

# Konstrukce vytlačovacího stroje na strunu pro 3D tiskárnu

Bc. Silný Jakub

---

Diplomová práce  
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Jakub Silný</b>
Osobní číslo:	<b>T20785</b>
Studijní program:	<b>N3909 Procesní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Konstrukce technologických zařízení</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Konstrukce vytlačovacího stroje na strunu pro 3D tiskárnu</b>

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Navrhněte technické řešení vytlačovacího stroje.
3. Proveďte reologickou analýzu šneku a válce.
4. Zhotovte výkresovou dokumentaci včetně výkresu sestavy a kusovníku.
5. Zhodnocení výsledků řešení.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. Výrobní stroje a zařízení I. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 264 s. ISBN 978-80-7318-596-1.
2. Konstruktor: CAD – CAM – PLM – obrábění – 3D tisk – výroba – automatizace. Praha: Springwinter, 2013-. ISSN 1805-8590.
3. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. Základy konstruování. Vydání šesté. Brno: CERM, Akademické nakladatelství, 2015, 230 s. ISBN 978-80-7204-921-9.
4. VLČEK, Jiří a Miroslav MAŇAS. Aplikovaná reologie. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001, 144 s. ISBN 8073180391..
5. MALKIN, Aleksandr Jakovlevič a Avraam I. ISAYEV. Rheology: concepts, methods, and applications. Toronto: ChemTec Publishing, 2006, xii, 474 s. ISBN 189519833X.
6. MÜNSTEDT, Helmut. Elastic behavior of polymer melts: rheology and processing. Munich: Hanser Publishers, [2019], xx, 274 s. ISBN 978-1-56990-754-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Janošík, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 10. 5. 2022

Jméno a příjmení studenta: Jakub Silný

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukčním řešením strojního zařízení určeného pro výrobu polymerní struny pro 3D tisk (metoda FDM – Fused Deposition Modeling) technologií vytlačování. V teoretické části práce byl detailně zpracován princip výrobní technologie vytlačování a byly představeny nezbytné komponenty a zařízení pro danou technologii. Dále byl zpracován teoretický rozbor aditivní technologie 3D tisku metodou FDM (Fused deposition modeling) a jeho funkční součásti.

V praktické části byl navržen a zkonstruován vytlačovací stroj na polymerní tiskovou strunu pro 3D tiskárnu, konkrétně pro metodu FDM. Návrh 3D modelu vytlačovacího stroje byl proveden v programu CATIA V5R19 včetně výkresové dokumentace. V dalším bodě praktické části byla provedena reologická analýza šneku a válce pro zadané materiály v software ANSYS Fluent.

Klíčová slova: vytlačovací stroj, metoda 3D tisku FDM, analýza, ABS, PLA, PETG

## **ABSTRACT**

This master thesis deals with the design and construction solution of machinery for the production of polymer strings for 3D printing (FDM method - Fused Deposition Modeling) by extrusion technology. In the theoretical part of the thesis, the production principle of extrusion technology was elaborated in detail and the necessary components and equipment for the technology were introduced. Furthermore, a theoretical analysis of the additive 3D printing technology using the FDM method (Fused Deposition Modeling) and its functional components was processed.

In the practical part, a polymer printing string extrusion machine was designed and constructed for a 3D printer, specifically using the FDM method. The design of the 3D model of the extrusion machine was done in CATIA V5R19 including drawing documentation. In the next point of the practical part, rheological analysis of the screw and cylinder for the specified materials was performed in ANSYS Fluent software.

Keywords: polymer extrusion, method of 3D print FDM, analyze, ABS, PLA, PETG

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Václavovi Janošíkovi, PhD. za jeho odborné rady, připomínky a za ochotu se mnou konzultovat věci, což mi pomohlo ke zpracování diplomové práce. Poděkování také patří mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu studia a poskytli mi dobré podmínky pro studium.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POLYMERY A PLASTY</b> .....	<b>12</b>
1.1 HISTORIE A AKTUÁLNÍ TRENDY V OBLASTI POLYMERŮ .....	13
1.1.1 Historie .....	13
1.1.2 Současnost polymerů .....	15
1.1.3 Vývojové trendy polymerů .....	16
1.2 PŘÍSADY K POLYMERŮM A POLYREAKCE .....	17
1.2.1 Polymerace .....	18
1.2.2 Polykondenzace .....	18
1.2.3 Polyadice .....	18
1.3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ .....	19
1.3.1 Termoplasty .....	20
1.3.2 Reaktoplasty .....	21
1.3.3 Elastomery .....	22
1.4 POLYMERY URČENÉ PRO 3D TISK .....	24
1.5 ZÁKLADNÍ REOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY POLYMERŮ .....	24
1.5.1 Viskózní chování .....	26
1.5.2 Viskoelastické chování .....	27
<b>2 VYTLAČOVÁNÍ</b> .....	<b>29</b>
2.1 HISTORIE VYTLAČOVÁNÍ .....	29
2.2 SOUČASNÉ TRENDY V OBLASTI VYTLAČOVÁNÍ.....	30
2.3 POPIS A PRINCIP VYTLAČOVÁNÍ .....	31
2.3.1 Míchání polymerní směsi .....	33
2.4 VYTLAČOVACÍ STROJE .....	34
2.5 ŠNEKOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE .....	34
2.5.1 Jednošnekové vytlačovací stroje .....	35
2.5.2 Dvoušnekové vytlačovací stroje .....	40
2.5.3 Diskové vytlačovací stroje .....	41
2.5.4 Pístové vytlačovací stroje .....	45
2.5.5 Pohonné jednotky vytlačovacích strojů .....	46
2.6 VYTLAČOVACÍ HLAVY.....	47
2.6.1 Plochá vytlačovací hlava .....	49
2.6.2 Vytlačovací hlava na duté profily .....	50
2.6.3 Vytlačovací hlava na plné profily .....	50
2.6.4 Vytlačovací hlava na opláštění vodičů .....	51
2.7 ZÁKLADNÍ TYPY VÝROBNÍCH LINEK .....	51
2.7.1 Linka na vyfukování fólií .....	52

2.7.2	Linka na vytlačování trubek.....	53
2.7.3	Linka na opláštění vodičů.....	54
<b>3</b>	<b>TECHNOLOGIE 3D TISKU .....</b>	<b>55</b>
3.1	HISTORIE 3D TISKU .....	55
3.2	AKTUÁLNÍ VÝVOJ TRENDŮ V OBLASTI 3D TISKU.....	56
3.3	VÝHODY A NEVÝHODY 3D TISKU .....	57
3.3.1	Výhody 3D tisku .....	57
3.3.2	Nevýhody 3D tisku .....	57
3.4	ROZDĚLENÍ METOD PRO 3D TISK .....	57
3.5	METODA 3D TISKU FDM .....	58
3.5.1	Materiály filamentu pro FDM 3D tisk .....	59
3.6	METODA 3D TISKU SLA .....	61
3.7	METODA 3D TISKU SLS .....	61
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>62</b>
<b>4</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ.....</b>	<b>64</b>
5.1	POUŽITÉ PROGRAMY .....	64
<b>6</b>	<b>NÁVRH KOMPONENTŮ VYTLAČOVACÍHO STROJE.....</b>	<b>65</b>
6.1	VOLBA MOTORU .....	65
6.2	VOLBA PŘEVODOVKY .....	67
6.3	VOLBA SPOJKY .....	68
6.4	ULOŽENÍ ŠNEKU DO TĚLA STROJE.....	70
6.4.1	Volba ložiska.....	70
6.5	DIMENZOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH SOUČÁSTÍ STROJE.....	72
6.5.1	Obecné charakteristiky šneku a válce .....	72
6.5.2	Konkrétní hodnoty dimenzování.....	73
6.5.3	Materiál a polotovar šneku.....	75
6.5.4	3D model navrženého šneku .....	75
6.6	NÁVRH VÁLCE.....	76
6.6.1	Materiál a polotovar válce.....	76
6.7	NÁVRH TĚLA STROJE .....	77
6.7.1	Materiál a polotovar těla .....	77
6.8	NÁVRH PŘÍRUBY POHONU.....	79
6.9	VOLBA CHLADIČE A CHLAZENÍ TĚLA .....	79
6.10	NÁVRH NÁSYPNÉHO SYSTÉMU .....	81
6.10.1	Vyprázdňení násypky.....	83
6.11	NÁVRH ZÁKLADNY STROJE.....	84



6.12	VOLBA KUŽELOVÉ HLAVY .....	85
6.13	NÁVRH TRYSKY .....	85
6.14	CHLAZENÍ ZA TRYSKOU .....	86
6.15	VYTÁPĚNÍ VÁLCE A REGULACE TEPLoty .....	86
6.15.1	Topné pásy .....	86
6.15.2	Regulace teploty .....	88
6.16	OSTATNÍ ELEKTRO KOMPONENTY .....	89
6.17	VIZUALIZACE KOMPLETNÍHO NÁVRHU VYTLAČOVACÍHO STROJE .....	90
<b>7</b>	<b>ANALÝZY V ANSYS FLUENT .....</b>	<b>91</b>
7.1	STRUKTURNÍ STROM ANALÝZY .....	91
7.2	GEOMETRIE .....	92
7.3	VYSÍŤOVÁNÍ GEOMETRIE .....	93
7.4	MODUL FLUENT .....	95
7.4.1	Obecné nastavení a výběr modelu .....	96
7.4.2	Charakteristiky materiálu .....	97
7.4.3	Okrajové podmínky .....	98
7.4.4	Hybridní inicializace .....	99
7.4.5	Kalkulace výpočtu .....	100
7.5	VÝSLEDKY ANALÝZY .....	101
7.5.1	Výsledky pro ABS .....	101
7.5.2	Výsledky pro PLA .....	103
7.5.3	Výsledky pro PETG .....	105
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>107</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>108</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>112</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>114</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>118</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>119</b>

## ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá návrhem, výpočtem a konstrukčním řešením strojního zařízení určeného pro výrobu polymerní struny pro 3D tisk (metoda FDM – Fused Deposition Modeling) technologií vytlačování.

Vytlačování polymerů je velmi rozšířenou a základní technologií pro zpracování surového polymerního materiálu ve formě granulí, prášku nebo vloček do požadovaného polotovaru či finálního výrobku. Pro vytlačování filamentu pro metodu 3D tisku FDM se používají klasické jednošnekové vytlačovací stroje a zpravidla se využívají přímé vytlačovací hlavy, které zajišťují rozměrovou a teplotní stálost extrudátu. Metoda FDM umožňuje velmi širokou škálu použití tisknutého polymerního materiálu, který se volí dle daného typu využití následného výrobku. Filament pro 3D tisk má nejčastěji kruhový průřez a po vytlačení vytlačovací hlavou je následně odvíjecím zařízením odtahován na navíjecí zařízení, nejčastěji buben či špulka.

Metoda 3D tisku FDM je v současnosti velmi propagovaná a hojně využívaná nekonvenční metoda pro výrobu prototypů a tvarově složitých dílců. Jedná se o vytvoření součásti pomocí tiskové struny (filamentu), kdy je tisková struna vedena do extrudéru, ve kterém dochází k plastifikaci polymerního materiálu vlivem působení tepelné energie. Následně dochází k opakované distribuci polymerní taveniny na tiskovou podložku ve formě tenkých vrstev v rovině XY.



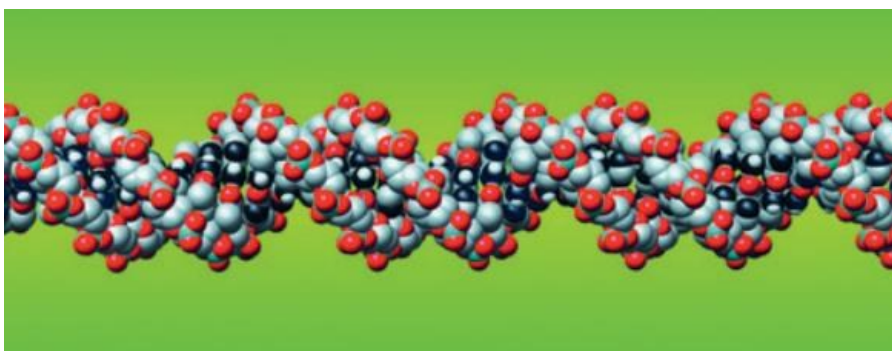
Obr. 1.: Ukázka vytlačovacího stroje na polymerní strunu [7]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

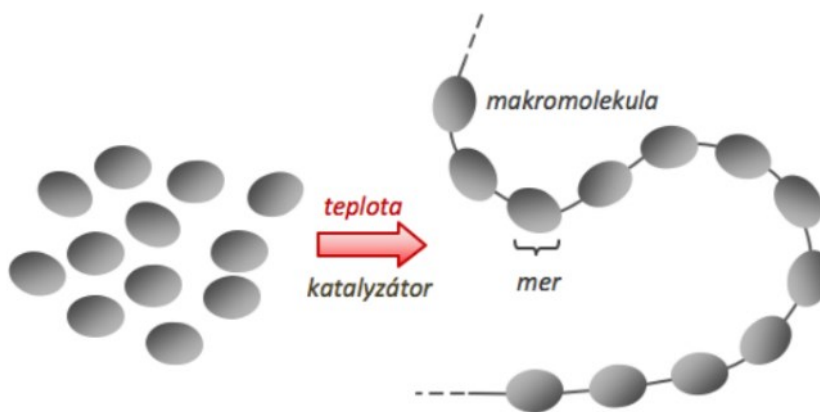
## 1 POLYMERY A PLASTY

Rozdíl mezi významy slov polymer a plast není žádný, obě slova znamenají totéž. Slovo polymer pochází ze složení dvou řeckých slov „poly“, což znamená mnoho nebo více, a „meros“, což znamená jednotka.

Plast jako takový se dá definovat jako technický materiál založený na bázi polymerů, častokrát s různými přísadami, které materiálu dodávají požadované vlastnosti jako například barviva či změkčovadla. Polymery jsou velké makromolekuly, ve kterých se molekuly monomerů navzájem vážou do dlouhých řetězců. V jednom polymerním řetězci může být i několik tisíc monomerních molekul. [2]



Obr. 2.: Polymerní řetězec [2]



Obr. 3.: Schéma makromolekuly [3]

Polymery jsou chemické látky, které mají neobvyklou šíři vlastností. Ve svých obrovských molekulách obsahují většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru ale i jiných prvků. Polymery jsou ve formě součásti prakticky v pevném (tuhém) stavu, ale v určitém stádiu zpracování se nachází v pseudoplastickém stavu, který umožňuje většinou za zvýšené teploty a tlaku, udělit budoucímu výrobku nejrůznější tvary, podle předpokládaného použití. [5]

Polymery jsou v oblasti technických materiálů a technologických aplikací v průmyslu přelomovým bodem ve vývojové etapě materiálů, ale i polymery mají své kladné a záporné vlastnosti a to fyzikální, chemické či zpracovatelské.

Tab. 1.: Výhody a nevýhody polymerních materiálů [3]

<b>Přednosti polymerů</b>
Nízká hustota materiálu
Tepelný izolant
Elektrický izolant
Odolnost proti povětrnosti a korozi
Chemická odolnost
Snadná zpracovatelnost
Nižší vynaložená energie při zpracování
Efektivní využití sluneční a větrné energie

<b>Nedostatky polymerů</b>
Hořlavost materiálu
Odolnost vůči nízkým teplotám
Vysoká teplotní roztažnost
Vytváření elektrostatického náboje
Nízká odolnost proti UV záření
Časová závislost užitečných vlastností, křep

## 1.1 Historie a aktuální trendy v oblasti polymerů

Všechny námi používané materiály si musely projít objevením, výzkumem a následným rozvojem. Polymery nejsou v tomto klasickém evolučním vývoji každého technického materiálu výjimkou. U polymerních materiálů je tento objev datován v roce 1496, kdy celosvětově známý cestovatel Kryštof Kolumbus přivezl z Ameriky do evropských zemí první kaučukové míče. [3]

### 1.1.1 Historie

Kaučuk, který K. Kolumbus přivezl do Evropy však našel své první uplatnění až přibližně 300 let po tomto objevu. V roce 1791 byl poprvé použit přírodní kaučuk v aplikacích technického rázu konkrétně pro výrobu nepromokavých plášťů, výrobu lepidla v terpentýnu či pro výrobu pryže chemickým procesem vulkanizace s pomocí síry. Velmi důležitým milníkem v historii kaučuků byl v roce 1888 vynález a patent pneumatiky britským vědcem

Dunlopem. Hned se nevyráběly pneumatiky pro osobní automobily, jak bychom se mohli domnívat, nýbrž pro jízdní kola. Počátek výroby prvních pneumatik pro osobní automobily je datován v roce 1906. [3]

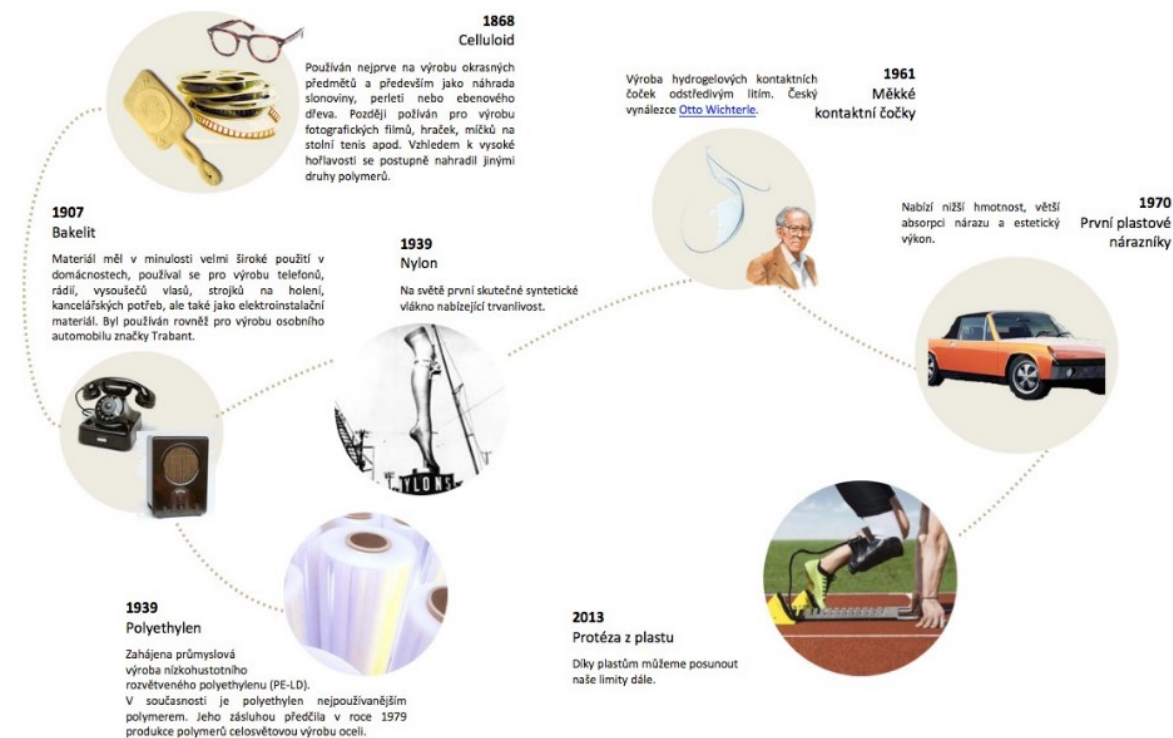


*Obr. 4.: Ukázka brazilského kaučukovníku a přírodního kaučuku [3]*

Vývoj polymerů, nikterak kaučuků, zaznamenal v roce 1846 rázný posun, když se podařilo popsat první uměle připravený tedy neúplně syntetický polymer, který nesl název nitrát celulózy. Tento polymer byl zpočátku využíván jako druh výbušniny až později k přípravě polymerů. Objev tohoto polymeru je spojen s hrou kulečnick. V té době se kulečnick hrál s kouli ze slonoviny. Bratři Hyattové spojením nitrátu celulózy a kafru připravily materiál, který plně zastupoval roli slonoviny v kulečnickové kouli. Chemickými procesy připravili ještě neúplně syntetický polymer, jelikož byl založen na bázi přírodní makromolekulární látky – celulózy. Jeho název byl celuloid, který byl v pozdějších letech hojně využíván ve vývoji filmového průmyslu a kinematografie. [3]

Úplně syntetický polymer se podařilo vyrobit v roce 1907, kdy americký chemik Baekeland připravil fenol formaldehydovou pryskyřici, později nesla obchodní název bakelit. Tato pryskyřice našla uplatnění ve velmi široké oblasti průmyslových aplikací. Lidské společnosti, která se vyvíjela neúprosným tempem, byla motivací v rozvoji syntetických polymerů skutečnost potřeby lepších izolantů v elektrotechnickém průmyslu. V průběhu první poloviny dvacátého století se poté rozběhl další výzkum syntetických polymerů a byli připraveny známé polymery jako polyvinylchlorid (PVC), polymethylmethakrylát (PMMA), močovinoformaldehydové pryskyřice, polystyren (PS), chloroprenový kaučuk, polyestery, polyamidy (PA6 – silon, PA66 – nylon), rozvětvený nízkohustotní polyethylen (LDPE) či polytetrafluorethylen (PTFE). [3]

Ve druhé polovině dvacátého století začal vývoj polymerních materiálů zrychlovat a na trh byl uveden podstatný konstrukční polymer akrylonitril-butadien-styren, který je v dnešní době velmi využívaný polymer v oblasti konstrukčních aplikací díky své houževnatosti, tuhosti a teplotní odolnosti v širokém rozsahu hodnot. Dalšími syntetickými polymery byly: epoxidová pryskyřice, lineární vysokohustotní polyethylen (HDPE), polypropylen (PP) či polykarbonát (PC) a další varianty různých kopolymerů. [3]



Obr. 5.: Významné milníky ve výzkumu polymerních materiálů [3]

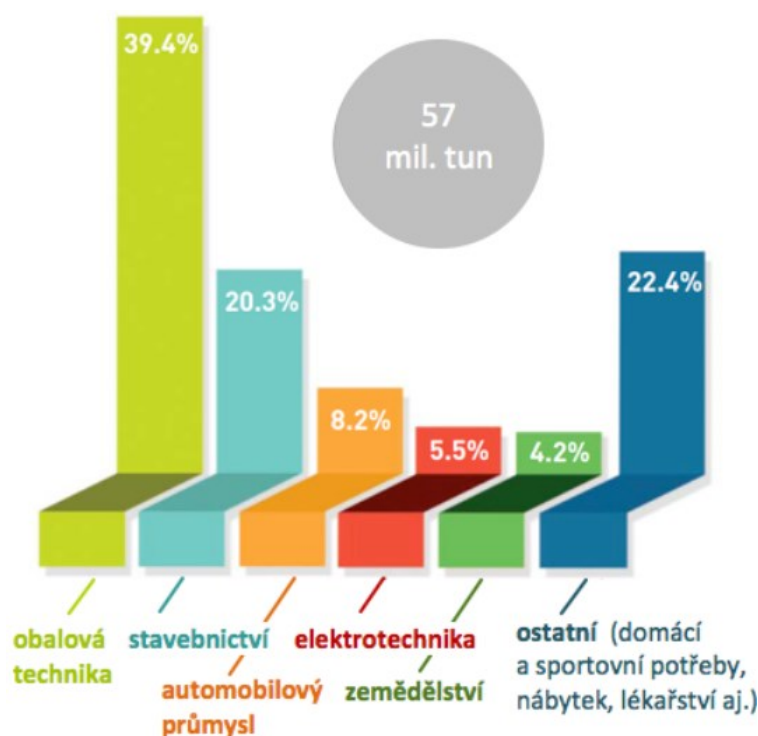
### 1.1.2 Současnost polymerů

Současnost polymerů a její vývojové trendy jsou velmi ožehavými a diskutovanými tématy mezi mnoha vědci, společnostmi ale i u širokou veřejnost. S postupným vývojem společnosti a rostoucími požadavky na technické součásti a strojní zařízení se lidé snažili vynalézt druh materiálu, který by uspokojil jejich potřebu. Jednalo se například o nižší hmotnost výrobku, odolnost vůči korozi, životnost a v neposlední řadě ekonomicky a ekologicky přijatelný materiál. S těmito parametry jsou polymery v souznění, a proto se dostávají více do popředí jako konstrukční materiály ve velkém množství průmyslových aplikací viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** [2],[3],[13]

### 1.1.3 Vývojové trendy polymerů

Dnešní trendy vývoje polymerů se ubírají směrem praktického vývoje pro technické či technologické uplatnění a zaměřují se především na zlepšení užitečných a zpracovatelských vlastností. Důležité užité vlastnosti jsou pro mnoho uživatelů aspekty jako mechanické a fyzikální vlastnosti a životnost materiálů, přičemž v pořadí důležitosti těchto kritérií hraje významnou roli jejich oblast aplikace. Se zvyšující se kvalitou nových polymerů musí být zároveň kompenzována cenová náročnost těchto materiálů pro výrobce, ale i pro zpracovatele a konečného spotřebitele. Zpracovatelské vlastnosti jsou rozhodujícím faktorem pro efektivitu a náklady zpracování. Tyto vlastnosti mohou být dané například u termoplastů jejich reologickými vlastnostmi. Zmíněné zpracovatelské vlastnosti se dostávají do popředí čím dál více především kvůli jejich využití v automobilovém průmyslu. [25]

Velmi aktuálním tématem a požadavkem na vývoj nových polymerních materiálů je zvýšení bezpečnosti provozu a spolehlivosti při minimálním či úplném vyloučení ekologických rizik při jejich recyklaci nebo likvidaci po ukončení používání daného výrobku. Vývoj 3D tisku u polymerních materiálů také nezůstává pozadu. Lidé se snaží nalézt či připravit takové materiály, které by se svými mechanickými vlastnostmi alespoň přiblížily plastovým výrobkům, které jsou v současné době opracovávány pomocí konvenčních technologií. [3]

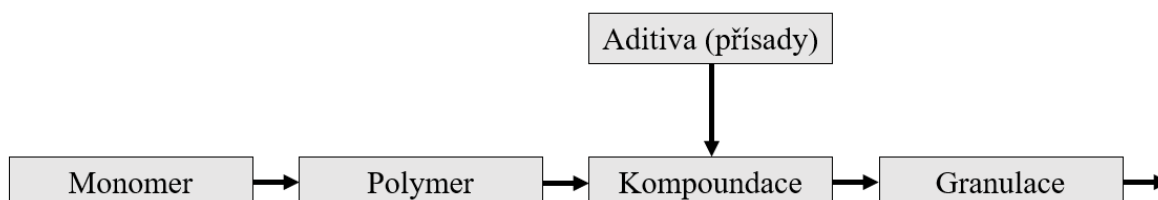


Obr. 6.: Evropská data o spotřebě a aplikacích polymerů [3]



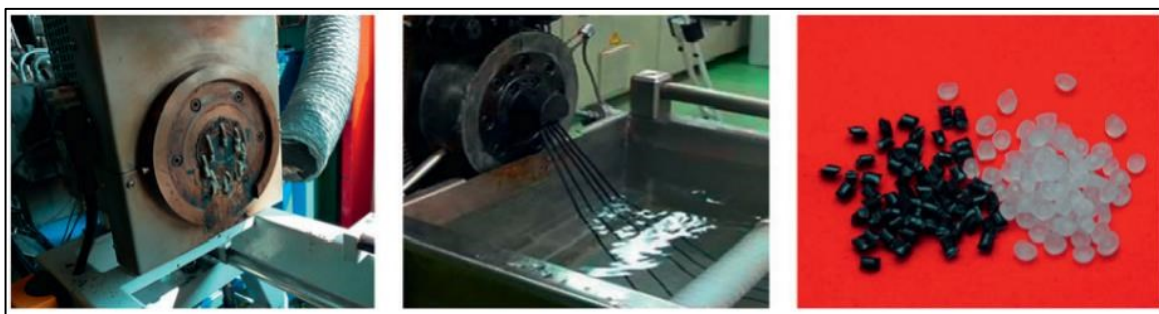
## 1.2 Přísady k polymerům a polyreakce

Polymerní materiály, určené pro jakýkoliv zpracovatelský proces plastikářské technologie, mají strukturu samotného polymeru, ke kterému jsou přidávány různé druhy přísad, které používáme pro zlepšení fyzikálních, chemických, elektrických a teplotních vlastností finálního polymeru.



Obr. 7.: Postup polyreakce a následné přidání aditiv [2]

Na obrázku níže je znázorněna metoda smíchání polymeru a přísad ve vytlačovacím stroji. Tento proces se odborně nazývá kompoundace. Z vytlačovací hlavy vychází několik drátů kruhového průřezu, které jsou následně na speciálních strojích rozsekány na malé válečky, tedy na granulace, což je výsledný produkt kompoundování polymerů. [2]



Obr. 8.: Praktická ukázka vytlačení směsi polymeru s aditivou [2]

Prostý polymer je vyroben určitým druhem polyreakce, při které se pomocí chemického procesu stávají monomerní jednotky ve struktuře makromolekulárními látkami. Polyreakce můžeme rozdělit do tří skupin: [3],[26]

- polymerace – výroba polyolefinů (PE, PP), styrenových polymerů (ASA, SAN, PS), polyakrylátů (PMMA), PVC,
- polykondenzace – výroba polyamidů (PA), polykarbonátů (PC), nasyčených polyesterů (PET, PBT, LCP),
- polyadice – proces syntézy lineárních polyuretanů (PUR), epoxidová pryskyřice.

### 1.2.1 Polymerace

Pro polymeraci je typické, že od začátku reakce se v reakční směsi nachází jak monomerní, tak polymerní látky, které vznikly reakcí. Reakce se sama od sebe nespustí a je potřeba do systému dodat iniciátory. Dle typu iniciátoru můžeme polymerace rozdělit na radikálové a iontové. Polymerace je řetězová růstová reakce, při které spolu reagují malé molekuly monomeru a propojí se do velké řetězovité molekuly polymery. Typickým jevem pro polymeraci je zapojení celá molekuly monomeru do procesu tvorby makromolekulárního řetězce, tudíž nevzniká vedlejší produkt. Polymerace můžeme rozdělit podle způsobu provedení na následující druhy: [3],[13],[27]

- bloková polymerace,
- roztoková polymerace,
- suspenzní polymerace,
- emulzní polymerace.

### 1.2.2 Polykondenzace

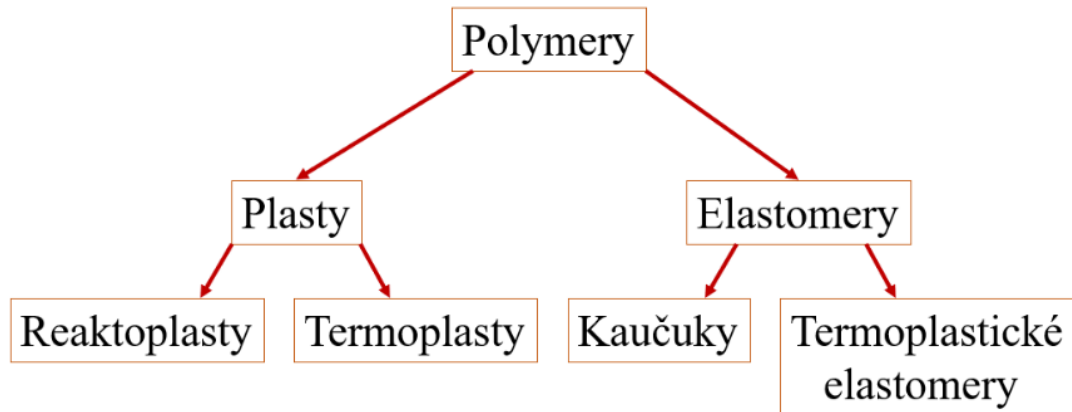
Polykondenzace je kroková (stupňovitá) růstová reakce multifunkčních molekulárních stavebních bloků. U této polyreakce se také spojují monomery do dlouhých řetězců, avšak při každém následujícím připojení další monomerní polymerní jednotky se odštěpí vedlejší produkt. Finální polymer se tedy významně liší chemickým složením od výchozích sloučenin. V tomto ohledu je to rozdíl oproti polymeraci zmíněné v předchozí kapitole. Rychlost polykondenzace opět v porovnání s polymerací, která může trvat zlomky sekund, je menší. Výhodou této metody polyreakce je skutečnost, že chemický proces polykondenzace můžeme přerušit v jakémkoliv stádiu a následně v procesu opět bez problémů pokračovat. [3],[13]

### 1.2.3 Polyadice

Polyadice je kroková (stupňovitá) růstová reakce. Při této stupňovité polyreakci spolu reagují dva naprosto odlišné typy monomerů, které v molekule obsahují reaktivní atomové skupiny. Tento druh polyreakce přínosný v tom, že při chemickém procesu nevzniká žádný vedlejší produkt, ale vodíkový atom se přesouvá z jedné reaktivní skupiny na jinou. Tímto jevem dochází v systému ke slučování (adici). [3],[13]

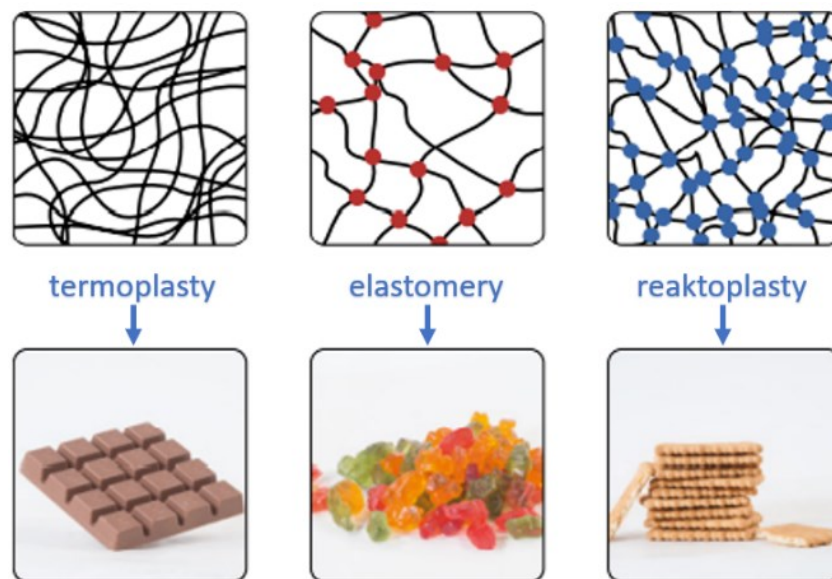
### 1.3 Základní rozdělení polymerů

Polymery v dnešní době představují obrovskou škálu využití, přičemž dominují celkovému světovému průmyslu v použití jako konstrukčních materiálů. Polymery můžeme rozdělit do dvou základních skupin, které se dále dělí na další podskupiny viz obrázek níže.



Obr. 9.: Schéma rozdělení polymerů

Pro zjednodušení a porozumění problematice je zajímavé přirovnání jednotlivých druhů polymerů k lidským potravinám konkrétně k sladkým pochutinám. Termoplasty jsou jako čokoláda dají se rozpustit a zpět nechat ztuhnout. Elastomery se vyznačují také vysokou elasticitou a vrácením do původního stavu právě jako gumoví medvídci. Reaktoplasty se chovají jako sušenka či dort, jednou je upečeme, proběhne chemická reakce a dále už se nedají zpracovávat. [13]



Obr. 10.: Přirovnání polymerů k potravinám [13]

### 1.3.1 Termoplasty

Materiály, které na začátku zahřívání začnou měknout a poté je můžeme tvářet. Zahřátím nad teplotu tání termoplast přechází do stavu, ve kterém se stává taveninou. Když tento jev opakujeme reverzně stává se z taveniny opět tuhé těleso. V materiálu během těchto cyklů dochází ke strukturním změnám vlivem fyzikálních změn. Tento děj měknutí a tuhnutí je vratný a dá se říct do nekonečna opakovatelný.

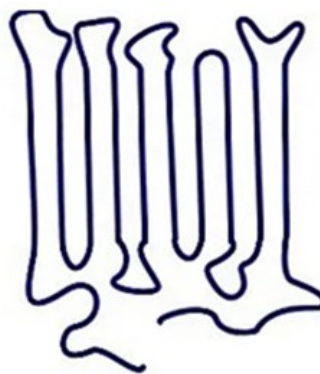
Termoplasty se dále dělí na: [21]

- **amorfní**
  - makromolekuly jsou přítomny neuspořádaně vedle sebe nebo propletené,
  - skládají se z ataktických polymerních řetězců,
  - mají nízkou hustotu,
  - například: PS, PMMA, PC, ABS, SAN a další.
  
- **semikrystalické**
  - makromolekuly jsou pravidelně uspořádány a jsou schopny krystalizovat,
  - skládají se ze syndiotaktických a izotaktických polymerních řetězců,
  - mají vysokou hustotu,
  - například: PE, PET, PP, PA, POM, PBT a další.

Na obrázku níže je srovnání amorfní a semikrystalických polymerů v řetězcové síti.



Amorfní polymer



Semikrystalický polymer

Obr. 11.: Amorfní a semikrystalické řetězce [21]



Obr. 12.: Výrobky z termoplastů

### 1.3.2 Reaktoplasty

Druh amorfních polymerů, které jsou tavitelné a tvarovatelné jen po určitou dobu po zahřátí materiálu. Během následujícího zahřívání dochází k chemické změně, při které se původní molekuly zesítují a tímto okamžikem se stávají netavitelné a nerozpustné. Dochází k procesu tzv. vytvrzování to znamená, že chemická reakce způsobí vznik zesíťované struktury polymeru. Jedná se o nevratný proces a vytvrzený materiál již nelze znovu tvarovat, svařovat ani ho nemůžeme jakýmkoliv způsobem převést do taveninového stavu. Výrobky z reaktoplastů mají velkou chemickou a tepelnou odolnost nebo také tvrdost a tuhost. Reaktoplasty považujeme za neobtnající. Reaktoplasty v nevytvrzeném stavu nazýváme jako pryskyřice. Příklady pryskyřic mohou být fenolformaldehydová pryskyřice (PF), epoxidová pryskyřice (EP) nebo polyesterová pryskyřice (UP). Na obrázku níže jsou uvedeny příklady použití reaktoplastů. [3],[13]



Obr. 13.: Příklady použití reaktoplastů [3]

### 1.3.3 Elastomery

Elastomery jsou vysoce pružné (elastické) polymerní materiály, které mají velmi nízkou tuhost a jsme schopni je relativně malou silou deformovat či tvarovat, aniž bychom je jakýmkoliv způsobem porušily. Ve většině případů je tato deformace vratná.

#### Kaučuky

Nejznámějším zástupcem z řad elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se následnou vulkanizací vyrábí pryže. Proces vulkanizace je chemický proces, při kterém dochází k řídkému zesíťování molekul a následná pryž získává vysokou pružnost (elasticitu) a je odolná proti trvalé deformaci. Nejčastěji vulkanizace probíhá pomocí síry, při které se teploty síťování pohybují od 140 °C do 160 °C. Můžeme také vulkanizovat pomocí peroxidu či oxidem zinku. Atomy síry v systému tvoří příčné vazby mezi původními lineárními řetězci makromolekul kaučuku. Samotná pryž ovšem nevzniká pouze ze samotného kaučuku, nýbrž z gumárenské směsi, která se skládá kromě kaučuku ze speciálních přísad, bez kterých by vulkanizace byla jen těžko možná. Důležitá věc je, že surový kaučuk je za tepla lepivý, zastudena tuhý a nepružný materiál, ale následně upravený vulkanizát má vysokou elasticitu v širokém spektru teplot. Pryž je amorfním polymerem s nízkou teplotou skelného přechodu  $T_g$ , jelikož během zvulkanizování kaučuku vznikly řídké chemické (příčné) vazby mezi makromolekulami, které jsou uzly polymerní prostorové sítě. [3],[13]

Kaučuky můžeme rozdělit na další dvě skupiny: [3]

- a) kaučuky pro všeobecné (komoditní) použití
  - hlavními představiteli jsou přírodní a syntetický kaučuk a jejich předností je nízká cena a velký objem spotřeby,
  - příklady použití: pneumatiky, hadice, dopravní pásy, těsnění, gufera atd.



