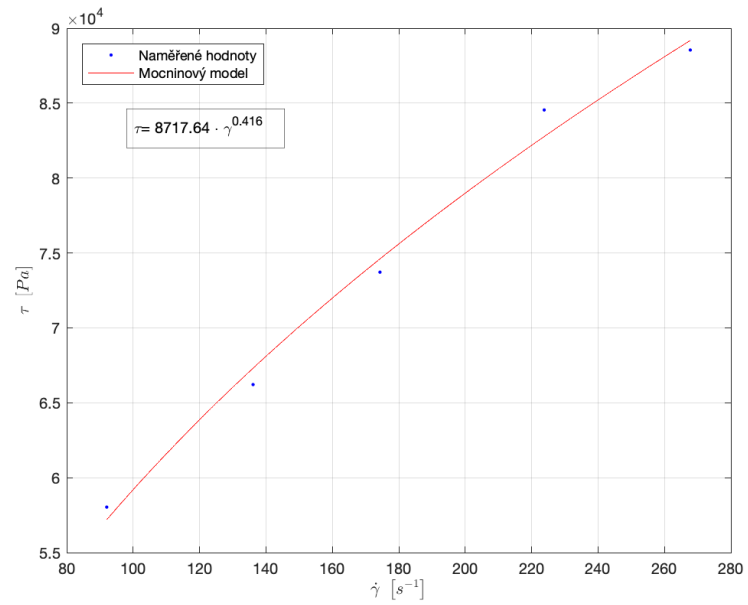
---

---

`coeffvals =`

`1.0e+03 *`

`8.7176 0.0004`



Published with MATLAB® R2017a



## Příloha č.2

---

```
clear all
close all
clc

%základní parametry
rho=945;
n=0.409776879060486;

%rozm#ry št#rbiny
h=0.001;
s=0.02;
x=h/s;

%vzdálenost mezi sníma#i
L=0.13;

%Nam##ená data z tabulek:

%M##ení 1 - n=30otmin, bez barviva, hmotnost 248.96g
pA1=291.744;
pB1=257.541;
pC1=28.613;
n1=30;
m1=248.96;
t1=429.92;
dp1=(pB1-pC1)*100000;
m1k=m1/1000;
dmdt1=m1k/t1;
dVdt1=dmdt1/rho;

%M##ení 2 - n=25otmin, bez barviva, hmotnost 210.29
pA2=264.569;
pB2=233.302;
pC2=26.392;
n2=25;
m2=210.29;
t2=433.74;
dp2=(pB2-pC2)*100000;
m2k=m2/1000;
dmdt2=m2k/t2;
dVdt2=dmdt2/rho;

%M##ení 3 - n=20, hmotnost 177.48g
pA3=245.083;
pB3=216.083;
pC3=24.908;
n3=20;
m3=177.48;
t3=443;
dp3=(pB3-pC3)*100000;
m3k=m3/1000;
dmdt3=m3k/t3;
```

---

```

dVdt3=dmdt3/rho;

%M##ení 4 - n=15, hmotnost 123.55g
pA4=223.165;
pB4=196.634;
pC4=23.035;
n4=15;
m4=123.55;
t4=425.56;
dp4=(pB4-pC4)*100000;
m4k=m4/1000;
dmdt4=m4k/t4;
dVdt4=dmdt4/rho;

%M##ení 5 - n=10, hmotnost 83.82g
pA5=187.564;
pB5=164.914;
pC5=20.169;
n5=10;
m5=83.82;
t5=424.94;
dp5=(pB5-pC5)*100000;
m5k=m5/1000;
dmdt5=m5k/t5;
dVdt5=dmdt5/rho;

%Výpočet dat pro konstrukci reogramu
gama1=2*dVdt1/s/h/h*(2+1/n);
gama2=2*dVdt2/s/h/h*(2+1/n);
gama3=2*dVdt3/s/h/h*(2+1/n);
gama4=2*dVdt4/s/h/h*(2+1/n);
gama5=2*dVdt5/s/h/h*(2+1/n);

tau1=h*dp1/2/L;
tau2=h*dp2/2/L;
tau3=h*dp3/2/L;
tau4=h*dp4/2/L;
tau5=h*dp5/2/L;

%Rovnice: gama=2V/b/h/h*(2+1/n), tau=h*dp/2/L
%ru#n# zvolím první nást#el indexu toku n=0,5
%plot(gama1,tau1,'b.',gama2,tau2,'b.',gama3,tau3,'b.',gama4,tau4,'b.',gama5,tau5,'
%z grafu rovnice Tau=K*gama^n

x=[gama1 gama2 gama3 gama4 gama5];
y=[tau1 tau2 tau3 tau4 tau5];

%Fit: 'untitled fit 1'.
[xData, yData] = prepareCurveData( x, y );

% Set up fitype and options.
ft = fitype( 'power1' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';

