

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

ZAŘÍZENÍ PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ A BIOPLASTŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

JAN CHVÁTAL



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 12118

Technická 4, 166 07 Praha 6

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro: **Jan Chvátal**

Program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Obor: 2301R000 bezoborový

Název tématu: **Zařízení pro zpracování plastů a bioplastů**

Title: **Equipment for plastics and bioplastics processing**

Zásady pro vypracování:

Zpracujte rešerši zaměřenou na technologii a zařízení pro zpracování plastů a bioplastů. V rámci práce zpracujte následující dílčí cíle:

1. Seznamte se s technologiemi a zařízeními pro zpracování plastů a bioplastů (lisování, vstřikování, vytlačování, vyfukování, válcování, ...).
2. Vyberte si jednu technologii a proveďte rešerši konstrukčního provedení zařízení, která jsou v této technologii užívána.
3. Pro jeden konkrétní typ zařízení podrobně rozeberte jeho konstrukci, identifikujte podstatné funkční části a popište, jak byste postupovali při jejich návrhu a dimenzování.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: rozsah cca 25 stran

Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 25. dubna 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 10. června 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student/ka zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

Posluchač bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne

21. dubna 2016

Jan Chvátal

T. Jirout

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
vedoucí ústavu



Michael Valášek

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 19. dubna 2016

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením
vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jan Chvátal

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost a odborné vedení.

Anotační list

Jméno autora: Jan

Příjmení autora: Chvátal

Název práce česky: Zařízení pro zpracování plastů a bioplastů

Název práce anglicky: Equipment for plastics and bioplastics processing

Rozsah práce:
počet stran: 67
počet obrázků: 51
počet tabulek: 3
počet příloh: 0

Akademický rok: 2015/2016

Jazyk práce: český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky (U12118)

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství (B2342)

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Oponent:

Konzultant práce: prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Zadavatel: Ústav procesní a zpracovatelské techniky (U12118)

Anotace česky: Tato práce se zabývá technologiemi zpracování plastů a bioplastů. Obsahuje přehled jednotlivých technologií pro zpracování a poté se věnuje vytlačování polymerů. Dále zahrnuje odvození vztahů pro proudění polymeru mezi dvěma rovnoběžnými deskami a využití těchto vztahů v konkrétním případě vytlačování polyethylenových trubek.

Klíčová slova: technologie zpracování plastů a bioplastů, vytlačování

Anotace anglicky: This thesis is focused on plastics and bioplastics processing technologies. It consists of summary of processing technologies and extrusion of polymers. Thesis also contains inference of polymer flow between parallel fixed panels and their usage in polyethylene pipes extrusion.

Klíčová slova: plastics and bioplastics processing technologies, extrusion

Využití: návrh parametrů vytlačovacího stroje

OBSAH

Poděkování	4
Anotační list.....	5
OBSAH	6
ÚVOD.....	8
1 METODY ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ	11
1.1 LISOVÁNÍ	11
1.2 VÁLCOVÁNÍ	12
1.3 VYTLAČOVÁNÍ.....	13
1.4 VSTŘIKOVÁNÍ.....	14
1.5 DALŠÍ METODY TVÁŘENÍ PLASTŮ.....	15
2 VYTLAČOVÁNÍ.....	16
2.1 PŘÍPRAVA GRANULÁTU.....	18
2.1.1 SMĚŠOVÁNÍ POLYMERŮ.....	18
2.1.2 GRANULACE.....	27
2.2 ODPAD	29
2.3 PÍSTOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE	31
2.4 ŠNEKOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE.....	32
2.4.1 ŠNEK	33
2.4.2 HLAVY VYTLAČOVACÍCH STROJŮ.....	42
2.5 TECHNOLOGIE VYTLAČOVÁNÍ TRUBEK POMOCÍ ŠNEKOVÉHO VYTLAČOVACÍHO STROJE	45
3 NÁVRH VYTLAČOVACÍHO STROJE.....	49
3.1 VOLBA PLASTU	49
3.2 VOLBA GEOMETRIE.....	50
3.3 TOKOVÉ VLASTNOSTI.....	51
3.4 ODVOZENÍ VZTAHŮ	52
3.4.1 PŘEDPOKLADY	52
3.4.2 ROVNICE KONTINUITY PRO NESTLAČITELNÉ TEKUTINY.....	53
3.4.3 CAUCHYHO ROVNICE	53
3.4.4 KONSTRUKTIVNÍ ROVNICE.....	54
3.4.5 ODVOZENÍ RYCHLOSTNÍHO PROFILU A PRŮTOKU VE ŠTĚRBINĚ PRO MOCNINNÉ LÁTKY	56
3.5 DOSAZENÍ KONKRÉTNÍCH HODNOT	59
3.5.1 VSTUPNÍ HODNOTY:.....	60
ZÁVĚR	62
POUŽITÁ LITERATURA	63

SEZNAM NEJČASTĚJI POUŽÍVANÝCH SYMBOLŮ	65
SEZNAM OBRÁZKŮ	66
SEZNAM GRAFŮ.....	67
SEZNAM TABULEK.....	67

ÚVOD

Pokud budeme chtít objasnit pojem polymer od jeho vzniku, budeme se muset vydat až do roku 1493. V tomto roce byl totiž objeven Kolumbovými mořeplavci kmen indiánů, který si zhotovil míč z vyschlé kapaliny, která vytékala z místních stromů, které byly nazývané "Cau-Uchu" (odtud i český termín "kaučuk"). Jeho první využití Evropany se datuje až na rok 1791, kdy se z přírodního kaučuku vyráběly nepromokavé lodní plachty. Dále šel už pokrok ve zkoumání této látky velmi rychle dopředu. V polovině 19. století bylo zjištěno, že při zahřátí kaučuku ve směsi se sírou vznikne látka s novými vlastnostmi zvaná pryž. S vynálezem pneumatiky v roce 1888 přišel velký rozmach gumárenského průmyslu a spolu s ním nutnost získávat kaučuk i jinak, než pouze přírodní cestou.

V roce 1860 Granvil Williams jako první destilací přírodního kaučuku izoloval látku, kterou nazval izopren. Ten o 19 let později přeměnil francouzský chemik Bouchardat zpět na kaučuk a tím dal vzniknout výrobě polyizoprenu. Roku 1900 bylo v Rusku zjištěno, že z kaučuku lze získat nejen izopren, ale také dimethylbutadien, který je možné také přeměnit zpět na kaučuk. Tímto způsobem bylo tedy možné kaučuky vyrábět uměle, což jako první potvrdilo Německo v první světové válce, kdy zahájilo výrobu polydimethylbutadienu.