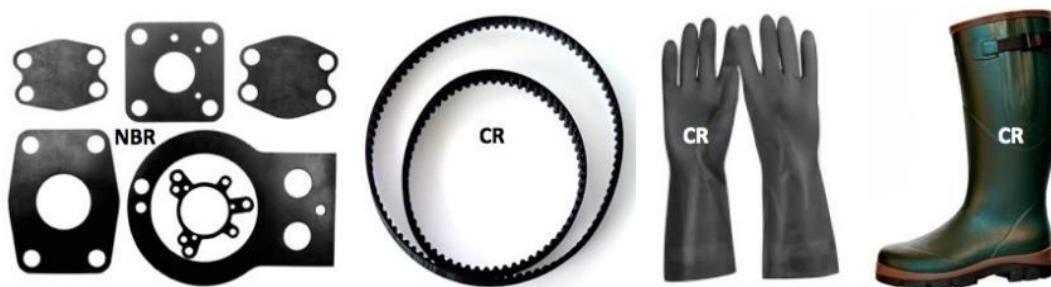
Obr. 14.: Ukázka pneumatik pro osobní automobily [23]



Obr. 15.: Další příklady využití technické pryže [22]

b) kaučuky pro speciální využití

- tyto kaučuky využíváme v aplikacích, při kterých je vyžadována například dlouhodobá rezistence proti olejům nebo obecně zdraví škodlivým látkám či v případech vysoké aplikační teploty,
- příklady použití: těsnění v olejových prostředích, rukavice, řemeny, boty atd.



Obr. 16.: Příklady použití speciálních kaučuků [3]

### Termoplastické elastomery – TPE

Termoplastické elastomery jsou speciální skupinou polymerů, které zaujímají ve struktuře polymerů pozici mezi termoplasty a elastomery. Jsou to polymery s dvoufázovou polymerní architekturou, tvořenou vzájemně nemísitelnými měkkými a tvrdými segmenty, aby vytvořili oddělené fáze systému. Měkké segmenty (elastomery) ve struktuře dávají systému žádanou vysokou elasticitu a ohebnost. Tvrdí segmenty (termoplasty) naopak poskytují své kladné vlastnosti jako velkou tuhost a vysokou teplotu skelného přechodu a tání. Termoplasty také dodají systému požadovanou lepší zpracování polymeru a recyklovatelnost. Příklady aplikací termoplastických elastomerů mohou být různé a všestranné. [3]



Obr. 17.: Příklady aplikací termoplastických elastomerů [3]

#### 1.4 Polymery určené pro 3D tisk

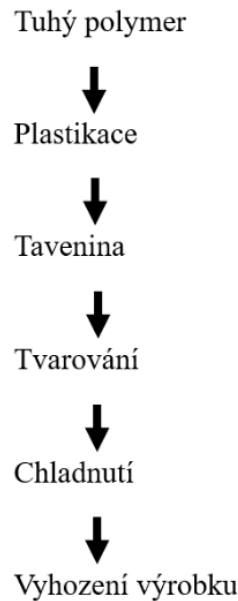
Technologie 3D tisku typu FDM (z anglické zkratky Fused Deposition Modeling) využívá ke své práci několik druhů polymerních materiálů. Všechny typy polymerních materiálů nejsou určeny pro tuto technologii rapid prototypingu. Polymery vhodné pro metodu 3D tisku FDM budou detailně popsány a teoreticky rozebrány v další, konkrétně třetí části teoretické sekce diplomové práce [3.5.1], která se zabývá samotným 3D tiskem jako celkem.

#### 1.5 Základní reologické charakteristiky polymerů

Reologie je věda, která se zabývá deformací a tokem látek. Odborný termín reologie pochází ze spojení dvou řeckých slov, a to „rhei“, což znamená tečení a „logos“, což znamená učení. Znalosti tokového chování materiálu jsou nepostradatelnou součástí plastikářské oblasti. Tato vědomost umožňuje přizpůsobit návrh a konstrukci tvářecích nástrojů, které musí odolávat tlaku generovaného z vytlačovacího stroje či můžeme s pomocí znalostí reologie orientační stavy v polymerních řetězcích. Každý materiál může téct, je-li mu poskytnut dostatečný čas.[10],[13]

Naprostým základem výroby polymerních dílů je vytvoření taveny z pevného polymeru a následném vytlačení taveniny z polymeru přes vytlačovací hlavu, přičemž tvar vytlačovací hlavy (hubice) odpovídá následnému tvaru polotovaru či finálního dílu. Můžeme tedy konstatovat, že faktory jako tok taveniny a přenos tepla hrají velmi důležitou roli ve zpracovatelských procesech polymerů. [6]





Obr. 18.: Princip výroby polymerních součástí

Nízkomolekulární kapaliny, respektive jejich tok vykazuje newtonské chování kapaliny. Makromolekulární látka, kterou může být například tavenina termoplastu, ovšem vykazuje významné znaky nenewtonského (pseudoplastického) chování. Newtonské tokové chování je nejjednodušší aproximací reologického chování polymerních tavenin. Tok polymerní taveniny v kanálech vytlačovací hlavy a při polymerních zpracovatelských procesech mají ve velké většině případů smykový charakter proudění. Při smykovém toku se disipuje energie, což znamená přeměnu mechanické energie na tepelnou.[11],[15]

Při smykovém toku můžeme měřit reologické charakteristiky dané polymerní taveniny.

Parametry, které můžeme měřit při smykovém toku jsou následující: [10]

- a) ITT – index toku taveniny (anglicky MFI – melt flow index),
- b) Toková křivka (výtlačné a rotační reometry),
- c) Skluz na stěně (výtlačné reometry),
- d) vliv  $N_1$  (rotační a výtlačné reometry – širokoštěrbinová hlava).

Přičemž, index toku taveniny ITT je množství materiálu v gramech, vytlačené za 10 minut, při přesně definovaných podmínkách.  $N_1$  je vliv prvního rozdílu normálových napětí (provádí se na rotačním a výtlačném reometru se šterbinovou hlavou).

Reologické chování můžeme rozdělit do tří skupin:

- elastické chování,
- viskózní chování,
- viskoelastické chování.

### 1.5.1 Viskózní chování

Smyková viskozita  $\eta$  charakterizuje míru odporu kapaliny proti aplikované smykové síle a je definována jako podíl smykového napětí  $\tau$  ku rychlosti smykové deformace  $\dot{\gamma}$ . Jednotky viskozity jsou pak Pa.s. Numericky vyjádřená smyková viskozita poté vypadá: [10],[15]

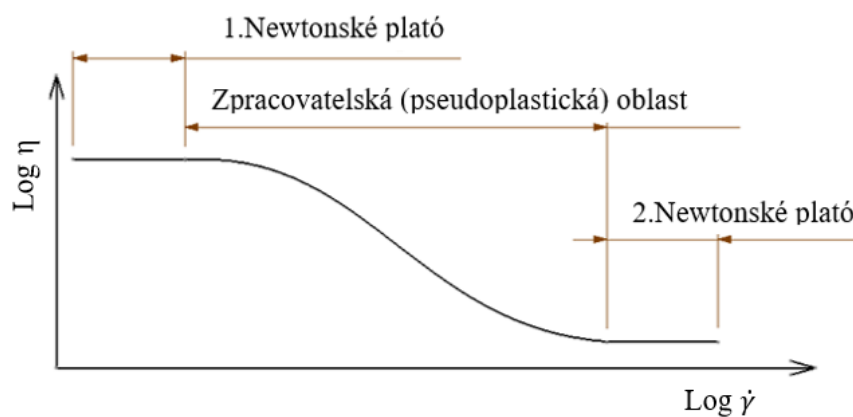
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [Pa \cdot s] \quad (1)$$

Existuje druhý typ viskozity a to elongační (tahová) viskozita  $\eta_E$ , která charakterizuje odpor kapaliny vůči protahování a je přímo úměrná takovému napětí  $\sigma$  a nepřímo úměrná rychlosti tahové deformace  $\dot{\epsilon}$ . Numericky vyjádřená elongační viskozita poté vypadá: [10],[15]

$$\eta_E = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} [Pa \cdot s] \quad (2)$$

Soustředme se nyní na smykovou viskozitu, která má více vypovídající hodnotu pro tokové vlastnosti ve vytlačovacích stojích či hlavách. Newtonské chování je nejjednodušším typem chování, kde je viskozita konstantní. Smykové napětí lze z předchozích vztahů zapsat tímto způsobem: [15]

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} [Pa] \quad (3)$$



Obr. 19.: Závislost smykové viskozity na rychlosti smýkání [15]

Jak již bylo řečeno polymerní taveniny vykazují znaky nenevtonského chování. Jak je patrné z obrázku výše, tak polymery jsou obecně newtonské v oblasti nízkých rychlostech smykových deformací, čemuž se říká newtonské plató. Jakmile se polymer dostane do oblastí s vyššími rychlostmi smýkání začíná smyková viskozita klesat. Tento děj se nazývá smykové ztenčení. [15]

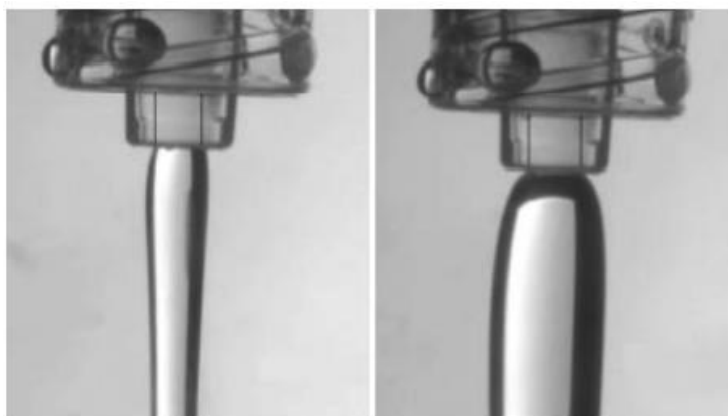
### 1.5.2 Viskoelastické chování

Těleso se chová částečně jako viskózní (při malých rychlostech smykové deformace) a částečně jako elastické (při vyšších rychlostech smýkání). Nejenom viskozita charakterizuje taveniny polymeru při tečení. Polymer je také charakterizován určitou elasticitou. Tato elasticita je doložena například při experimentálním procesu Weissenbergova efektu. [15]



Obr. 20.: Experimentální pokus Weissenbergova efektu [15]

Roztok polymeru při rotování míchadla šplhá po tyči nahoru. Důvodem tohoto jevu je generování smykových napětí vlivem vysoké rotační energie míchadla. K tomuto efektu dochází vlivem prvního rozdílu normálových napětí  $N_1$ . U vody, jakožto newtonské kapaliny by k tomuto jevu nedošlo. [10],[15]



Obr. 21.: Narůstání polymeru za hubicí (vlevo – voda, vpravo – polymer) [15]

Děj narůstání za hubicí, při kterém extrudát zvětšuje svůj průměr při výstupu z vytlačovací hlavy. Tento průměr při zvyšování rychlosti průtoku ještě více naroste. U vody tento jev nenastane z důvodu nulových smykových napětí při výtoku. Naopak polymerní roztok generuje smyková napětí, vliv  $N_2$  druhého rozdílu normálových napětí tzv. korýtkový jev. [10],[15]

Viskoelastické chování je složité na numerické popsání jevu, nicméně existuje několik modelů, které tento typ chování polymerů vysvětlují. Asi nejznámějším, a co se týče složitosti méně náročný model, je obecný Maxwellův model, který je, jak matematicky, tak schématicky vyjádřen níže: [10],[15]

$$\tau_{ij} + \lambda \cdot \dot{\tau}_{ij} = 2 \cdot \eta \cdot D_{ij} \quad (4)$$

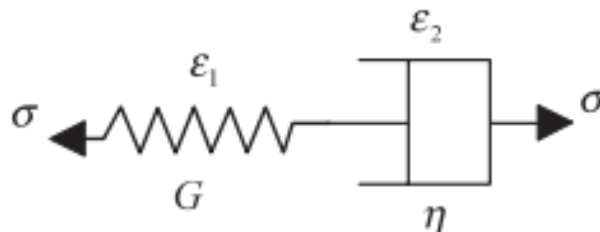
kde:  $\tau_{ij}$  – tenzor napětí [Pa],

$\lambda$  – relaxační čas [s],

$\dot{\tau}_{ij}$  – kódeformační časová derivace tenzoru napětí [Pa.s<sup>-1</sup>],

$\eta$  – viskozita [Pa.s],

$D_{ij}$  – tenzor rychlosti deformace [s<sup>-1</sup>].



Obr. 22.: Schéma Maxwellova modelu (píst + pružina) [15]

## 2 VYTLAČOVÁNÍ

Ve zpracovatelských procesech plastů a elastomerů existují různé druhy technologií. Vytlačování je v polymerním průmyslu základní a nezastupitelná metoda pro zpracování polymerních materiálů. Tato technologie umožňuje vyrábět velmi široký a rozmanitý sortiment polotovarů či finálních produktů.

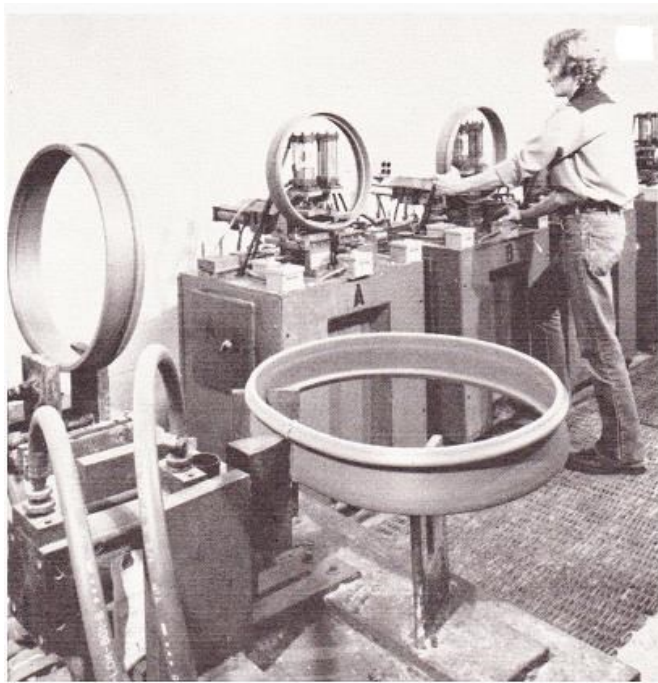
### 2.1 Historie vytlačování

První strojní zařízení určené k vytlačování termoplastů bylo navrženo, zkonstruováno a uvedeno do provozu poprvé v roce 1935, a to týmem okolo inženýra Paula Troestera v Německu. Než došlo k tomuto počínu byly vytlačovací stroje používány pouze pro vytlačování kaučukových směsí. Hlavní stavebním kamenem stroje byl zpravidla šnek, který byl pouze jednošnekový. Vytlačovací stroje v té době disponovaly pouze parním ohřevem. Tento typ ohřevu postupem času nesplňoval vyšší požadavky na objem výroby a po roce 1935 byly tyto nedostačující topná tělesa nahrazeny výkonnějšími elektrickými topnými články, které se používají dodnes. Po roce 1935 v Itálii byl také stanoven základní princip dvoušnekového vytlačovací stroje pro vytlačování termoplastů. [1]

První detailní analýzy procesu vytlačování se zabývali dopravou taveniny nebo stlačováním taveniny. V roce 1950 se začali stále více objevovat vědecké články a studie právě o procesu vytlačování polymerů. V polovině padesátých let publikovali vědci Darnell a Mol první kvantitativní studii o dopravě pevných látek. Velmi významnou konferencí pro vývoj technologie vytlačování bylo 122. zasedání rady ACS v polovině 20. století konkrétně v roce 1953. Na tomto meetingu představili členové oddělení polymerní chemie společnosti DuPont de Nemours&Co nejnovější zprávy v oblasti teorie vytlačování polymerních materiálů. V polovině šedesátých let publikoval polymerní inženýr Tadmor první kvantitativní studii o tavení polymerů, která vycházela z dřívějších ověřených studií inženýra Maddocka. Až přibližně v roce 1965 se podařilo popsat celý proces samotného vytlačování (od násypky až po vytlačovací hlavu). [1]

Kolem roku 2000 byla vyvinuta nová generace míchacích zařízení u vytlačovacích strojů, které vytvářejí silný elongační tok pro zlepšení zejména disperzního míchacího efektu. Již před delší dobou bylo z poznatků vědátorů zřejmé, že lepšího míchacího efektu je dosaženo při generování elongačního toku než při smykovém míchání. [1]

Nástupem nových účinných míchadel pro jednošnekové vytlačovací stroje se mnohonásobně zlepšili možnosti jednošnekových extruderů ve srovnání s míchacím účinkem u dvoušnekových extruderů. Z pohledu pořizovací ceny, nákladů na provoz a složitosti výroby jsou jednošnekové extrudery výhodnější a mohou přinést značné úspory financí. Vysokorychlostní jednošnekové vytlačovací stroje jsou komerčně dostupné přibližně od roku 2005 až 2010. Jedná se o jeden z nejvýznamnějších vývojových trendů poslední doby v oblasti jednošnekových extruderů za několik posledních desetiletí. Tyto relativně malé extrudery (průměr šneku 50-75 mm) jsou schopny pracovat v rychlostech od 1000 do 1500 otáček šneku za minutu a dosahovat výstupní rychlosti až o řád vyšší než u běžných vytlačovacích strojů. [1]



Obr. 23.: Počátky vytlačování polymerů [24]

## 2.2 Současné trendy v oblasti vytlačování

Vytlačování jako většina ostatních technologií nezamrzla na bodu mrazu a neustále jde dopředu s novými možnostmi a modifikacemi produkce polotovarů či finálních součástí. Výroba polymerních směsí a kompozitů prostřednictvím tavného zpracovatelského procesu je naprosto běžně používanou metodou k výrobě nových materiálů s požadovanými vlastnostmi. Tento postup má hlavní výhody v eliminaci použití složitých procesů (například polymeračních reakcí) a ve využití komerčně dostupných komponentů. Široké spektrum možného výběru složení polymerních hmot a jejich zpracovatelských podmínek může být užitečným nástrojem a zjednodušením pro snadné přizpůsobení jejich náležitých vlastností.

Mimo jiné je možné tento postup použít kupříkladu při tavení, které se obvykle provádí na běžných průmyslových extruderech. Samotné vytlačování je oblast plastikářského odvětví, která se velmi dynamicky rozvíjí. Je tomu tak z důvodu následujících skutečností o vytlačování:[28]

- výborná kontinuita (plynulost) výroby,
- krátká doba zpracování polymerní směsi,
- velmi účinný míchací efekt,
- velká kapacita,
- dobrá kvalita vytlačených výrobků,
- rozmanitost a univerzálnost.

Nevýhodou technologie vytlačování může být potřebný velký pracovní prostor z důvodu dlouhých vytlačovacích linek nebo problém s recyklací vícevrstevných trubek či profilů. [2]

V důsledku výše zmíněných skutečností o vytlačování se výzkum a rozvoj této technologie vydal směrem, který se zaměřuje na oblast, v dnešním světě hodně diskutovanou, a tou jsou biodegradabilní polymerní směsi a kompozity vyrobeném tavným procesem. Tyto polymery a kompozity se nyní těší z velkého zájmu v akademických kruzích, výzkumných skupinách či průmyslovým společnostem. Ovšem fyzikální mísení definované jako jednoduché míchání ve stádiu taveniny bez jakýchkoliv chemických reakcí mezi složkami, obvykle vede k mezifázové adhezi, což má za následek nedostatečné fyzikálně mechanické vlastnosti, které polymerní materiál získal a významně ho omezuje v dalším použití. Z tohoto důvodu velká většina polymerních směsí, které jsou založeny na bázi bio a kompozitů vyžadují další kompatibilizaci, která vede ke zlepšení užitečných vlastností. [28]

### 2.3 Popis a princip vytlačování

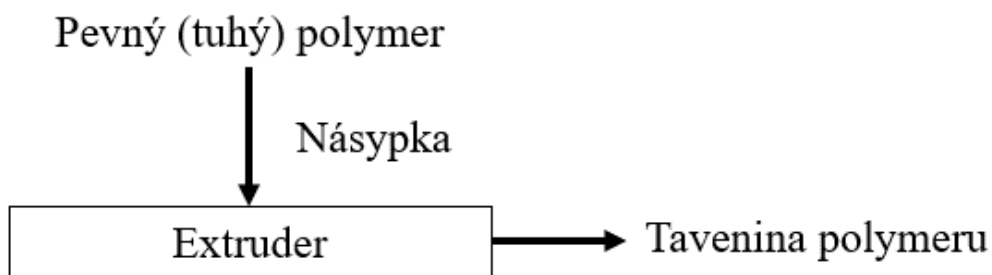
Zpracování polymerů se skládá ze 3 základních funkcí: [12]

1. Tavení, respektive plastikace tuhého polymeru,
2. Tvarování taveniny polymeru,
3. Tuhnutí taveniny polymeru do požadovaného tvaru.

Technologie vytlačování polymerů je kontinuální (nepřetržitý) způsob tváření polymerů, při kterém je vytlačován zplastikovaný polymer z tlakové komory mezi šnekem a válcem

profilovacím zařízením, které je součástí vytlačovací hlavy a nazývá se hubice. Zpravidla se vytlačují nekonečné tvarové profily různé složitosti přes vytlačovací hlavu, které mohou v další části linky řezány nebo navíjeny na špulku dle požadované aplikaci profilu. Jako příklady extrudátu můžeme uvést fólie, desky, tvarové profily, vlákna, granule, opláštěvané vodiče atd. Další funkce, které mohou modifikovat polymer jsou například: míchání přísad a plniv anebo fyzikální či chemická úprava molekul polymeru. [20]

Na obrázku níže je zjednodušeně (schématicky) naznačený proces vytlačování.



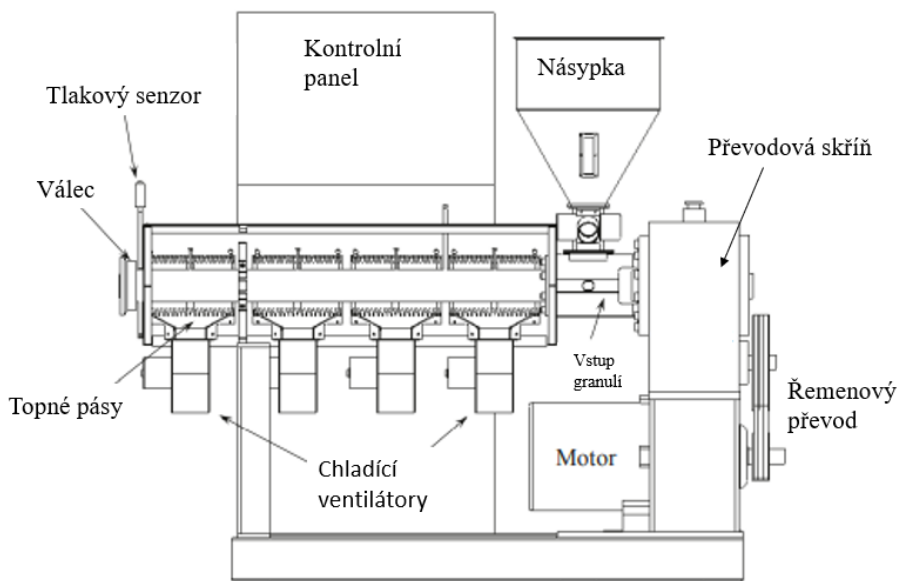
Obr. 24.: Schématické naznačení principu vytlačování [12]

Primární funkce extrudéru:

- doprava polymeru v tuhé fázi například granule či prášek,
- tavení polymeru a dávkování.

Sekundární funkce:

- míchání polymerní směsi,
- fyzikální a chemická modifikace.



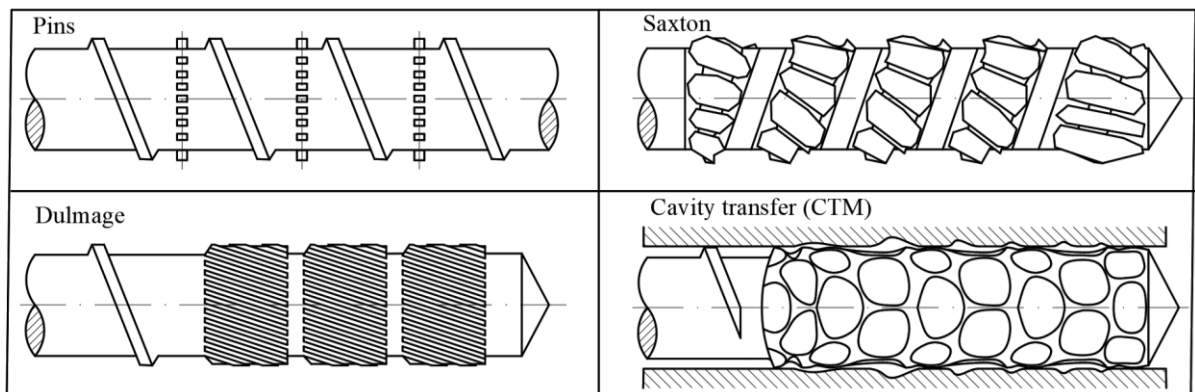
Obr. 25.: Schématická sestava vytlačovacího stroje [17]



### 2.3.1 Míchání polymerní směsi

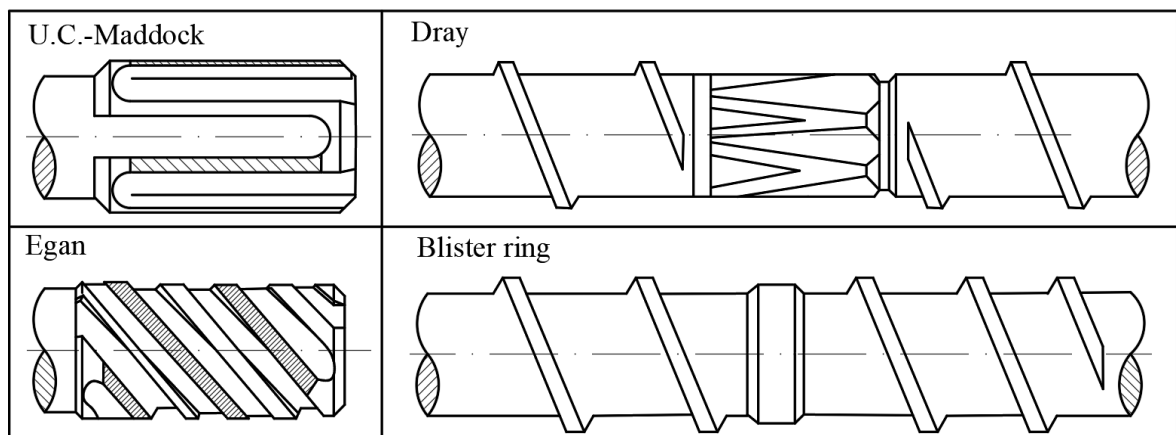
Z důvodu přidávání různých přísad (plniva, barviva, skelná vlákna, minerální prášky atd) do polymerní směsi při vytlačování je potřeba klást velký důraz na kvalitní homogenizaci materiálu. Ke standartním šnekům bývají pro zlepšení promíchání a zvýšení kvality homogenizace přidávány mísící a torpédové sekce na šneku. Míchání polymerních směsí můžeme rozdělit do dvou základních skupin: [10],[12],[20]

- distributivní míchání – základ homogenizace materiálu je rozdělení hlavního toku do několika dalších pomocí překážek, tudíž se poloha částic při průchodu distributivním elementem významně mění. Na níže uvedeném obrázku jsou vyobrazeny čtyři druhy elementů pro distributivní míchání,



Obr. 26.: Elementy pro distributivní míchání [14]

- disperzní míchání – základ homogenizace materiálu je dosažení vysokých smykových rychlostí (například náhlá změna geometrie – zúžení), tudíž se poloha částic při průchodu disperzním elementem výrazně nezmění. Na níže uvedeném obrázku jsou zobrazeny čtyři typy disperzních míchacích elementů.



Obr. 27.: Elementy pro disperzní míchání [14]

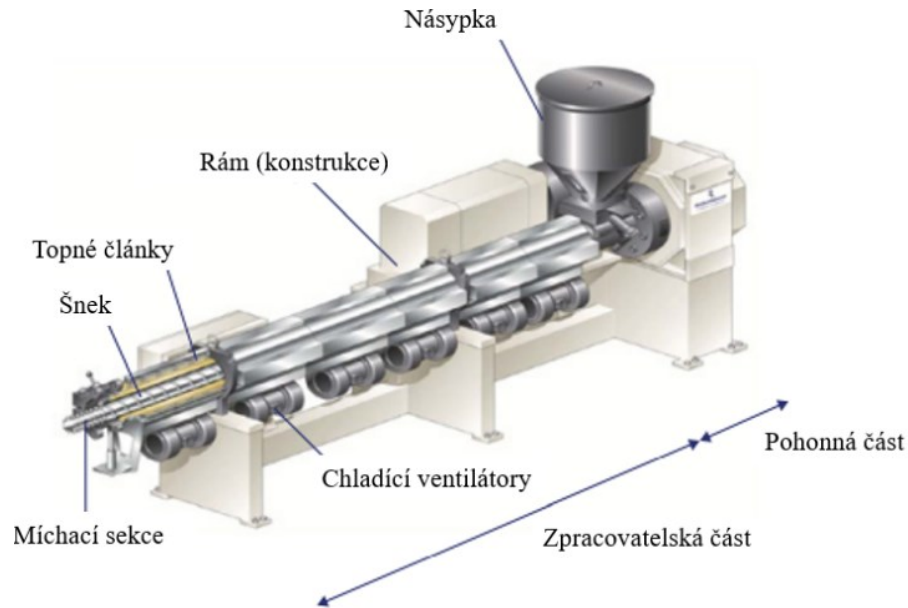
## 2.4 Vytlačovací stroje

Nezbytným strojním zařízením pro samotný proces extruze je zpravidla vytlačovací stroj, respektive extruder. Vytlačovací stroje by sami o sobě nemohli fungovat bez přídatných součástí. Mezi tyto elementy můžeme zařadit pohonnou jednotku vytlačovacího stroje a na ni navazující převodový mechanismus. Dalším příslušenstvím pro bezchybné fungování extrudery jsou násypka (trychtýř), sestava vytlačovací hlavy a v neposlední řadě topné články a ventilátory pro chlazení vytlačovacího procesu. Slouží k provedení celkového procesu vytlačování polymerů, přičemž známe několik druhů vytlačovacích strojů. Extrudery můžeme rozdělit na několik typů a podskupin. Dle jejich způsobu fungování lze provést dělení na kontinuální (plynulý, nepřetržitý) proces a diskontinuální proces. Druhý zmíněný proces dodává polymer po částech (přerušovaně) a nachází uplatnění pro dávkovací procesy jako jsou vstřikování či vyfukování. Kontinuální extrudery mají rotační člen, který dávkuje systém nepřetržitě. Přerušované vytlačovací stroje mají vratný člen, který pracuje na základě jednotlivých cyklů. Nejčastější je dělení dle konstrukce pracovního elementu ve vytlačovacím stroji na následující druhy: [1]

- šnekové vytlačovací stroje,
- diskové vytlačovací stroje,
- pístové vytlačovací stroje.

## 2.5 Šnekové vytlačovací stroje

Nejznámějšími a nejpoužívanějšími vytlačovacími stroji jsou šnekové vytlačovací stroje. Přívlastek šnekové nesou díky hlavnímu elementu v extruderu – šneku, který se stará společně s ostatními částmi vytlačovacího stroje o distribuci, tavení a finální extruzi polymerní směsi. Šnekové extrudery se dají dále rozdělit dle konstrukce na jednošnekové či vícešnekové.

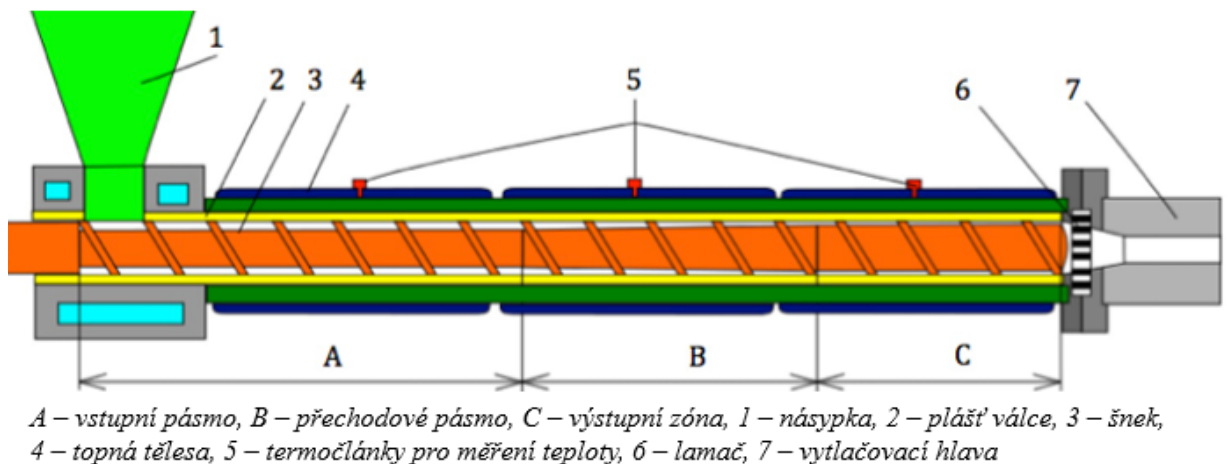


Obr. 28.: Ukázka uspořádání šnekového extruderu [13]

### 2.5.1 Jednošnekové vytlačovací stroje

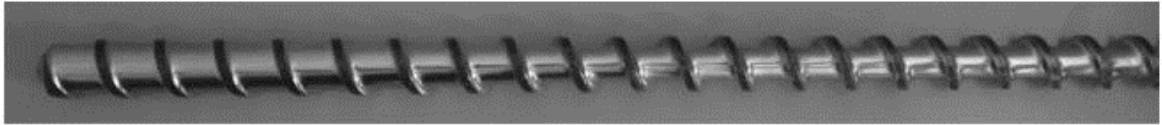
Standartní jednošnekové vytlačovací stroje jsou nejdůležitějším a nejvyužívanějším typem extruderů ve zpracovatelském průmyslu polymerů. Srdcem celého systému šnekových extruderů jsou šnek a válec. Za hlavní přednosti jednošnekových vytlačovacích strojů lze považovat následující faktory: [1]

- nízké pořizovací náklady,
- jednoduchá konstrukce a robustnost
- spolehlivost a životnost,
- velmi výhodný v poměru cena/výkon.



Obr. 29.: Schématický jednošnekový vytlačovací stroj v řezu [20]

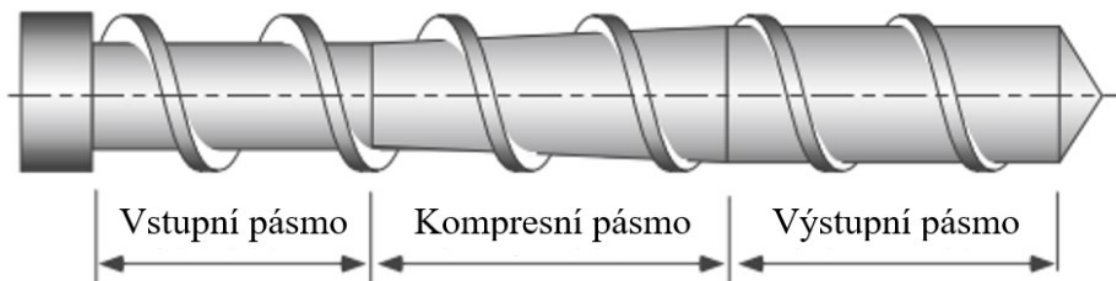
## Prostý jednochodý šnek



Obr. 30.: Jednochodý konvenční šnek [14]

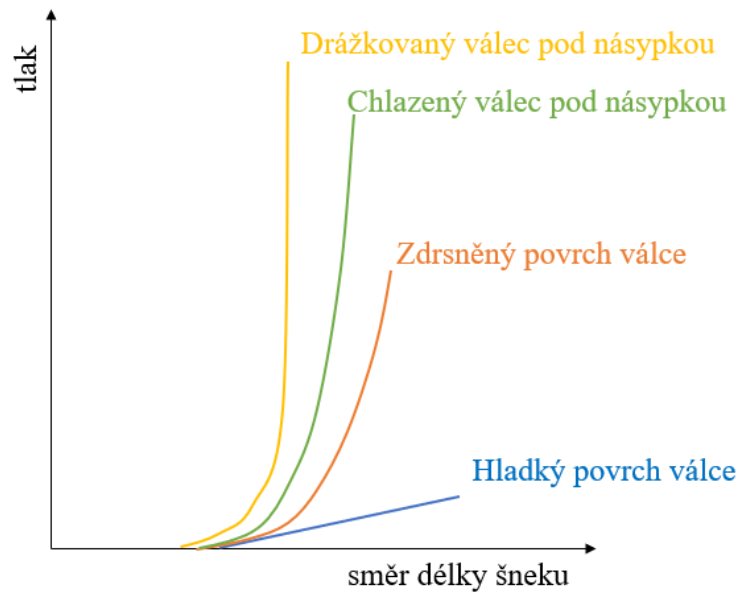
Na Obr. 30 je znázorněn typ jednochodého šneku je charakteristický tím, že má pouze jednu navinutou šroubovici po celé své délce. Materiál šneku musí mít vysokou pevnost, dobrou odolnost proti opotřebení a také chemickou odolnost. Často se používají nitridační oceli, které disponují vysokou pevností, ale zároveň jsou dobře obrobitelné. Šnek bývá často leštěný z důvodu třecích poměrů mezi ním, pláštěm válce a materiálem. Šnek běžně používaného konvenčního vytlačovacího stroje má tři odlišné geometrické sekce, a to následující zóny:

- vstupní (plnicí) zóna,
- přechodová (kompresní) zóna,
- výstupní zóna.