```

---

---

```

opts.StartPoint = [10338.3939356085 0.382716732438388];

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
coeffvals=coeffvalues(fitresult)

% Plot fit with data.
figure( 'Name', 'untitled fit 1' );
h = plot( fitresult, xData, yData);
legend( h, 'Name#ené hodnoty', 'Mocninový
model', 'Location', 'NorthWest' );
% Label axes
set(0, 'defaultTextInterpreter', 'latex');

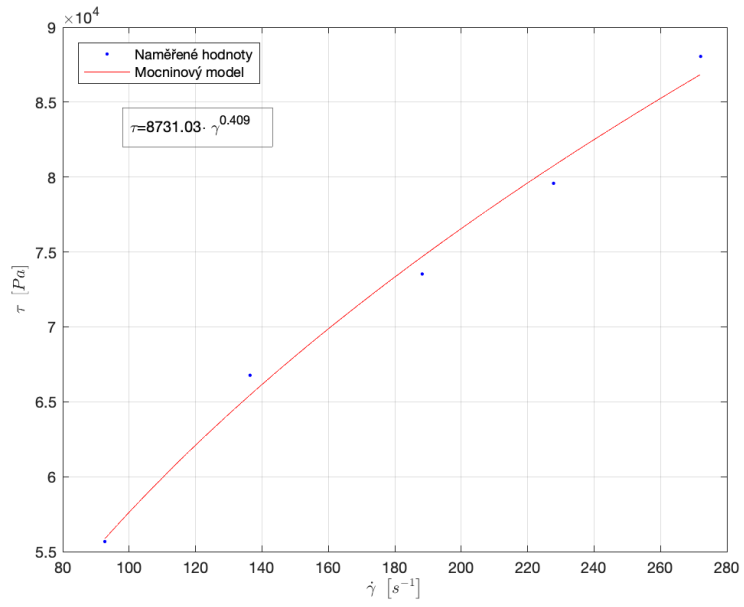
xlabel('$$\dot{\gamma}\sim\left[s^{-1}\right]$$');
ylabel('$$\tau\sim\left[Pa\right]$$');

grid on
dim = [.2 .5 .3 .3];
str = '\tau=8731.03\cdot \gamma^{0.409}';
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

coeffvals =

    1.0e+03 *
    8.7310    0.0004

```



Published with MATLAB® R2017a

## Příloha č.3

---

```
clear all
close all
clc

% Vstupní parametry volím

rmin=11;
hmax=5;
alfa=(pi*32)/180;
u=(25/60)*1000;
S=4.562;
V=u*S;
c=1/3;
d=2/3;

% Výpočet gammy

% ry=rmin + y*sin(alfa)
%
% hy=sqrt(rmin/ry)*hmax
%
% gamma=((6*V)/(pi*ry*hy^2))*e4
%
% R0 výpočet

R0=0.889*(rmin*hmax^2)^c

% Výpočet y0

y0=hmax^c *rmin^c *(6.29 * hmax^c * sin(alfa) + 5.016* rmin^c )

% Maximální pr#m#r pinoly

rmaxp=rmin+(2*R0+y0)*sin(alfa)+((hmax)/2)*cos(alfa)

% Geometrie kanálu
y=2*R0+y0;

ry=rmin+(y*sin(alfa))
%
hy=sqrt(rmin/ry)*hmax
%
for ksi=[0 pi/16 2*pi/16 3*pi/16 4*pi/16 5*pi/16 6*pi/16 7*pi/16
8*pi/16 9*pi/16 10*pi/16 11*pi/16 12*pi/16 13*pi/16 14*pi/16 15*pi/16
16*pi/16]
    deg=180-(180*ksi/pi);
    Rksi=R0*(ksi/pi)^c;
    Dksi=2*Rksi;
    yksi=y0*(ksi/pi)^d *((pi^c*ksi^d*hmax^3*rmin*sin(alfa)+4*R0^4)/
(pi*hmax^3*rmin*sin(alfa)+4*R0^4));
    ryps=rmin+(Rksi+yksi)*sin(alfa);
%     hyps pro y=yksi+Rksi st#ed
```