Od té doby došlo k velkému pokroku v syntéze polymerů a díky tomu vznikaly nové a nové umělé materiály, které dnes můžeme vidět takřka na každém kroku. Pro jejich zpracování se začalo používat mnoho metod v čele s vytlačováním. Této metodě zpracování polymerů zaměřím velkou část své práce.

Nejprve ale přijde stručné seznámení s jednotlivými procesy zpracování polymerů, poté už se budu zabývat vytlačováním. Tato část bude věnována obecným náležitostem této technologie. V poslední, třetí, části již přijde na řadu odvození proudění mezi dvěma rovnoběžnými deskami a následné využití těchto vztahů pro vytlačování polyethylenové trubky Tr 20x3 rychlostí 50 metrů za hodinu.

Vymezení pojmů

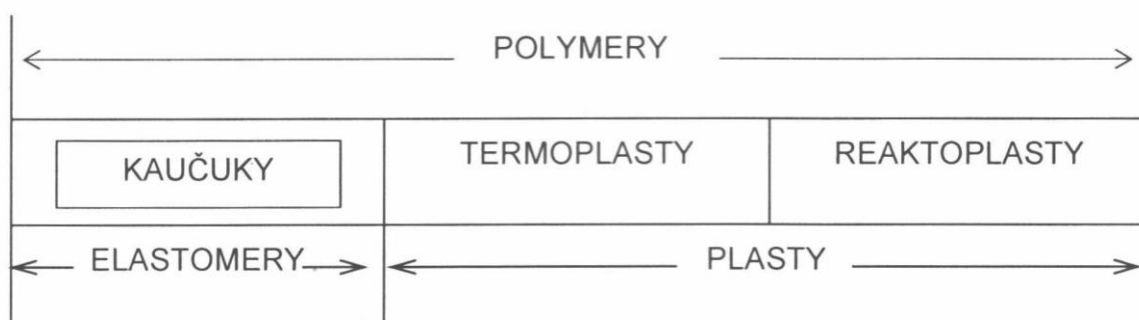
Pojmem polymer dnes rozumíme makromolekulární látku, ve které se opakují atomy nebo skupiny atomů navzájem propojené ve velkém počtu.

Z fyzikálních vlastností může mít polymer krystalovou mřížku, ale může být i amorfní. U amorfního stavu navíc můžeme rozlišovat tři podskupiny, kterými jsou sklovitý stav, kaučukovitý stav a plastický stav. K jejich lepšímu určení pomáhá teplota zeskenění T_g a teplota tání T_m .

Syntetické polymery – výsledný produkt zpracování ropy, těžko rozložitelné v přírodě. Jsou výsledkem lidské činnosti, v přírodě se jinak nevyskytují. Při rozpadu mohou uvolňovat jedovaté látky, ale pro snadnou výrobu a multifunkční využití jsou dnes hojně využívány ve všech průmyslových odvětvích. Nejznámějšími druhy jsou PVC, PE nebo PP.

Přírodní polymery – pocházejí z přírodních zdrojů. Z řetězců přírodních polymerů se skládá většina zemské fauny i flóry. Hlavními zástupci jsou polysacharidy (celulóza, škrob) a bílkoviny.

Protože pojem polymer zahrnuje velkou škálu produktů přírodních i syntetických, rozdělují se dále i podle kritéria plasticity na následující podskupiny.



Tabulka 1 Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]

Elastomery: Už z názvu samotného lze vyčíst, že jde o elastický polymer, který můžeme i malou silou silně zdeformovat bez porušení. Obvykle jde o deformaci vratnou. Hlavním zástupcem elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se vyrábí pryž (guma). Jejich elasticita se při vulkanizaci ještě zvětšuje, ale i nezvulkanizovaný kaučuk má elastické vlastnosti.

Plasty: Tímto termínem rozumíme podskupinu polymerů, které jsou za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při vyšší teplotě se ale stávají plastickými a tvarovatelnými. Pokud můžeme změnu z plastického do tuhého stavu opakovat (vratná změna), nazýváme polymer termoplastem. Jestliže jde o změnu nevratnou (neopakovatelnou), protože je výsledkem chemické reakce (probíhající obvykle za zvýšené teploty), pak mluvíme o reaktoplastech (dříve také termosety).

Bioplasty: Slovo bioplast označuje širokou škálu produktů. Obvykle míní polymerní materiály vyrobené čistě z přírodních materiálů. Vstupní surovina je chemicky upravena (např. na kyselinu mléčnou) a následně je polymerizována. Druhým případem jsou biodegradabilní polymery (plasty). Biodegradabilními plasty jsou materiály podobné kompozitům. Materiál z biomasy se v tomto případě používá jako pojivo. Při rozkladu pojiva se pak syntetický materiál rozpadá rychleji než bez tohoto přírodního aditiva.

U zpracování bioplastů je třeba důsledně dbát na jejich chemickou stavbu. Některé totiž mohou být velmi citlivé na vodu (chlazení plynem), jiné na železo (niklové stroje), apod. Pokud se ale všechny tyto vlastnosti berou v potaz, mohou být bioplasty zpracovávány stejně, jako ryze syntetické plasty.

1 METODY ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ

Hlavním procesem zpracování polymerů je tváření. To se používá pro elastomery, termoplasty i reaktoplasty. Výhodou termoplastů v tomto procesu je, že jejich zahřátí nevyvolává žádnou chemickou reakci, která by ovlivnila jejich konzistenci. I díky tomu mohou být v plastickém stavu udržovány déle než kaučuky nebo reaktoplasty. Nevýhodou termoplastů je ale naopak nutnost je po konci tváření ochladit. To totiž u reaktoplastů a kaučuků nutné není, protože při tváření sesíťují, čímž ztratí svou termoplasticitu.