Obr. 31.: Model konvenčního jednochodého šneku a jeho jednotlivé části [1]

Funkcí vstupního pásma je dávkování vytlačovacího stroje předem stanoveným množstvím materiálu bez fluktuací. Vstupní zóna, kde se veškerý materiál nachází tuhém (pevném) stavu ve formě pelet, granulí či prášku. Jedná se o sekci, která má konstantní průměr šneku po celé své délce a hloubka kanálu je zde největší, z důvodu potřeby pojmout, co největší množství materiálu. Intenzita dopředného pohybu materiálu je dána třecími poměry mezi materiálem, šnekem a válcem. Šneky proto bývají leštěny a válce naopak zdrsňeny abychom dosáhli ve vstupním pásmu co největšího nárustu tlaku. Válec, respektive jeho povrchová úprava je velmi důležitým faktorem právě pro generace tlaku ve vstupní sekci. Válec se proto modifikují do různých konfigurací. Válec může být hladký (nejméně vhodný pro danou potřebu), zdrsňený, chlazený válec pod násypkou či drážkovaný pod násypkou.[10],[14],[18]



Obr. 32.: Vliv povrchu válce na generaci tlaku [10]

Přechodové či kompresní sekce má za úkol přitlačovat polymer ke stěně válce, který je vyhřívaný, tudíž dochází k tavení a v kanále se nachází současně tavenina i tuhé lože. Přitlačování polymeru se děje v důsledku zmenšování hloubky kanálu (zvětšování průměru šneku) to znamená, že hloubka kanálu v této sekci není konstantní, ale má klesající tendenci. Polymery mají obecně nízkou tepelnou vodivost, proto se pevná fáze polymeru taví velmi pomalu. Aby se polymer v této fázi začal tavit je potřeba do systému dodávat teplo pomocí topných těles (pásů). Ovšem nejenom topná tělesa se starají o zahřátí polymeru, ale i děj disipace. Disipace je přeměna mechanické energie na tepelnou. Tento jev se děje při stlačování polymeru ke stěně válce. Na začátku přechodové sekce má kanál větší hloubku než na konci této zóny, proto je definován pojem kompresní poměr, který je právě poměrem těchto rozdílných hloubek kanálů. [10],[14]

Úkolem třetí zóny je dopravovat případně homogenizovat (míchat) taveninu. V poslední výstupní nebo také výtlačné sekci šneku se nachází už pouze tavenina, která je z velké většiny tepelně, ale i materiálově zhomogenizovaná. Pro výstupní pásmo je charakteristický velký průměr šneku a malá hloubka kanálu. Průměr šneku se v této sekci nemění a po celé délce konstantní. [13]

### Válec

Válec je v podstatě ocelová trubka s dokonale lesklým vyleštěným vnitřním povrchem. Nejjednodušší konstrukcí a nejlevnější na výrobu jsou válce právě pro jednošnekové vytlačovací stroje. Naopak válce pro dvoušnekové extrudery jsou více konstrukčně složitější a díky tomu mají vyšší jak pořizovací, tak výrobní cenu. Na válci jsou umístěny topné pásy

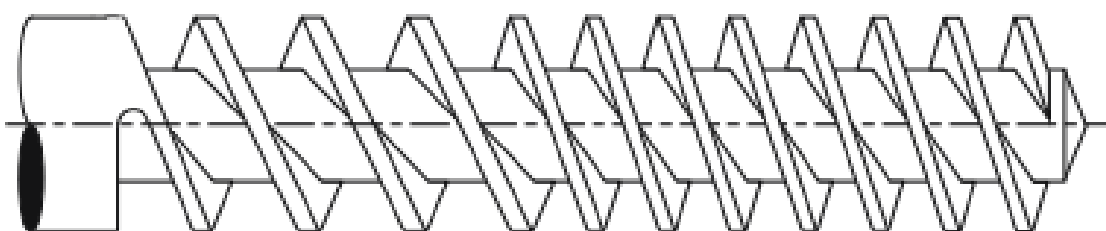
a chladicí ventilátory. Na starších vytlačovacích strojích byly tyto segmenty přišroubovány ke stroji, ale u novějších strojů už jsou tyto části zapouzdřovány přímo do válce. Na každém topném tělese je zabudováno teplotní čidlo, kterým kontrolujeme a konfigurujeme teploty při vytlačovacím procesu. [2]



Obr. 33.: Ukázka válce pro dvoušnekový extruder [2]

Známé jsou další typy jednošnekových vytlačovacích strojů, přičemž šneky u těchto extruderů mohou mít různé modifikace standartního jednochodého šneku podle dané aplikace: [1],[10],[18]

- změna úhlu stoupání šroubovice po délce šneku,
  - stoupání klesá po délce při stejné hloubce kanálu – pro kaučukové materiály,



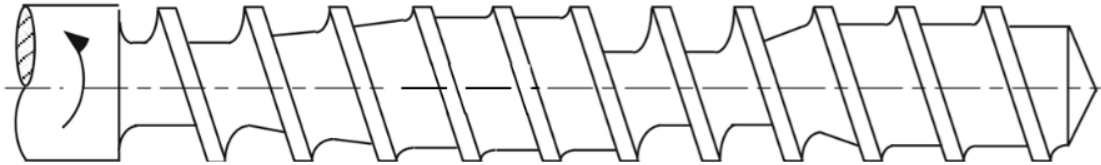
Obr. 34.: Modifikace šneku pro vytlačování kaučuků [1]

- stoupání roste po délce šneku (redukce smýkání) – teplotně citlivé materiály,
- vypuštění jedné nebo více sekcí šneku – pro materiály citlivé na teplotu (PVC),



Obr. 35.: Šnek bez vstupní a výstupní zóny [17]

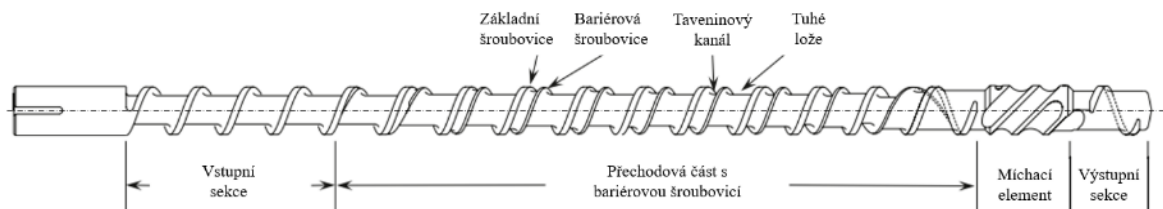
- přidání šroubovice ve vstupní sekci – stabilizace dopravy granulí ve vstupní sekci,
- změna hloubky kanálu ve výstupní sekci (šnek s dekompresní sekcí) – evakuační sekce umožňuje otevření válce a následné odsátí vzduchu a nežádoucí vlhkosti.



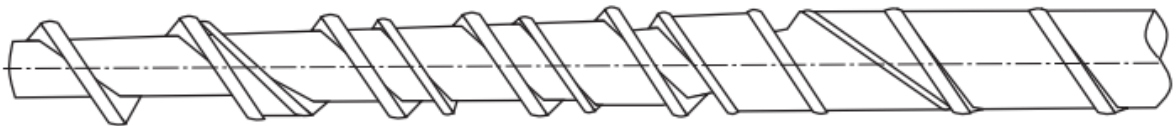
Obr. 36.: Šnek s evakuační zónou [1]

### Bariérový šnek

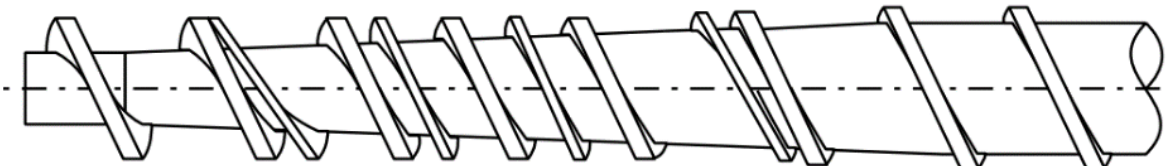
Jedná se o speciální případ šneku, který má účinnější zpracovatelské vlastnosti než standardní šnek, tudíž má i vyšší kapacitu. K jednošnekové geometrii je přidána druhá šroubovice, která se nazývá bariérová. V systému se vytvoří dva na sobě nezávislé kanály. Taveninový kanál je uzavřený. Na obrázku níže je znázorněn Stewardův bariérový šnek, který disponuje bariérovou šroubovicí v přechodové sekci šneku. Za kompresní sekci následuje disperzní míchací element Egan, který zajišťuje dobrou homogenizaci taveniny před finální extruzí přes vytlačovací hlavu. [1],[2],[18]



Obr. 37.: Stewardův Bariérový šnek [18]



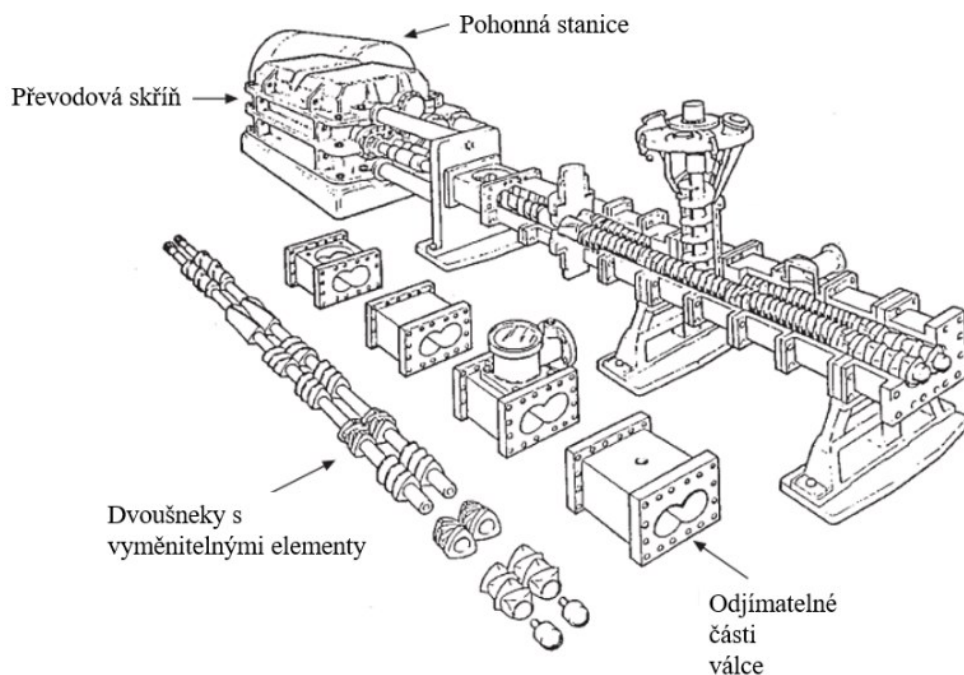
Obr. 38.: Barrivův bariérový šnek [17]



Obr. 39.: Mailleferův bariérový šnek [14]

### 2.5.2 Dvoušnekové vytlačovací stroje

Dvoušnekové extrudery jsou nejjednodušší modifikací v oblasti vícešnekových vytlačovacích strojů. Vytlačovací stroje se dvěma otáčejícími se šnekami mohou plnit daleko více funkcí, které disponují pouze jedním šnekem. Dvoušnekový vytlačovací stroj zahrnuje podle definice dva rovnoběžně uložené šneky, které se otáčejí uvnitř válce, který má průřez „osmičky“. Na rozdíl od jednošnekového extruderu se dvoušnekové stroje vyrábí ve velkém množství variant s různým provedením konstrukce. Přímé dvoušnekové konstrukce se používají hlavně pro neměkčené PVC v práškové formě a vyrábí se z nich především trubky a profily. V dnešní době se často používají ke směšování odlišných plastů nebo pryskyřic s přísadami k výrobě polymerních směsí, které se využijí u jiných výrobků například u vstřikování. Nevýhodou těchto vytlačovacích strojů je poměrně velká, respektive dlouhá konstrukce. Důvodem je malé vytváření třecího tepla potřebného k tavení, proto je potřeba mít dlouhou tavnou sekci, aby se tavenina stihla dobře promíchat a zhomogenizovat. [2],[14],[17]

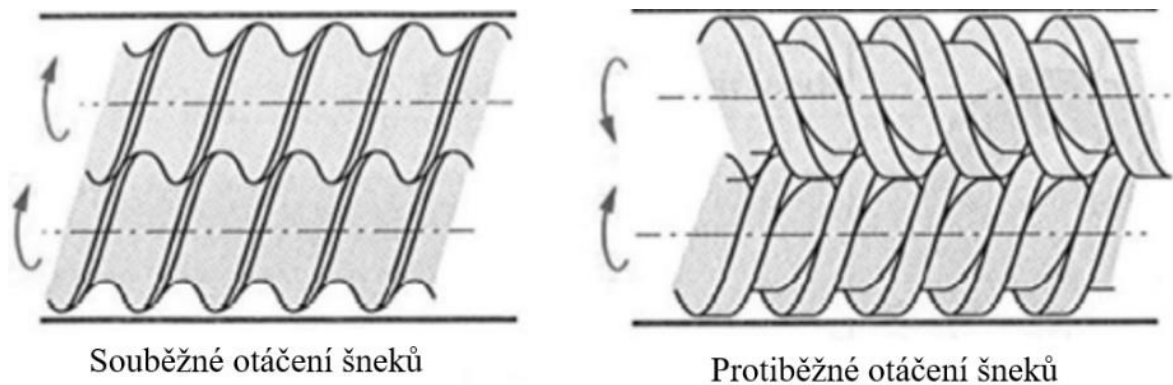


Obr. 40.: Schéma dvoušnekového vytlačovacího stroje [17]

Pro klasifikaci dvoušnekových vytlačovacích strojů se používají dvě hlavní kritéria: [14]

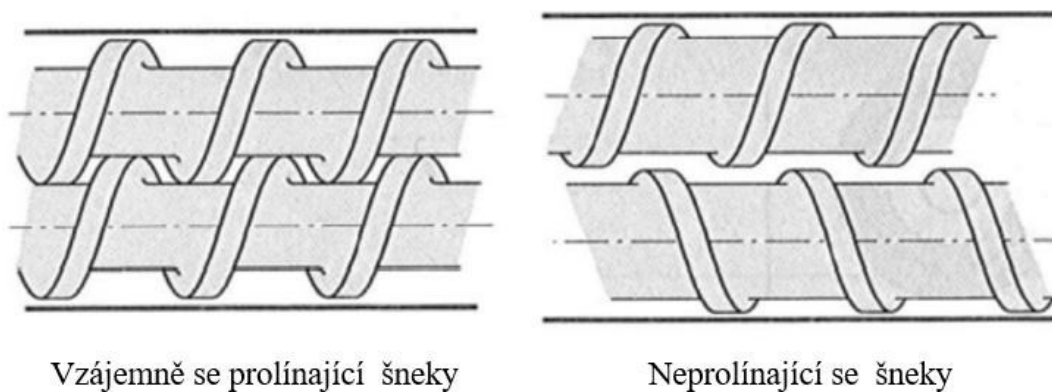
- směr otáčení šneku – vytlačovací stroje jsou označovány jako ko-rotáční, pokud se oba šneky otáčejí ve stejném směru anebo protiběžné, když se šneky otáčejí proti sobě,





Obr. 41.: Otáčení dvoušneků [14]

- vzájemné prolínání – šneky se považují za prolínající se, když se šroubovice jednoho šneku proniká do kanálu toho druhého. Tento průnik může být částečný anebo úplný.



Obr. 42.: Prolínání dvoušneků [14]

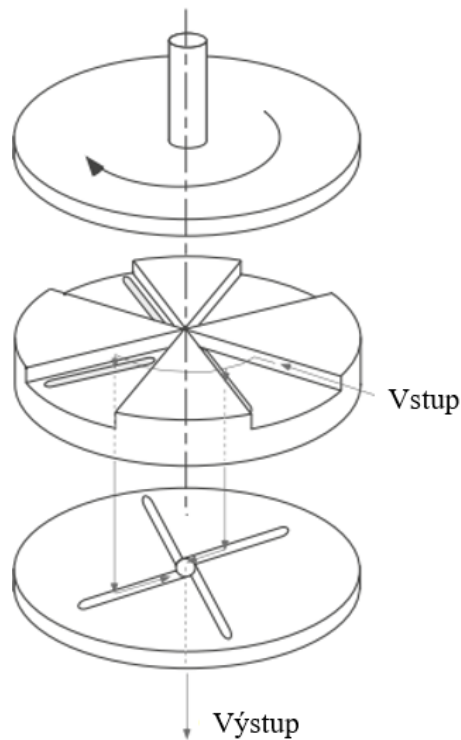
### 2.5.3 Diskové vytlačovací stroje

Existují i vytlačovací stroje, které nemají jako hlavní pracovní člen šnek, ale i přesto mohou patřit do skupiny kontinuálních vytlačovacích strojů. Diskové extrudery existovali již před mnoha lety, ovšem do většího povědomí se dostali až od roku 1950. Nicméně v průmyslové oblasti mají stále relativně malé zastoupení ve srovnání se šnekovými vytlačovacími stroji. Tento typ vytlačovacích strojů používá k vytlačování polymerního materiálu dva typy pracovních členů, a to buď disk nebo buben. Většina diskových vytlačovacích strojů je založena na principu viskózní tlakové dopravy materiálu. Jeden speciální druh diskového extruderu využívá elasticity (pružnosti) polymerních tavenin k dopravě polymerního materiálu a vyvinutí potřebného tlaku ve vytlačovací hlavě. [1]

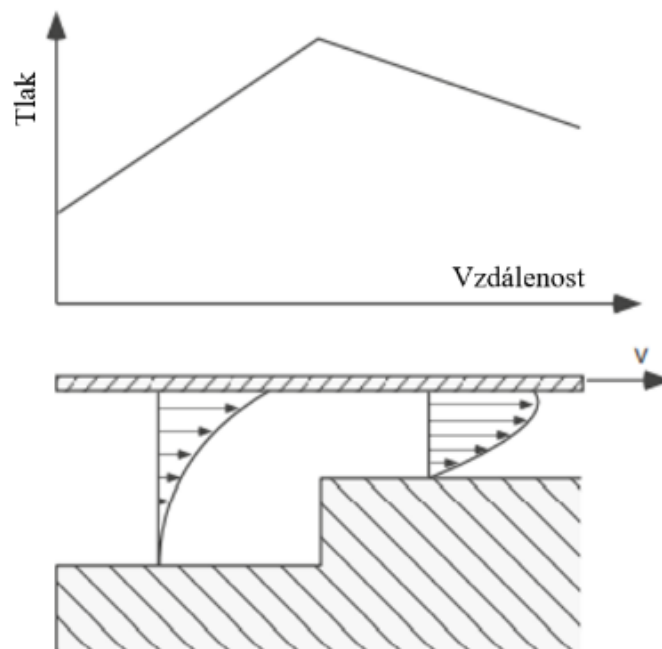
#### Diskový vytlačovací stroj se stupňovitým kotoučem

Jeden z prvních diskových vytlačovacích strojů vyvinul Westover v roce 1962 a často je označován jako stupňovitý diskový stroj či extrudér s posuvnou podložkou. Základem tohoto typu je stupňovitý kotouč, který je umístěný v malé vzdálenosti od ploché desky. Při

otáčení jednoho z disků s polymerní taveninou v axiální mezeře dochází k nárůstu tlaku při přechodu z jedné větší mezery do druhé menší. [1]



Obr. 43.: Stupňovitý kotouč pro diskový extruder [1]



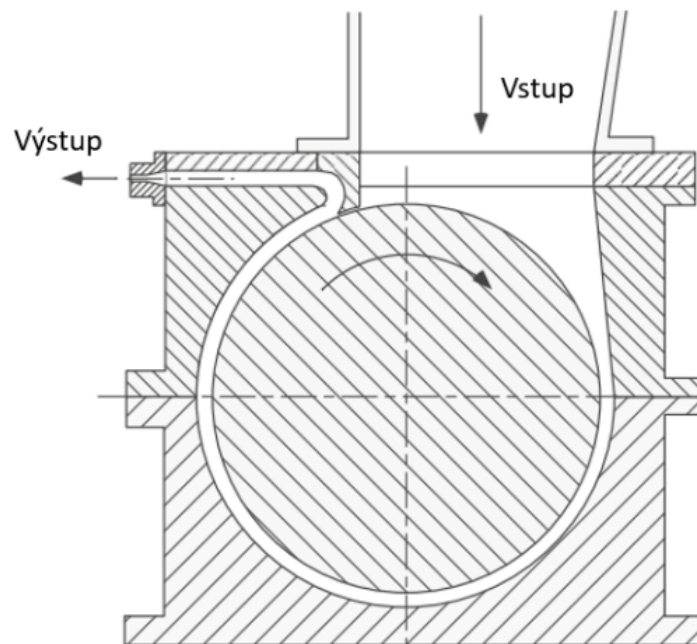
Obr. 44.: Generace tlaku v přechodové oblasti [1]

Pokud jsou ve stupňovitém kotouči zabudovány výstupní kanálky, můžeme polymerní materiál vytlačet kontinuálně. Tento koncept konstrukce vytlačovacího stroje vychází z Rayleighovy analýzy o hydrodynamickém mazání v různých typech geometrií. Z jevu analýzy

vyplývá závěr, že rovnoběžná stupňovitá deska je schopna unést největší zatížení. Stupňovitý diskový vytlačovací stroj byl také navržen v jiné modifikaci, kdy se velikost mezery mění postupně. Tento extruder má klínový disk, který postupně zvyšuje tlak v závislosti na radiální vzdálenosti. Nevýhodou diskového vytlačovacího stroje se stupňovitým kotoučem z praktického hlediska je obtížné čištění z důvodu složité konstrukční koncepce průtokových kanálků právě ve stupňovitém kotouči. [1]

### Bubnový diskový extruder

Dalším typem diskového vytlačovacího stroje, který má relativně zastaralou koncepci konstrukce zařízení je bubnový extruder. Schématicky znázorněný princip výrobního procesu bubnového vytlačovacího zařízení vyráběného ve švýcarské firmě Schmid & Kocher je uveden na obrázku níže. [1]

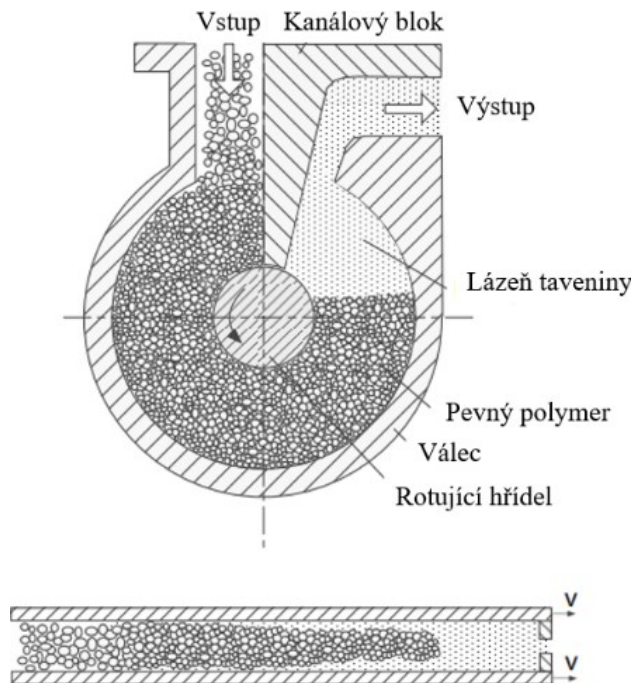


Obr. 45.: Schéma principu bubnového extruderu [1]

Materiál je přiváděn násypkou do pracovního prostoru kruhového charakteru mezi rotor a válec. Na základě rotačního pohybu rotoru je materiál přenášen po obvodu válce až k výstupní štěrbině materiálu. Těsně před opuštěním materiálu výstupní štěrbinou, narazí materiál na tzv. stěrač. Tato stírací lišta se stará o odebrání materiálu z rotoru a odklání tok polymerního materiálu do kanálu, který vede polymer do vytlačovací hlavy. Bubnové vytlačovací stroje nebyly nikdy konkurence schopné ve srovnání se standartními jednošnekovými vytlačovacími stroji. [1]

Neexistují pouze tyto dva typy diskových extruderů. Známý jsou ještě další konstrukčně zajímavé diskové extrudery a to: [1]

- **spirálové diskové vytlačovací stroje**
  - koncept známý od roku 1952,
  - schopen přenášet velmi vysoké zatížení,
  - z hlediska dopravy taveniny srovnatelný se šnekovým vytlačovacím strojem, avšak v dopravě pevných látek (granulí) je tato schopnost sporná.
- **extrudery typu „diskpack“**



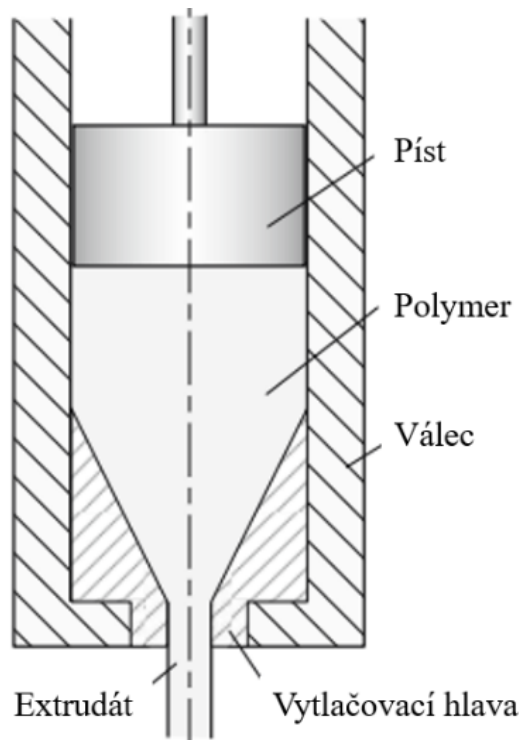
Obr. 46.: Princip vytlačovací stroj typu „diskpack“ [1]

Materiál vstupuje násypkou do axiální pracovní mezery a dále pokračuje do pracovního prostoru, kde rotuje hřídel, na které jsou namontovány tenké kotouče. Materiál se pohybuje s kotouči o celou jednu otáčku a poté narazí na kanálový blok. Kanálový blok uzavře prostor mezi kotouči a nasměruje materiál do výstupní štěrbině (následně dále k vytlačovací hlavě) nebo do přenosového kanálu ve válci vytlačovacího stroje. Tvar kotoučů může být optimalizovaný podle dané specifické funkce jako doprava pevných látek, tavení, doprava taveniny či míchání. [1]

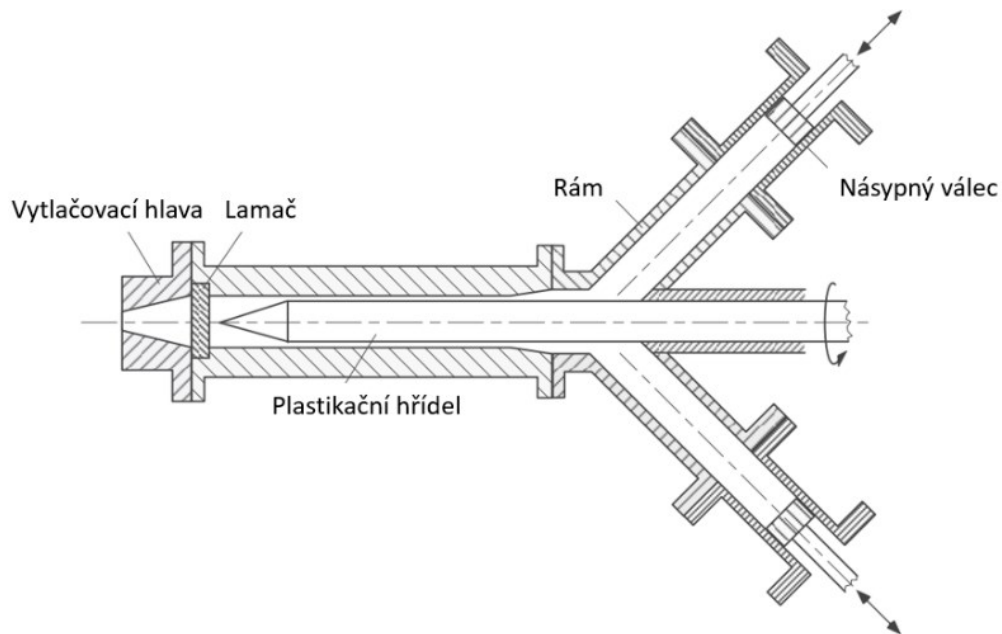
### 2.5.4 Pístové vytlačovací stroje

Dalším používaným typem vytlačovacích strojů jsou pístové extrudery. Jsou to konstrukčně jednoduché, robustní a mají diskontinuální charakter výrobního procesu. Pístové stroje jsou vytlačovací zařízení, které jsou schopny generovat velmi vysoké tlaky. Vzhledem k diskontinuálnímu charakteru procesu jsou pístové vytlačovací stroje vhodné pro použití v cyklických, opakujících se aplikacích. Typickými příklady použití pístových extruderů v plastikářských technologiích jsou vstřikování a vyfukování. Dříve byly první vstřikovací stroje vybaveny právě pístovými vytlačovacími stroji, které dodávali taveniny do vstřikovací formy. Určité provozní omezení pístových vytlačovacích strojů však způsobili přechod na vytlačovací stroje s vratným šnekem nebo se používá jejich vhodná kombinace. Dvě hlavní omezení jsou omezená tavná kapacita a špatná teplotní rovnoměrnost polymerní taveniny. V současné době se pístové extrudery používají primárně ve formovacích strojích na relativně malé velikosti výrobků. Pístové extrudery můžeme rozdělit do dvou skupin: [1]

- jedno pístové vytlačovací stroje,
- více pístové vytlačovací stroje.



Obr. 47.: Extruder s jedním pístem [1]



Obr. 48.: Vytlačovací stroj se dvěma písty [1]

### 2.5.5 Pohonné jednotky vytlačovacích strojů

Každé strojní zařízení musí být nějakým způsobem poháněno, aby docházelo k požadovanému efektu práce. Pohon vytlačovacího stroje musí uvádět do rotačního pohybu šnek, který musí dosahovat požadovanou rychlostí otáčení. Měl by být schopen udržovat konstantní nekolísavé otáčky šneku, protože kolísání otáček, respektive průtoku by mělo za následek rozměrové a tvarové nestability na extrudátu. Tato vlastnost pohonu je velmi podstatná pro finální kvalitu vytlačovaných výrobků. Také je nutné, aby byl pohon schopný dodávat požadované množství kroutícího momentu na hřídel vytlačovacího šneku. Další vlastností, kterou musí pohon splňovat je schopnost efektivně a variabilně měnit otáčky v širokém rozmezí hodnot. Ve většině případů aplikací je žádoucí, aby se otáčky mohly dát měnit v podstatě za běhu, a to od minimálních otáček až po maximální s naprostou plynulostí chodu zařízení. V průběhu let fungování průmyslového vytlačování byly použity různé systémy pohonů pro extrudery. V současnosti se využívají tyto základní pohonné ústrojí:[1]

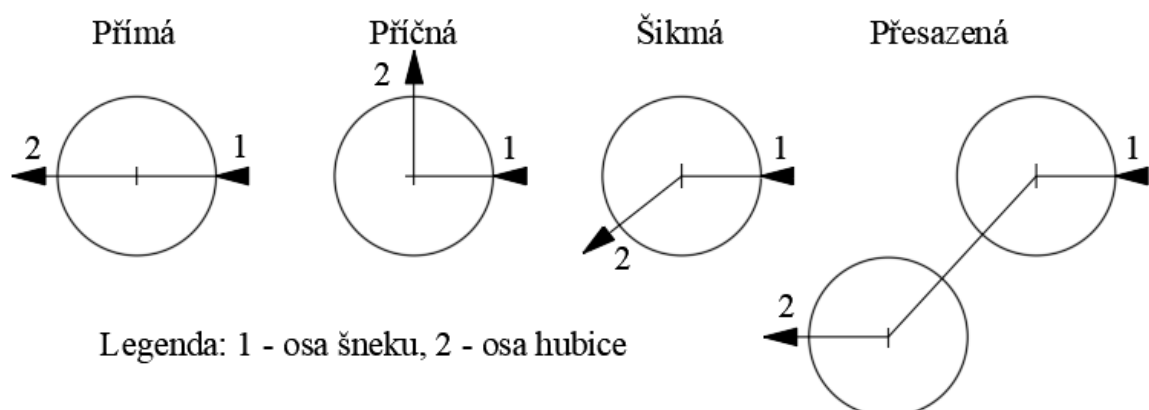
- a) střídavý AC elektromotor – například klecový indukční elektromotor je velmi oblíbenou volbou pohonu, jelikož je konstrukčně jednoduchý, robustní a nemá velké nároky na údržbu. Doporučuje se ovšem jen v těch aplikacích, kde je dostačující pouze jedna rychlost šneku.
- b) stejnosměrný DC elektromotor – je nejvhodnější a nejoblíbenější variantou pohonu moderních vytlačovacích strojů. Na rozdíl od střídavého elektromotoru v tomto případě lze různě regulovat otáčky dle požadované aplikace.

- c) hydraulické motory – skládá se ze střídavého elektromotoru s konstantními otáčkami, které pohání hydraulické čerpadlo, a to následně hydraulický motor. Tento pohon je často označován jako hydrostatický pohon. Výhodou je plynulá regulace otáček, kroutícího momentu a výkonu pomocí hydromotoru. Nevýhodou je složitá konstrukce a pořizovací cena.

## 2.6 Vytlačovací hlavy

Bezprostředně za šnekem na konci každého vytlačovacího stroje se nachází vytlačovací hlava. Jedná se o nedílnou a velmi důležitou součást vytlačovacího stroje, která má za úkol tvarovat roztavený polymer do finálního tvaru výrobku či polotovaru. Hlavní funkcí vytlačovací hlavy je tedy vytlačení taveniny přes štěrbinu a zajištění konstantních průtokových podmínek a rovnoměrných rozměrových parametrů výsledného extrudátu. Vytlačovací hlava má štěrbinu, které je negativním tvarem výsledného produktu. Vytlačovací hlavy můžeme rozdělit několika různými způsoby, a to například dle tvaru štěrbinu či podle druhu dané průmyslové aplikace. Základní dělení vytlačovacích hlav dle pozice osy šneku a osy hubice: [9], [10]

- přímé vytlačovací hlavy,
- příčné vytlačovací hlavy,
- šikmé vytlačovací hlavy,
- přesazené vytlačovací hlavy.



Obr. 49.: Schématické rozdělení vytlačovacích hlav [20]

Přímé vytlačovací hlavy se ve velkém množství používají při výrobě polymerních produktů jako jsou tyče, trubky, profily, fólie či desky. Osa šneku a osa hubice jsou v tomto případě souosé. Příčné vytlačovací hlavy se používají při technologiích vyfukování fólií a

k opláštění vodičů. Osy vstupu a výstupu jsou na sebe vzájemně kolmé. Šikmé vytlačovací hlavy se využívají při výrobě tenkých fólií a osy mezi sebou svírají v rozmezí od 40° do 60°. Speciálních typem jsou přesazené vytlačovací hlavy, které se mohou používat při výrobě trubek s vnitřní kalibrací či při vícevrstevném opláštění. [9], [20]

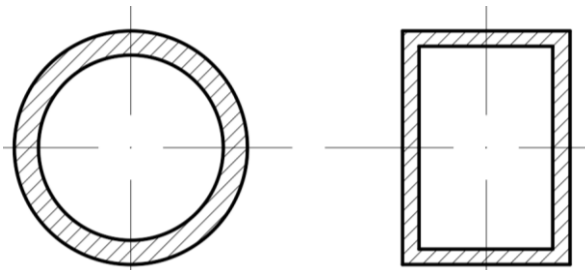
Dále můžeme rozdělit vytlačovací hlavy na konkrétní typy dle geometrie výstupního průřezu či podle dané výrobní aplikace na: [9], [10]

- ploché vytlačovací hlavy,



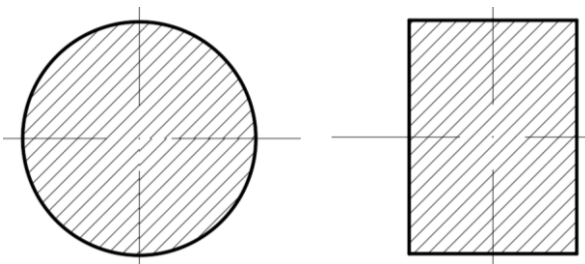
Obr. 50.: Ukázka průřezů dutých profilů

- vytlačovací hlavy na duté profily,



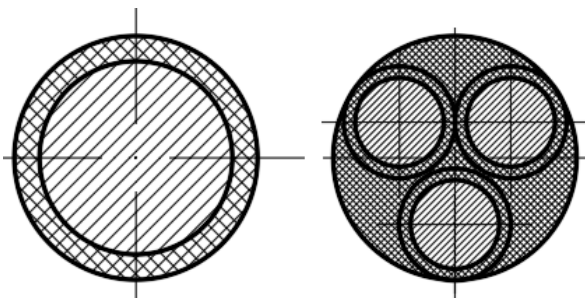
Obr. 51.: Ukázka průřezů dutých profilů

- vytlačovací hlavy na plné profily,



Obr. 52.: Ukázka průřezů plných profilů

- vytlačovací hlavy na opláštění vodičů



Obr. 53.: Ukázka průřezů u opláštění vodičů



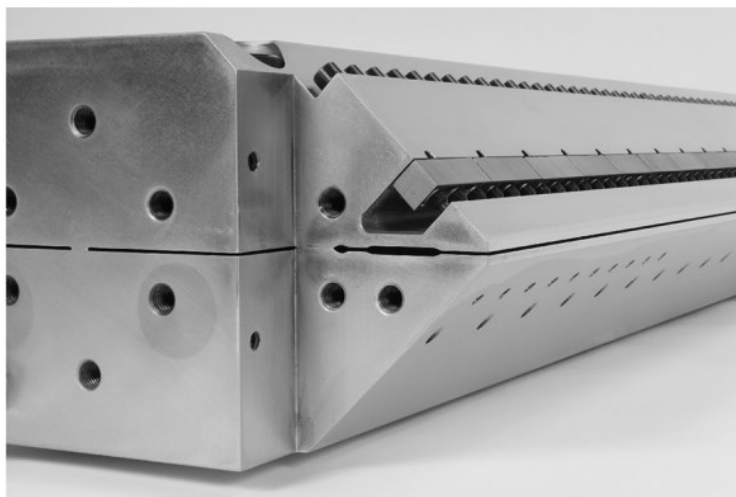
### 2.6.1 Plochá vytlačovací hlava

Ploché vytlačovací hlavy se ve velkém množství používají při výrobě plochých či pásových polymerních produktů, které mají velký poměr šířky a tloušťky. Konkrétní extrudát z ploché vytlačovací hlavy může být například deska, fólie či pás. Tento typ vytlačovacích hlav, respektive jeho šterbina, může být při výrobě manuálně či automaticky nastavována. Rovnoměrné rozložení průtoku při vytlačování je zajištěno vhodnou konstrukcí rozdělovače a pro jemné úpravy se používá stavitelná lišta, pomocí které jsme schopni pružně reagovat na změny při výrobě. [9], [12]

Škála materiálů, které se používají na výrobu plochých vytlačovacích hlav je velká. Materiál, ze kterého bude hlava vyrobena, se volí podle předem určených a konkrétních zpracovatelských podmínek. Nejčastěji se pro výrobu nástrojová ocel P20 (ČSN 19520), která má střední obsah uhlíku a po výrobě je pokovená či potažena. Využívají se také niklové a niklové hybridní materiály k výrobě vytlačovacích hlav. Používají se různé pokovovací materiály ovšem nejčastějším je chrom. Agresivita zpracovávaného materiálu spolu se samotným procesem představují hlavní faktory při výběru materiálu, který je vhodný pro vytlačovací hlavu a pokovení. [9], [12]

Nejjednodušším typem rozdělovače pro plochou vytlačovací hlavu je konstrukční řešení s konstantním průřezem nebo T – drážkou. V obou případech by měla být vnitřní geometrie navrhnutá a zefektivněn tak, aby nebo nedocházelo ke generování mrtvých míst, což by mohlo vést k následné stagnaci polymeru. [12]

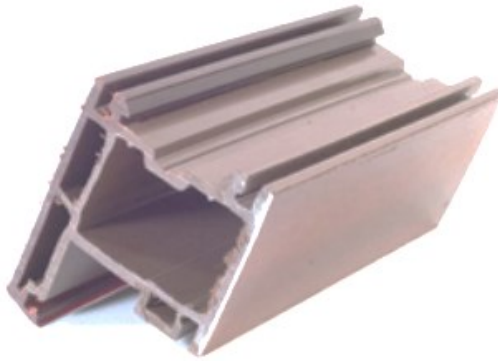
Na obrázku níže je znázorněna reálná plochá vytlačovací hlava, která má stavitelnou šířku mezery pro regulaci tloušťky výrobku.



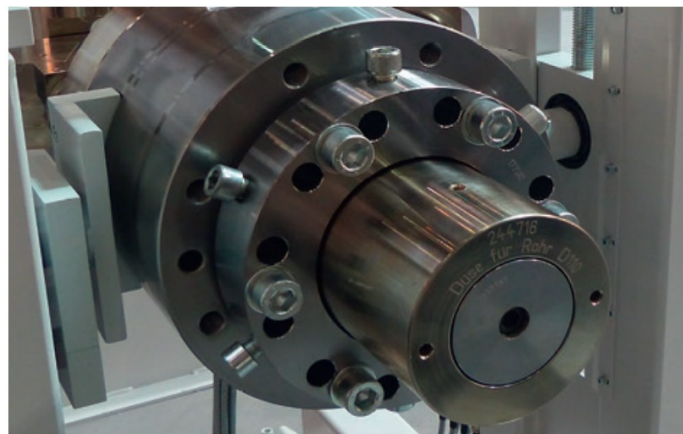
Obr. 54.: Ukázka ploché vytlačovací hlavy s nastavitelnou šterbinou [12]

### 2.6.2 Vytlačovací hlava na duté profily

Tento typ vytlačovacích hlav se používá pro výrobu dutých profilů. Typickými zástupci výrobků v této oblasti vytlačovacích hlav jsou trubky. Další profily také mohou být čtvercové či obdélníkové. Specifickým dutým profilem je okenní profil. Vytlačování profilů může být prováděna pomocí přímé či příčné vytlačovací hlavy.