---

```

hyps=sqrt(rmin/ryps)*hmax;

T=table(deg(:),Dksi(:),yksi(:),ryps(:),hyps(:), 'VariableNames',
{'deg','Dksi','yksi','ryps','hyps'});
disp(T)

gamma=((6*V)/(pi*ryps*hyps^2))*(hyps/hmax);

G=table(gamma, 'VariableNames', {'gamma'});
disp(G)

end

for ksi2=[0 pi/64 2*pi/64 3*pi/64 4*pi/64]
deg2=180-(180*ksi2/pi);
Rksi2=R0*(ksi2/pi)^c;
Dksi2=2*Rksi2;
yksi2=y0*(ksi2/pi)^d * ((pi^c*ksi2^d*hmax^3*rmin*sin(alfa)+4*R0^4)/
(pi*hmax^3*rmin*sin(alfa)+4*R0^4));
ryps2=rmin+(Rksi2+yksi2)*sin(alfa);
%   hyps pro y=yksi+Rksi st#ed
hyps2=sqrt(rmin/ryps2)*hmax;

K=table(deg2(:),Dksi2(:),yksi2(:),ryps2(:),hyps2(:), 'VariableNames',
{'deg2','Dksi2','yksi2','ryps2','hyps2'});
disp(K)
end

R0 =

    5.7811

y0 =

    64.0994

rmaxp =

    53.2147

ry =

    51.0946

```

---

---

hy =

2.3200

<u>deg</u>	<u>Dksi</u>	<u>yksi</u>	<u>ryps</u>	<u>hyps</u>
180	0	0	11	5

gamma

13.201

<u>deg</u>	<u>Dksi</u>	<u>yksi</u>	<u>ryps</u>	<u>hyps</u>
168.75	4.5885	7.2137	16.038	4.1408

gamma

10.933

<u>deg</u>	<u>Dksi</u>	<u>yksi</u>	<u>ryps</u>	<u>hyps</u>
157.5	5.7811	11.953	18.866	3.8179

gamma

10.08

<u>deg</u>	<u>Dksi</u>	<u>yksi</u>	<u>ryps</u>	<u>hyps</u>
146.25	6.6177	16.215	21.346	3.5893

gamma

9.4765

<u>deg</u>	<u>Dksi</u>	<u>yksi</u>	<u>ryps</u>	<u>hyps</u>
135	7.2838	20.24	23.656	3.4096

gamma

9.0021

---

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
123.75	7.8462	24.123	25.862	3.2609

*gamma*  


---

8.6095

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
112.5	8.3378	27.913	28.001	3.1339

*gamma*  


---

8.2742

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
101.25	8.7775	31.638	30.092	3.023

*gamma*  


---

7.9815

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
90	9.177	35.318	32.147	2.9248

*gamma*  


---

7.7221

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
78.75	9.5444	38.965	34.177	2.8366

*gamma*  


---

7.4893

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
67.5	9.8856	42.587	36.187	2.7567



---

*gamma*

7.2784

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
56.25	10.205	46.192	38.182	2.6837

*gamma*

7.0857

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
45	10.505	49.785	40.165	2.6166

*gamma*

6.9085

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
33.75	10.789	53.369	42.14	2.5546

*gamma*

6.7447

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
22.5	11.059	56.948	44.108	2.4969

*gamma*

6.5925

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
11.25	11.316	60.524	46.071	2.4432

*gamma*

---

---

6.4505

<i>deg</i>	<i>Dksi</i>	<i>yksi</i>	<i>ryps</i>	<i>hyps</i>
0	11.562	64.099	48.031	2.3928

*gamma*

6.3175

<i>deg2</i>	<i>Dksi2</i>	<i>yksi2</i>	<i>ryps2</i>	<i>hyps2</i>
-------------	--------------	--------------	--------------	--------------

180	0	0	11	5
-----	---	---	----	---

<i>deg2</i>	<i>Dksi2</i>	<i>yksi2</i>	<i>ryps2</i>	<i>hyps2</i>
177.19	2.8906	2.7339	13.215	4.5618

<i>deg2</i>	<i>Dksi2</i>	<i>yksi2</i>	<i>ryps2</i>	<i>hyps2</i>
174.38	3.6419	4.4188	14.307	4.3843

<i>deg2</i>	<i>Dksi2</i>	<i>yksi2</i>	<i>ryps2</i>	<i>hyps2</i>
171.56	4.1689	5.8772	15.219	4.2508

<i>deg2</i>	<i>Dksi2</i>	<i>yksi2</i>	<i>ryps2</i>	<i>hyps2</i>
168.75	4.5885	7.2137	16.038	4.1408

Published with MATLAB® R2017a

## Příloha č.4

---

```
clear all
close all
clc

%---Výpočet parametrů na výstupu z hlavy---
%Hledám tlak abych mohl pevnostně navrhnout šrouby

%Provozní parametry
hmax=5;
rmin=11;
alfa=(pi*32)/180;
u=(25/60)*1000;
S=4.562;

V=S*u;

gamma=13.201;
y0=64.0994;

%Materiálové vlastnosti
K=8731.03;
n=0.409;

%Geometrie hlavy
L=29.157;
R=1.225;

%Výpočet tlakové ztráty deltap1
deltap1=((2*K*L)/(R))*(V*((3+1/n)/(pi*R^3)))^n

%Viskozita
eta=K*gamma^(n-1)

%Výpočet tlakové ztráty deltap2
deltap2=((8*V*eta)/(sin(alfa)*pi*hmax^3*rmin^(3/2)))*((rmin
+y0*sin(alfa))^(3/2) -rmin^(3/2))

%Výsledná tlaková ztráta = součet - jsem na straně bezpečnosti
deltap=deltap1+deltap2

%---Šrouby---

%Síla
p=10;
beta=(pi*30)/180;
```