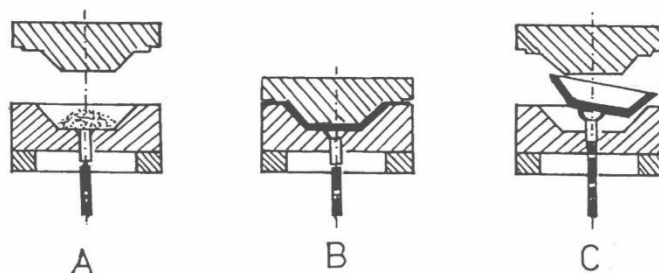
Polymery se obvykle tvářejí nad jejich teplotou toku, která se liší podle vlastností makromolekulární látky. Obvykle to ale bývá rozsah mezi 100°C až 200°C.

1.1 LISOVÁNÍ

Lisování je zpracovatelský proces vlastní hlavně reaktoplastům (aminoplasty, polyestery). Teplota plastu při lisování závisí na druhu plastu, tloušťce stěny a geometrii výrobku, nicméně se pohybuje standardně v rozmezí 130°C až 190°C. Můžeme ho rozdělit na dvě základní varianty. Vysokotlaké a nízkotlaké lisování, u kterých je mezním tlakem 3,5MPa. Obvyklejší ale bývá první možnost.

Vysokotlaké lisování

Nejčastější metodou vysokotlakého lisování je lisování přímé. K tomu se téměř výhradně používají pístové hydraulické lisy, které jsou konstruovány pro uzavírací sílu až 10MN. Výsledný tvar výlisku je dán tvarem lisovací formy, umístěné v lisu.

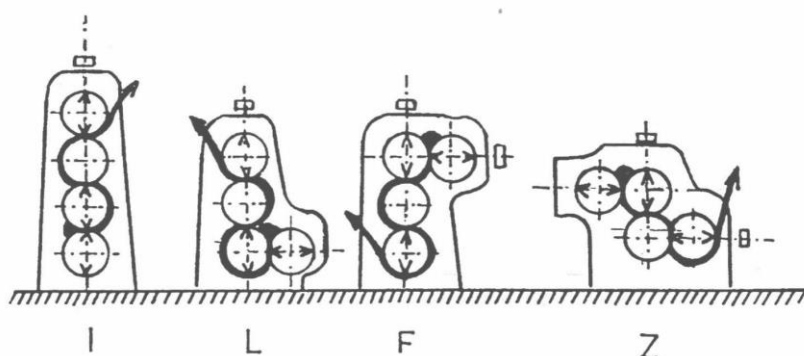


A – plnění formy, B – vlastní lisování, C – vyjímání výlisku z formy

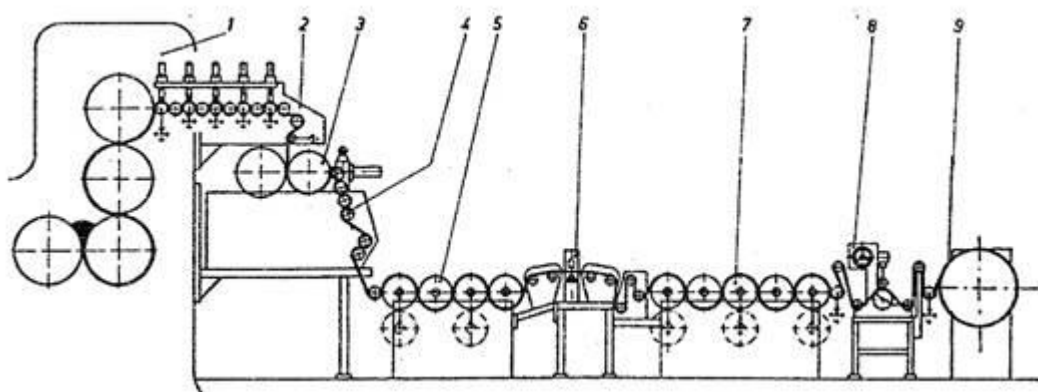
Obr. 1 Princip vysokotlakého přímého lisování [1]

1.2 VÁLCOVÁNÍ

Válcování, nebo také kalandrování je způsob tváření polymerů, který je hojně využíván k výrobě fólií, desek a k nanášení polymerů na textilní podložky. Principem válcování je hromadění polymerní směsi před úzkou štěrbinou, kterou projde pouze malý zlomek objemu látky. Kvalita výsledného povrchu je dána počtem válců, mezi kterými polymer prochází. Nejčastější variantou bývá čtyřválcový kalandr. Ten se nadále dělí na různé typy (I, L, F, Z) – viz obr. 2. Válčováním se zpracovávají materiály jako PVC, PE-HD, PE-LD, apod. Plast se nejdříve rozehřeje na želatinační teplotu (u PVC je to 170°C) a dostává se mezi válce, kde se hněte a promíchává. Na válcovací zařízení pak navazují procesy chlazení, desénování, dloužení, potiskování, ořezávání, apod. Válcovací linka je vidět na obrázku 3.



Obr. 2 Klasifikace čtyřválců na typy I, L, F a Z [1]



1 - čtyřválcový kalandr, 2 - válečkový odtah, 3 - desénovací válce, 4 - odtah,
5 - temperace, 6 - měření tloušťky, 7 - chlazení, 8 - ořezávání okrajů, 9 - navíjení

Obr. 3 Linka pro válcování fólií z měkčeného PVC [8]

1.3 VYTLAČOVÁNÍ

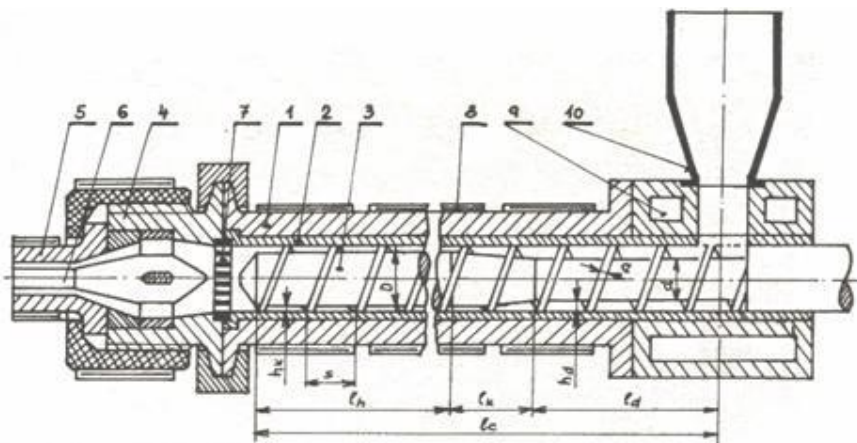
Vytlačováním rozumíme proces, kterým je polymer kontinuálně vytlačován z tlakové komory.