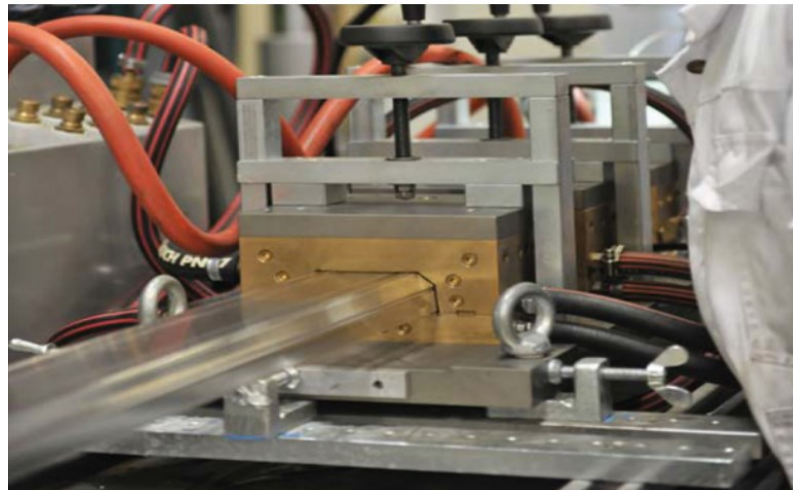
Obr. 55.: Okenní profil [13]



Obr. 56.: Ukázka vytlačovací hlavy na trubky [2]

### 2.6.3 Vytlačovací hlava na plné profily

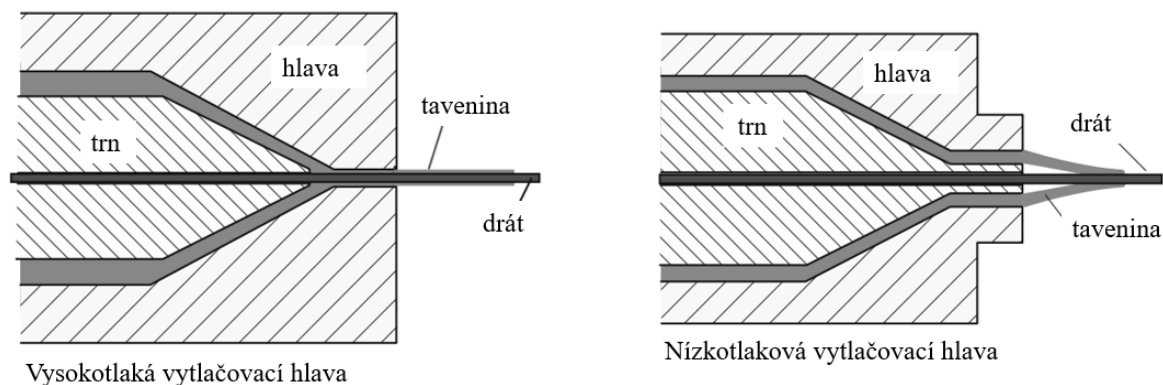
Výše zmíněný typ vytlačovacích hlav se používá k výrobě plných průřezů. Extrudáty z této vytlačovací hlavy mohou mít různé průřezy. Konkrétním výrobkem může být struna pro FDM tisk (filament), která má kruhový nebo čtvercový profil dle požadavků zákazníka. Dalším příkladem je například tělo a víko lišty pro elektroinstalace nebo kluzné lišty na dopravníky. Jako další úprava některých typů extrudátů po extruzi může následovat granulování na sekacích či nožových strojních zařízeních. [8]



Obr. 57.: Vytlačování plného profilu [13]

#### 2.6.4 Vytlačovací hlava na opláštění vodičů

Tento typ vytlačovací hlavy se používá k opláštění vodičů. Kolem vodiče je opláštěn polymerní materiál z důvodu izolace a ochrany. Rozlišujeme dva typy opláštění vodičů, a to vysokotlaké a nízkotlaké. Při vysokotlakém opláštění se polymerní tavenina setkává s vodičem již ve vytlačovací hlavě před výstupem, což umožňuje dobrý kontakt právě mezi vodičem a polymerem. U nízkotlakého opláštění se polymerní tavenina setkává s vodičem až po výstupu z vytlačovací hlavy. Používá se v případech, kdy není nezbytné mít dobrý kontakt mezi vodičem a taveninou nebo když je potřeba vytlačit pouze volný plášť přes potažený vodič. [1]



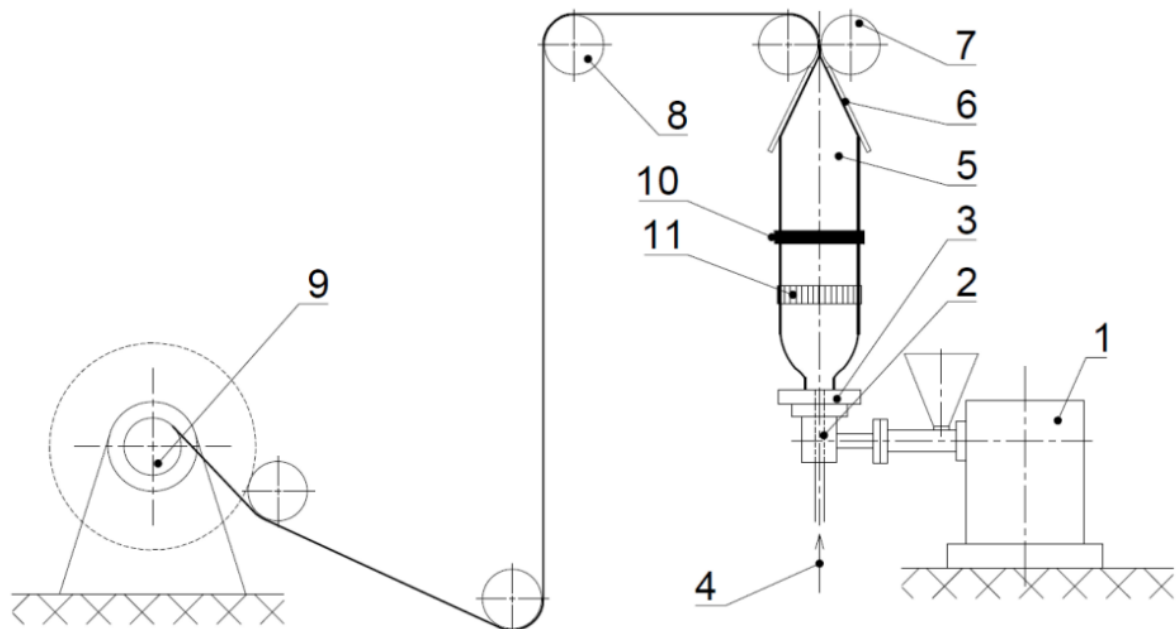
Obr. 58.: Schéma přetlakové a podtlakové vytlačovací hlavy pro opláštění [1]

### 2.7 Základní typy výrobních linek

Proces extruze se používá pro celou řadu zpracovatelských technologií v plastikářském průmyslu. Vytlačování je do výrobních postupů s velkou oblibou zařazováno. Jedním

z důvodů zařazování právě vytlačování do výrobních linek může být kontinuita výrobního procesu. Níže je zmíněno několik typů výrobních linek, které využívají technologie extruze.

### 2.7.1 Linka na vyfukování fólií

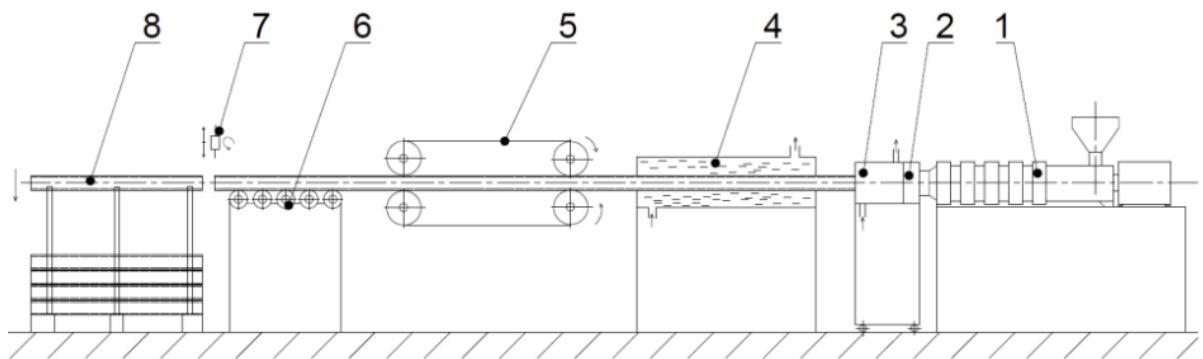


*Legenda:* 1- šnekový vytlačovací stroj, 2- vytlačovací hlava, 3- chladicí prstenec,  
4- přívod rozfukovacího vzduchu, 5- rozfouknutá folie,  
6- naváděcí a skládací desky, 7- tažné válce, 8- ústrojí, 9- navíjecí ústrojí,  
10- měření tloušťky, 11- kalibrační koš

*Obr. 59.: Schéma linky na vyfukování fólií*

Vytlačovací stroj je opatřen hlavou pro vyfukování fólií. Vytlačovaná folie se určitým přetlakem rozfoukne a chladí vzduchem, přiváděným chladícím prstencem. Chladicí prstenec zaručuje rovnoměrné ofukování folie po celém obvodu. Vzduch se do hadice přivádí trnem přímo nebo přes žebro rozdělovače. Vyfouknutá folie se postupně chladí. Délka chladicí dráhy je závislá na druhu materiálu, tloušťce folie a rychlosti odtahu. Ochlazená folie se skládá mezi skládacími deskami a uzavírá odtahovacími válci. Odtahové válce mají samostatný regulovatelný pohon. Rychlostí odtahu se reguluje podélné prodloužení a tím i tloušťka folie, respektive šířka folie. Folie se navíjí na navíjecí zařízení, které bývá obvykle dvojité. V případě potřeby je možno složení folie jednostranně nebo oboustranně ořezávat.

### 2.7.2 Linka na vytlačování trubek

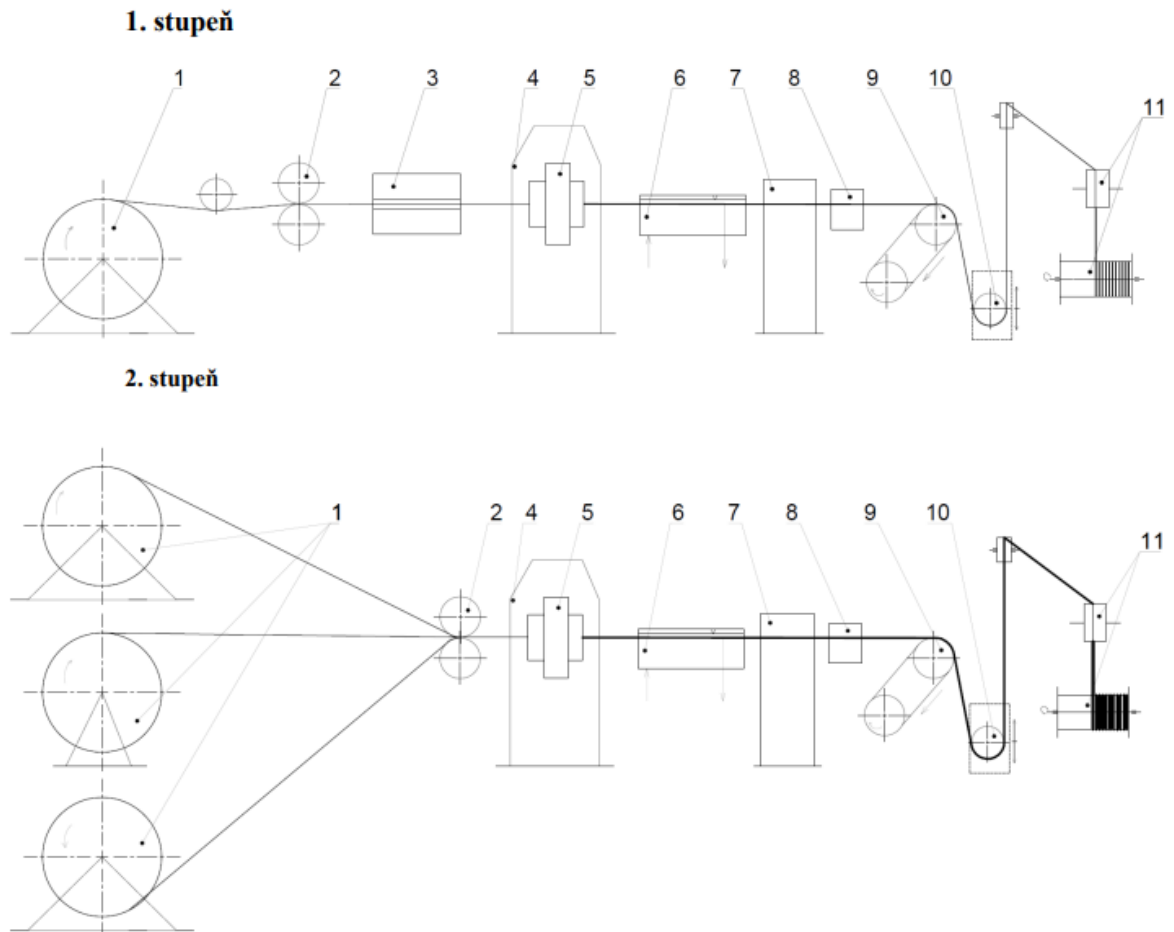


*Legenda: 1- vytlačovací stroj, 2- vytlačovací hlava, 3- přetlaková kalibrace, 4- chlazení, 5- odtah, 6- dopravník, 7- dělicí zařízení, 8- paletizace*

*Obr. 60.: Schématicky naznačená linka na vytlačování trubek*

Linka na vytlačování trubek například z PVC je v praxi naprosto běžně využívanou výrobní technologií. V základním principu extrudér vytlačí přes vytlačovací hlavu, která má průřez mezikruží, taveninu. Následuje přetlaková kalibrace extrudátu, kde dochází k zafixování tvaru a rozměru. Na kalibrační ústrojí navazuje chlazení, které může být prováděno vodní sprchou či ve vodní lázni. O řízení rychlosti a plynulosti procesu se stará odtahovací zařízení. Trubky jsou poté nařezány dělicím zařízením na dané délky a složeny na paletu.

### 2.7.3 Linka na opláštění vodičů



**Legenda:** 1- cívka, 2- naváděcí zařízení, 3- předehřívací zařízení, 4- VS,  
5- příčná opláštovací hlava, 6- chladicí vana, 7- kontrolní zařízení,  
8 - zařízení na kontrolu vlastností elektrického obalu, 9- odtah,  
10- zásobník, 11- navíjecí zařízení

Obr. 61.: Schéma linka na opláštění vodičů

Návrh výrobní linky pro opláštění vodičů je dvoustupňový. První stupeň opláští jednotlivé měděné dráty, druhý pak 3 opláštěné vodiče svazuje dohromady a opláští do jednoho. Na začátku první linky se vodič odvíjí z cívky a přes vodící kladky vstupuje do předehřívacího zařízení. Předehřev je do linky zařazen z důvodu nahřátí a lepšího spojení polymeru s měděným drátem. Předehřátý vodič vstupuje do vytlačovacího stroje opatřeného příčnou hlavou na opláštění. Vzniklý plášť se kalibruje a ochlazuje v chladicí vaně, dále se měří a kontroluje soustřednost pláště, požadovaný průměr a izolační vlastnosti. Opláštěný vodič je odtahován válci a přes zásobník je navíjen na cívky. Cívky s takto opláštěnými vodiči se pomocí manipulátorů zařazují do druhého stupně, kde je linka složená jako ta předešlá.

### 3 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Lidská společnost se v poslední době zaměřila na výzkum a vývoj technologií v oblasti tzv. rapid prototypingu, což znamená využití moderních technologií pro vývoj a následné využití prototypu v hromadné, respektive sériové výrobě. Jednou z těchto metod je 3D tisk, který je velmi využívanou aditivní technologií určenou právě k výrobě prototypů převážně pro kusovou či malosériovou výrobu. Strojní zařízení, na kterých se 3D tisk provádí se nazývají 3D tiskárny a můžeme je dle konstrukce rozdělit na stolní a průmyslové. V teoretickém rozboru se budeme více zabývat typem 3D tisku, pro který se využívá polymerní struna při výrobním procesu.

#### 3.1 Historie 3D tisku

Japonský vědec Hideo Kodama učinil v roce 1981 první záznam o 3D tisku jako aditivní technologií. Stal se tak prvním autorem výrobku, který při výrobě využíval ultrafialové světlo k vytvrzování polymerů a vytvářel pevné součásti. Tento objev byl odrazovým můstkem pro další vývoj 3D tisku konkrétně metody stereolitografie (SLA). Později se o potvrzený vynález stereolitografie postaral vědec Charles Hull, který využíval této technologie 3D tisku k vytváření menších součástí (prototypů) za účelem tyto díly otestovat předtím, než se naplno rozběhne výroba skutečných dílců. Tento princip tím pádem ušetřil, jak peníze, tak čas vynaložený pro vývoj dílu. K vytvoření 3D modelů se samozřejmě využívá výpočetní techniky za podpory různých CAD softwarů, abychom zajistili přesné zadání vyráběných dílů. [30]

Metoda SLS – Selektivní laserové spékání (slinování) byla další, již více pokročilou formou 3D tisku. Využívá aditivní technologie a práškového polymeru pro vytváření objektů. Typickým představitelem polymeru při metodě SLS je nylon. [30]

Tavné depoziční modelování – metoda FDM, kterou vyvinuli v roce 1988 Lisa a Scott Crump, je v současnosti nejrozšířenější metodou 3D tisku. Nejznámější jsou stolní 3D tiskárny. Pro vytvoření dílu je polymerní struna roztavena v tiskové hlavě a nanášena vrstvou po vrstvě na pracovní podložku. [30]

Za posledních 30 let prošel 3D tisk velkým rozvojem a změnami. S nově přicházejícími nápady a metodami se trojrozměrné tisknutí dílců těší velkému zájmu a čím dál více se jeho typy zdokonalují. [30]

### 3.2 Aktuální vývoj trendů v oblasti 3D tisku

Jedním z nejdůležitějších trendů ve výrobě v poslední době je vzestup aditivní technologie, respektive 3D tisku, který umožňuje přímou výrobu hotových součástí z počítačových modelů. V současné době se 3D technologie dynamicky vyvíjí ve všech směrech svého působení na trhu. Přední společnosti a giganti 3D průmyslu investují velké peníze do výzkumu a vývoje této moderní a relativně mladé aditivní technologie. [4]

Ve velké většině případů se společnost soustředí na ekologické dopady 3D tisku na životní prostředí. Jedná se o snahu vyvíjet a používat, co nejšetrnější materiály k přírodě při zachování, co největšího množství žádoucích chemických, fyzikálních či mechanických vlastností. V poslední době je pozorovatelný pokrok v udržitelnosti jednotlivých nových materiálů a s tím spojené recyklování materiálů. [31]

Jedním z dalších trendů, na které se společnosti zaměřují, je stále pokračující demokratizace 3D tisku, zejména v oblasti nepolymerních materiálů. Konkrétně technologie FDM zažívá velký rozmach v oblasti tisku materiálů jako je keramika či kov. Jak kovy, tak keramika jsou velmi žádané materiály v aditivních technologiích v oblasti zdravotnictví či automobilového a leteckého průmyslového odvětví. Velkou výzvou pro mnohé firmy je tedy v současnosti 3D tisk kovů. [31]

Výčet nejdůležitějších současných trendů uzavírá myšlenka využití 3D tisku ve stavebnictví. Pouhá myšlenka o této možnosti tisku je již minulostí a využití trojrozměrného tisku v oblasti stavařství nabylo reálných rozměrů. [31]



Obr. 62.: Ukázka budovy zhotovené pomocí 3D tisku [31]



### 3.3 Výhody a nevýhody 3D tisku

3D tisk je rychle se rozvíjející technologie, která má velké množství výhod, ale také existuje množství nevýhod a limitací při výrobě. Ve srovnání s tradičními, konvenčními technologiemi může 3D tisk v mnoha ohledech zaostávat. [16]

#### 3.3.1 Výhody 3D tisku

Jako výhody této aditivní technologie ve srovnání s tradičními technologiemi se dají považovat následující kritéria: [16]

- snazší výroba složitých a těžko vyrobitelných součástí,
- menší cena za výrobu tvarově a geometricky náročných dílců,
- levnější vývoj nových prototypů,
- možnost tisku nejenom polymerů, ale i kovů či keramiky,
- není potřebná forma na každý díl ve srovnání se vstřikováním či odléváním kovů.

#### 3.3.2 Nevýhody 3D tisku

Jako nevýhody této aditivní technologie ve srovnání s tradičními technologiemi se dají považovat následující kritéria: [16]

- vytisknuté součásti mají horší fyzikální vlastnosti, menší pevnost a jsou křehčí
- z důvodu vrstvení polymeru mají dílce horší kvalitu a míra detailu je nízká,
- malá výrobní produktivita, malá hospodárnost, dlouhá doba výrobního procesu,
- nutnost přesné a relativně časté kalibrace výrobního procesu,
- po vytištění dílu často nutné postprodukční dokončovací práce tradiční technologií.

### 3.4 Rozdělení metod pro 3D tisk

Technologie 3D tisku polymerů je v současnosti dynamicky se rozvíjející aditivní technologií, přičemž ji můžeme rozdělit na následující základní pilíře:

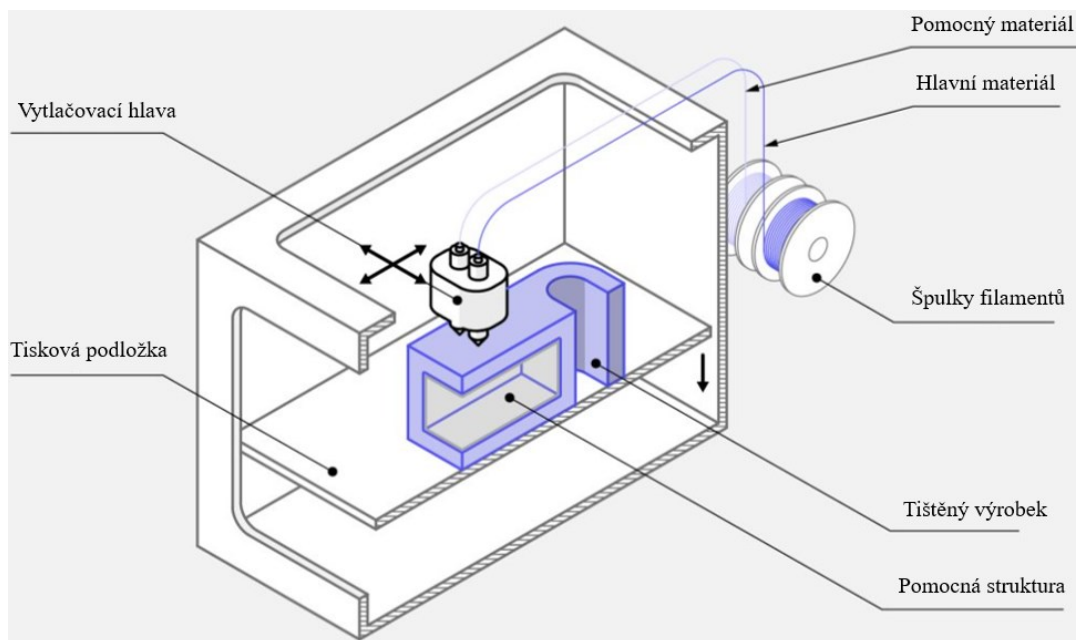
- FDM – z anglické zkratky – Fused Deposition Modeling,
- SLA – stereolitografie,
- SLS – z anglické zkratky – Selective Laser Sintering,

Další část teoretického rozboru bude primárně a detailně věnována metodě 3D tisku FDM a zbylé dvě metody (SLA a SLS) budou zmíněny jen velmi zevrubně a krátce jen jako představení metody.

### 3.5 Metoda 3D tisku FDM

Jedná se bezpochyby o nejrozšířenější metodu trojrozměrného tisku polymerů, jak v průmyslových (komerčních) aplikacích, tak v laboratorním či kutilském odvětví. Tento velký rozvoj tiskáren je způsoben jejich relativně nízkou pořizovací cenou a poté nízkými provozními náklady. [19]

Jedná se o aditivní technologii, která využívá tepelnou energii k roztavení pevného polymerního filamentu. Tisková struna je odvíjena ze špulky a dále vedena přes extruder, kde dochází k plastikaci polymeru, do trysky. Následuje opakované vrstvení polymerní taveniny v předem určených trajektoriích na tiskovou podložku až po vyhotovení finálního dílce (modelu). FDM tisk může být uskutečňován pomocí jednoho filamentu či dvou filamentů (hlavního a pomocného). Tato skutečnost se poté promítá na kvalitu výsledného výtisku. [16], [19]

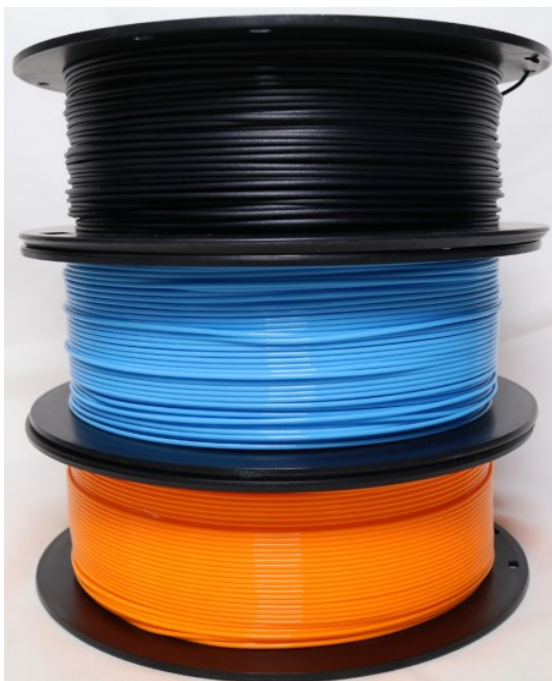


Obr. 63.: Schéma principu FDM tisku [32]

### 3.5.1 Materiály filamentu pro FDM 3D tisk

Materiály tiskových strun mohou být různé a volí se podle následného použití budoucího výrobku. Filamenty, které se používají u metody FDM můžeme rozdělit do základních skupin podle náročnosti použití na:[29]

- běžné – filamenty, které jsou standartně používány pro FDM tisk,
- dekorační – filamenty, které finálnímu výrobku dávají vylepšený vzhled,
- průmyslové – tiskové struny, které se využívají dle potřeby dané aplikace v průmyslu.



Obr. 64.: Ukázka filamentů [19]

#### Běžné filamenty

Jako standartní filamenty se používají z velké většiny termoplasty. Jako konkrétní příklady materiálů můžeme zmínit následující: [29]

- **PLA**
  - v současnosti nejpoužívanější materiál, velmi oblíbený a levný filament,
  - výhodou je nízký bod tání, recyklovatelný, při tisku nezapáchá.
- **ABS**
  - houževnatější ve srovnání s PLA,
  - cenově dražší než PLA, při tisku vyzařuje výraznou vůni.

- **PETG**
  - upravená modifikace materiálu PET, méně křehký materiál,
  - tisk transparentních výrobků, pružnější a odolnější než PLA a ABS

### **Dekorativní filamenty**

Materiály dekorativních tiskových strun v sobě obsahují prvky, které obecně vylepšují celkový vzhled vytisknuté součásti a není potřebná další povrchová úprava. Jako konkrétní příklady materiálů můžeme zmínit následující: [29]

- **Dřevo**
  - filament není tvořen ze 100 % dřevem, po tisku imituje dřevěný povrch,
  - obsahuje 60–70 % PLA a 30–40 % dřevěných vláken.
- **Kov**
  - filament obsahující PLA nebo ABS, které jsou napuštěny kovovým práškem,
  - poměr této směsi bývá 50 % PLA nebo ABS a 50 % kovového prášku.

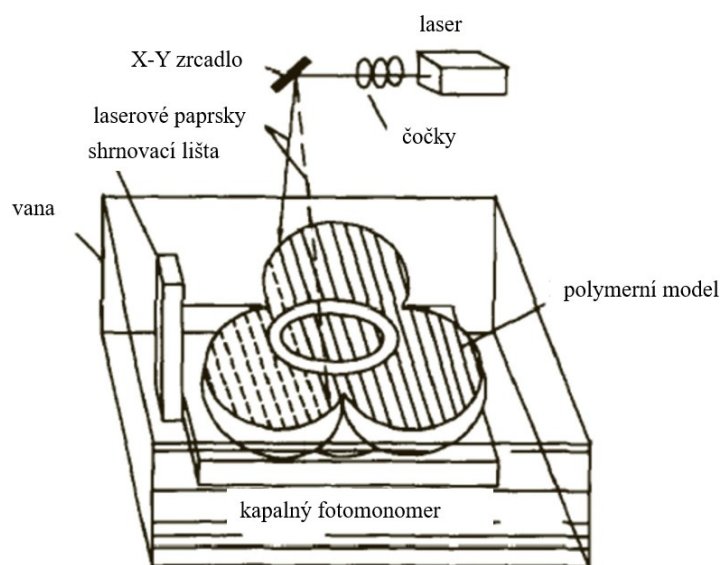
### **Průmyslové filamenty**

Tyto tiskové struny se používají pro výrobu součástí, které jsou určeny pro dané komerční průmyslové aplikace. Jako konkrétní příklady materiálů můžeme zmínit následující: [29]

- **Karbon**
  - přidáním uhlíkových vláken do PLA nebo ABS vzniká velmi pevný celek,
  - vylepšený typ PC filamentu o uhlíková vlákna,
  - velmi houževnatý a pevný materiál.
- **PC – ABS**
  - polymer napuštěný uhlíkovými vlákny, který obsahuje ABS z důvodu snížení tuhosti,
  - pevný, tepelně odolný a houževnatý materiál.
- **ASA**
  - dobrá alternativa k běžným filamentům (ABS),
  - odolný vůči přírodním vlivům, relativně odolný proti chemickým látkám.

### 3.6 Metoda 3D tisku SLA

Tato metoda je založena na vytvrzování fotocitlivé polymerní pryskyřice pomocí laserového záření. Kvalita a tloušťka vrstvy se odvíjí podle druhu použitého strojního zařízení. Pryskyřice je vystavena laserovému záření pro vytvrzení dané vrstvy. Po dokončení jedné vrstvy se pracovní stůl spustí o vrstvu níže a zbytek nevytvrzeného polymeru se shrne dolů z pracovního stolu a poté se opětovně použije. Opakuje se vytvrzování dalších vrstev až po vyhotovení kompletního výrobku. Technologie stereolitografie je jedna z nejpřesnějších aditivních technologií. Velkou nevýhodou je vysoká pořizovací cena strojního zařízení. [16]



Obr. 65.: Schéma principu SLA technologie [16]

### 3.7 Metoda 3D tisku SLS

Technologie selektivního laserové spékání je metoda 3D tisku, která je založena na spékání práškových materiálů působením tlakového média  $\text{CO}_2$ . Pracovní komora je vystavena tepelnému působení, jehož hodnota se blíží k bodu teploty tání daného vzorku. Působením tepla z laserového paprsku se taví žádoucí vrstvy prášku. Metoda SLS je kompatibilní s polymery, kovy, kovovými kompozity, kompozity kovů a polymerů a kovokeramickými kompozity. Nevýhodou této technologie je relativně malá přesnost dle velikosti dílu, potřeba inertní atmosféry a nutnost udržování stálé teploty na úrovni bodu tání materiálu. [16]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V zadané diplomové práci byly stanoveny následující cíle:

- Vypracování literární studie na dané téma
- Navrhnout technické řešení vytlačovacího stroje
- Provést reologickou analýzu šneku a válce
- Zhotovit výkresovou dokumentaci včetně výkresu sestavy a kusovníku
- Zhodnotit výsledky řešení

Cílem praktické části diplomové práce je v první části navrhnout a zkonstruovat kancelářský, přenosný a kompaktní vytlačovací stroj, který bude sloužit k výrobě polymerního filamentu pro metodu 3D tisku FDM. Tento návrh je podložen kontrolním výpočtem na jednotlivé komponenty vytlačovacího zařízení.

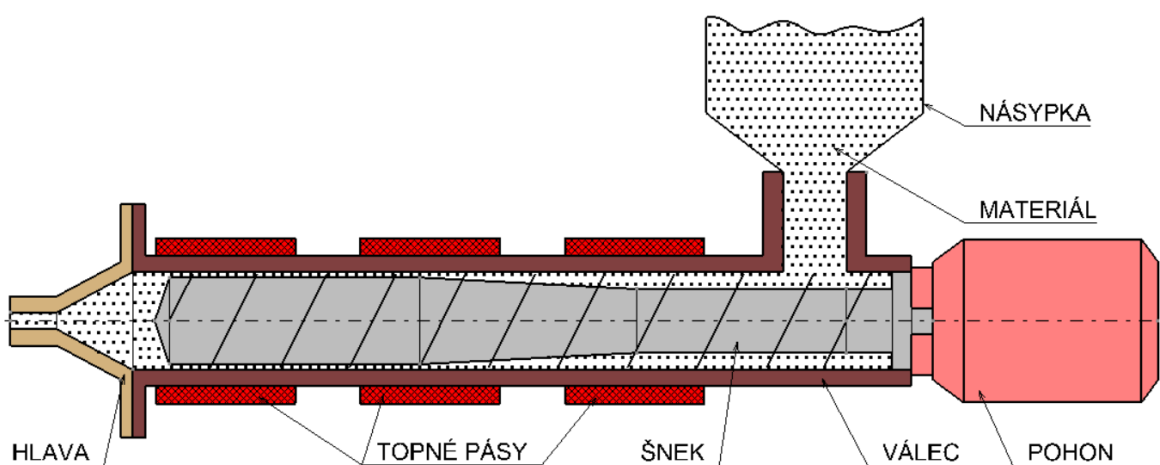
V další bodě praktické části je provedena reologická analýza šneku a válce pro dané materiály v programu ANSYS v modulu Fluent.

Zadané parametry pro proces vytlačování tiskové struny:

- průměr filamentu  $d_f = 1,75$  mm,
- průměr válce  $D = 18$  mm,
- maximální otáčky šneku  $n = 30/\text{min}$ ,
- teplota okolí  $t_o = 20$  °C,
- dané materiály filamentů PLA, ABS a PETG.

## 5 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

Jako návrh konstrukčního řešení vytlačovacího stroje určeného k výrobě tiskové struny pro FDM tisk byl zvolen typ šnekového vytlačovacího stroje s prostým jednochodým šnekem. Jedná se o velmi rozšířenou formu technologie vytlačování polymerů v průmyslu. Důvodem volby šnekového extruderu je relativně nízká pořizovací cena zařízení, poměr cena/výkon, jednoduchá robustní konstrukce, životnost či univerzálnost využití šneku v průběhu procesu vytlačování (zpracováváný materiál, plynulá regulace otáček atd.). Zjednodušené schéma vytlačovacího stroje je znázorněno na obrázku níže.



Obr. 66.: Schéma vytlačovacího stroje

Z důvodu potřeby návrhu strojního zařízení kancelářského typu, s relativně malými a kompaktními rozměry se návrh technického řešení pro zadaný případ poněkud odlišuje od standartního postupu konstrukčního návrhu, kdy jsou dvě hlavní funkční součásti vytlačovacího stroje šnek a válec. V tomto případě bude vytlačovací stroj disponovat hlavním stavebním prvkem vytlačovacího stroje, a to tělem, které bude fungovat jako křížovka pro spojení násypky, šneku, válce a pohonné jednotky. Pomocí těla bude také přišroubován celý vytlačovací stroj k základně výrobního zařízení.

### 5.1 Použité programy

Pro splnění veškerých kritérií zadání diplomové práce bylo potřebné použít software, které byly nápomocny ke splnění jednotlivých cílů práce. Návrh 3D modelu sestavy vytlačovacího zařízení byl proveden v programu CATIA V5R19. Výkresová dokumentace byla taktéž zhotovena v tomto software včetně výkresu sestavy stroje. Reologické analýzy byly zhotoveny v systému ANSYS.



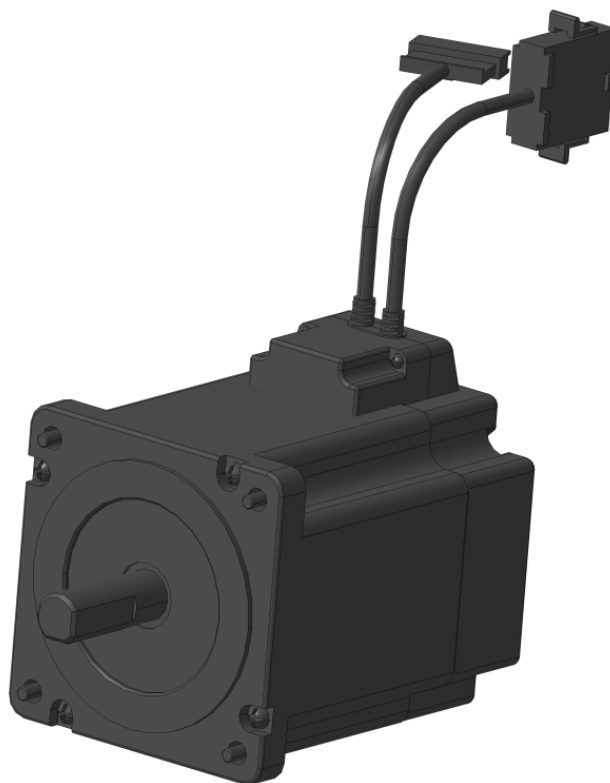
## 6 NÁVRH KOMPONENTŮ VYTLAČOVACÍHO STROJE

Celkový návrh komponentů vytačovacího stroje byl volen specificky dle zadání diplomové práce. Při volbě jednotlivých komponentů byl kladen důraz na kvalitní, ale zároveň jednoduchou a levnou konstrukci a provedení jednotlivých dílů, jak vyráběných, tak kupovaných. Pro celkové sestavení a zrealizování 3D návrhu vytačovacího stroje bylo zapotřebí jednotlivé komponenty stroje vyrobit z definovaných rozměrů polotovaru. Pohonná jednotka byla vybrána z katalogu daného výrobce. Normalizované součásti byly použity pro jednodušší realizaci celkového návrhu.