---

```

delta=(pi*9.53)/180;
S1=15399.172+487.614
S2=395.228;
S3=411.874;
S4=8.334;

Fc=p*S1*sin(alfa)+p*S2*sin(beta)+p*S3*sin(delta)+p*S4

%Síla na jeden šroub
%počet šroub# = n

n=4;

Fi=Fc/n

%Šroub M12
dd=11.73;
Ss=(pi*dd^2)/4;
%Mez pro 250 stup##
sigmak=875;
%míjivé zatížení 60% meze kluzu
a=0.6;

sigmat=Fi/Ss

sigmad=a*sigmak

k=sigmad/sigmat

deltap1 =

    8.8989e+06

eta =

    1.9001e+03

deltap2 =

    1.0088e+06

deltap =

    9.9077e+06

S1 =

    1.5887e+04

```

---

---

*F<sub>c</sub>* =  
8.6929e+04

*F<sub>i</sub>* =  
2.1732e+04

*sigmat* =  
201.1020

*sigmad* =  
525

*k* =  
2.6106

*Published with MATLAB® R2017a*

**BÖHLER M310**  
**ISOPLAST®**

DIN~X 42 Cr 13  
W. Nr. 1.2083

Chemické složení	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Obsah prvků v %	0,41	0,70	0,45	14,30	0,60	0,20

## Charakteristika

Antikorozi martenzitická chromová ocel, která díky speciálním postupům při výrobě a optimálnímu chemickému složení nabízí vysokou leštitelnost, dobrou odolnost proti korozi, dobrou obrobiteľnosť, fotoleptateľnosť a vysokou odolnosť proti opotrebení otěrem. Materiál je dodávaný v provedení M310 ISOPLAST – elektrostruskově přetaovaný s vysokou čistotou s homogenitou.

## Použití

Formy pro zpracování chemicky agresivních plastů (např. PVC) a plastů s abrazivními vlivy způsobujícími opotřebení materiálů otěrem. Díky vynikající leštitelnosti v provedení ISOPLAST, je ocel vhodná pro formy na výrobu čoček a jiné formy pro optický průmysl.

## Tepelné zpracování

### Žihání na měkko

Teploty 840 až 870 °C.

Regulované pomalé chlazení v peci rychlostí 10 až 20 °C/h, do cca 600 °C, další chlazení na vzduchu. Tvrdost po žihání na měkko max. 200 HB.

### Žihání na odstranění pnutí

Teplota cca 650 °C, po prohřátí v celém průřezu výdrž 1 až 2 hodiny v neutrální atmosféře, následně pomalé chlazení v peci.

### Kalení

1000 až 1050 °C, výdrž na kalící teplotě po plnohodnotném prohřátí 15 až 30 minut.

Ochlazovací prostředí: olej, vzduch.

Dosažitelná tvrdost po kalení: 53 – 56 HRC.

### Popouštění

Bezprostředně po kalení pomalé zahřívání na popouštěcí teplotu. Výdrž na teplotě 1 hodinu na každých 20 mm tloušťky, minimálně však 2 hodiny. Chlazení na vzduchu. Orientační hodnoty dosažitelných tvrdostí jsou uvedeny v popouštěcím diagramu.

## Standardní rozměrový sortiment Böhler M310 ISOPLAST

● Kruhové tyče, žíhané loupané, IBO ECOMAX (mm)

20,5	25,5	30,5	38,8	40,8	45,8	50,8	55,8
60,8	66,0	71,0	76,0	81,0	86,0	91,0	101,5
111,5	121,5	131,5	141,5	151,5	162,0	182,0	202,0

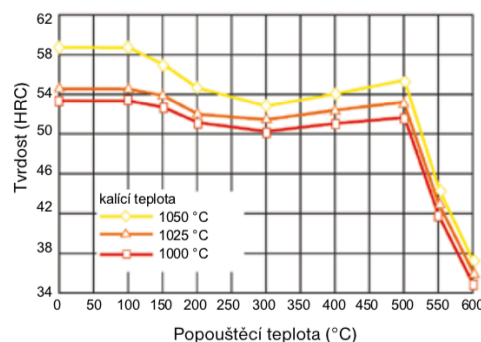
— Desky žíhané

Možnost dělení desek podle požadovaných rozměrů

Šířka (mm)	Tloušťka (mm)
	305,0
1020,0	X

### Popouštěcí diagram BÖHLER M310

Průřez zkušební vzorku: čtyřhran 20 mm



nástrojové oceli pro výrobu forem na plasty