Základní dělení vytlačovacích procesů:

- Výroba trubek a profilů (trubky - PVC, PE-HD, PE-LD, PP; profily - PS, PC)
- Výroba fólií a desek (fólie - PP, PE-HD, PC, PVC; desky – PE, PP, PVC)
- Ostatní způsoby (vlákna – PP, PE-HD; napěněné profily – PS, PE-LD)

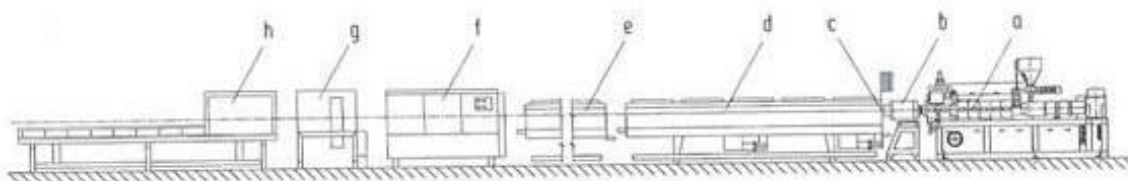
K vytlačování se převážně užívá jednošnekových nebo dvoušnekových vytlačovacích strojů, na které navazuje tvarovací hlava (obr. 4). Vytlačování bývá obvykle doplněno dalšími přístroji pro chlazení, kalibraci, apod. Tím se vytváří vytlačovací linky (obr. 5).

O tomto tématu bude více uvedeno ve druhé části.



1 – pracovní válec, 2 – pouzdro, tavní komora, 3 – šnek, 4 – vytlačovací hlava
5 – hubice, 6 – trn, 7 – lamač, 8 – topení, 9 – chlazení, 10 – násypka

Obr. 4 Jednošnekový vytlačovací stroj [8]



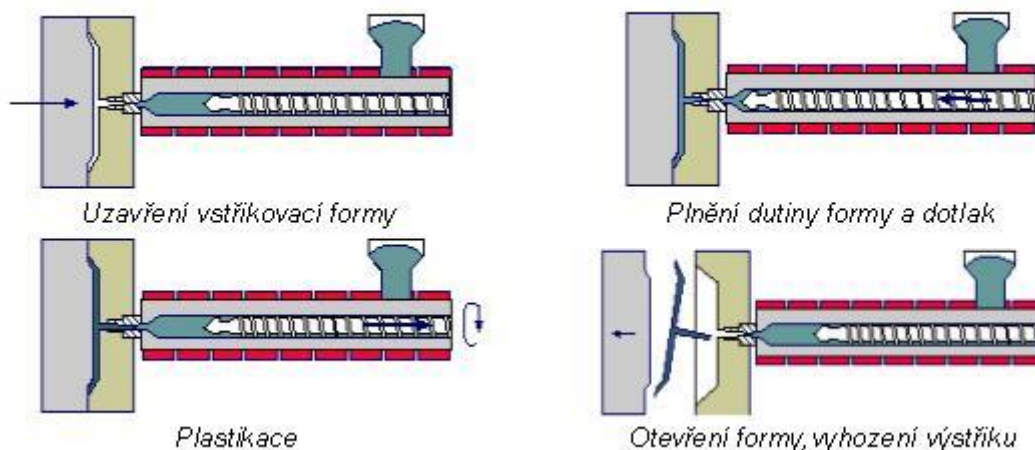
a – vytlačovací stroj, b – vytlačovací hlava, c – kalibrace, d – kalibrační jednotka,
e – chlazení, f – měřící zařízení, g – dělicí zařízení, h – odkládací zařízení

Obr. 5 Linka na výrobu trubek z PVC [8]

1.4 VSTŘIKOVÁNÍ

Touto metodou vznikají kvalitní a rozměrově dostatečně přesné výrobky. Během jediné operace se prášek na vstupu přemění na hotový výrobek, který už není třeba dále opracovávat. Plast je do vstřikovacího zařízení přiváděn ve formě granulí. Z násypky jsou granule odebírány šnekem nebo pístem a jsou přiváděny do tavicí komory. Principem metody je vstříknutí taveniny polymeru z tavicí komory do připravené formy, jejíž tvar zaujme. Forma je chlazená a plast v ní tak postupně tuhne. Po ztuhnutí taveniny se forma otevře a vyjme se hotový výrobek (obr.6). Celý cyklus se následně opakuje.

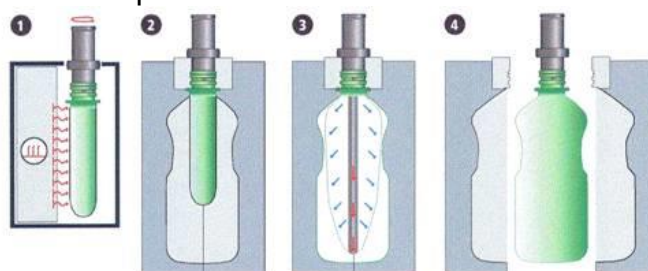
Vstřikování lze provádět téměř všechny druhy termoplastů. V omezené míře se mohou vstřikovat i některé reaktoplasty a kaučuky. Hlavními parametry vstřikování jsou vstřikovací tlak (ovlivňuje rychlost plnění, uzavírací sílu), teplota taveniny (dána druhem plastu, ovlivňuje tekutost a také dobu chlazení) a teplota formy (udává teplotu taveniny a je na ní závislý i vstřikovací tlak). Rychlost plnění formy by měla být co nejvyšší, aby byl výsledný výrobek homogenní. Rozměry výrobku pak ovlivňuje také doba a síla dotlaku.