### 6.1 Volba motoru

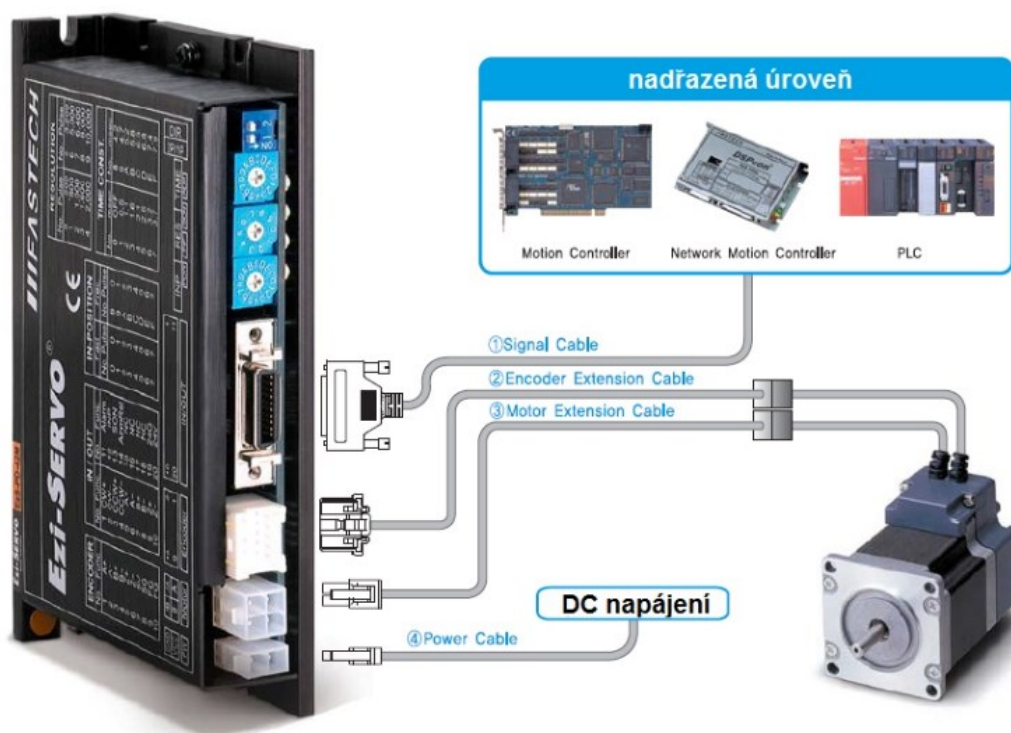
Na základě průzkumu obdobných technických řešení návrhu byl pro danou konkrétní aplikaci vytačování zvolen krokový motor se zpětnou vazbou a externím driverem s přesným typem technologií Ezi – Servo ST 86M od společnosti RAVEO. Ezi – servo systém je založený na spojení optického enkodéru s krokovým motorem a inteligentním řízením (PLC). Výše zmíněný typ spojení poté zaručuje přesné polohování s rychlostí změny zpětné vazby 25  $\mu$ s. Použití daného typu krokového motoru je velmi výhodné a žádoucí v případech náhlé změny zatížení, čímž zabraňuje ztrátě spojení, respektive synchronizace. Velkou výhodou technologie ezi – servo ve srovnání s klasickými servomotory je téměř stoprocentní eliminování vibrací z hřídele. Tento typ krokového motoru disponuje následujícími základními parametry: [33]

- napětí 2,34 V DC,
- proud motoru 6 A/fáze,
- přídržný moment 4,5 N · m,
- rozlišení enkodéru: 10000–32000 pulzů/ot,
- plynulý rotační pohyb od 0,2 ot/min,
- rychlost n: 0–3000 ot/min,
- velikost (délka) 86 mm,
- napájení 40–70 V DC,
- hmotnost krokového motoru 2,4 kg.



Obr. 67.: 3D model krokového motoru

System Ezi – servo je jednoduše použitelný a aplikovatelný pro daný případ. Ve srovnání se servomotory je systém intuitivnější a nepotřebuje těžkopádné a v některých případech zdoluhavé odlaďování.



Obr. 68.: Schématické zapojení krokového motoru [33]

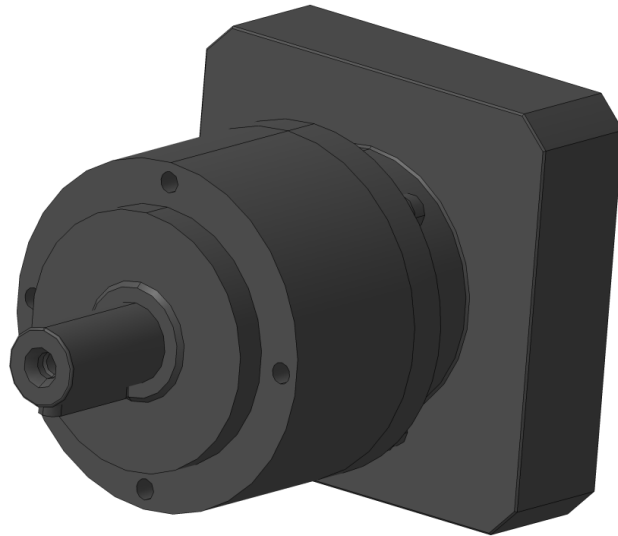


Obr. 69.: Reálný krokový motor [33]

## 6.2 Volba převodovky

Z důvodu plynulosti a bezpečnosti chodu motoru a celkového procesu vytlačování byla ke krokovému motoru připojena přímá planetová převodovka. Planetová převodovka byla zvolena od firmy APEX DYNAMICS Czech s.r.o. Přesné označení typu převodovky bylo vybráno z katalogu výrobce. Konkrétní označení planetové převodovky je AE070-010. Tento typ se používá právě ve spojení s krokovým motorem. Převodovka bude spojena s krokovým motorem a spojkou těsným perem, aby byl zajištěn přenos kroutícího momentu. Planetová převodovka disponuje následujícími parametry: [33]

- nominální výstupní moment  $M_n = 40 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,
- převodový poměr  $i = 10$ ,
- maximální radiální zatížení  $F_R = 1\,377 \text{ N}$ ,
- maximální axiální zatížení  $F_A = 765 \text{ N}$ ,
- účinnost  $\eta \geq 97 \%$ ,
- bezpečnostní ochrana IP 65,
- hmotnost převodovky 1,4 kg.



Obr. 70.: 3D model planetové převodovky AE070-010



Obr. 71.: Reálný model přímé planetové převodovky [33]

### 6.3 Volba spojky

Z důvodu korekce negativních jevů při otáčení hřídele šneku byl použit prvek spojující převodovku s hřídelí. Pro spojení planetové převodovky a hřídele šneku byla pružná spojka od firmy T.E.A. Technik s.r.o. konkrétní typ spojky GE-T 24-32. [34]

Tento typ spojky zajišťuje přenos kroutícího momentu a disponuje řadou výhod:

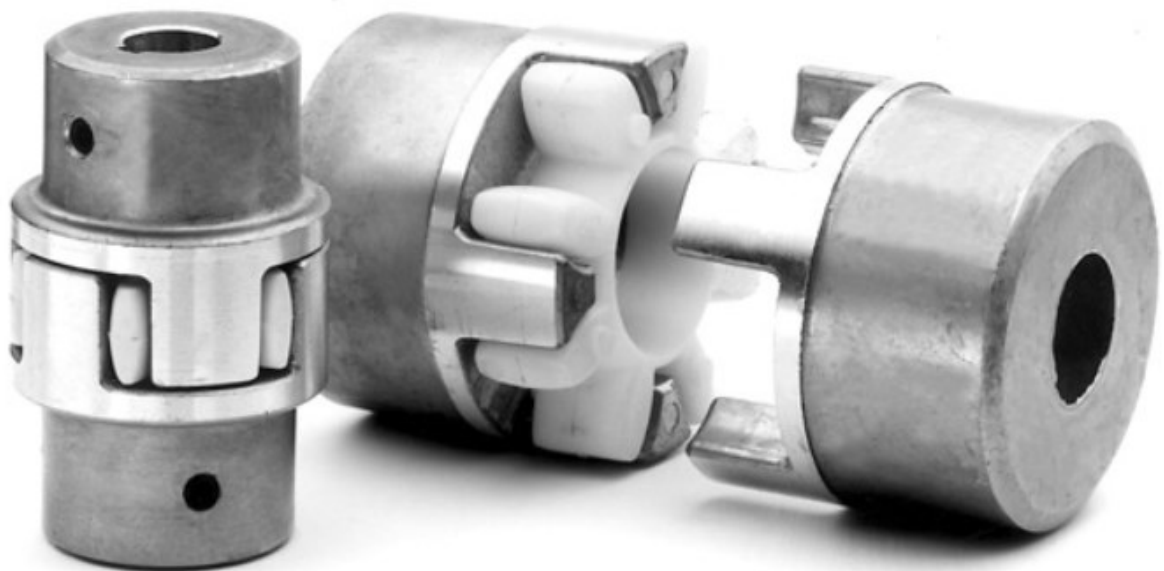
- velmi dobré tlumení vibrací,
- vyrovnání drobné nesouososti,
- vyrovnání drobné úhlové odchylky mezi spojovanými hřídeli.

Pružná spojka je složena ze dvou nábojů a pružného (polymerního) středu. Tyto prvky jsou smontovány k sobě, přičemž náboje spojky jsou vyrobeny z litiny a věnec spojky z termoplastu, který má tvrdost 94 ° Shore. [34]

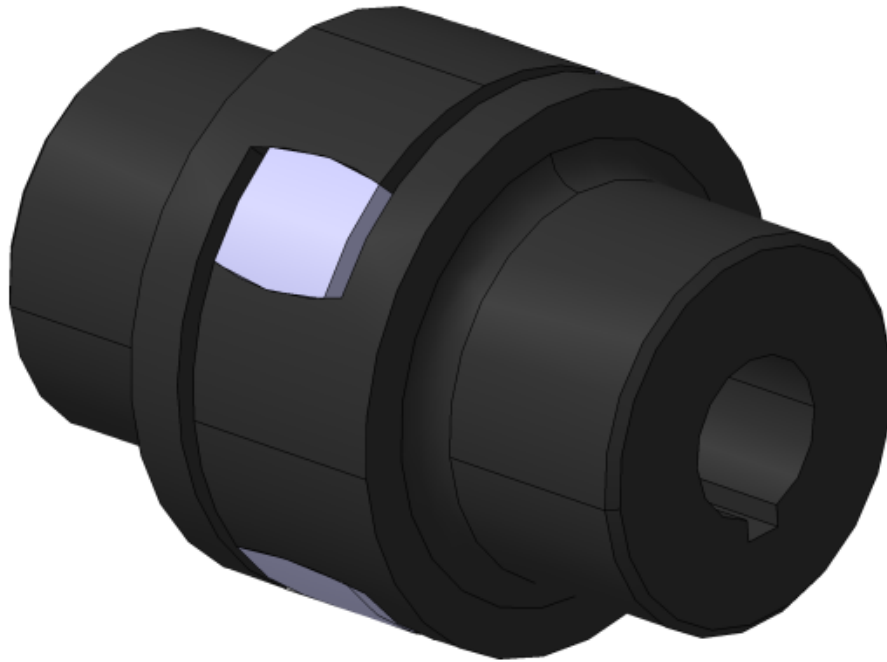
Spojka je usazena do příruby pohonu, která spojuje planetovou převodovku a tělo stroje. Spojka je zajištěna proti pootočení těsnými pery. V axiálním směru je zajištěna proti posuvu na jedné straně doražením o hřídel šneku a na dvou nábojích je pojištěna také červíky, které dotlačí náboj na hřídel šneku či výstupní hřídel převodovky

Základní parametry pružní spojky: [34]

- nominální kroutící moment  $M_n = 35 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,
- maximální otáčky  $n_{\text{max}} = 10\,600 \text{ ot/min}$ ,
- maximální axiální nesouosost = 1,4 mm,
- maximální radiální nesouosost = 0,2 mm,
- maximální úhlová odchylka = 0,9 °,
- hmotnost spojky 0,924 kg.



Obr. 72.: Reálná pružná spojka [34]



Obr. 73.: 3D model pružní spojky [34]

## 6.4 Uložení šneku do těla stroje

Přenos kroutícího momentu ze spojky na hřídel šneku je důležitý pro zajištění plynulého otáčení šneku a konstantní průběh vytlačovacího procesu. Tento přenos kroutícího momentu je zajištěn prostřednictvím těsného pera, které je usazeno do drážky na hřídeli šneku, přičemž fixuje spojení šneku a spojky proti pootočení.

### 6.4.1 Volba ložiska

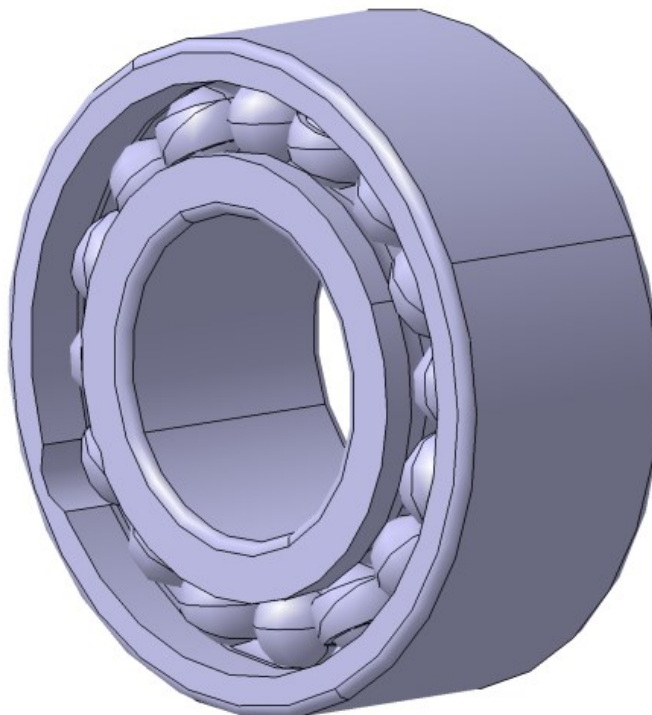
Pro daný návrh bylo podstatné zvolit ložisko, které bude přenášet jak axiální zatížení, tak radiální zatížení. Bylo zvoleno valivé dvouřadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem od společnosti SKF a přesného označení 52206. Základní charakteristiky zvoleného dvouřadého ložiska jsou následující: [35]

- dynamická únosnost  $C = 25,1$  kN,
- statická únosnost  $C_0 = 51$  kN,
- mezní únavové zatížení  $P_u = 1,86$  kN,
- referenční otáčky  $n_r = 3600$  ot/min,
- mezní otáčky  $n_m = 5000$  ot/min,
- hmotnost 0,25 kg.



*Obr. 74.: Řez axiálním dvouřadým ložiskem s kosouhlým stykem [35]*

Tento typ ložiska je vhodný pro letný typ uložení hřídele. Je tedy dobře aplikovatelný pro daný konkrétní případ, kdy je šnek uložen pouze v jednom místě. Dobře se vyrovnává s axiálními, ale i radiálními silami, které má za úkol přenášet.



*Obr. 75.: 3D model dvouřadého ložiska 52206 [35]*

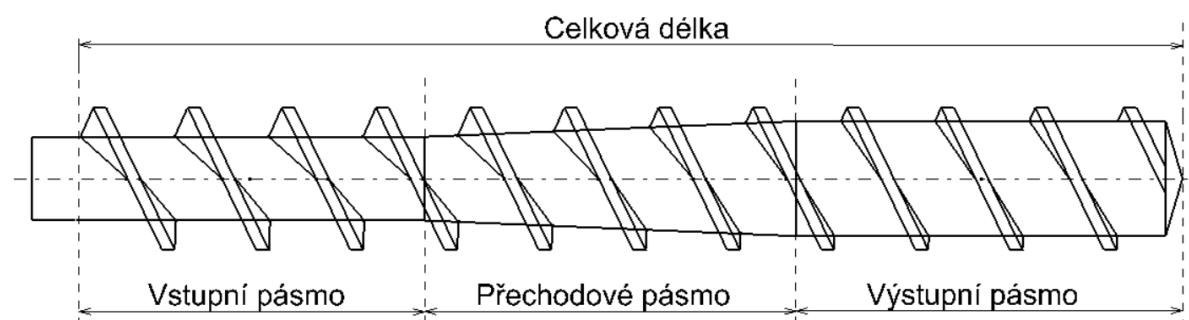
Dvouřadé kuličkové ložisko s kosouhlým stykem je přichyceno na hřídeli šneku. Z jedné strany je ložisko opřeno o stěnu těla stroje, aby bylo zajištěna pevná axiální poloha. Z druhé strany je na hřídeli zajištěna kombinací prvků KM matice a MB podložky. Tyto prvky mají za úkol zafixovat ložisko v pohybu vůči hřídeli.

Samotná hřídel šneku je zajištěna proti axiálnímu posuvu pomocí distančního kroužku, který je přitlačován k ložisku, respektive k tělu stroje přírubou pohonu.

## 6.5 Dimenzování základních součástí stroje

### 6.5.1 Obecné charakteristiky šneku a válce

Dvě nejdůležitější součásti vytlačovacího stroje jsou šnek a válec (komora). Pro danou aplikaci byl zvolen standartní jednochodý šnek se třemi zónami, kde ve vstupní (plnicí) a výstupní sekci je průměr šneku konstantní, ale v přechodové (kompresní) zóně průměr šneku směrem k hlavě narůstá. Celkový výkon vytlačovacího stroje je dán všemi třemi zónami šneku. Největší podíl na výkonu vytlačovacího stroje má ovšem vstupní pásmo vlivem třecích koeficientů na začátku vstupní zóny. Geometrie šneku a materiál také ovlivňují budoucí průběh tlaku v průběhu procesu. Ve vstupní pásmu, z důvodu žádaného nárůstu tlaku, může být povrch válce zdrsněný, chlazený či drážkovaný v prostoru pod násypkou. Tyto podpůrné jevy mají za následek exponenciální nárůst tlaku ve vstupní sekci. [10]



Obr. 76.: Obecné schéma jednochodého šneku

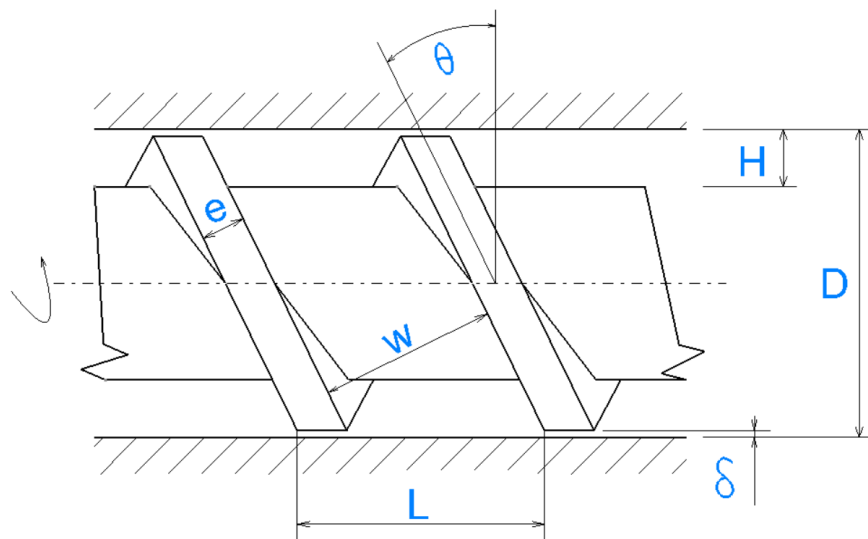
Typické parametry komerčně vyráběných jednochodých šneků:

- Celková délka šneku:  $20D - 30D$ ,
- Délka vstupního pásma:  $4D - 8D$ ,
- Délka výstupního pásma:  $6D - 10D$ ,
- Hloubka kanálu ve vstupní zóně  $H_1 = 0,1D - 0,15D$



- Hloubka kanálu ve výstupní zóně  $H_2 = (H_1/2) - (H_1/4)$
- Kompresní poměr =  $H_1/H_2$

Šnek je tvořen vřetenem a šroubovicí. Vřeteno je ta část těla, na kterém je navinuta šroubovice. Šroubovice musí mít určité parametry pro správný chod šneku a celkově vytlačovacího stroje. Základní charakteristiky jednochodého šneku jsou uvedeny na detailním schématu níže.



Obr. 77.: Detailní schéma šroubovice

Obrázek výše popisuje základní parametry šneku a válce, kde:

- D – průměr válce,
- H – hloubka kanálu,
- $\theta$  – úhel šroubovice (stoupání),
- L – vzdálenost začátků sousedících závitů šroubovice a platí, že  $L = D$ ,
- e – šířka závitů šroubovice a platí, že  $e = 0,1D$
- $\delta$  – vůle mezi šroubovicí a pláštěm válce a platí, že  $\delta = 0,002 - 0,005D$
- w – nejkratší vzdálenost mezi závitů šroubovice,

### 6.5.2 Konkrétní hodnoty dimenzování

Dle výše uvedených charakteristik šneku a válce dosazujeme do definovaných parametrů konkrétní hodnoty dle průměru válce:

- Průměr válce  $D = 18 \text{ mm}$ ,

- Průměr šneku  $d_s$

$$d_s = D - 2 \cdot \delta \quad (5)$$

$$d_s = 18 - 2 \cdot 0,09$$

$$d_s = 17,82 \text{ mm}$$

- Celková délka šneku:  $20D = 360 \text{ mm}$
- Délka vstupního pásma:  $5D = 90 \text{ mm}$ ,
- Délka přechodového pásma:  $5D = 90 \text{ mm}$ ,
- Délka výstupního pásma:  $8D = 144 \text{ mm}$ ,
- Hloubka kanálu ve vstupní zóně  $H_1$
- Hloubka kanálu ve výstupní zóně:  $H_2 = 1,26 \text{ mm}$ ,
- Kompresní poměr:  $H_1/H_2 = 2,61/1,26 = 2,07$ .
- Úhel šroubovice  $\theta$ :

$$\tan \theta = \frac{L}{\pi \cdot D} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{L}{\pi \cdot D} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{18}{\pi \cdot 18} \right)$$

$$\theta = 17,66^\circ$$

- Šířka závitu šroubovice  $e = 0,1 \cdot D = 0,1 \cdot 18 = 1,8 \text{ mm}$
- Vůle mezi šnekem a pláštěm válce  $\delta = 0,005 \cdot D = 0,005 \cdot 18 = 0,09 \text{ mm}$
- Nejkratší vzdálenost mezi závity šroubovice  $w$ :

$$w = (L - e) \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$w = (18 - 1,8) \cdot \cos 17,66^\circ$$

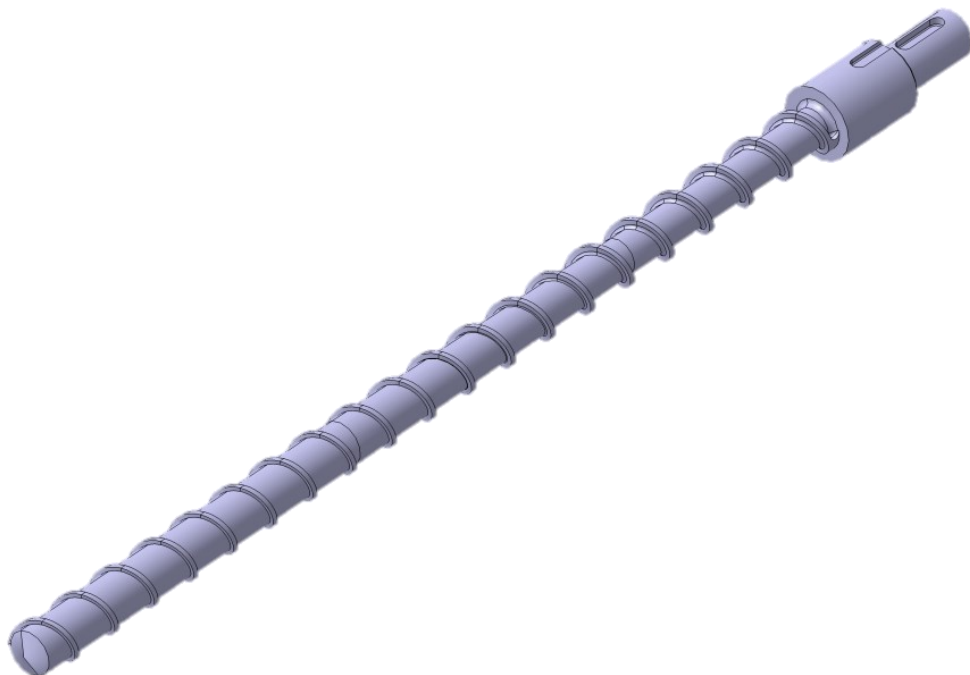
$$w = 15,44 \text{ mm}$$

### 6.5.3 Materiál a polotovar šneku

Šnek vytlačovacího stroje je velmi namáhanou součástí, tudíž materiál šneku musí disponovat vysokou pevností, chemickou odolností, velkou odolnost proti opotřebení zároveň, ale musí být relativně snadno obrobitelné. Z tohoto důvodu bývají materiály šneků často leštěny, aby odpor materiálu mezi pláštěm válce a šnekem byl, co nejmenší a zamezilo se tak příliš rychlému opotřebení jednotlivých elementů šneku. Jednoduchý šnek bude vyroben z nástrojové oceli ČSN 19552 (W.Nr. 1.2343). Z důvodu potřebné tvrdosti materiálu šneku následuje po opracování povrchu proces nitridace na hodnotu tvrdosti 65 HRC. Jako polotovar šneku pro výrobu byla kruhová tyč Ø 28 o délce 428 mm.

### 6.5.4 3D model navrženého šneku

Na obrázku níže je znázorněný 3D model jednoduchého šneku. Součástí modelu samotného šneku jsou dvě osazení pro připojení pohonu včetně drážek pro zafixování axiálního pohybu ložiska na hřídeli. Hřídel šneku je zajištěna proti pohybu v těle stroje pomocí přítlačného distančního kroužku, který je přitlačován přírubou pohonu.



Obr. 78.: 3D model jednoduchého šneku

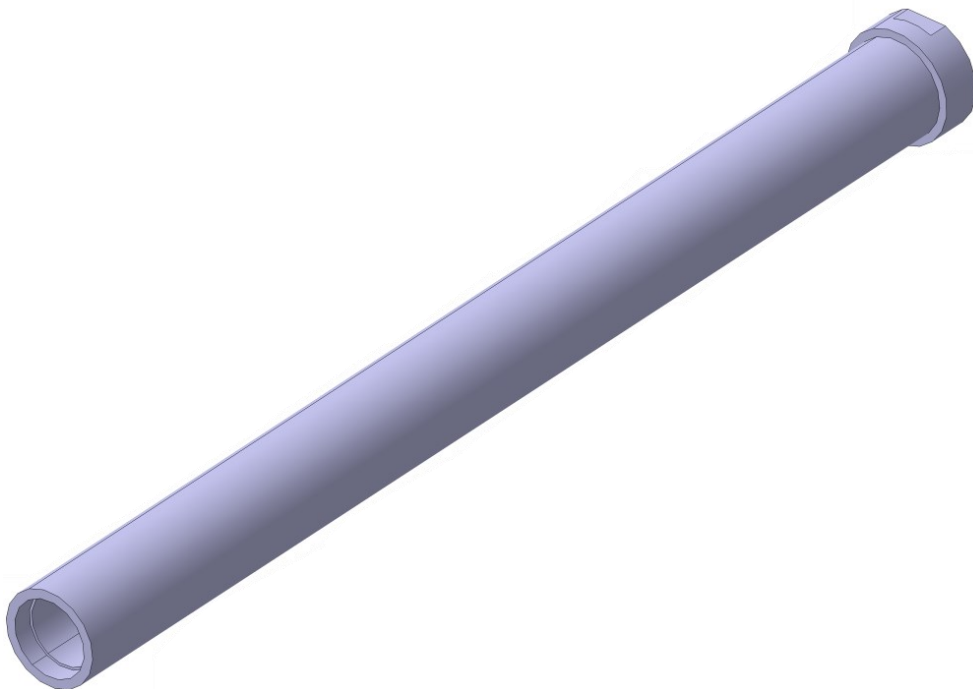
## 6.6 Návrh válce

Druhou velmi důležitou a nepostradatelnou součástí vytlačovacího stroje je válec, respektive válcová komora, ve které probíhá v kombinaci s konstantním rotačním pohybem šneku fázová změna polymerního materiálu, a to přeměna polymeru z pevné fáze do pseudoplastické. Tato fázová přeměna je závislá nejenom na rotačním pohybu šneku ve válci, ale také na množství vytvořeného disipačního tepla v prostoru mezi válcem a šnekem, nebo také na intenzitě ohřevu válce, které je do systému dodáváno prostřednictvím topných těles (pásů).

### 6.6.1 Materiál a polotovar válce

Stejně jako šnek musí být materiál válce vysoce pevný a odolný vůči opotřebení. Jako materiál válce byla zvolena austenitická nerezová ocel třídy 17, konkrétně ČSN 17 240 (W.Nr. 1.4301), která se vyznačuje velmi vysokou odolností proti korozi. Tato ocel se také vyznačuje dobrou obrobiteľností a tváriteľností.

Jako polotovar byla zvolena přesná bezešvá trubka  $\text{Ø } 28 \times 5$ , která má délku 304 mm. Na jedné straně trubky, blíže k tělu, se nachází osazení včetně vybrání na dvou stranách trubky, které má za úkol fixovat rotační pohyb válce vůči tělu stroje. Osazení také připevňovací funkci trubky k tělu pomocí přidruženého přitlačného chladiče. Na druhém konci, který je blíže k vytlačovací hlavě je vyřezán závit pro našroubování kuželové hlavy.



Obr. 79.: 3D model válce

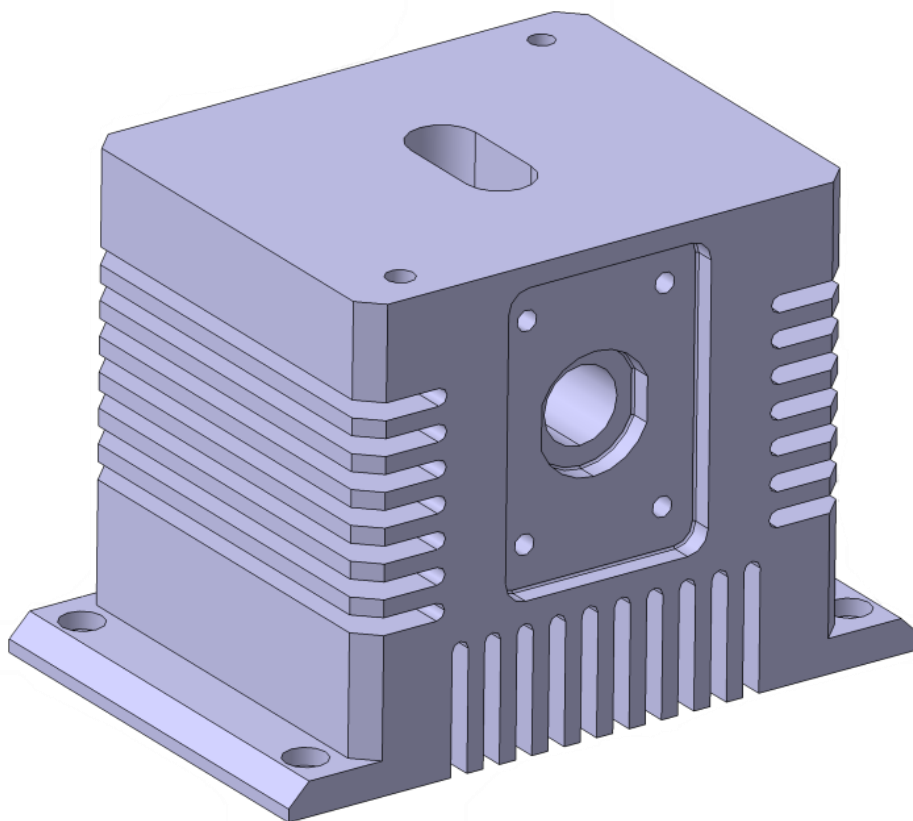
## 6.7 Návrh těla stroje

Hlavním stavebním celkem pro konkrétní návrh je tělo stroje, které plní v celkové sestavě hned několik funkcí. Tělo stroje v první řadě slouží jako kotevní prvek, který je připevněn k celkové základně vytlačovacího stroje a zajišťuje tak stabilitu nejen konstrukce, ale i vytlačovacího procesu. Další funkcí tohoto prvku je středění komponentů, které jsou ukotveny v těle, jak ze strany šneku, tak ze strany pohonu. Dále jsou na horní straně těla vyvrtány díry pro uchycení systému násypky. V neposlední řadě tento prvek disponuje drážkou pro nasypání tuhého polymerního materiálu. Tato drážka je slícována se svařencem násypky a vodící deskou pro bezproblémový tok polymerních aglomerátů. Na bočních stranách a spodní straně jsou vyfrézovány drážky z důvodu dokonalejšího odvodu tepla ze systému. Ze spodní strany těla bude žebrování chlazeno proudem chladného vzduchu generovaného z radiálního ventilátoru umístěného těsně u těla. Tímto jevem bude docíleno žádaného ochlazování válce pod násypkou, tudíž bude ve vstupním pásmu pod násypkou generováno velké množství tlaku, které se poté bude spotřebovávat ve zbývajících pásmech systému po délce šneku, tedy v přechodovém a výstupním pásmu. V tomto případě se bude jednat o vytlačovací proces, při kterém se bude jedna z hlavních součástí – šnek, chovat jako dopravní. Šnek bude mít pouze dopředný pohyb a generovat velký výkon. Tento typ šneku má vysokou schopnost produkovat velký výkon, ovšem má malou míchací účinnost. Kdybychom chtěli docílit opačného efektu u vytlačování, musel by se v systému generovat tlak po celé délce šneku a šnek by se choval jako míchací, s velkým míchacím účinkem, ovšem s malým výkonem.

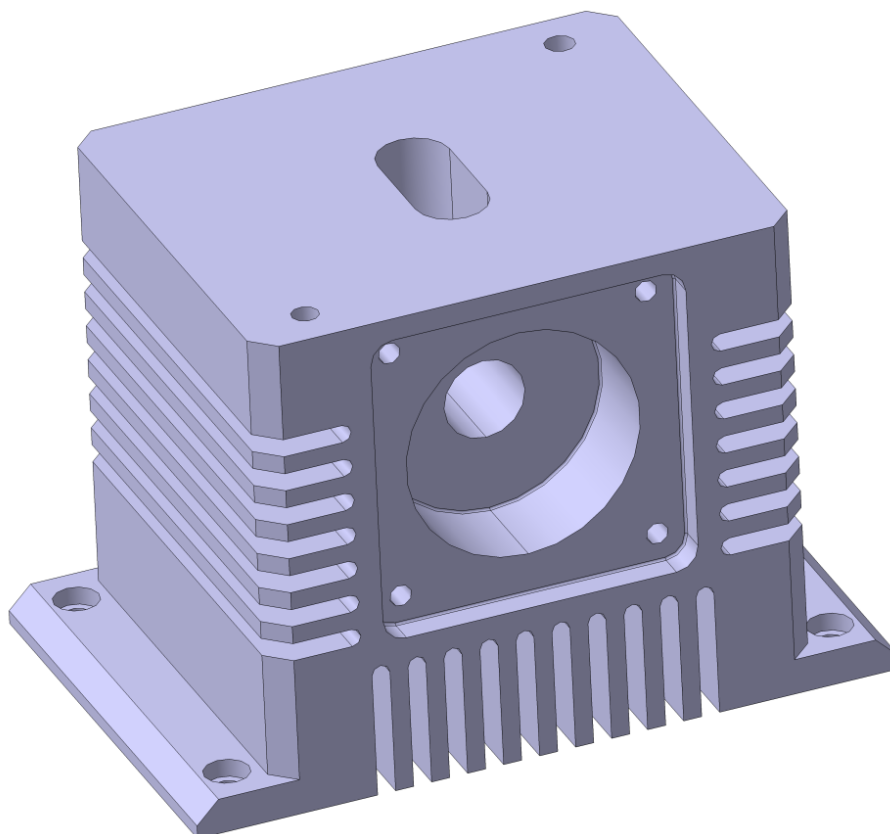
### 6.7.1 Materiál a polotovar těla

Z důvodu potřeby vysoké pevnosti těla byl zvolen duralový materiál přesného označení dle normy EN AW 7075. Jedná se o velmi pevný a relativně tvrdý materiál. Zanedbatelná taktéž není jeho dobrá obrobiteľnosť. Negativní vlastností zmíněného materiálu je velmi nízká odolnosť proti korozi. Tento negativní jev byl vyřešen povrchovou úpravou součástí, a to konkrétně eloxováním, které násobně zvyšuje odolnosť proti korozi.

Polotovar výrobku byl zhotoven jako přířez. Důvodem volby výroby pomocí přířezu byly relativně velké rozměry plné tyče a obtížná manipulace s klasickou plnou čtvercovou tyčí o průřezu například 120 x 120 mm.



*Obr. 80.: 3D model těla stroje strana od šneku*

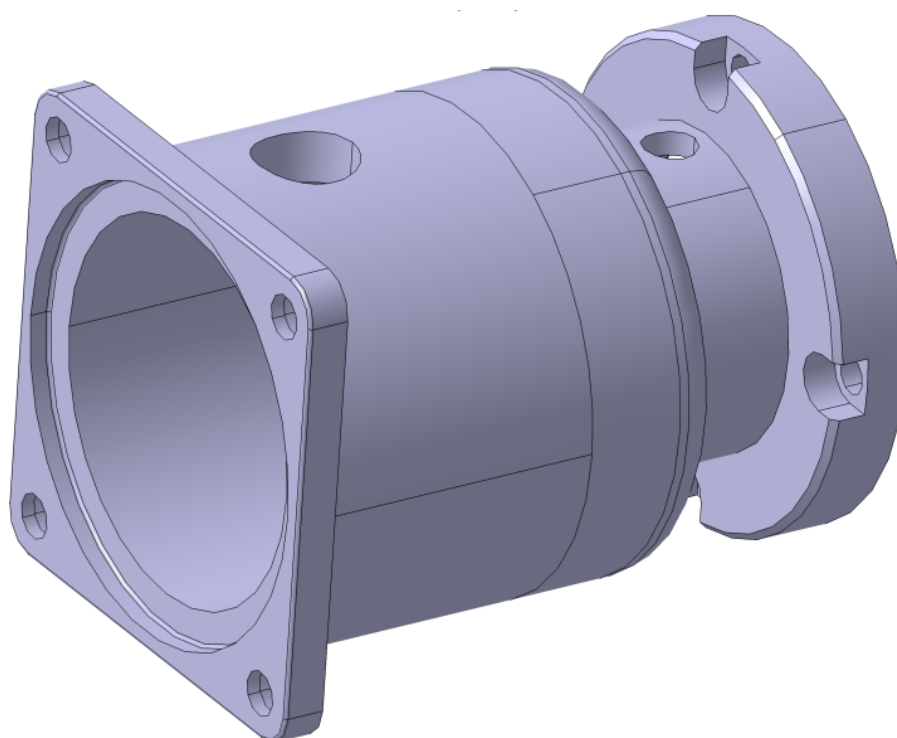


*Obr. 81.: 3D model těla strana od pohonu*

## 6.8 Návrh příruby pohonu

Pro spojení pohonu (krokový motor a planetová převodovka) a těla stroje bylo potřebné navrhnout součást, která bude fungovat jako kryt pružné spojky, ale i jako spojovací a upevňovací prvek převodovky k tělu. Na obvodech příruby byly vyvrtány dvě montážní díry pro přišroubování červíků pružné spojky k hřídeli šneku a hřídeli planetové převodovky.

Pro přírubu pohonu bylo použito duralového materiálu EN AW 7075 s následnou povrchovou úpravou eloxováním. Jako polotovar byla použita tyč čtvercového průřezu o rozměrech 70 x 70 mm a délce 100 mm.