Obr. 6 Vstřikovací cyklus [8]

1.5 DALŠÍ METODY TVÁŘENÍ PLASTŮ

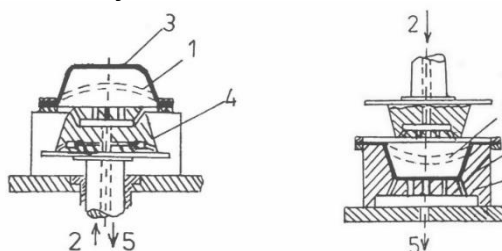
Vyfukování slouží k výrobě dutých předmětů (lahví, kanystrů, popelnic apod.) a fólií. Touto metodou se zpracovává hlavně PE a PP (dohromady asi $\frac{3}{4}$ produkce) nebo také PVC a PET. Vyfukování má dvě varianty - výtlačné a vstříkovací (obr. 7). U výtlačného vyfukování je extruderem vytlačen polotovár, který je zavřen do formy a vyfouknut. U vstříkovacího vyfukování se polymer nastříkne na speciální trn umístěný ve formě, která se následně rozevře, polymer se přenes do vyfukovací formy a tam je stlačeným vzduchem vyfouknut. Výhodou vstříkovacího postupu je výrobek bez svarů a celková vyšší kvalita, nevýhodou je pak cena a omezená velikost finálního produktu.



1 – ohřev tvarové části předlisku, 2 – přesun do vstříkovací formy, 3 – vyfukování, 4 – chlazení, vyhození

Obr. 7 Princip vstříkovacího vyfukování s přerušovaným procesem [8]

Tvarování je proces, při kterém se zpracovávají termoplasty. Obvykle se provádí za tepla a bývá bez větších nároků na rozměrovou přesnost. Nejčastěji jsou touto metodou zpracovávány styrenové plasty a dále také PVC, PC, PE, PET nebo PP. Při tvarování se plast tloušťky menší než 3 mm nahřívá pouze z jedné strany, při větší tloušťce pak z obou stran. Hlavní je rovnoměrné nahřátí polymeru lehce pod teplotu toku. Tvarování se dělí na mechanické a pneumatické (obr. 8). Jeho princip je pochopitelný z následujících obrázků.



1 – předehřátá fólie předtažená tlakovým vzduchem 2; 3 výrobek vytvarovaný tvárnici 4 za součinnosti vakua 5

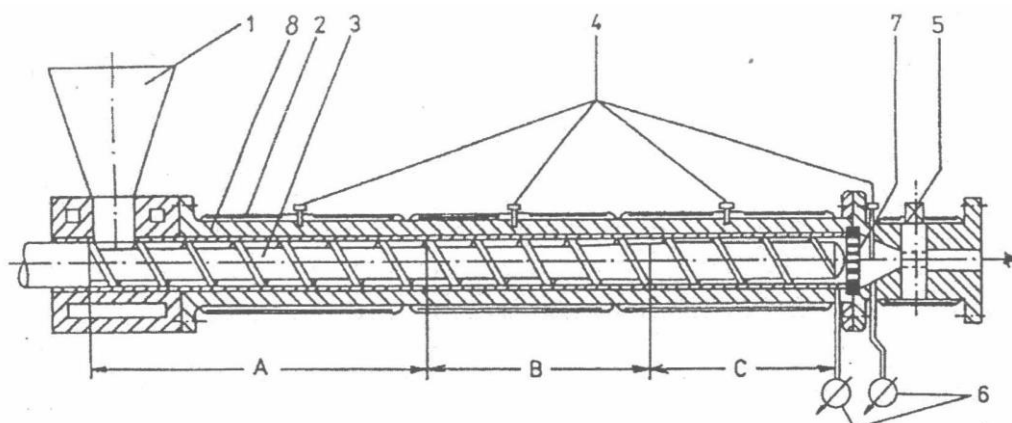
Obr. 8 Znázornění pozitivního (vlevo) a negativního (vpravo) vakuového tvarování [1]

2 VYTLAČOVÁNÍ

Metoda vytlačování je nejrozšířenější metodou zpracování polymerů. Proces vytlačování se řadí do tvářecích operací. Při tomto ději je hmota v plastickém stavu vytlačována tvarovacím nástrojem do volného prostoru. K tomu se používají převážně šnekové nebo v menší míře také pístové vytlačovací stroje.

Nejčastějšími materiály pro vytlačování jsou termoplasty. U vytlačování reaktoplastů nebo elastomerů je třeba nižších teplot ve šneku, aby se materiál nevytvrdil již tam. Ve šneku je tudíž potřeba větší tlak pro hnětení částic. Po průchodu vytlačovací hlavou je pak reaktoplast i elastomer dodatečně zahřát a vytvrzen (u kaučuků nastává vulkanizace).

Pro vytlačování bioplastů platí stejné předpoklady jako pro syntetické plasty, jen je třeba dát pozor na jejich vlastnosti. Některé bioplasty mohou reagovat s železným šnekem, proto je třeba nahradit železné části v extruderu niklem nebo jiným kovem. Další nutnou změnou může být chlazení plynem namísto vodní lázně. Specifické požadavky na vytlačovací technologii mohou mít ale i syntetické plasty a proto nebudu rozlišovat mezi vytlačováním plastů a bioplastů.



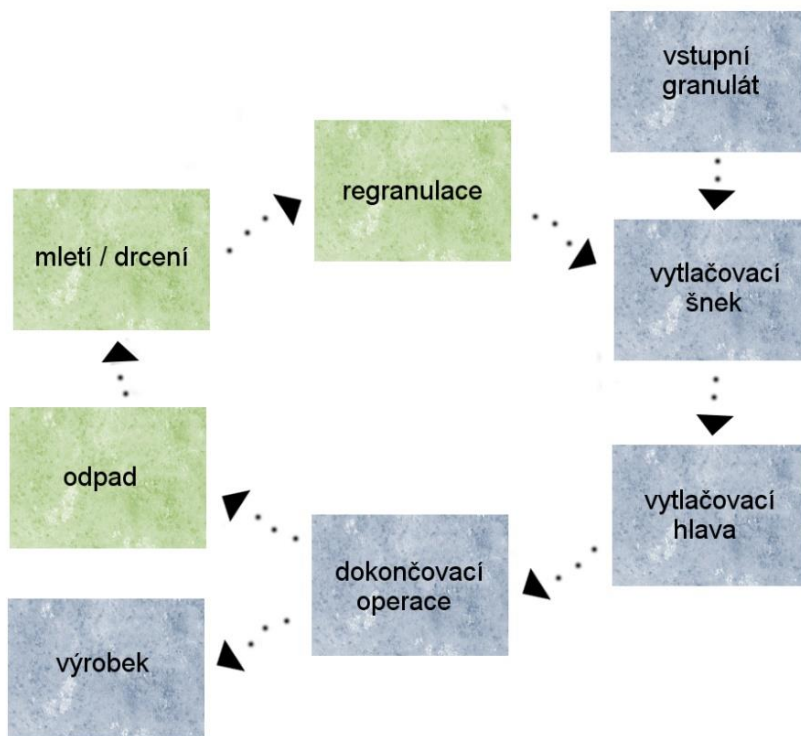
1 – násepka, 2 – elektrické odporové topení, 3 – šnek, 4 – termočlánek k měření teploty v zónách A, B a C, 5 – ventil k regulaci tlaku, 6 – snímače tlaku, 7 – lamač, 8 – válec.
A – plnicí část (zóna), B – plstiční zóna, C – vytlačovací zóna

Obr. 9 Schéma vytlačovacího šnekového stroje [1]



Obr. 10 Vytlačovací stroje v praxi [14]

Na následujícím obrázku (obr. 11) je vidět souslednost jednotlivých procesů při vytlačování. Každým z nich se budu později zabývat samostatně.



Obr. 11 Schéma vytlačovacího procesu

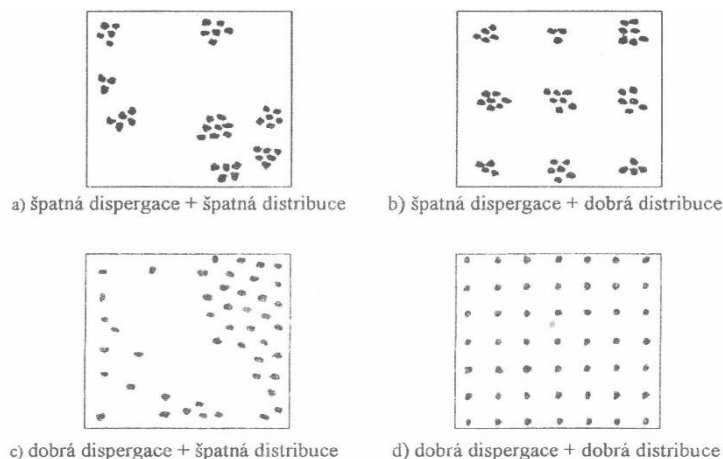
2.1 PŘÍPRAVA GRANULÁTU

Kaučuky ani plasty nelze obvykle zpracovávat bezprostředně v hotové výrobky. Prochází nejdříve procesem přípravného zpracování, kde do nich musí být přidány a rozptýleny další přísady (vulkanizační přísady, plniva, změkčovadla, stabilizátory, pigmenty apod.). Někdy musí být naopak odstraněny těkavé podíly (zbytky monomerů, rozpouštědel, vody apod.) nebo další případné nehomogenity. Navíc je třeba dát polymerům takovou fyzikální formu, která bude vhodná pro další zpracování (granulát, pásy, suchá směs, aglomerát apod.).

2.1.1 SMĚŠOVÁNÍ POLYMERŮ

Směšování je proces, při kterém jsou dva nebo více materiálů vneseny do směšovacího prostoru, kde se rozptýlí tak, aby došlo k požadované rovnoměrnosti rozložení jednotlivých komponent v míchané hmotě. Při směšování se částice jedné látky zanáší mezi částice látky druhé, zatímco bude výchozí poměr dosahován ve stále menších objemech. Čím vyšší je požadovaný stupeň homogenity, tím náročnější bude míchací proces. Požadovaný stupeň ale nemusí být dosažen již během vstupního míchání. Ideální stav, kdy poměr složek je stále stejný a nezávisí na velikosti zkoumaného objemu směsi, ale není nikdy dosažen.

Směšování můžeme rozdělit podle dějů, které při něm probíhají. Pokud dochází pouze k rozptýlení přísady, jedná se o distribuční promíchávání. Zmenšuje-li se i velikost částic, pak směšování označíme jako dispergační (viz obr. 12).

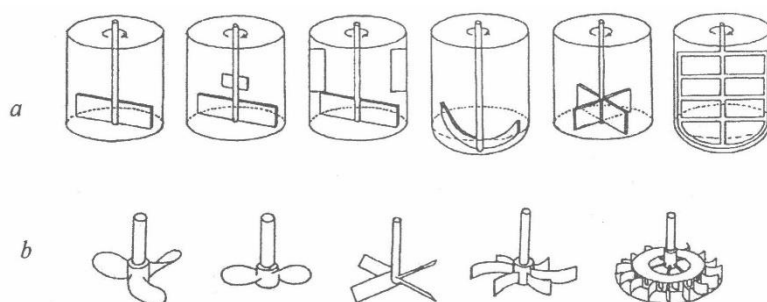


Obr. 12 Schematické znázornění distribučního a dispergačního míchání [2]

U směšování dále rozlišujeme dva základní typy – intenzivní a extenzivní. Pojem intenzivní se může nahradit slovem hnětení nebo plastikace. Při intenzivním směšování je hmota ve změkklém nebo roztaveném stavu a stupeň její homogenity závisí na intenzitě smykového namáhání v systému. Extenzivním je označen směšovací proces, v němž stupeň homogenity závisí na stupni toku nebo na vytváření nového povrchu.

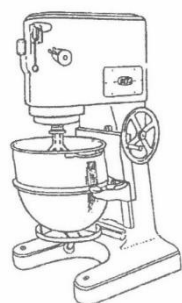
2.1.1.1 Míchání v kapalném prostředí

Nejjednodušší konstrukcí míchacího stroje pro kapaliny je *lopatkový* míchač (obr. 14). Velmi podobnou konstrukci má i míchač *turbínový*, který se liší pouze tvarem míchadla (obr. 13).



Obr. 13 Příklady míchadel pro lopatkový (a) a turbínový míchač (b) [2]

Další možnost je *fluidační* míchač (obr. 15). Ten slouží především k míchání práškových hmot a jeho nejčastější použití je při přípravě práškového PVC smíchaného s kapalnými změkčovadly. Rychle se otáčející rotor (obvodová rychlost 30 až 60 m·s⁻¹) podobný ploché turbíně, umístěný horizontálně na dně míchací nádoby, uvádí práškový polymer do vířivého pohybu. Částice polymeru jsou přitom namáhány nárazy rotoru, nárazy o stěnu nádoby a také vzájemnými srážkami. Směs se navíc vzniklým třením zahřívá. Jeden míchací cyklus trvá mezi pěti až deseti minutami.