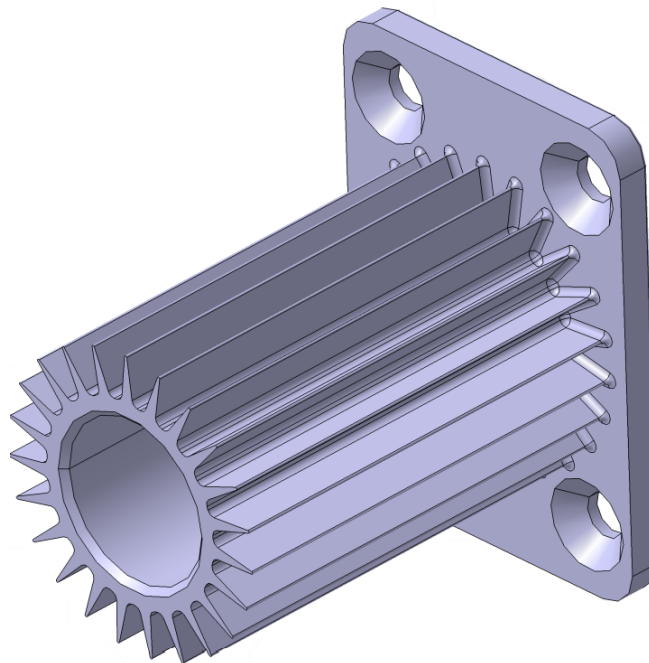


Obr. 82.: 3D model příruby pohonu

## 6.9 Volba chladiče a chlazení těla

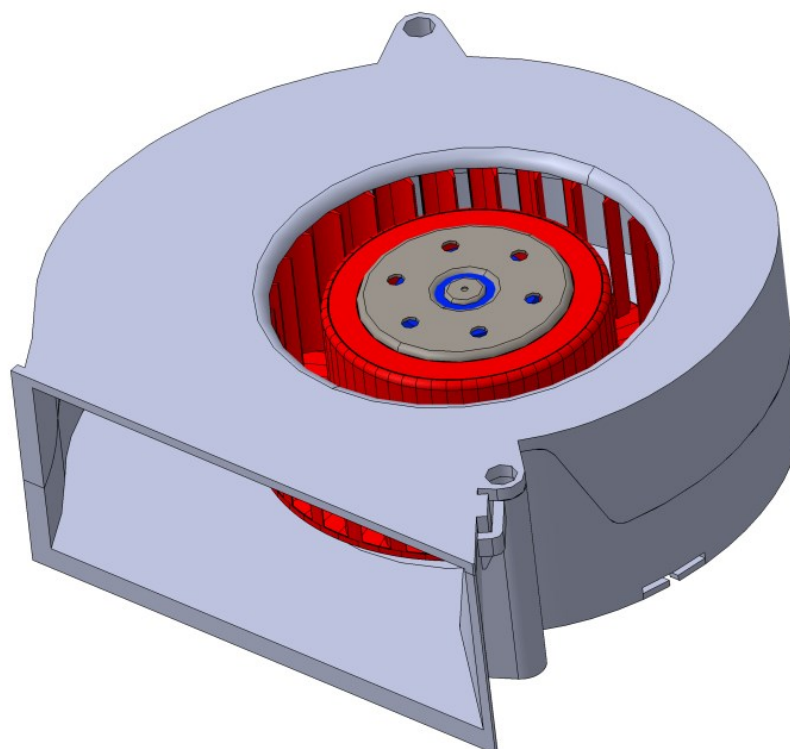
Pro správné fungování vytlačovacího procesu byl navržen chladičí prvek systému, který má za úkol odvádět přebytečné teplo od těla stroje, kde je generování tepla nežádoucí a negativním jevem. Chladič zároveň plní připevňovací funkci, kdy přitlačuje válec k tělu stroje a zajišťuje tak dokonalé slícování a spojení šneku, válce a těla.

Chladič disponuje po svém obvodu žebrováním, které slouží k odvodu tepla od válce, který je v přechodové a výstupní části vytápěný topnými pásy a na jeho povrchu se tak generuje tepelná energie.



Obr. 83.: 3D model chladiče

Pod tělem stroje se nachází žebrování, které má za úkol odvádět teplo z oblasti pod násypkou materiálu. Tyto žebra jsou chlazená chladným vzduchem. Generování chladného vzduchu má za důsledek větší generování tlaku ve vstupní zóně pod násypkou a následné spotřebě tlaku po délce šneku. O chlazení žebrování se stará radiální ventilátor, který je připevněn k základně stroje a ofukuje žebra těla pod násypkou.

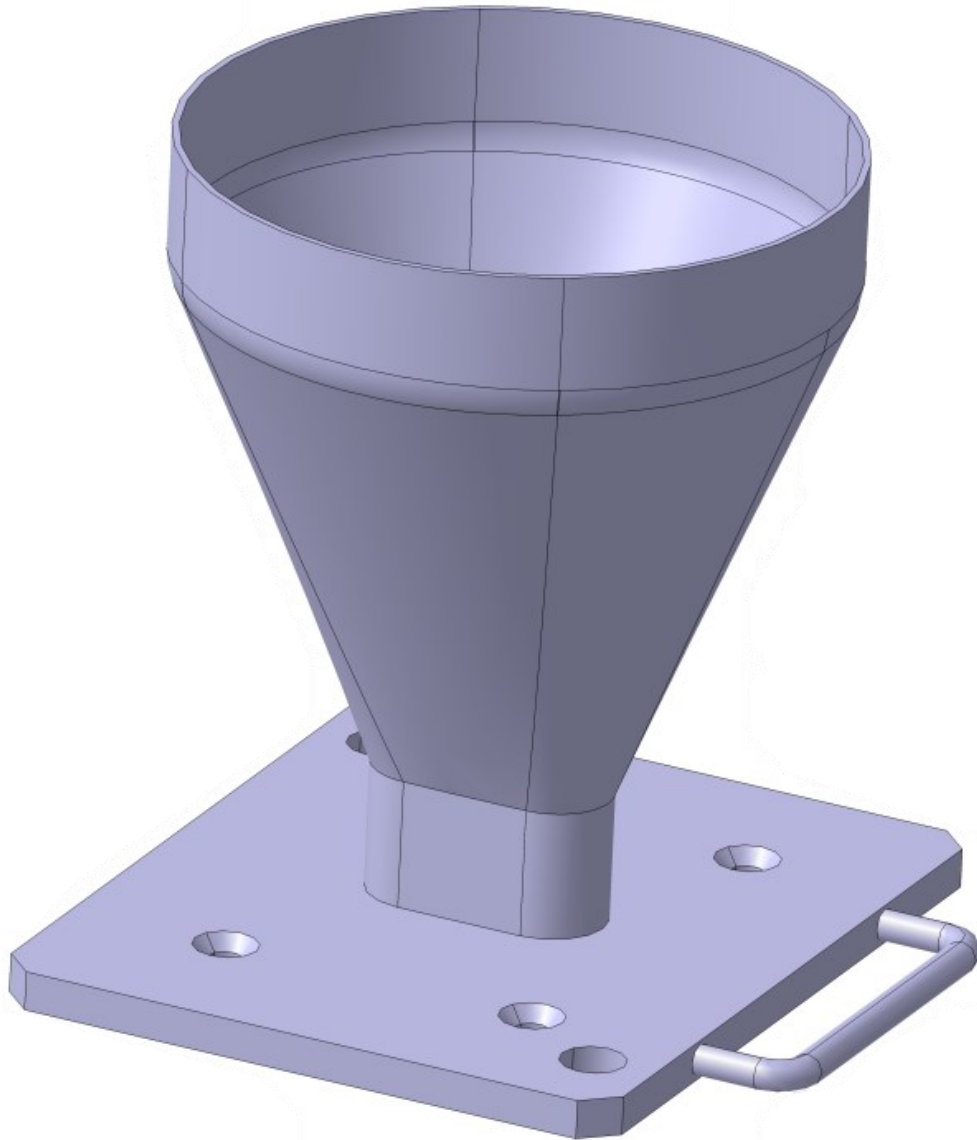


Obr. 84.: Model radiálního ventilátoru



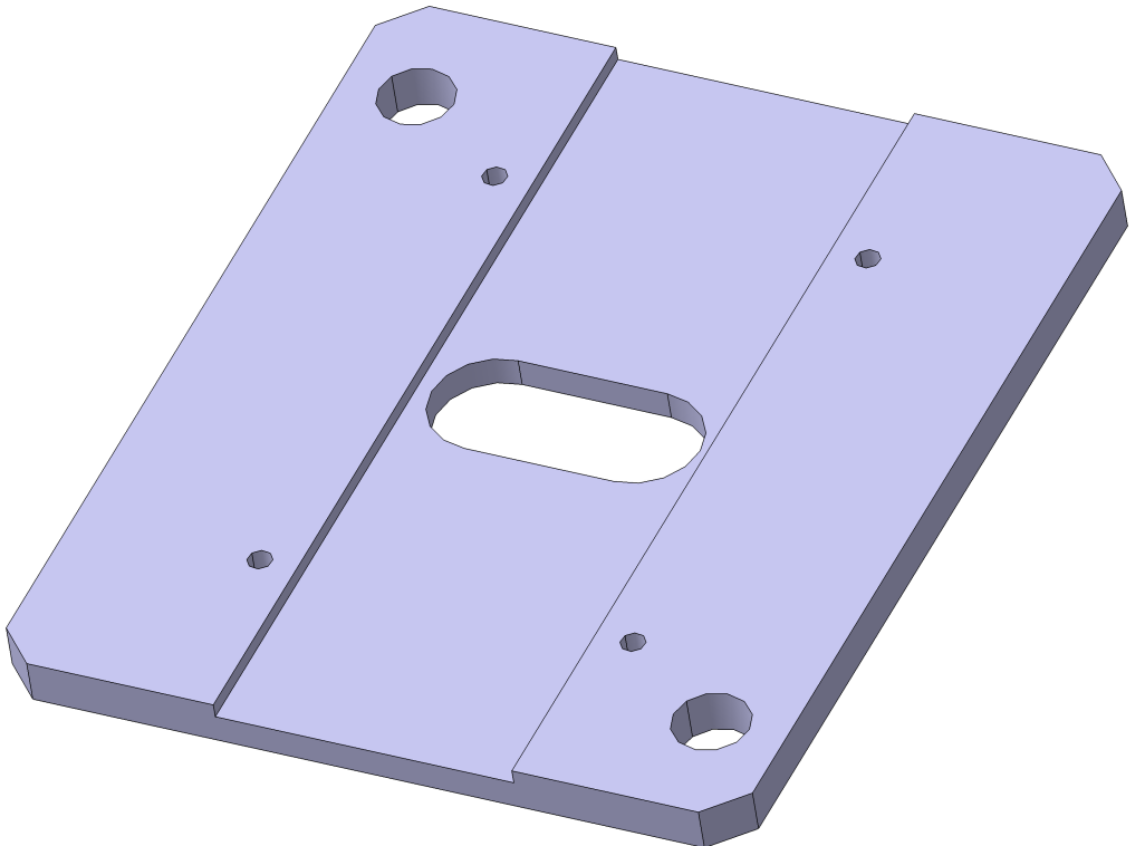
## 6.10 Návrh násypného systému

Násypka ve vytlačovacím cyklu slouží k zásobování vytlačovacího stroje tuhým polymerním materiálem (granule, prášek). V tomto případě se skládá ze tří částí, které mají za úkol vystředit násypnou drážku proti tělu stroje. První částí je svařenec násypky, který je znázorněn na obrázku níže:



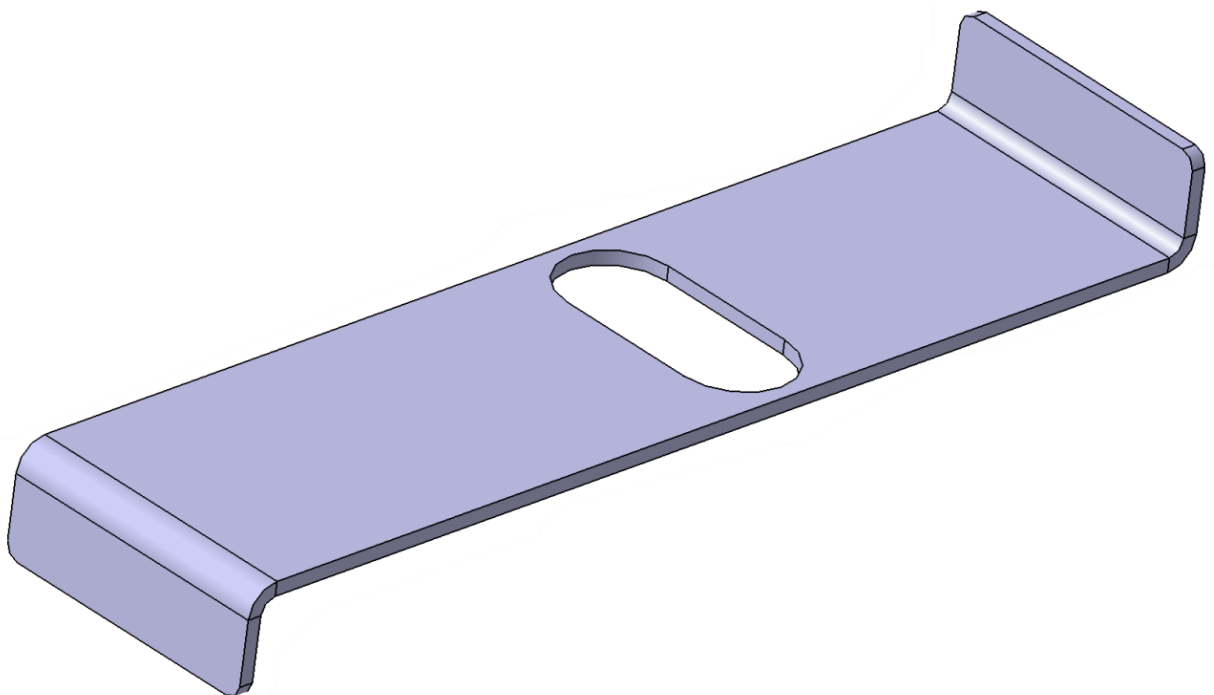
*Obr. 85.: Model svařence násypky*

Druhou částí násypného systému je vodící deska, která je připevněna spolu se svařencem násypky k tělu stroje. Společně se svařencem násypky tvoří vodící drážku pro posuvný šibr. Tento šibr slouží k okamžitému zastavení padání materiálu do prostoru mezi šnekem a válcem, a tudíž k ukončení vytlačovacího procesu. Tento stav může nastat například během poruchy či špatné optimalizace procesu, kdy je potřebné okamžité zastavení vytlačovacího procesu stroje.



*Obr. 86.: Model vodící desky*

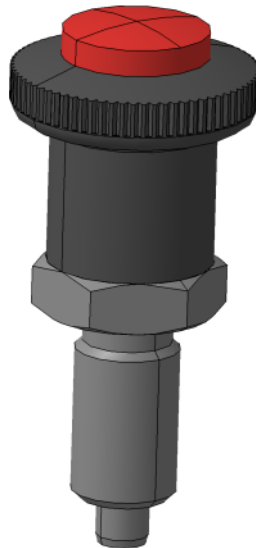
Lícování drážek musí být dokonale zajištěna, abychom v případě nuceného zastavení provozu stroje mohli okamžitě reagovat na vzniklou situaci.



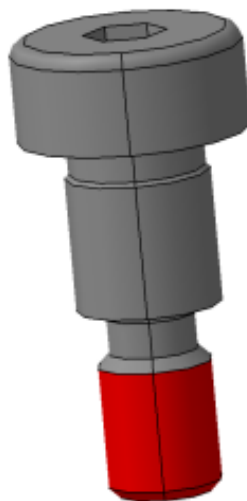
*Obr. 87.: 3D model posuvného šíbru*

### 6.10.1 Vyprázdnění násypky

V případě nutnosti vysypání celé násypky například při výměně materiálu či ukončení práce s daným materiálem je násypný systém otočný a schopný okamžitého vyprázdnění celkového objemu násypky. Jedná se o princip otočného čepu, který je přišroubován přes svařenec násypky a vodící desku jednom rohu až do těla stroje. Tento čep má vůli vůči svařenci násypky a vodící desce, tudíž je možnost otočit těmito dvěma deskami. V druhém rohu je pomocí systému přídržné matice zakontrovan zajišťovací kolík. Tento kolík má v sobě zabudovanou pružinu, která vysouvá hřídelku z těla kolíku. Tímto principem se uvolní sestava svařence násypky a vodící desky a při zavřeném posuvném šíbru se může pootočením systému vyprázdnit celá násypky.



Obr. 88.: Model zajišťovacího kolíku

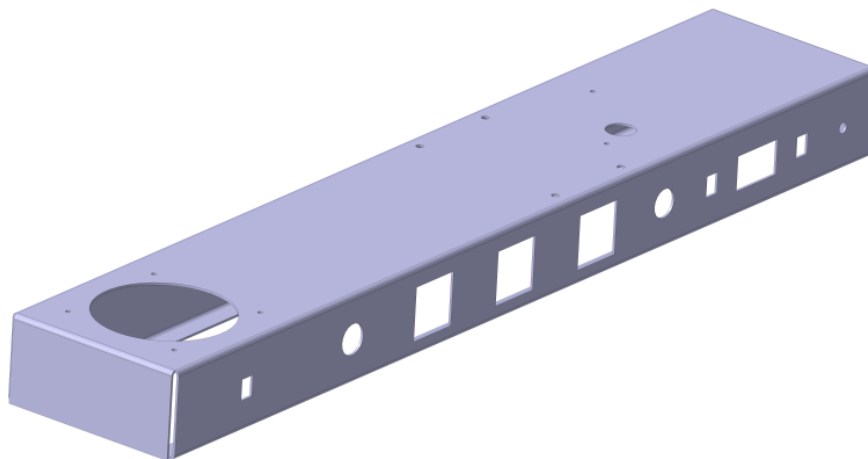


Obr. 89.: Otočný čep

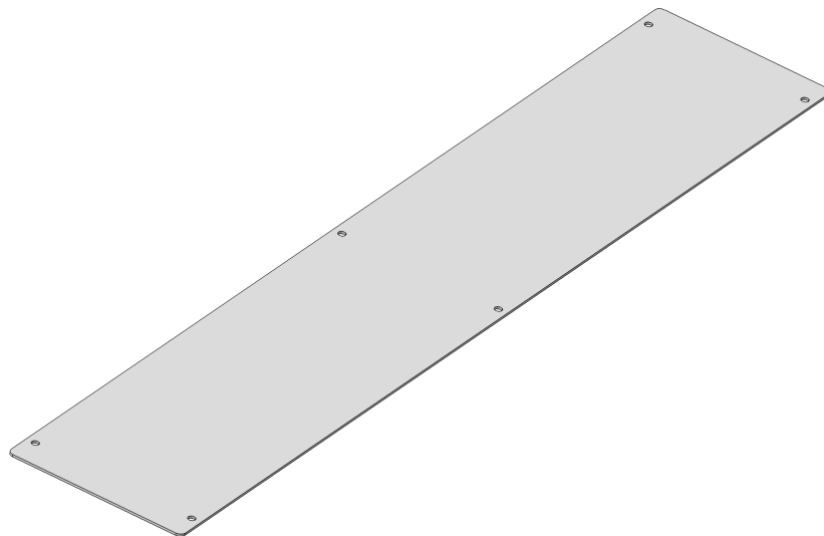
## 6.11 Návrh základny stroje

Pro dobrou a spolehlivou stabilitu vylačovací stroje byla navržena základna stroje. Tato součást byla zhotovena pomocí pálení laserem, následného ohraňování a zavařování rohů základny. Jedná se o plechovou součást, která je vyrobena z nerezového materiálu ČSN 17 240 a má tloušťku 2 mm.

Základna byla navržena pro ukotvení těla stroje a také pro osazení chladících ventilátorů jak radiálního, tak axiálního. Na součásti byly také vyřezány díry pro elektrokomponenty vylačovacího stroje. Základna je ze spodní strany zakrytována plechovým krytem. Pro dokonalé získání roviny byly ze spodní strany na kryt přišroubovány stavitelné nohy, které se dají variabilně nastavit dle nerovností na podkladu. Nastavitelné nohy disponují na spodní straně gumovou protiskluznou podložkou, která zaručuje stabilitu stroje a tlumí vibrace.



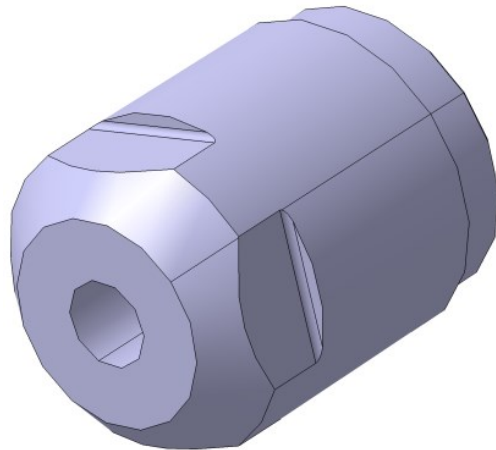
Obr. 90.: Model základny stroje



Obr. 91.: Model spodního krytu

## 6.12 Volba kuželové hlavy

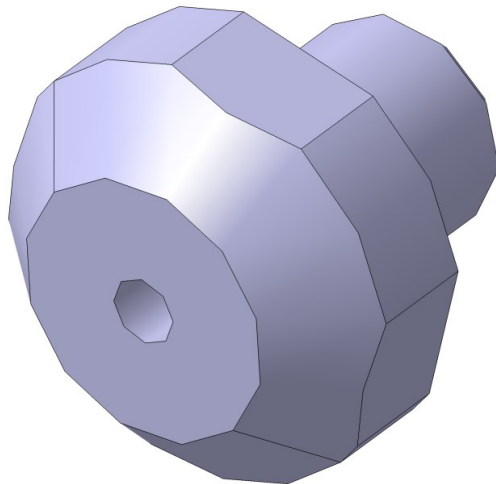
Na konci válce se nachází kuželová hlava, která slouží k regulaci průřezu materiálu z prostoru mezi šnekem a válcem do konečného průměru filamentu. Na jednom konci kuželové hlavy je vyřezán závit M22, který se bude šroubovat do válce. Jako zvolený materiál kuželové hlavy byl zvolen bronz ČSN 423016. Důvodem volby tohoto materiálu byla velká teplotní vodivost bronzu. Jako polotovar byla zvolena kruhová tyč o průměru 24 a délce 34 mm.



Obr. 92.: Model kuželové hlavy

## 6.13 Návrh trysky

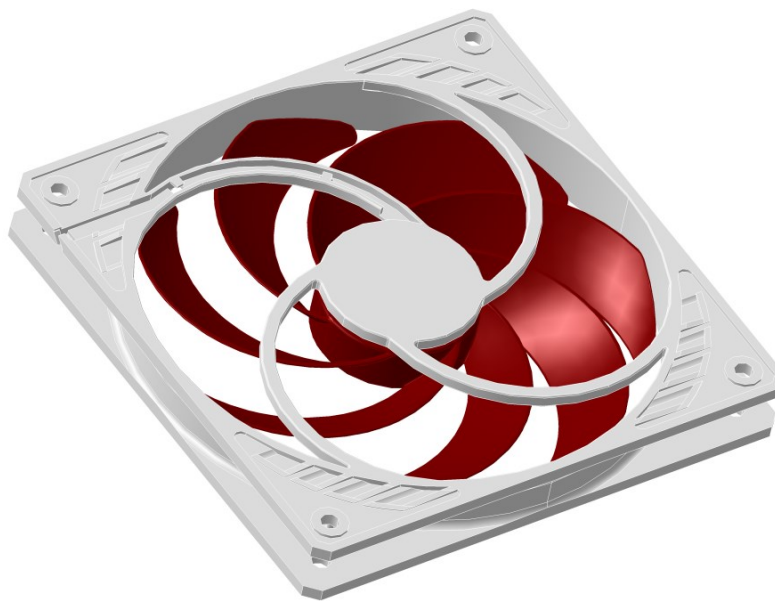
V neposlední řadě celkové koncepce vytlačovacího stroje musí být na úplném konci tryska. Tento prvek má za úkol vytlačit tiskovou strunu o daném průměru. Materiál tryska je také bronz ČSN 423016 z důvodu dobré teplotní vodivosti bronzu. Jako polotovar byla zvolena kruhová tyč o průměru 16 a délce 20 mm.



Obr. 93.: Model trysky

## 6.14 Chlazení za tryskou

Po vytlačení filamentu z trysky je materiál teplý a potřebuje ochladit na teplotu, při které s ním půjde bezpečně manipulovat. Tento úkol plní axiální ventilátor, který je přišroubovaný zespodu základny a efektivně ochlazuje vytlačenou tiskovou strunu. Z důvodu bezpečnosti je na horní stranu ventilátoru přišroubována mřížka ventilátoru.



Obr. 94.: Model axiálního ventilátoru

## 6.15 Vytápění válce a regulace teploty

Válcovou komoru se šnekem je potřebné vytápět z důvodu žádané převedení stavu tuhého polymerního materiálu na stav pseudoplastický. Pro správné nastavení teploty vytápění je v systému zabudovaný regulátor teploty.

### 6.15.1 Topné pásy

Pro vytápění válcové plochy byly použity topné pásy, které jsou umístěny na obvodu válce vytlačovacího stroje. Pod topnými pásy jsou umístěny duralové podložky, pomocí kterých se jednodušeji manipuluje s topnými tělesy v axiálním směru. Tento stav může nastat při potřebě přesunout topný pás na jiné místo a soustředit tak teplotu do jednoho místa. O vytápění válce se starají celkově tři topná tělesa, přičemž jeden topný pás má výkon 250 W a je schopen vyhřát válec na teplotu 350 °C. Vytápění válce je realizováno ve třech zónách z důvodu potřeby odlišné (stoupající) teploty směrem k vytlačovací hubici (trysce). Teplota je kontrolována pomocí termočlánku, který je přitlačen mezi topným pásem a tělem válce.



Obr. 95.: Topný pás [36]

Topný pás byl uchycen na válci pomocí svěrného šroubového spojení, které přitahuje objímky topného tělesa k sobě a fixuje tak topný pás vůči axiálnímu pohybu na hřídeli válce. Aretace proti pootočení na hřídeli je řešena také šroubovým spojením. Termočlánek, respektive jeho sonda je vložena do podložky topného pásu a snímá hodnotu teploty na povrchu válce. Sonda termočláneku zasílá signály do regulátoru teploty a obsluha stroje poté může náležitě reagovat na aktuální stav teploty.



Obr. 96.: Termočlánek se sondou [37]

### 6.15.2 Regulace teploty

Topné pásy, respektive jejich výkon a teplota byla regulována pomocí regulátorů teploty od firmy Autonics. Tyto tři regulátory byly zabudovány do základny vytlačovacího stroje. Regulátor reaguje na teplotní situaci na povrchu válce a následně koriguje hodnotu teploty v závislosti na vytlačovacím procesu.



Obr. 97.: 3D model regulátoru teploty



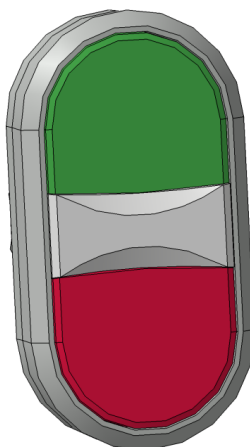
Obr. 98.: Reálný model regulátoru teploty TZN4S



## 6.16 Ostatní elektro komponenty

Pro správnou funkci vytlačovacího stroje bylo potřeba zakomponovat do návrhu i ostatní elektro komponenty, které byly zabudovány do základny z důvodu ovládní, korekce a kontroly vytlačovacího procesu.

Na základnu bylo zabudován hlavní vypínač, který při stisknutí zapíná či vypíná veškeré komponenty vytlačovacího stroje. V případě poruchy či úrazu bylo z důvodu bezpečnosti zabudováno tlačítko total stop, které okamžitě odstaví celý stroj z provozu. Dále byly zabudovány 3 menší vypínače, které spouštějí nebo vypínají axiální či radiální ventilátory a taktéž krokový motor. Ke krokovému motoru byl připojen potenciometr, kterým se dají plynule regulovat otáčky krokového motoru v průběhu vytlačovacího procesu. Na potenciometr byl připojen LCD displej, který digitálně ukazuje parametry otáček krokového motoru.



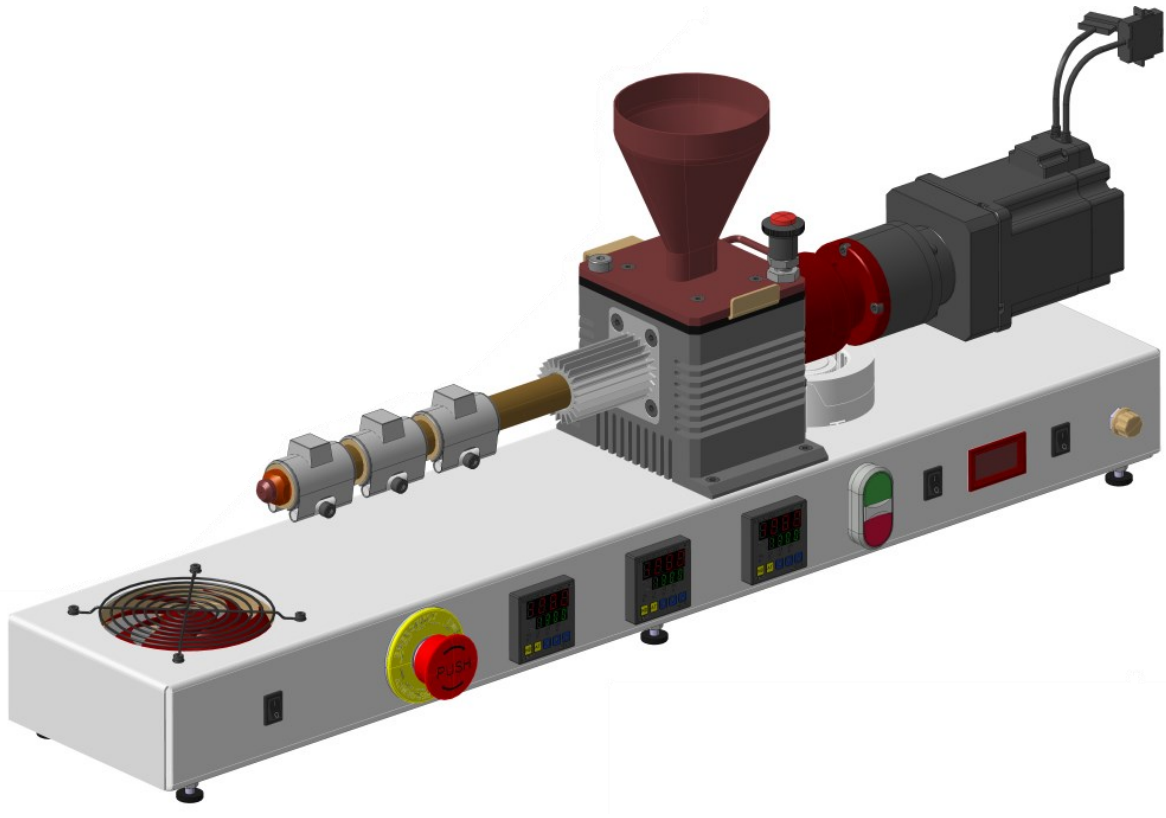
Obr. 99.: Model hlavního vypínače



Obr. 100.: Tlačítko total stop

### 6.17 Vizualizace kompletního návrhu vytlačovacího stroje

Po návrhu či volbě jednotlivých komponentů vytlačovacího stroje byly tyto prvky zakomponovány do celkové sestavy. Koncepce stroje byla uvažována jako návrh výrobního zařízení, které má splnit parametry kancelářského, přenosného a kompaktního strojního zařízení.



Obr. 101.: Kompletní návrh vytlačovacího stroje

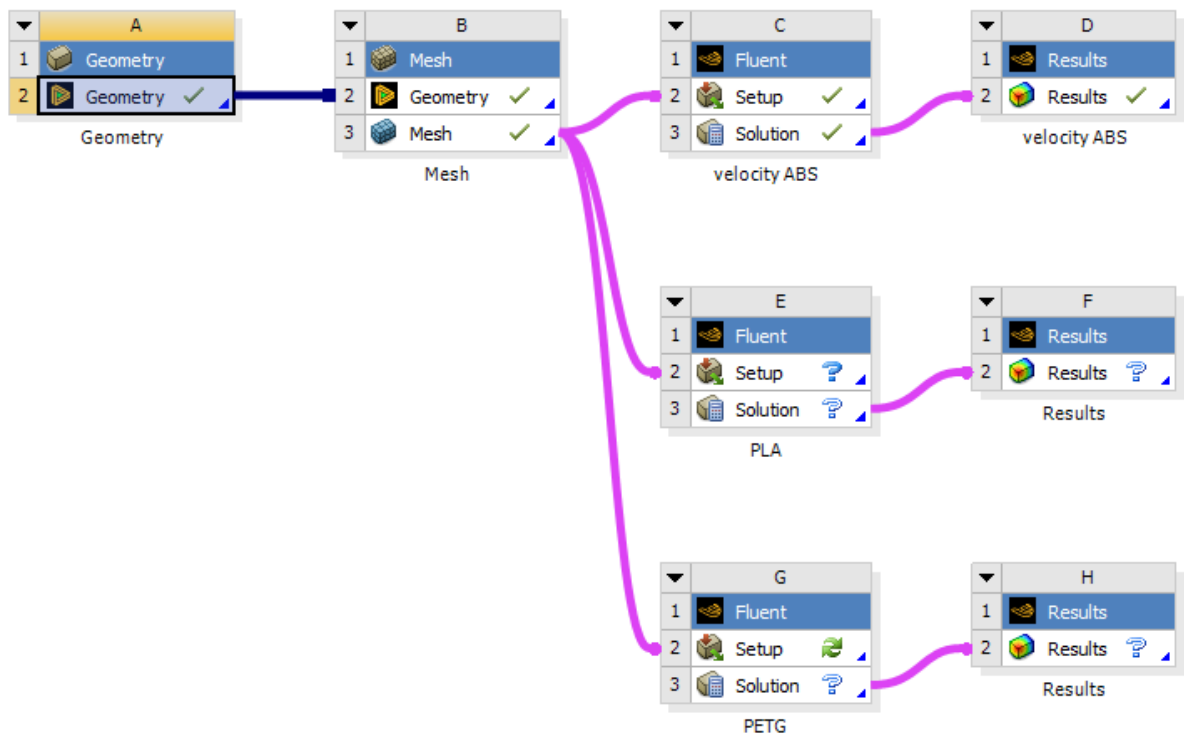
## 7 ANALÝZY V ANSYS FLUENT

V programu ANSYS v modulu Fluent byla provedena analýza rychlostního profilu pro tři materiály ABS, PLA a PETG. Pro analýzu bylo potřebné zjednodušit úlohu tak, že tělo stroje bylo nahrazeno klasickým válcovým tvarem a zafixován ve směru osy se šnekem pro následné použití v modulu Geometry.

### 7.1 Strukturní strom analýzy

Pro vytvoření analýzy bylo potřeba vytvořit slet funkcí, kterými bylo dosaženo výsledku analýzy. Pro tento účel posloužil velmi dobře strukturní strom operací v modulu Workbench, kde byl graficky navrhnut postup řešení úlohy v jednotlivých krocích. Do stromu byly zařazeny všechny moduly, které byly podstatní pro vytvoření analýzy. Jednalo se o následující moduly programu ANSYS:

- geometry – tvorba geometrie,
- mesh – vysíťování geometrie,
- fluent – solver (řešič) a setup (nastavení) dané úlohy,
- results – vizualizace výsledků.

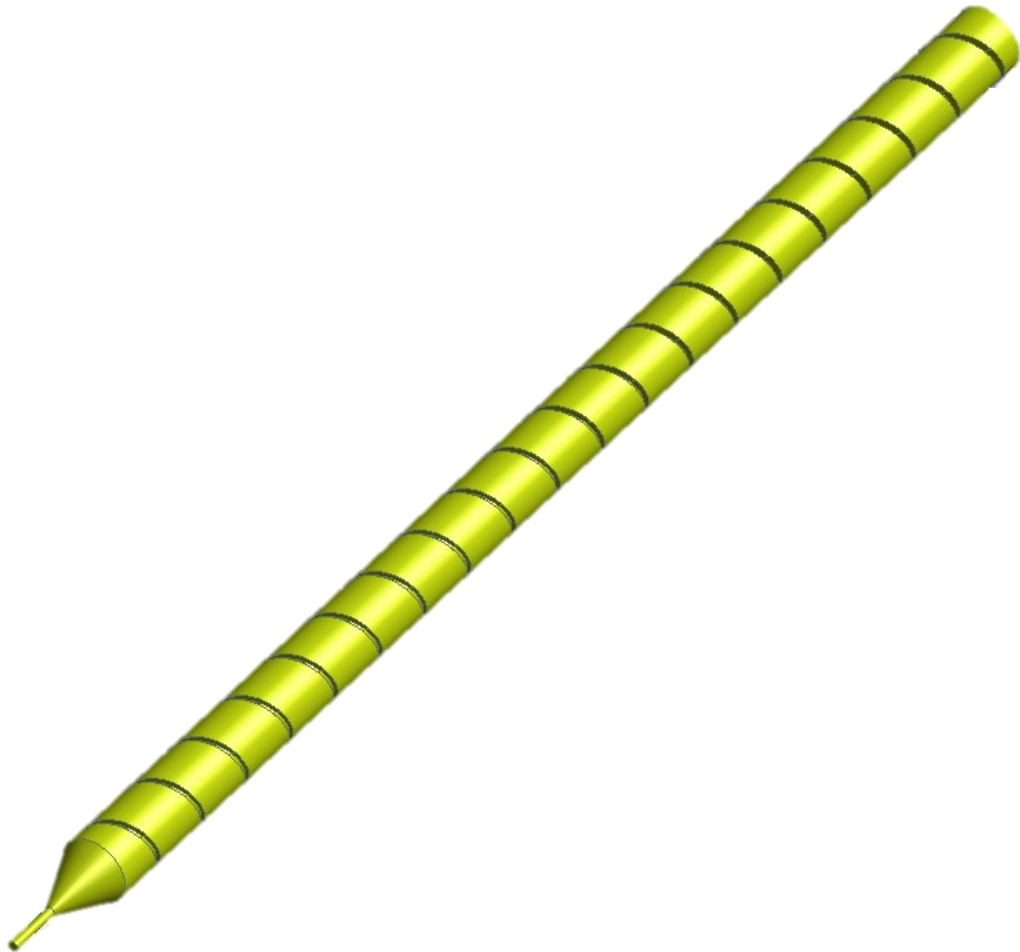


Obr. 102.: Strom operací ve Workbench

## 7.2 Geometrie

Základním prvkem pro vytvoření analýzy bylo zhotovit geometrii systému. Pro tento účel bylo využito importu geometrie šneku a válce z programu CATIA V5R19. Tuto geometrii bylo potřeba převést do souboru .stp. Takto připravený soubor byl importován do modulu Geometry v programu ANSYS.

Geometrie byla upravena v Design Modeler pomocí funkce Fill a Slice. Pomocí funkce Boolean byla získána geometrie taveniny, která bude proudit mezi geometriemi šneku a pláštěm válce. K vyřezané tavenině polymeru byl v modulu Plane a Sketch domodelován prvek kuželové hlavy a trysky vytlačovacího stroje pro úplnou geometrii vytlačování mezi šnekem a válcem.



Obr. 103.: Vymodelovaná geometrie taveniny

### 7.3 Vysítování geometrie

Po vytvoření geometrie taveniny byla vytvořena síť geometrie pro následný výpočet rychlostního profilu. Tato síť byla vytvořena v modulu Mesh, kde byly nastaveny veškeré parametry důležité pro výpočet. Při nastavování tvorby sítě byl volen kompromis mezi přesností řešení a časem výpočtu analýzy. Parametry sítě, které byly nastaveny v detailech sítě jsou uvedeny na obrázku níže.

Details of "Mesh" <span style="float: right;">▼ ↑ □ ×</span>	
[-] <b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] <b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	Default (19,791 mm)
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
[-] <b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (39,582 mm)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (9,8955e-002 mm)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	2, mm
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	Yes
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	1, mm
<input type="checkbox"/> Proximity Gap Factor	Default (3,)
Proximity Size Sources	Faces and Edges
Bounding Box Diagonal	395,82 mm
Average Surface Area	212,5 mm <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	1,6476e-004 mm
[-] <b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	High
Mesh Metric	None
[+] <b>Inflation</b>	
[+] <b>Advanced</b>	
[+] <b>Statistics</b>	

Obr. 104.: Parametry sítě

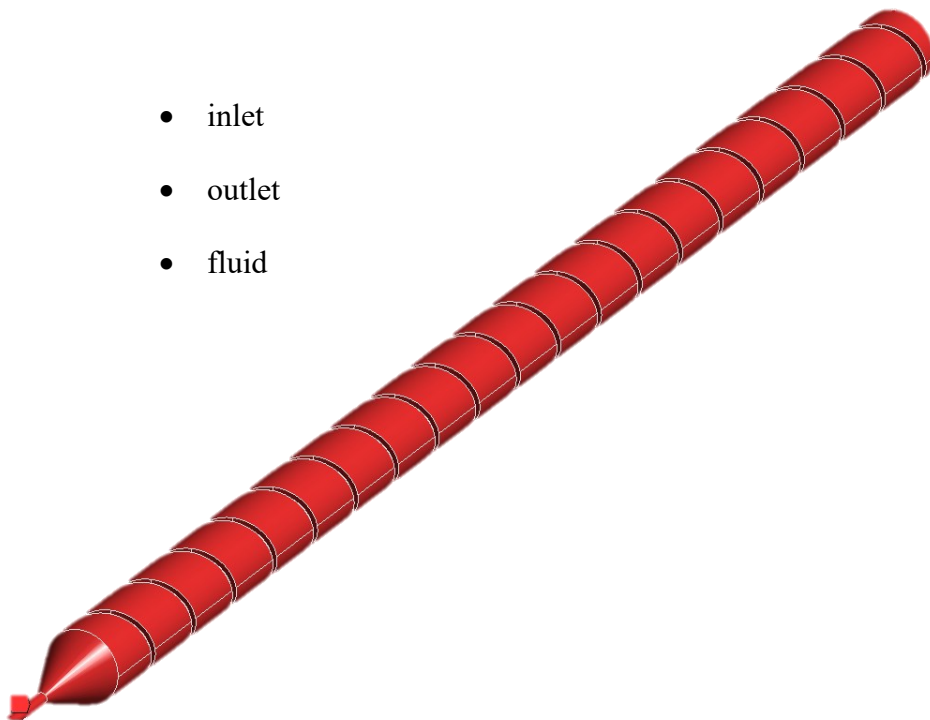
Po nastavení jednotlivých charakteristik byl spuštěn výpočet a tvorba sítě geometrie. Po vygenerování sítě byla síť zkontrolována pomocí funkce Check a Mesh quality.