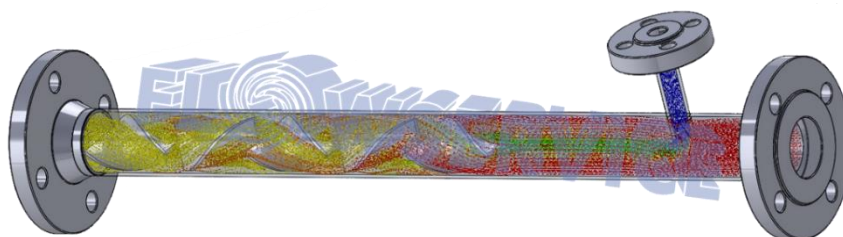


Obr. 14 Lopatkový míchač [2]



Obr. 15 Fluidační míchačka [8]

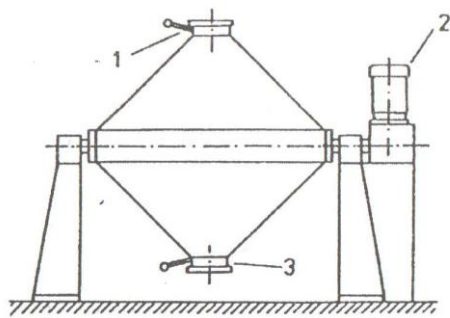
Jinou možností pro míchání v kapalném prostředí jsou statické směšovače. Tato zařízení dosahují míchacího účinku bez jakékoliv pohybující se součásti. Jejich účinek tkví v rozdělování tekoucí taveniny na řadu proudů, jejich přeskupování, směšování a opětovné rozdělování. Obsahují obvykle pouze jednu nebo i několik jednotek různě složitého tvaru. Zařazují se často před vytlačovací hlavu nebo vstřikovací trysku za účelem homogenizace a vyrovnání teploty taveniny. Výhodou statických směšovačů je bezhlučný chod a malá spotřeba energií. Nevýhodou je ale nutnost přivádění konstantních poměrů látek určených pro smíchání. Varianta statického směšovače je na obrázku 16.



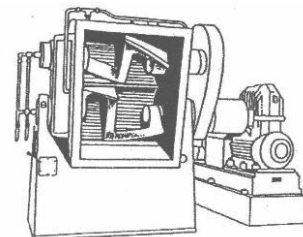
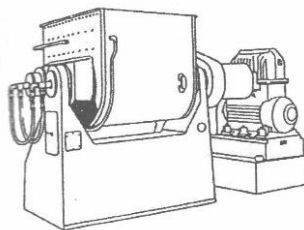
Obr. 16 Statický směšovač [15]

2.1.1.2 Mísení zrnitých látek

Pro mísení partikulárních látek slouží např. *bubnové* (obr. 17) nebo *sudové* mísiče. Buben (sud) se naplní sypkými hmotami, určenými ke smíchání a uchytí se ve speciální konstrukci, která jím otáčí. Tímto principem se vsádka přesypává až do dosažení požadovaného stupně homogenity. Tento typ mísiče je vhodný pro mísení nesoudržných materiálů. Mohou pracovat buď za sucha, nebo i s přidávkou kapaliny. Nejjednodušším a zároveň nejznámějším představitelem této skupiny je klasická míchačka na maltu nebo beton. Dalším typem jsou mísiče *pásové*. Jejich rotor tvoří pásy spirálovitě navinuté do tvaru válce, které se v nádrži otáčejí a přehrnují materiál z jedné strany na druhou. Pro navrácení materiálu z kraje nádrže zpět do středu bývá rotor opatřen vnitřním protiběžným pásovým vinutím. Další variantou pro směšování zrnitých látek je *dvouramenný* mísič. Ten má velmi masivní konstrukci a staví se pro objemy nádrží od 0,1 až po 10 000 litrů. Dno nádrže tvoří dva půlválce, v nichž se otáčejí míchadla. Obvyklé varianty jsou ukázány na obrázku 19. Nejčastější z nich je míchadlo ve tvaru písmene S. Míchadla se kvůli lepší homogenitě materiálu netočí stejnou rychlostí, ale přední bývá 1,5 až 2krát pomalejší než zadní. Jak je z obrázku 18 patrné, k vyklopení promíchaného obsahu nádrže stačí její pootočení.

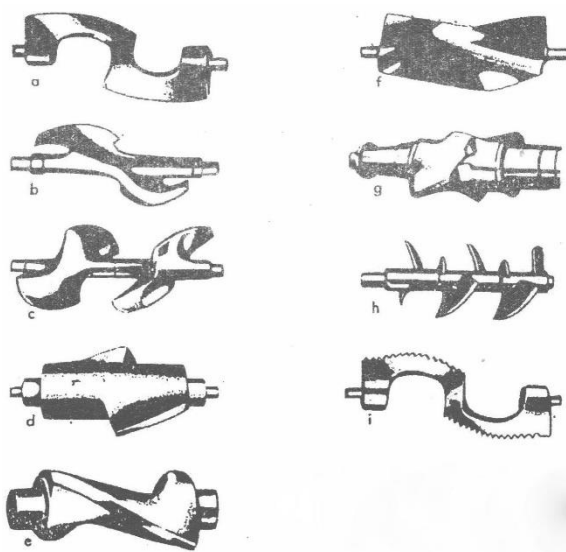


1 – plnicí otvor, 2 – motor, 3 – výpustní otvor



Obr. 17 Bubnový mísič [8]

Obr. 18 Dvouramenný mísič [2]

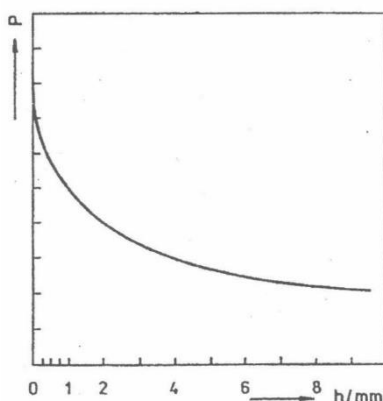


Obr. 19 Různé typy míchadel a hnětadel [2]