*Obr. 105.: Vygenerovaná síť geometrie*

Pro následné zpracování sítě v modulu Fluent byli pojmenovány jednotlivé vygenerované plochy sítě z důvodu přehlednějšího a srozumitelnějšího způsobu zadávání v operaci Fluent. Plochy byly pojmenovány pomocí funkce Create name selection jako inlet, outlet a fluid.

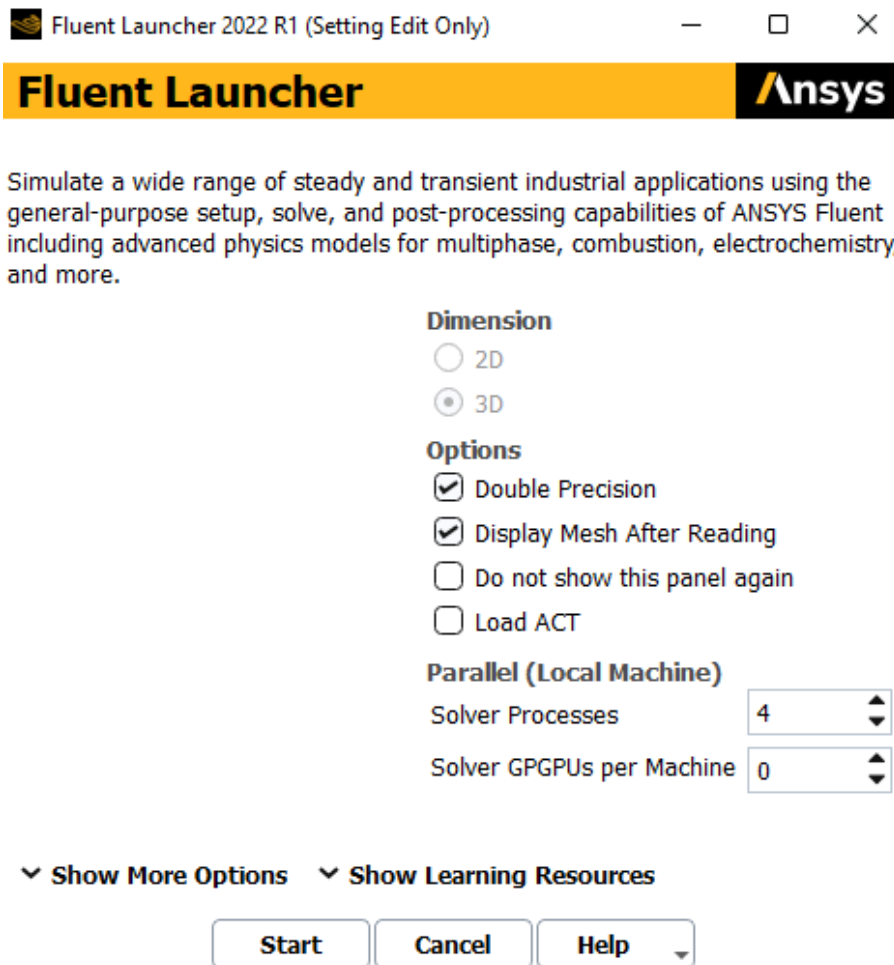
- inlet
- outlet
- fluid



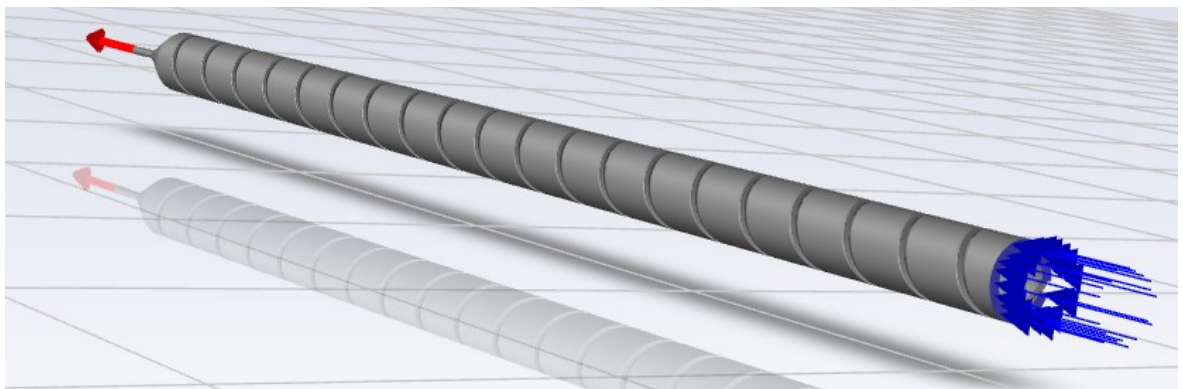
*Obr. 106.: Pojmenované plochy sítě*

## 7.4 Modul Fluent

Po vytvoření sítě taveniny bylo dalším krokem nastavení řešiče úlohy, ve kterém byly nastaveny hlavní charakteristiky vytlačovacího procesu a také parametry jednotlivých vytlačovaných materiálů. Prvním krokem bylo prvotní nastavení Fluent launcher, kde byly nastaveny základní parametry výpočtu. Poté bylo spuštěno prostředí v modulu Fluent.



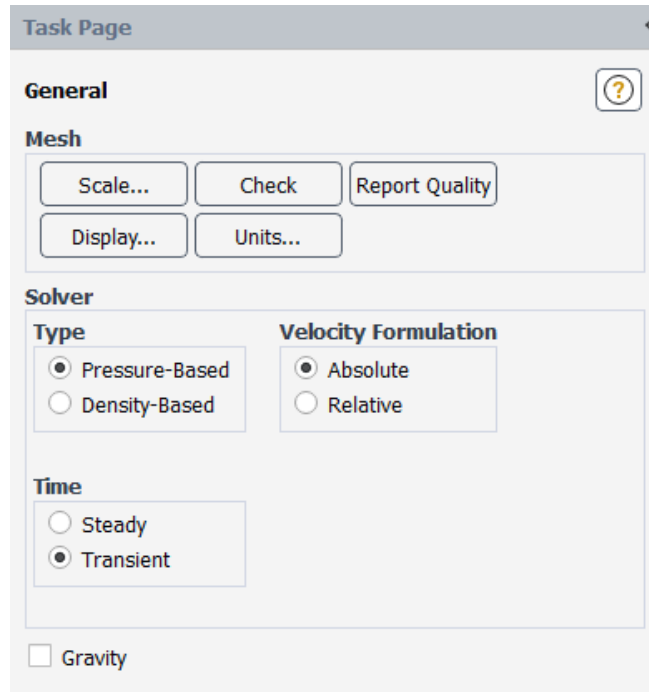
Obr. 107.: Základní parametry výpočtu



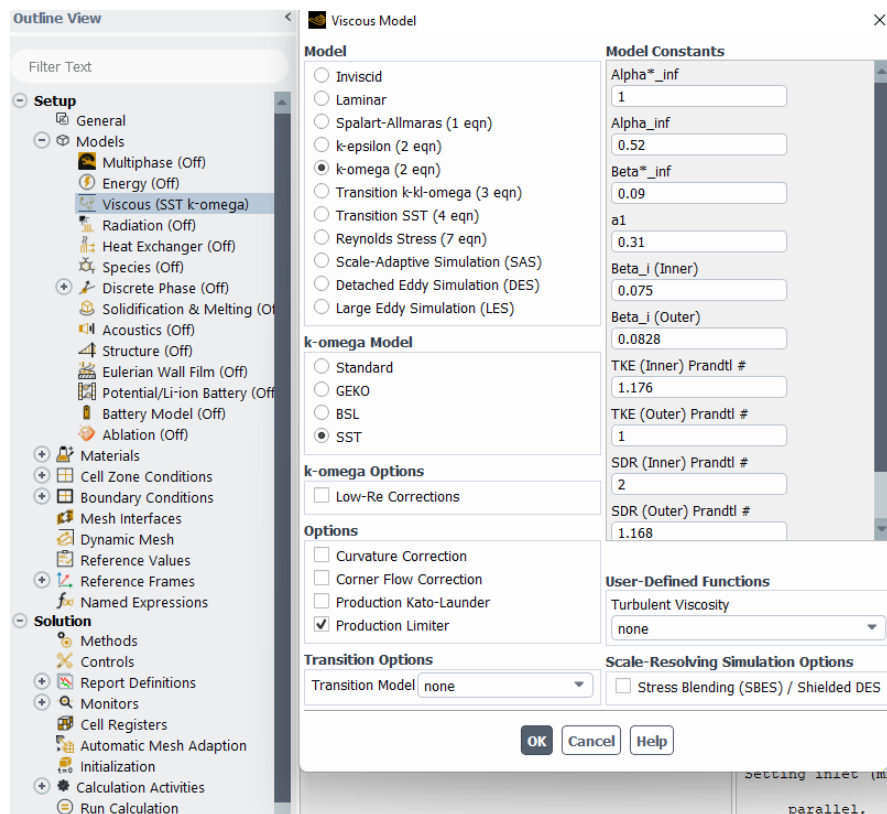
Obr. 108.: Prostředí v modulu Fluent

### 7.4.1 Obecné nastavení a výběr modelu

Po otevření bylo provedeno obecné nastavení jako bylo nastavení typu řešiče, formulace rychlosti a nastavení času. Dalším bodem bylo nastavení modelu výpočtu.



Obr. 109.: Obecné nastavení



Obr. 110.: Menu modulu Fluent a model výpočtu



### 7.4.2 Charakteristiky materiálu

Po výběru výpočtového modelu byly nastaveny základní parametry materiálu pro analýzu rychlostního profilu.

**Create/Edit Materials**

Name:

Material Type:

Chemical Formula:

Fluent Fluid Materials:

Mixture:

Order Materials by:  
 Name  
 Chemical Formula

Fluent Database...  
 GRANTA MDS Database...  
 User-Defined Database...

**Properties**

Density [kg/m<sup>3</sup>]:

Viscosity [kg/(m s)]:

Obr. 111.: Parametry materiálu ABS

**Fluid**

Zone Name:

Material Name:

Frame Motion  3D Fan Zone  Source Terms  
 Mesh Motion  Laminar Zone  Fixed Values  
 Porous Zone  LES Zone

Reference Frame:

**Rotation-Axis Origin**

X [m]:   
 Y [m]:   
 Z [m]:

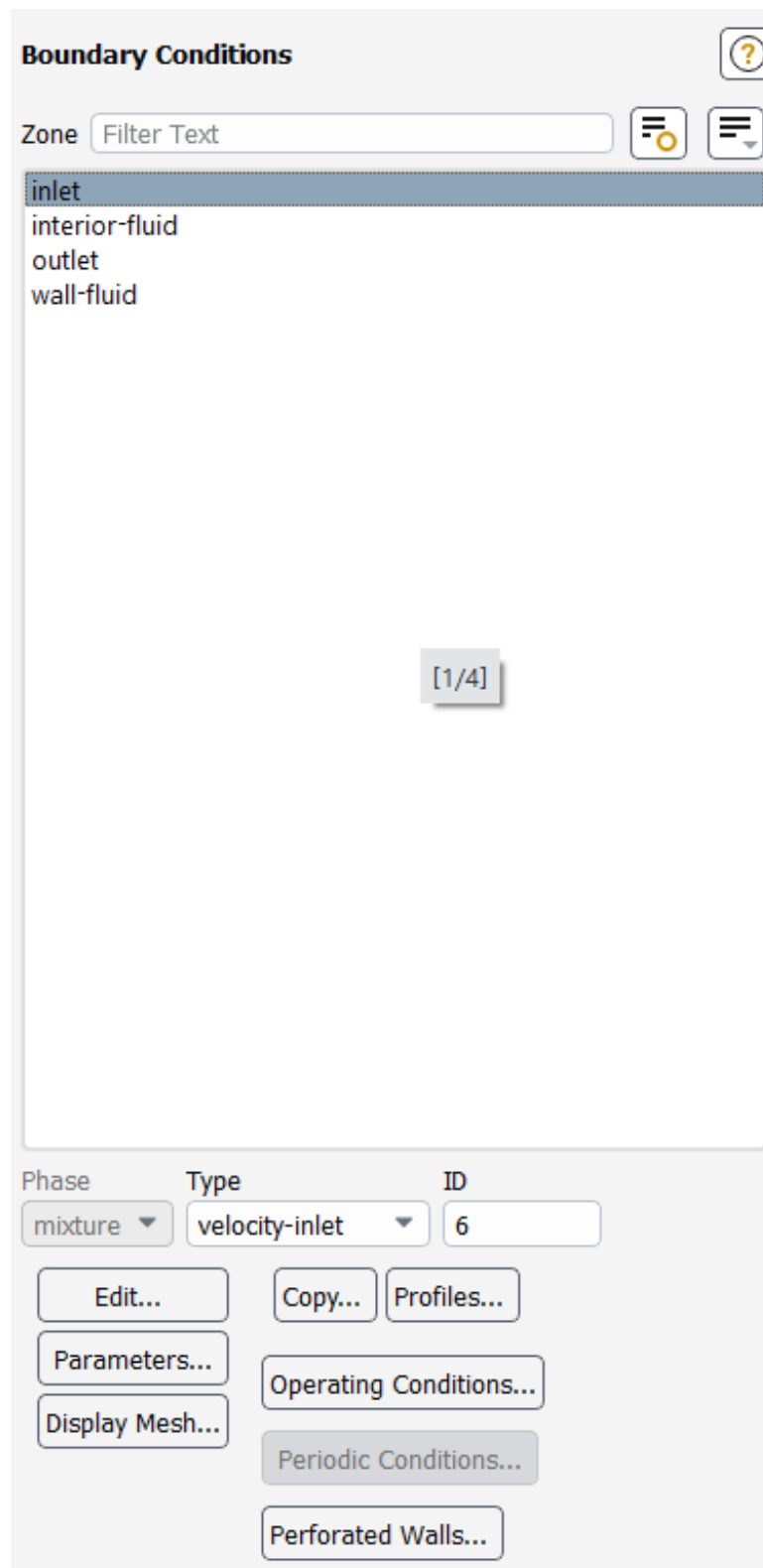
**Rotation-Axis Direction**

X:   
 Y:   
 Z:

Obr. 112.: Nastavení taveniny

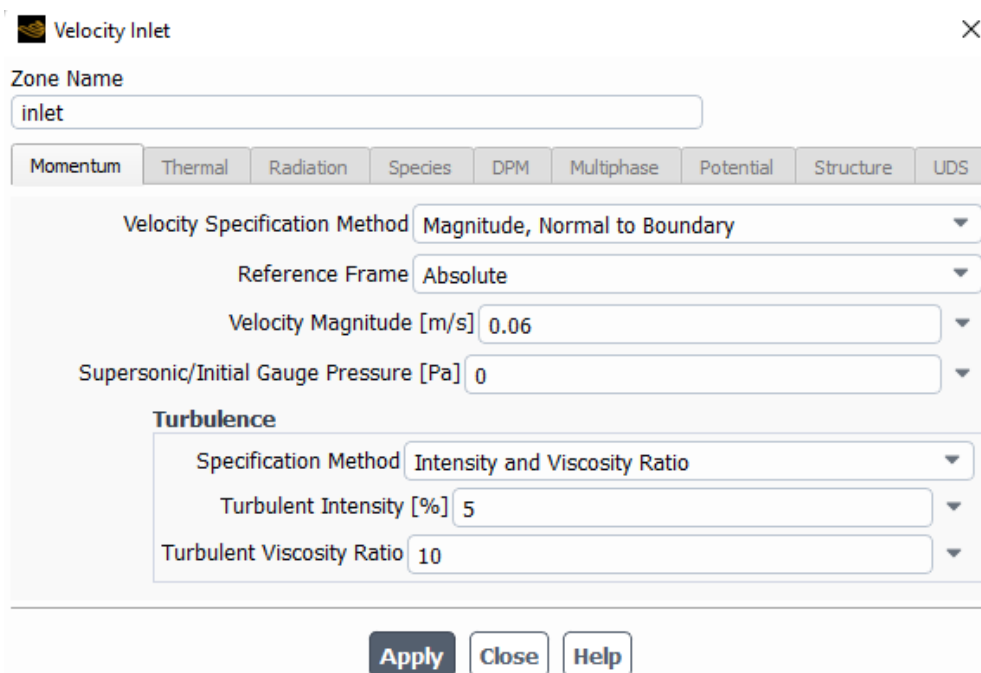
### 7.4.3 Okrajové podmínky

Dalším krokem bylo nastavení okrajových podmínek analýzy, které byly nastaveny pomocí funkce Boundary conditions. Byly nastaveny vstupní a výstupní parametry systému.



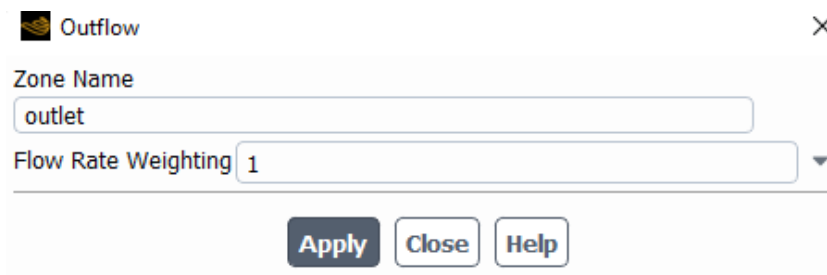
Obr. 113.: Menu pro nastavení podmínek

Důležité pro výpočet analýzy bylo nastavení vstupní rychlosti a výstupních parametrů.



The screenshot shows the 'Velocity Inlet' dialog box. At the top, there is a 'Zone Name' field containing 'inlet'. Below this is a tabbed interface with 'Momentum' selected. The 'Velocity Specification Method' is set to 'Magnitude, Normal to Boundary', the 'Reference Frame' is 'Absolute', and the 'Velocity Magnitude [m/s]' is '0.06'. The 'Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]' is '0'. Under the 'Turbulence' section, the 'Specification Method' is 'Intensity and Viscosity Ratio', 'Turbulent Intensity [%]' is '5', and 'Turbulent Viscosity Ratio' is '10'. At the bottom are 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons.

Obr. 114.: Nastavení vstupní rychlosti

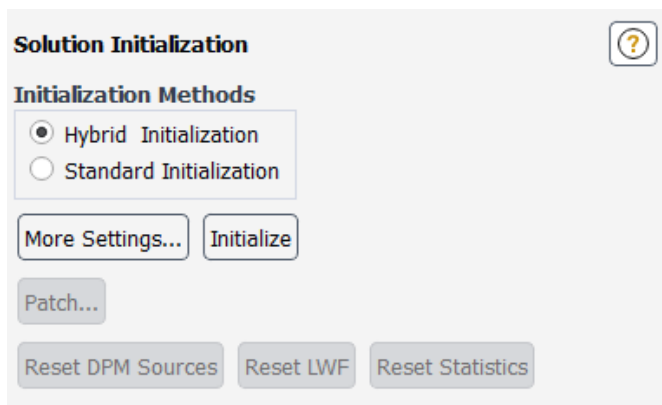


The screenshot shows the 'Outflow' dialog box. The 'Zone Name' field contains 'outlet'. The 'Flow Rate Weighting' is set to '1'. At the bottom are 'Apply', 'Close', and 'Help' buttons.

Obr. 115.: Nastavení výstupu

#### 7.4.4 Hybridní inicializace

Před spuštěním celkového výpočtu proběhla hybridní inicializace řešitele. Tato inicializace proběhla úspěšně.

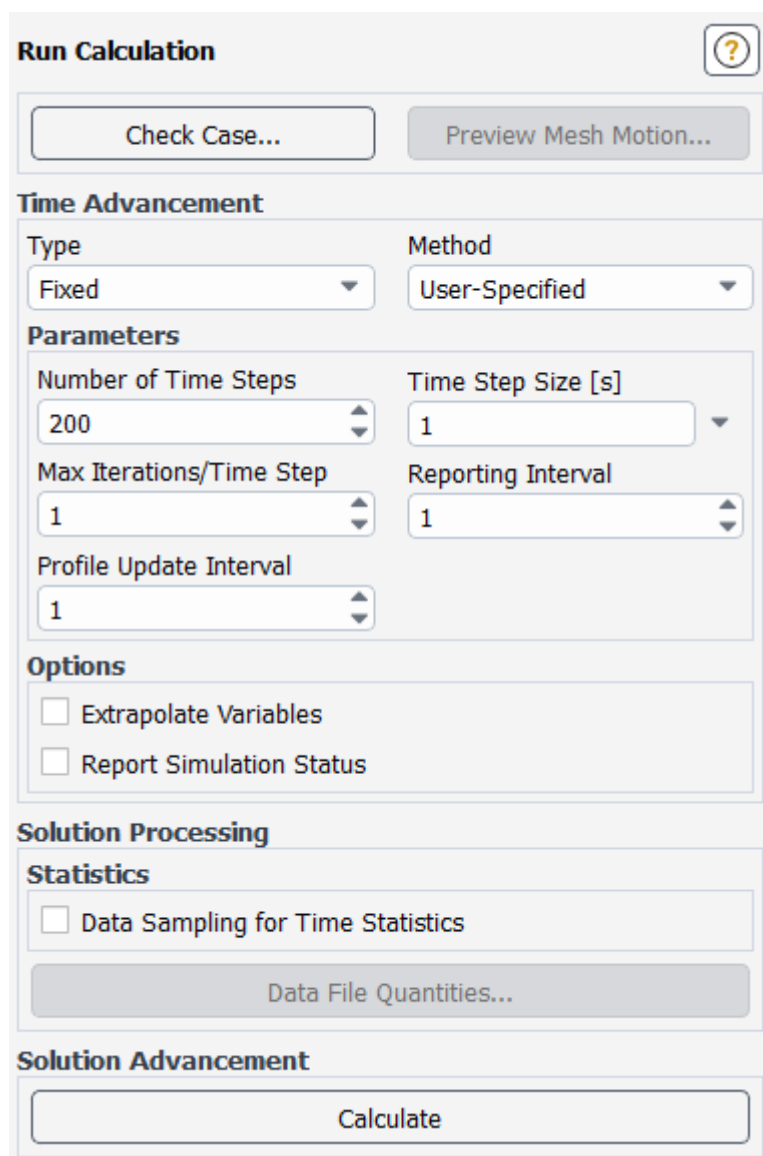


The screenshot shows the 'Solution Initialization' dialog box. Under 'Initialization Methods', 'Hybrid Initialization' is selected with a radio button. There are 'More Settings...', 'Initialize', and 'Patch...' buttons. At the bottom are 'Reset DPM Sources', 'Reset LWF', and 'Reset Statistics' buttons.

Obr. 116.: Hybridní inicializace

### 7.4.5 Kalkulace výpočtu

Po úspěšném zhotovení veškerých potřebných operací pro spuštění výpočtu byla spuštěna jeho kalkulační funkce Run Calculation. V menu této funkce byly taktéž nastaveny základní charakteristiky pro výpočet analýzy. Analýza tímto krokem byla připravena pro výpočet a byl spuštěn výpočet.



**Run Calculation** ?

Check Case... Preview Mesh Motion...

**Time Advancement**

Type: Fixed Method: User-Specified

**Parameters**

Number of Time Steps: 200 Time Step Size [s]: 1

Max Iterations/Time Step: 1 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

**Options**

Extrapolate Variables

Report Simulation Status

**Solution Processing**

**Statistics**

Data Sampling for Time Statistics

Data File Quantities...

**Solution Advancement**

Calculate

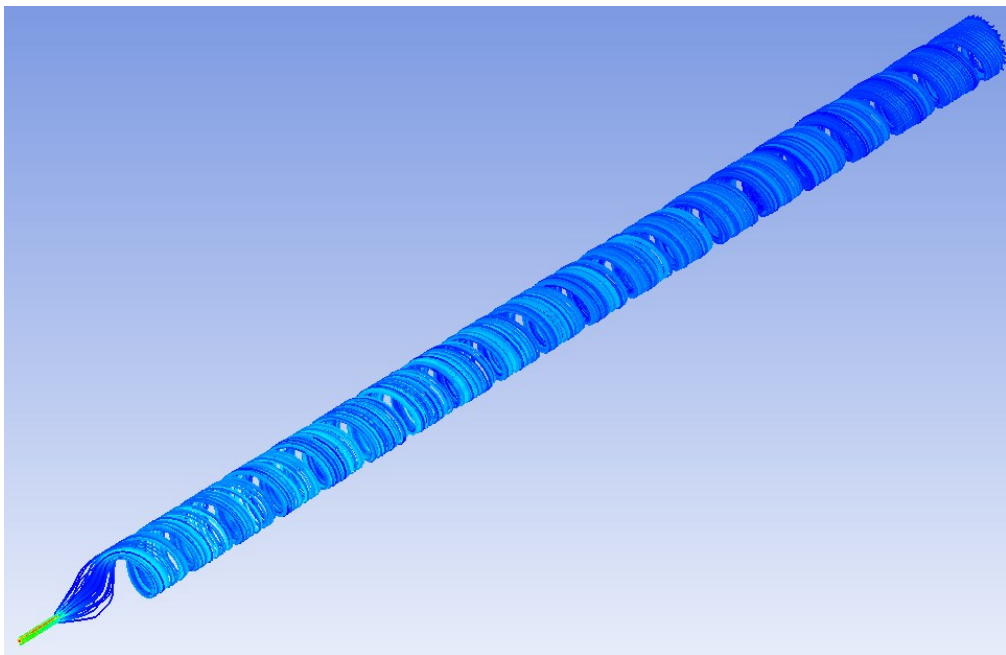
Obr. 117.: Parametry kalkulační analýzy

Tento postup byl proveden pro dosažení výsledků pro všechny tři zadané materiály.

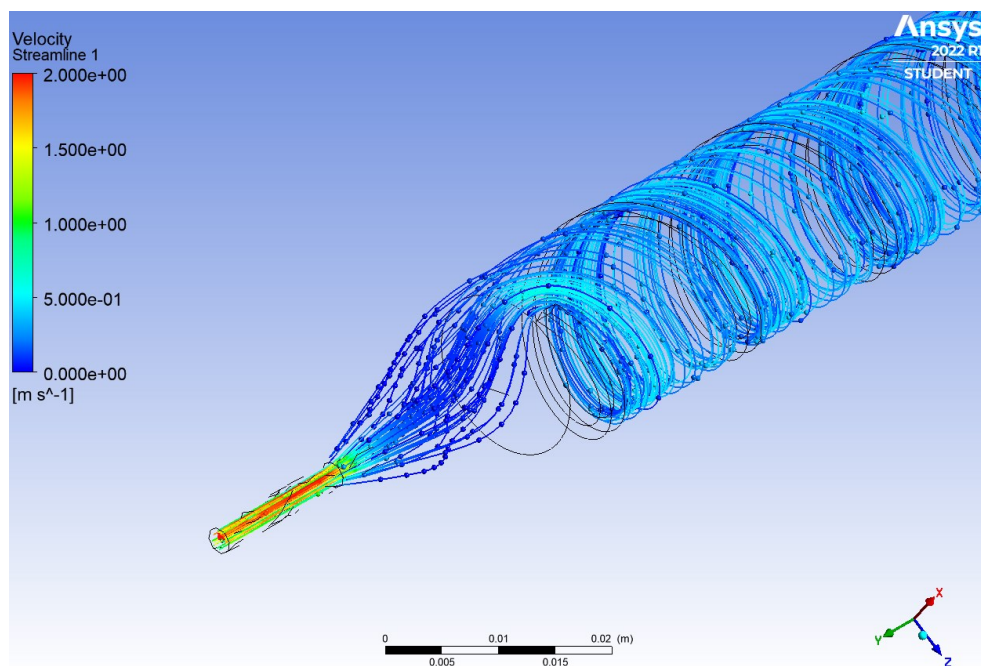
## 7.5 Výsledky analýzy

Po výpočtu analýzy byl modul Fluent zavřen a byl spuštěn modul Results, ve kterém byli vizuálně představeny výsledky výpočtu. Grafické výsledky byli reprezentovány ve dvou provedeních. Jedna varianta výsledku prezentovala rychlostní profil pomocí pole proudnic a druhá varianta pomocí vektoru.

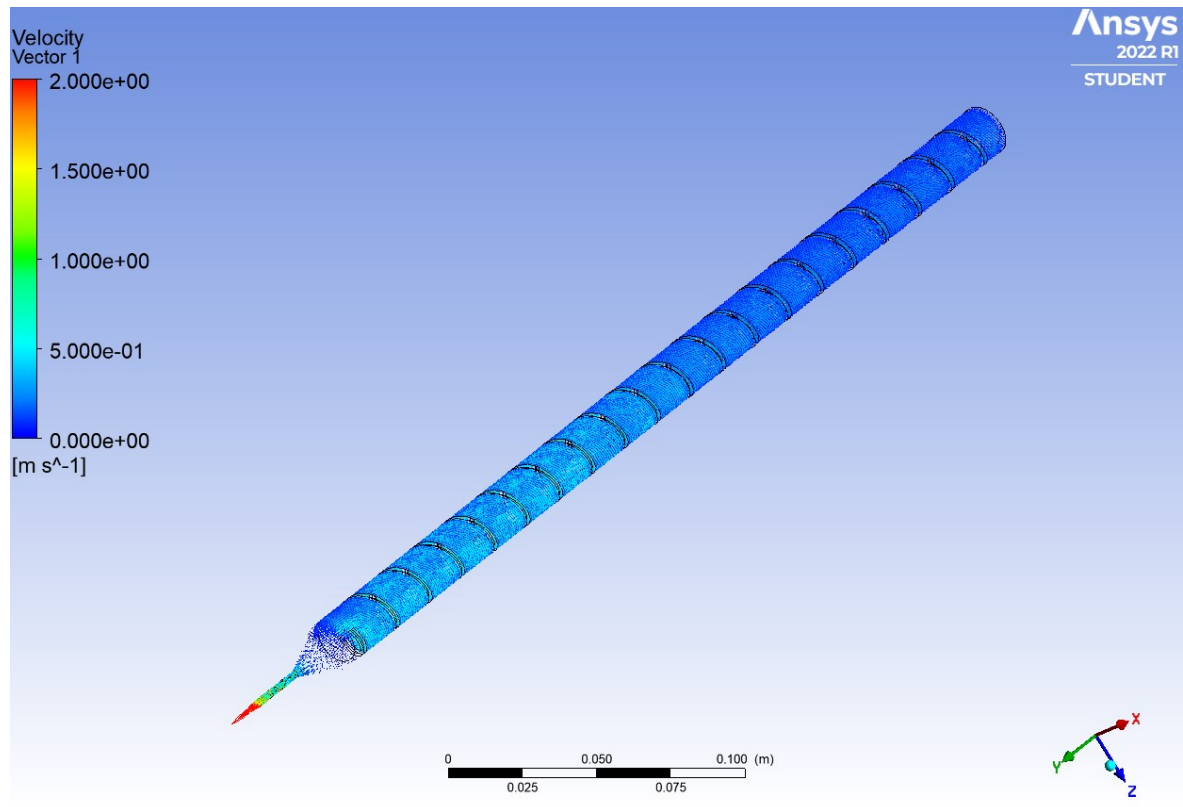
### 7.5.1 Výsledky pro ABS



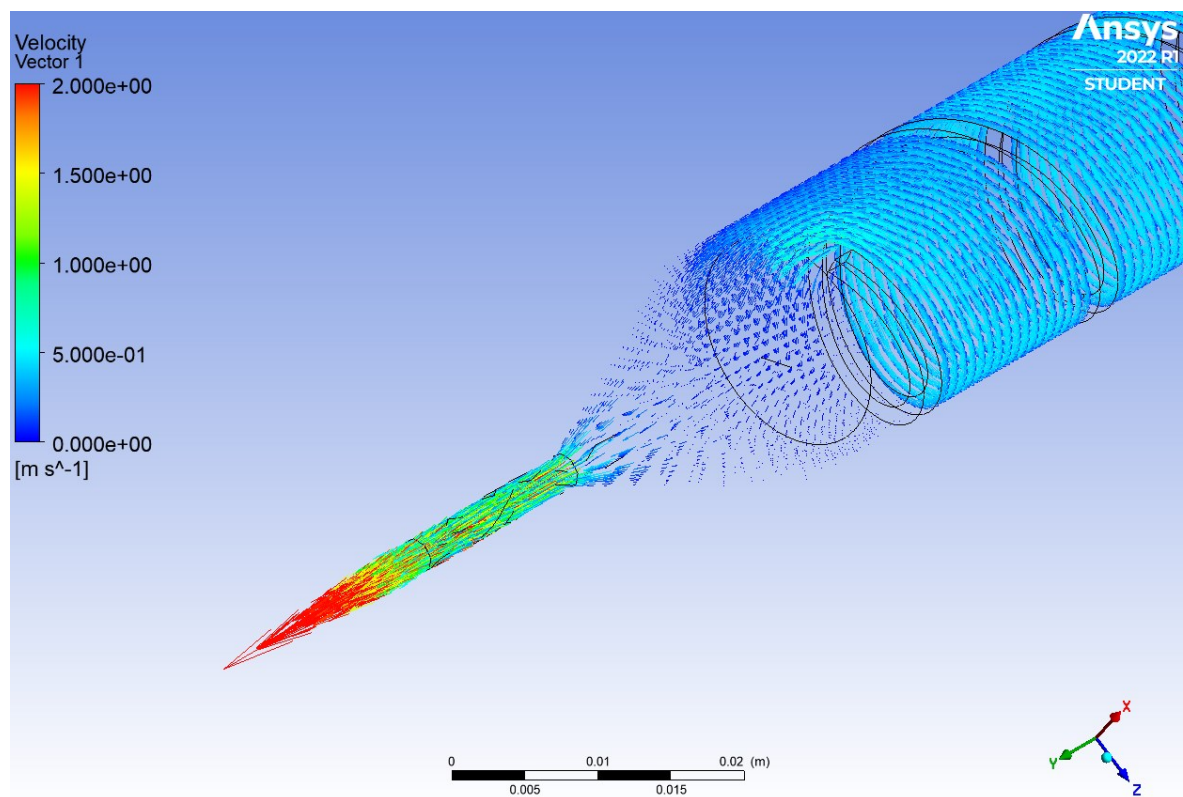
Obr. 118.: Rychlostní profil dle pole proudnic pro ABS



Obr. 119.: Detailní pohled rychlostního profilu dle pole proudnic na konci taveniny ABS

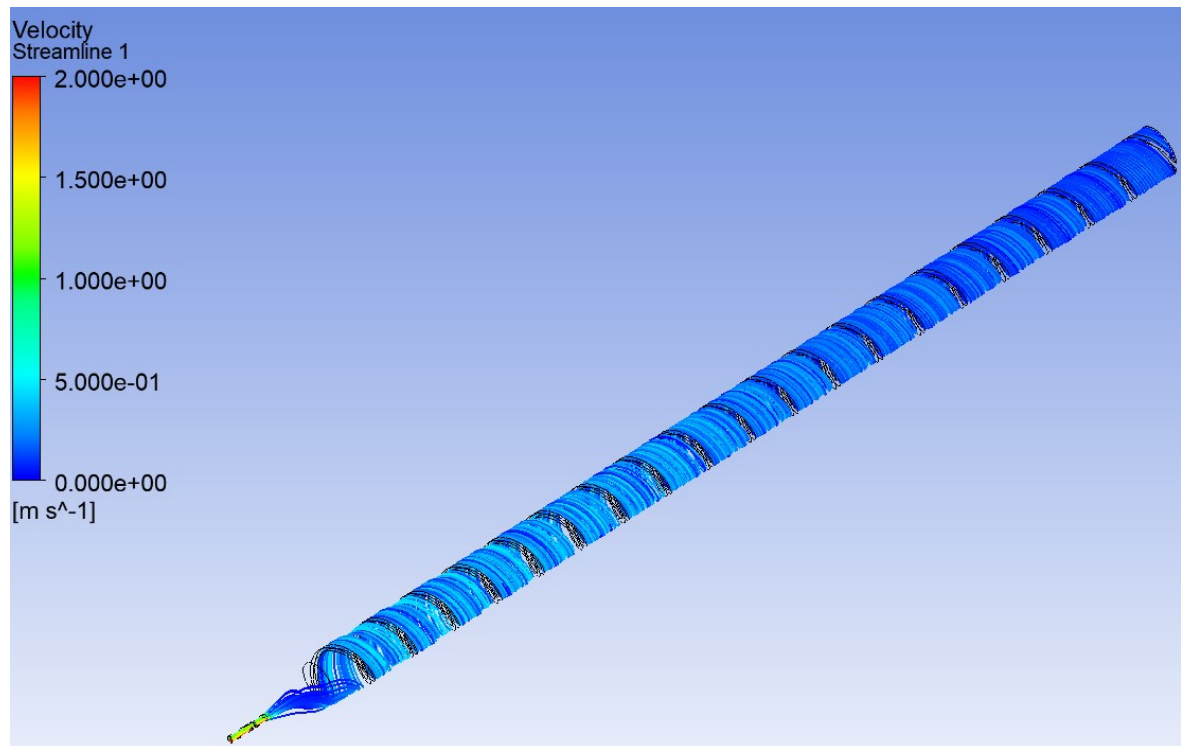


Obr. 120.: Vektorové zobrazení rychlostního profilu ABS

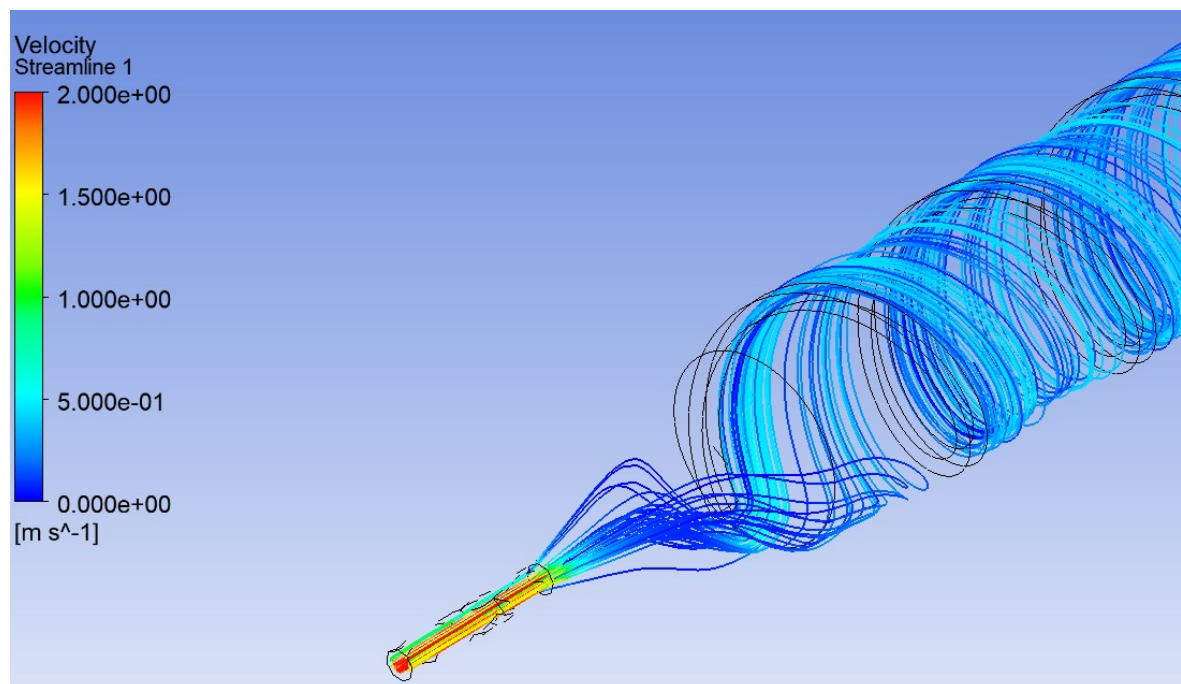


Obr. 121.: Detailní vektorové zobrazení rychlostního profilu ABS

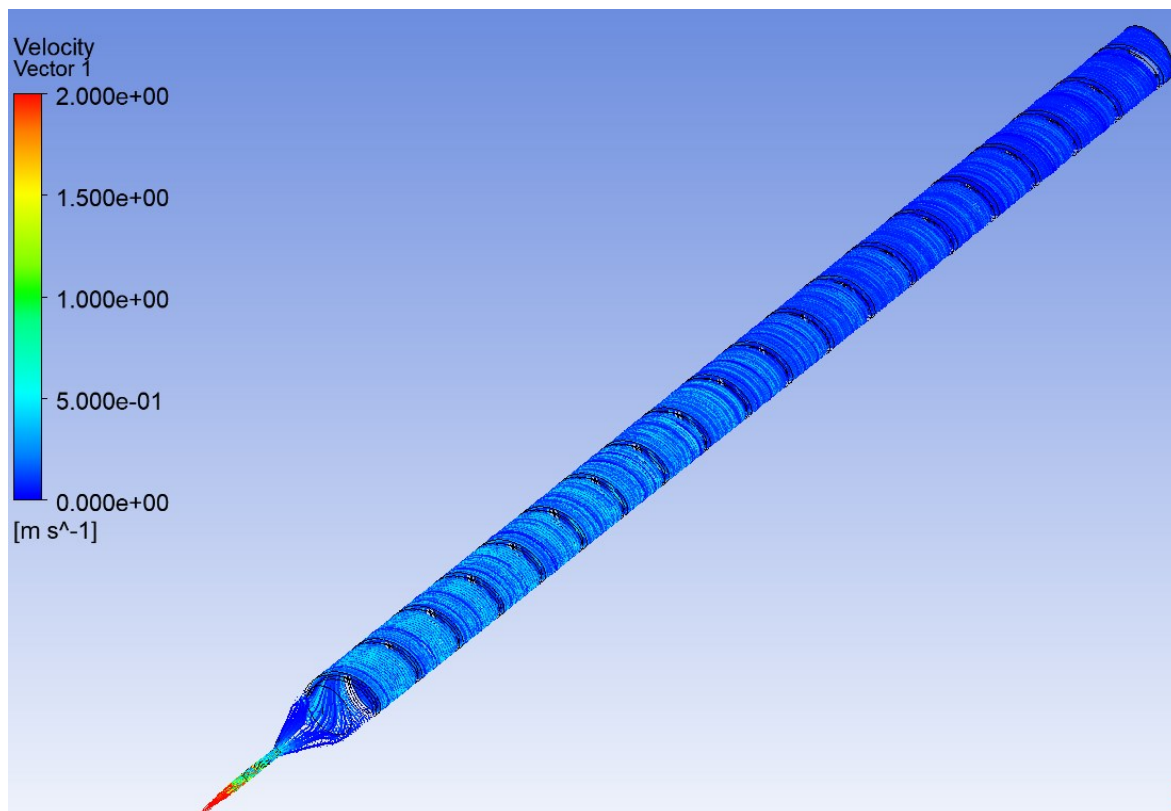
### 7.5.2 Výsledky pro PLA



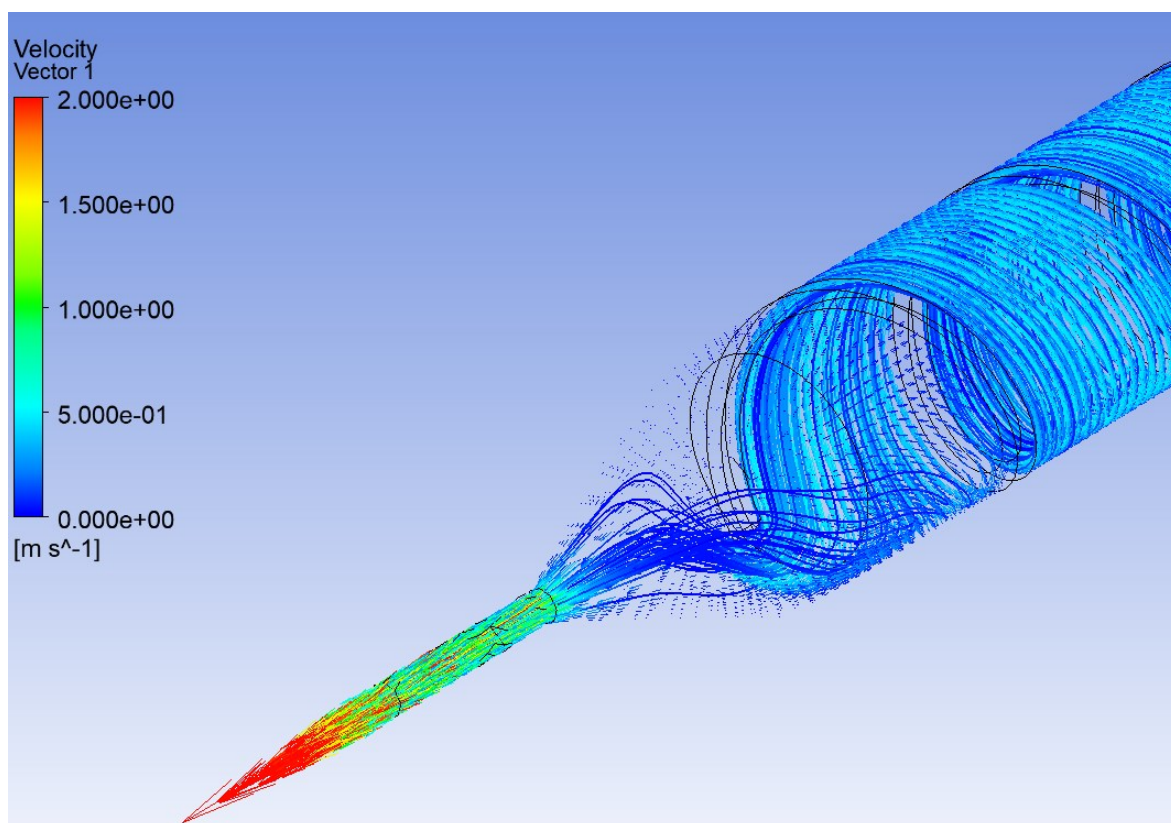
Obr. 122.: Rychlostní profil dle pole proudnic pro PLA



Obr. 123.: Detailní pohled rychlostního profilu dle pole proudnic na konci taveniny PLA



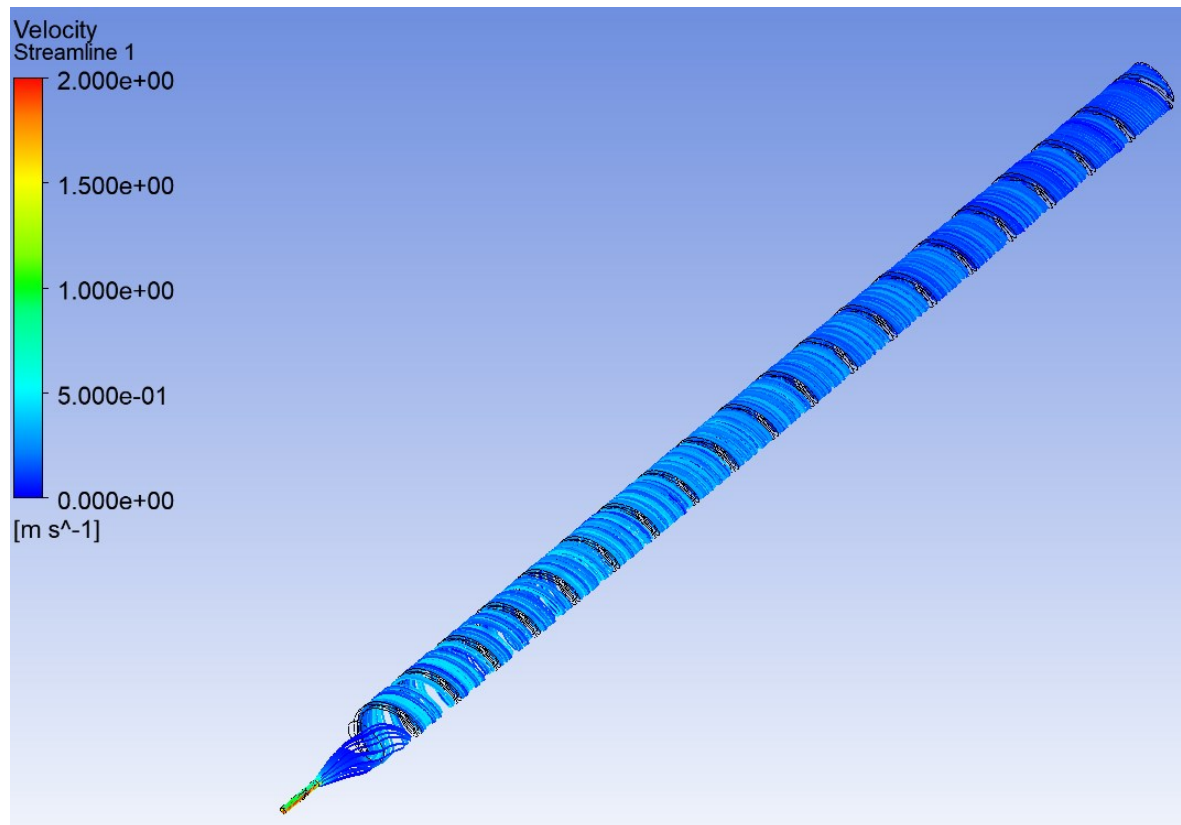
Obr. 124.: Vektorové zobrazení rychlostního profilu PLA



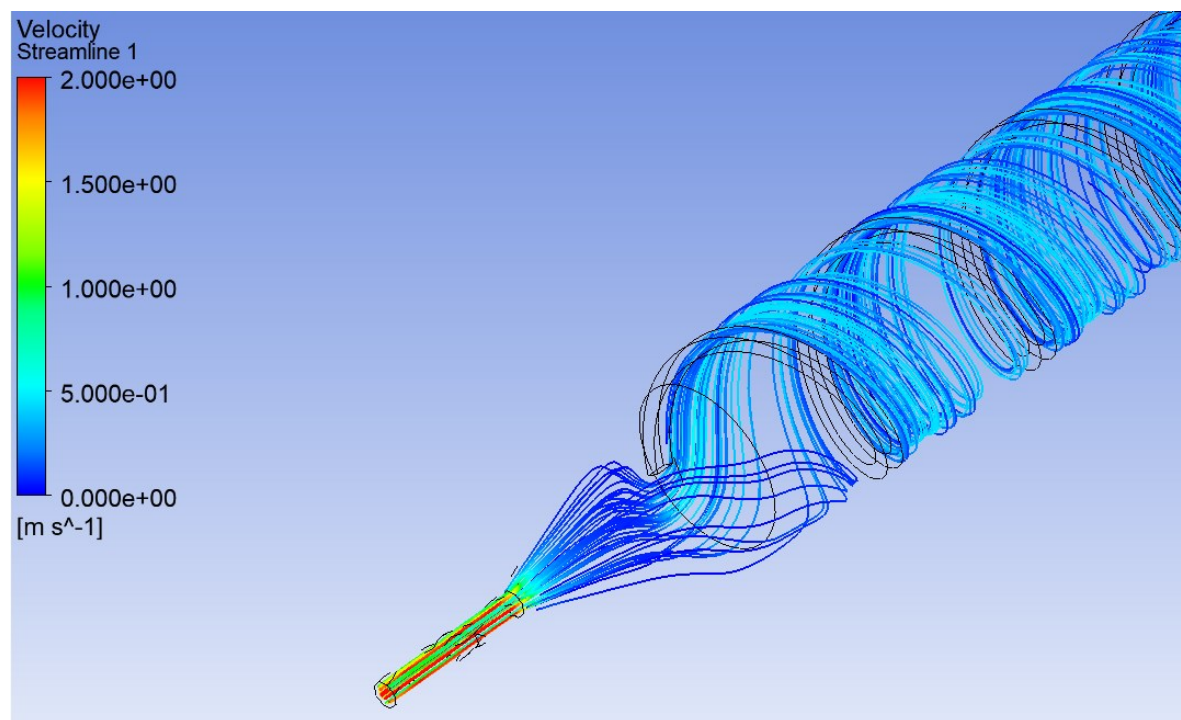
Obr. 125.: Detailní vektorové zobrazení rychlostního profilu PLA



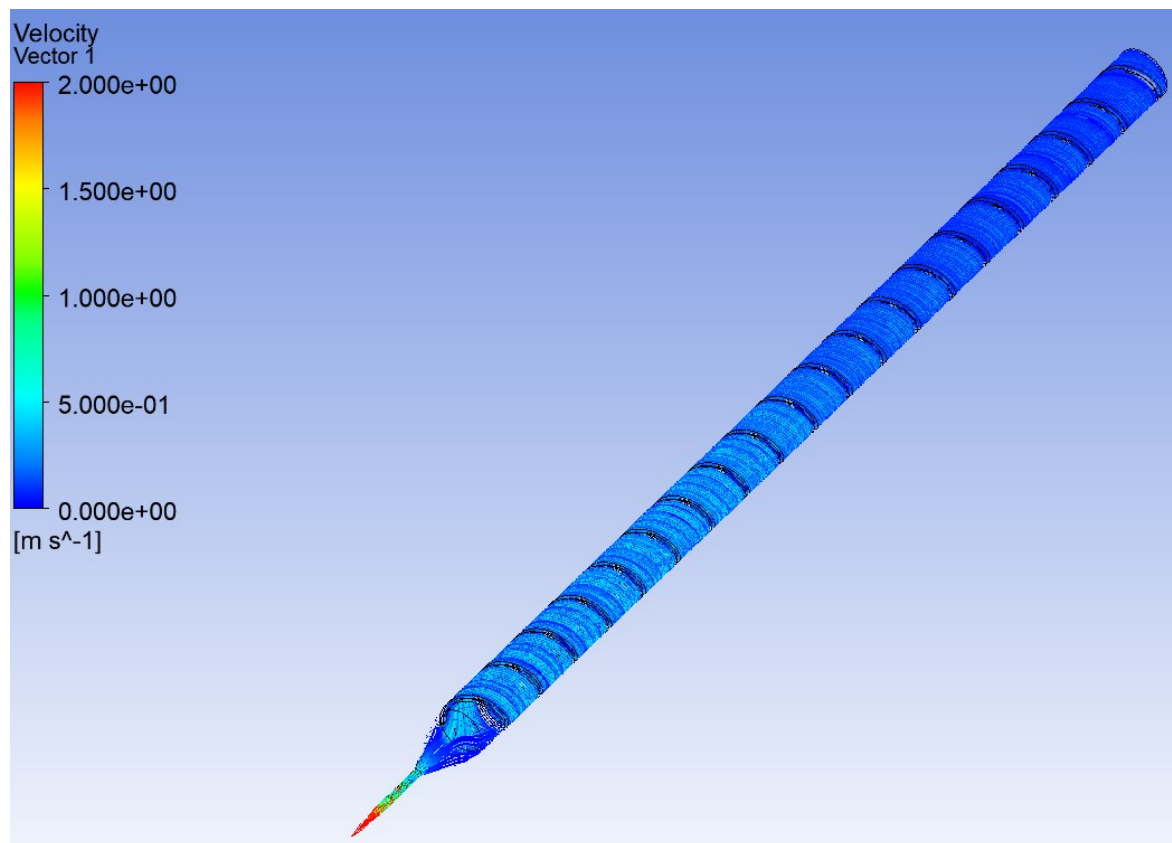
### 7.5.3 Výsledky pro PETG



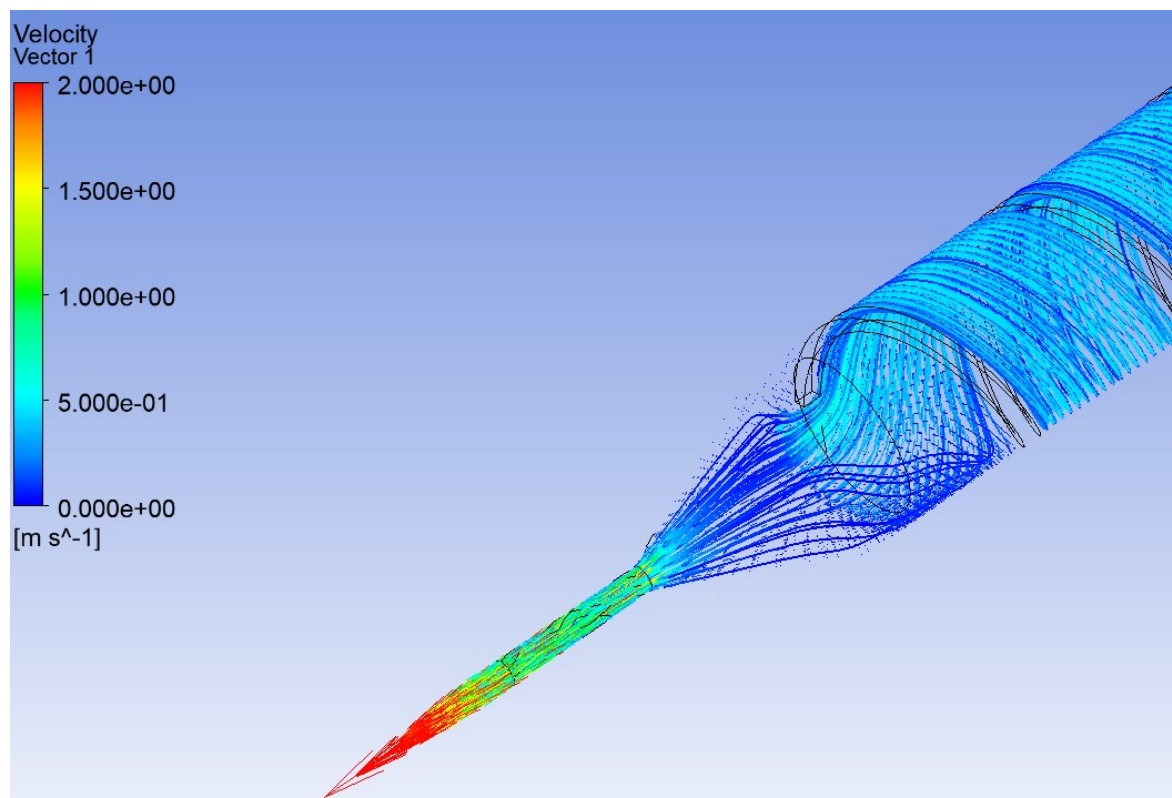
Obr. 126.: Rychlostní profil dle pole proudnic pro PETG



Obr. 127.: Detailní pohled rychlostního profilu dle pole proudnic na konci taveniny PETG



Obr. 128.: Vektorové zobrazení rychlostního profilu PETG



Obr. 129.: Detailní vektorové zobrazení rychlostního profilu PETG

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat literární rešerši na zadané téma, navrhnout technické řešení vytlačovacího stroje, provést reologickou analýzu šneku a válce, zhotovit výkresovou dokumentaci včetně výkresu sestavy a kusovníku a zhodnotit výsledky řešení.

Koncept diplomové práce byl rozdělen do dvou hlavních částí, a to na teoretickou a praktickou část. V teoretické sekci byla zhotovena a vypracována literární rešerše na zadané téma. Detailně byla vypracována oblast polárního průmyslu od výroby až po samotné použití polymerů v jednotlivých oblastech. V dalším bodě byla vypracována rešerše týkající se procesu vytlačování. Jednalo se o detailní rozbor od historie až po současnost a celkový průřez problematikou vytlačování. V posledním bodě teoretické části byla zhotovena detailní rešerši na téma v oblasti 3D tisku a všech jeho problematik včetně metod zpracování či typů materiálů tiskových strun.

V první sekci praktické části byl nejprve vypracován návrh a volba jednotlivých komponentů vytlačovacího stroje včetně součástí pro uchycení a zapojení elektro komponentů. Po návrhu a volbě jednotlivých prvků vytlačovacího zařízení byl následně vypracován kompletní návrh a sestavení jednotlivých komponentů či segmentů vytlačovacího stroje pro strunu na 3D tiskárnu včetně výkresové dokumentace a výkresu sestavy a kusovníku.

V druhé sekci praktické části diplomové práce byla vypracována reologická analýza rychlostního profilu v programu ANSYS. V tomto programu byly vypracovány jednotlivé operace pro dosažení výsledků analýzy. Pro tento účel byly použity moduly geometrie, sítě, proudění a výsledků. Tyto kroky s jasně definovanými parametry byly strukturálně umístěny do stromu operací.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] RAUWENDAAL, Chris. *Polymer Extrusion* [online]. 5th. Munich: Hanser Publishers, 2014. ISBN 978-1-5231-0127-6.
- [2] ULF, Bruder. *User's Guide to Plastic* [online]. 2nd. Munich: Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-572-2.
- [3] BĚHÁLEK Luboš. *Polymery* [online]. Liberec: Publi 2016 [cit. 2021-11-20]. ISBN 978-80-88058-68-7 (elektronická verze). Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>.
- [4] SANJAYAN, Jay G., Ali NAZARI a Behzad NEMATOLLAH. *3D Concrete Printing Technology Construction and Building Applications* [online]. Australia: Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-815481-6.
- [5] DUCHÁČEK Vratislav. *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. Str. 001. ISBN 80-7080-617-6.
- [6] NATTI S., Rao. *Diagnostics of Extrusion Processes*. Munich: Hanser Publications, 2014. ISBN 978-1-56990-568-5.
- [7] O'CONNELL, Jackson. Best Filament Extruders of 2021. *All3dp.com* [online]. 2021 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/best-filament-extruder-maker-diy-buy/>
- [8] WANKHADE, Mamta H. a Satish G. BAHALEY. *Design and Development of Plastic Filament Extruder for 3D Printing*. IRA International Journal of Technology & Engineering [online]. 2018, **10**(3), 18 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: doi: <http://dx.doi.org/10.21013/jte.v10.n3.p1>
- [9] HOPMANN, Christian Hopmann a Walter MICHAELI. *Extrusion Dies for Plastics and Rubber Design and Engineering Computations*. 4th. Munich: Hanser Publications, 2017. ISBN 978-1-56990-623-1.
- [10] ZATLOUKAL, Martin. *Přednášky T7AR*.
- [11] AGASSANT, J.F., P. AVENAS, P. CARREAU, B. VERGNES a M. VINCENT. *Polymer Processing: Principles and Modeling*. 2nd. Mnichov: Hanser Publishers, 2017. ISBN 978-1-56990-605-7.

- [12] CHAN I., Chung. *Extrusion of Polymers - Theory and Practice*. 3rd. Munich: Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-609-5.
- [13] BONTEN, Christian. *Plastics Technology-Introduction and Fundamentals*. Munich: Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1-56990-767-2.
- [14] LAFLEUR, Pierre G. a Bruno VERGNES. *Polymer Extrusion* [online]. Great Britain: ISTE, 2014. ISBN 9781848216501.
- [15] CARNEIRO, Olga S. a J. Miguel NÓBREGA. *Design of Extrusion Forming Tools*. Great Britain: Smithers Rapra Technology, 2012. ISBN 978-1-84735-517-1.
- [16] MURALIDHARA, H. B. a Soumitra BANERJEE. *3D Printing Technology and Its Diverse Applications*. Kanada: Apple Academic Press, 2021. ISBN 9781771889780.
- [17] GOFF, John, Tony WHELAN a Don DeLaney DELANEY. *The Dynisco Extrusion Processors Handbook* [online]. 2nd. Franklin: Dynisco [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: [https://www.dynisco.com/userfiles/files/27429\\_Legacy\\_Txt.pdf](https://www.dynisco.com/userfiles/files/27429_Legacy_Txt.pdf)
- [18] KANAI, Toshitaka a Gregory A. CAMPBELL. *Film processing advances*. Mnichov: Hanser Publishers, 2014. ISBN 978-1-56990-529-6.
- [19] ASADI, Aaron. *3D Make & Print* [online]. 2nd. United Kingdom: Imagine Publishing, 2015 [cit. 2021-11-09]. ISBN 978 1 78546 202 3.
- [20] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. Svitavy: Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-77-9.
- [21] *STREPHONSAYS* [online]. 2017 [cit. 2021-10-22]. Dostupné z: <https://cs.strephonsays.com/amorphous-and-vs-crystalline-polymers-8533>
- [22] *LIGO, s.r.o.* [online]. Červený Kostelec, 2021 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.ligo.cz/pryzove-vyrobky-z-technicke-pryze.php>
- [23] *HYBRID.CZ* [online]. 2019 [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/bridgestone-predstavuje-pneumatiky-enliten-ktere-snizuji-spotrebu/>
- [24] *Formtech Enterprises, Inc.* [online]. Bogart, c2020 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://formtech.com/about-us/history/>

- [25] KOTEK, Jiří. Trendy vývoje polymerních materiálů. *MM Spektrum* [online]. Duben 2018 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-vyvoje-polymernich-materialu>
- [26] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141.
- [27] *Polymerace* [online]. 2015 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <http://chemie.g6.cz/?p=216>
- [28] FORMELA, K., L. ZEDLER, A. HEJNA a A. TERCJAK. Reactive extrusion of bio-based polymer blends and composites – Current trends and future developments. *Express Polymer Letters* [online]. 2018, **12**(1), 24-57 [cit. 2021-12-01]. ISSN 1788618X. Dostupné z: doi:10.3144/expresspolymlett.2018.4
- [29] *The Comprehensive Guide to Comparing 3D Filament* [online]. 3D Printing Canada, c2021 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://3dprintingcanada.com/>
- [30] HAHN, Brooke. *History of 3D printing* [online]. 6 February 2018 [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <https://me3d.com.au/2018/history-of-3d-printing/>
- [31] MADELEINE, P. *What Were the 3D Printing Trends in 2021?* [online]. In: . 30 December 2021 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/what-were-the-3d-printing-trends-in-2021-301220214/>
- [32] VAROTSIS, Alkaios Bournias. *What is FDM 3D printing?* [online]. 2022 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- [33] *RAVEO s.r.o., World of motion* [online]. Otrokovice, 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/krokove-motory-zpetna-vazba-driver-fastech>
- [34] *T.E.A. Technik s.r.o.*, [online]. Popůvky u Brna, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/pruzne-spojky/>
- [35] *SKF* [online]. Švédsko, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings--17000\\_1-CS\\_tcm\\_54-121486.pdf#cid-121486](https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings--17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf#cid-121486)
- [36] *OSK-U* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/33000946986.html>

- [37] *Jakar Electronics* [online]. Karviná, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz/p/jednoduchy-termoclanek-vhodny-do-vlhkeho-prostredi>
- [38] *TEM Electronics* [online]. Ostrava, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/cz/details/tzn4s-14s/regulatory-teploty/autonics/?brutto=1&cy=CZK&glid=Cj0KCQjwpv2TBhDoARIsALBnVnnJULNx9Cwb-E-yrf2-OTbdgH0wt28q1OL6MEsQNUSN\\_kPXUf42Vf4aAv2EEALw\\_wcB](https://www.tme.eu/cz/details/tzn4s-14s/regulatory-teploty/autonics/?brutto=1&cy=CZK&glid=Cj0KCQjwpv2TBhDoARIsALBnVnnJULNx9Cwb-E-yrf2-OTbdgH0wt28q1OL6MEsQNUSN_kPXUf42Vf4aAv2EEALw_wcB)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ITT	Index toku taveniny
$N_1$	První rozdíl normálových napětí
$\dot{\tau}_{ij}$	Kodeformační časová derivace tenzoru napětí
$\eta$	Smyková viskozita
$\tau$	Smykové napětí
$\dot{\gamma}$	Rychlost smykové deformace
$\eta_E$	Elongační (tahová) viskozita
$\sigma$	Tahové napětí
$\dot{\epsilon}$	Rychlost tahové deformace
$D_{ij}$	Tenzor rychlosti deformace
$\tau_{ij}$	Tenzor napětí
$\lambda$	Relaxační čas
Log	Logaritmus
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
PLA	Polyactid acid (Polymléčná kyselina)
PET-G	Polyethylentereftalát-glykol
D	Průměr válce
$d_s$	Průměr šneku
$d_f$	Průměr filamentu
p	Odpor vytlačovací hlavy
n	Otáčky šneku
H	Hloubka kanálu
$H_1$	Hloubka kanálu ve vstupní sekci
$H_2$	Hloubka kanálu ve výstupní sekci
e	Šířka šroubovice



---

$\theta$	Úhel stoupání
$\delta$	Vůle mezi šroubovicí a pláštěm válce
w	Nejkratší vzdálenost mezi závity šroubovice
L	Vzdálenost začátků sousedících závitů šroubovice
mm	Milimetr
Pa	Pascal
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
g	Gram
cm <sup>3</sup>	Centimetr krychlový
min	Minuta
s	Sekunda
s <sup>-1</sup>	Reciproká (inverzní) sekunda
°C	Stupeň celsia
3D	Trojrozměrný prostor
FDM	Fused deposition modelling (modelace roztaveného materiálu)
SLA	Stereolithography (stereolitografie)
SLS	Selective laser sintering (selektivní spékání laserem)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.: Ukázka vytlačovacího stroje na polymerní strunu [7]</i> .....	10
<i>Obr. 2.: Polymerní řetězec [2]</i> .....	12
<i>Obr. 3.: Schéma makromolekuly [3]</i> .....	12
<i>Obr. 4.: Ukázka brazilského kaučukovníku a přírodního kaučuku [3]</i> .....	14
<i>Obr. 5.: Významné milníky ve výzkumu polymerních materiálů [3]</i> .....	15
<i>Obr. 6.: Evropská data o spotřebě a aplikacích polymerů [3]</i> .....	16
<i>Obr. 7.: Postup polyreakce a následné přidání aditiv [2]</i> .....	17
<i>Obr. 8.: Praktická ukázka vytlačení směsi polymeru s aditivou [2]</i> .....	17
<i>Obr. 9.: Schéma rozdělení polymerů</i> .....	19
<i>Obr. 10.: Přirovnání polymerů k potravinám [13]</i> .....	19
<i>Obr. 11.: Amorfni a semikrystalické řetězce [21]</i> .....	20
<i>Obr. 12.: Výrobky z termoplastů</i> .....	21
<i>Obr. 13.: Příklady použití reaktoplastů [3]</i> .....	21
<i>Obr. 14.: Ukázka pneumatik pro osobní automobily [23]</i> .....	22
<i>Obr. 15.: Další příklady využití technické pryže [22]</i> .....	23
<i>Obr. 16.: Příklady použití speciálních kaučuků [3]</i> .....	23
<i>Obr. 17.: Příklady aplikací termoplastických elastomerů [3]</i> .....	24
<i>Obr. 18.: Princip výroby polymerních součástí</i> .....	25
<i>Obr. 19.: Závislost smykové viskozity na rychlosti smýkání [15]</i> .....	26
<i>Obr. 20.: Experimentální pokus Weissenbergova efektu [15]</i> .....	27
<i>Obr. 21.: Narůstání polymeru za hubicí (vlevo – voda, vpravo – polymer) [15]</i> .....	27
<i>Obr. 22.: Schéma Maxwellova modelu (píst + pružina) [15]</i> .....	28
<i>Obr. 23.: Počátky vytlačování polymerů [24]</i> .....	30
<i>Obr. 24.: Schématické naznačení principu vytlačování [12]</i> .....	32
<i>Obr. 25.: Schématická sestava vytlačovacího stroje [17]</i> .....	32
<i>Obr. 26.: Elementy pro distributivní míchání [14]</i> .....	33
<i>Obr. 27.: Elementy pro disperzní míchání [14]</i> .....	33
<i>Obr. 28.: Ukázka uspořádání šnekového extruderu [13]</i> .....	35
<i>Obr. 29.: Schématický jednošnekový vytlačovací stroj v řezu [20]</i> .....	35
<i>Obr. 30.: Jednoduchý konvenční šnek [14]</i> .....	36
<i>Obr. 31.: Model konvenčního jednošnekového šneku a jeho jednotlivé části [1]</i> .....	36
<i>Obr. 32.: Vliv povrchu válce na generaci tlaku [10]</i> .....	37
<i>Obr. 33.: Ukázka válce pro dvoušnekový extruder [2]</i> .....	38
<i>Obr. 34.: Modifikace šneku pro vytlačování kaučuků [1]</i> .....	38

<i>Obr. 35.: Šnek bez vstupní a výstupní zóny [17]</i> .....	38
<i>Obr. 36.: Šnek s evakuační zónou [1]</i> .....	39
<i>Obr. 37.: Stewardův Bariérový šnek [18]</i> .....	39
<i>Obr. 38.: Barrův bariérový šnek [17]</i> .....	39
<i>Obr. 39.: Mailleferův bariérový šnek [14]</i> .....	39
<i>Obr. 40.: Schéma dvoušnekového vytlačovacího stroje [17]</i> .....	40
<i>Obr. 41.: Otáčení dvoušneků [14]</i> .....	41
<i>Obr. 42.: Prolínání dvoušneků [14]</i> .....	41
<i>Obr. 43.: Stupňovitý kotouč pro diskový extruder [1]</i> .....	42
<i>Obr. 44.: Generace tlaku v přechodové oblasti [1]</i> .....	42
<i>Obr. 45.: Schéma principu bubnového extruderu [1]</i> .....	43
<i>Obr. 46.: Princip vytlačovacího stroje typu „diskpack“ [1]</i> .....	44
<i>Obr. 47.: Extruder s jedním pístem [1]</i> .....	45
<i>Obr. 48.: Vytlačovací stroj se dvěma písty [1]</i> .....	46
<i>Obr. 49.: Schématické rozdělení vytlačovacích hlav [20]</i> .....	47
<i>Obr. 50.: Ukázka průřezů dutých profilů</i> .....	48
<i>Obr. 51.: Ukázka průřezů dutých profilů</i> .....	48
<i>Obr. 52.: Ukázka průřezů plných profilů</i> .....	48
<i>Obr. 53.: Ukázka průřezů u opláštění vodičů</i> .....	48
<i>Obr. 54.: Ukázka ploché vytlačovací hlavy s nastavitelnou šěrbinou [12]</i> .....	49
<i>Obr. 55.: Okenní profil [13]</i> .....	50
<i>Obr. 56.: Ukázka vytlačovací hlavy na trubky [2]</i> .....	50
<i>Obr. 57.: Vytlačování plného profilu [13]</i> .....	51
<i>Obr. 58.: Schéma přetlakové a podtlakové vytlačovací hlavy pro opláštění [1]</i> .....	51
<i>Obr. 59.: Schéma linky na vyfukování fólií</i> .....	52
<i>Obr. 60.: Schématicky naznačená linka na vytlačování trubek</i> .....	53
<i>Obr. 61.: Schéma linky na opláštění vodičů</i> .....	54
<i>Obr. 62.: Ukázka budovy zhotovené pomocí 3D tisku [31]</i> .....	56
<i>Obr. 63.: Schéma principu FDM tisku [32]</i> .....	58
<i>Obr. 64.: Ukázka filamentů [19]</i> .....	59
<i>Obr. 65.: Schéma principu SLA technologie [16]</i> .....	61
<i>Obr. 66.: Schéma vytlačovacího stroje</i> .....	64
<i>Obr. 67.: 3D model krokového motoru</i> .....	66
<i>Obr. 68.: Schématické zapojení krokového motoru [33]</i> .....	66
<i>Obr. 69.: Reálný krokový motor [33]</i> .....	67

<i>Obr. 70.: 3D model planetové převodovky AE070-010.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 71.: Reálný model přímé planetové převodovky [33] .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 72.: Reálná pružná spojka [34] .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 73.: 3D model pružní spojky [34] .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 74.: Řez axiálním dvouřadým ložiskem s kosouhým stykem [35] .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 75.: 3D model dvouřadého ložiska 52206 [35].....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 76.: Obecné schéma jednochodého šneku .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 77.: Detailní schéma šroubovice .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 78.: 3D model jednochodého šneku .....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 79.: 3D model válce.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 80.: 3D model těla stroje strana od šneku.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 81.: 3D model těla strana od pohonu .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 82.: 3D model příruby pohonu .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 83.: 3D model chladiče .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 84.: Model radiálního ventilátoru .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 85.: Model svařence násypky .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 86.: Model vodící desky.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 87.: 3D model posuvného šíbru.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 88.: Model zajišťovacího kolíku .....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 89.: Otočný čep.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 90.: Model základny stroje .....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 91.: Model spodního krytu.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 92.: Model kuželové hlavy .....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 93.: Model trysky.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 94.: Model axiálního ventilátoru.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 95.: Topný pás [36] .....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 96.: Termočlánek se sondou [37] .....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 97.: 3D model regulátoru teploty .....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 98.: Reálný model regulátoru teploty TZN4S.....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 99.: Model hlavního vypínače .....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 100.: Tlačítko total stop.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 101.: Kompletní návrh vytlačovacího stroje .....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 102.: Strom operací ve Workbench .....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 103.: Vymodelovaná geometrie taveniny .....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 104.: Parametry sítě .....</i>	<i>93</i>

<i>Obr. 105.: Vygenerovaná síť geometrie .....</i>	94
<i>Obr. 106.: Pojmenované plochy sítě.....</i>	94
<i>Obr. 107.: Základní parametry výpočtu .....</i>	95
<i>Obr. 108.: Prostředí v modulu Fluent .....</i>	95
<i>Obr. 109.: Obecné nastavení .....</i>	96
<i>Obr. 110.: Menu modulu Fluent a model výpočtu .....</i>	96
<i>Obr. 111.: Parametry materiálu ABS .....</i>	97
<i>Obr. 112.: Nastavení taveniny .....</i>	97
<i>Obr. 113.: Menu pro nastavení podmínek.....</i>	98
<i>Obr. 114.: Nastavení vstupní rychlosti .....</i>	99
<i>Obr. 115.: Nastavený výstupu .....</i>	99
<i>Obr. 116.: Hybridní inicializace .....</i>	99
<i>Obr. 117.: Parametry kalkulace analýzy .....</i>	100
<i>Obr. 118.: Rychlostní profil dle pole proudnic pro ABS .....</i>	101
<i>Obr. 119.: Detailní pohled rychlostního profilu dle pole proudnic na konci taveniny ABS .....</i>	101
<i>Obr. 120.: Vektorové zobrazení rychlostního profilu ABS .....</i>	102
<i>Obr. 121.: Detailní vektorové zobrazení rychlostního profilu ABS.....</i>	102
<i>Obr. 122.: Rychlostní profil dle pole proudnic pro PLA .....</i>	103
<i>Obr. 123.: Detailní pohled rychlostního profilu dle pole proudnic na konci taveniny PLA .....</i>	103
<i>Obr. 124.: Vektorové zobrazení rychlostního profilu PLA .....</i>	104
<i>Obr. 125.: Detailní vektorové zobrazení rychlostního profilu PLA .....</i>	104
<i>Obr. 126.: Rychlostní profil dle pole proudnic pro PETG .....</i>	105
<i>Obr. 127.: Detailní pohled rychlostního profilu dle pole proudnic na konci taveniny PETG .....</i>	105
<i>Obr. 128.: Vektorové zobrazení rychlostního profilu PETG .....</i>	106
<i>Obr. 129.: Detailní vektorové zobrazení rychlostního profilu PETG.....</i>	106

**SEZNAM TABULEK**

*Tab. 1.: Výhody a nevýhody polymerních materiálů [3] ..... 13*

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkresová dokumentace