2.1.1.3 Hnětení past

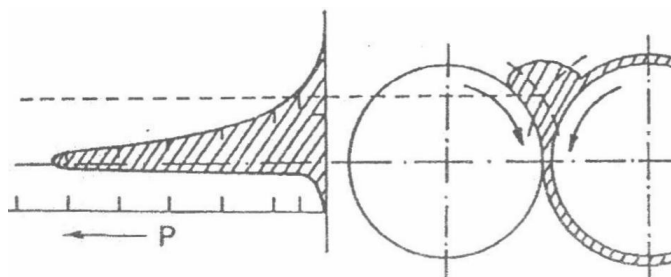
Hnětacími stroji rozumíme takové stroje, které jsou schopné plasty nejen mísit s přísadami, ale především působením intenzivního smykového namáhání mohou převést makromolekulární látku do plastického stavu a dosáhnout tak rozptýlení aglomerovaných komponent až do mikrorozměrů. Z toho vyplývá, že hnětací stroje mají robustnější konstrukci než míchače. Podle způsobu práce můžeme hnětací stroje rozdělit na diskontinuální a kontinuální. Diskontinuální hnětení je pokládáno za pružnější při změně zpracovávaného materiálu. Nevýhodou oproti kontinuálnímu hnětení ale může být kolísání kvality produktu v jednotlivých dávkách.

Mezi **diskontinuální** hnětače můžeme i přes odlišnou konstrukci zařadit i míchací dvouválec. Tyto stroje totiž patří k nejčastějším průmyslovým diskontinuálním hnětacím strojům. Jejich výhodou je velká plocha válců, kde polymer není smykově namáhán, což umožňuje temperaci hmoty a zabraňuje jejímu přehřátí. Tato přednost je ale kompenzována dlouhými míchacími časy a obtížnou obsluhou. Při hnětení na dvouválci se kolem předního válce tvoří souvislá vrstva plastického materiálu a přebytek hnětené směsi se shromažďuje v roličce (návalku) nad štěrbinou mezi válci. Povrch vrstvy má menší obvodovou rychlost než povrch zadního válce a vlivem rychlostního rozdílu tak dochází ke hnětení. Poměr obvodových rychlostí povrchu válců je nazýván skluz (1,0:1,1 až 1,3). Hnětení materiálu je tím intenzivnější, čím větší je rozdíl obvodových rychlostí a čím menší je štěrbina mezi válci. Se zmenšující se štěrbinou mezi válci vzrůstá i tlak mezi nimi, což ukazuje graf 1.



Graf 1 Závislost tlaku mezi válci P na šířce štěrbiny h [2]

Materiál nashromážděný v roličce je také promícháván, ale intenzita míchání je vzhledem k menším smykovým silám nižší. Tomu nasvědčují i tlakové poměry nad štěrbinou a ve štěrbině mezi válci (obr 20).

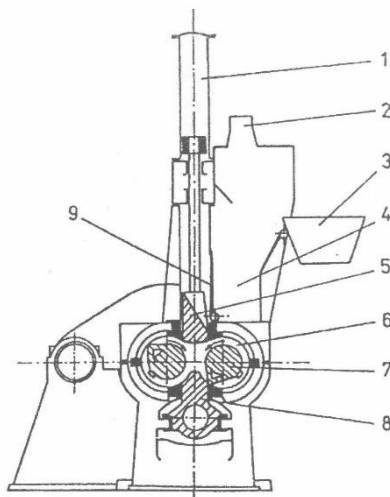


Obr. 20 Tlakové poměry mezi válci vzhledem k ose středu štěrbiny [2]

Již klasičtější diskontinuální hnětače můžeme dle konstrukce a pracovního způsobu rozdělit na dvě skupiny:

- a) Stroje, u kterých hnětadla do sebe nezasahují a pracují s různou obvodovou rychlostí;
- b) Stroje, jejichž hnětadla do sebe zasahují a mají stejnou obvodovou rychlost.

Uvedené hnětače jsou tlakové, což znamená, že pro zvětšení hnětací účinnosti je materiál vtlačován přítlačným klínem mezi hnětací rotory. Nejrozšířenějším typem je tlakový hnětač, který je zobrazen na obr. 21. Hnětadla do sebe nezasahují, otáčejí se proti sobě různou obvodovou rychlostí. Při řezu hnětací komorou získáme tvar ležaté osmičky. Obvyklé tvary hnětadel jsou znázorněny na obr. 19e a 19g. Plášť komory i hnětadla je dutý, aby ho bylo možné vyhřívat nebo chladit. Materiál určený ke zpracování je do hnětače vkládán vertikální šachtou, která je umístěna nad hnětací komorou, zatímco kapalné přísady jsou dávkovány přímo do komory. Vyprazdňování hnětače se provádí otvorem ve spodní části hnětací komory. Na účinnost hnětení má velký vliv i zaplnění hnětací komory míchanou hmotou. Tzv. činitel naplnění se obvykle pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,9 v závislosti na typu hnětače, míchaném materiálu, otáčkách rotoru a tlaku na horní uzavěr.



1 – vzduchový válec ovládající přítlačný klín, 2 – odsávání prachu, 3 – plnicí nádoba, 4 – plnicí násypka, 5 – přítlačný klín, 6 – míchací komora, 7 – hnětadla (rotory), 8 – spodní vypouštěcí klín, 9 – klapka

Obr. 21 Tlakový hnětač [2]

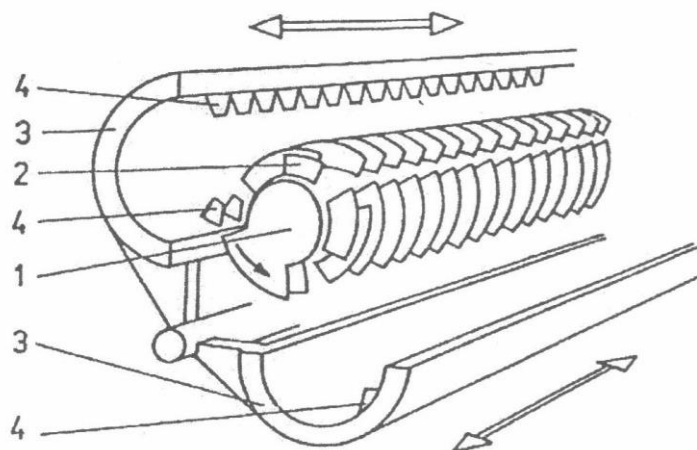
Snaha o zlepšení výkonnosti hnětačů, jejich automatizace a plynulost dodávky stejnorodé směsi vedla k zavedení **kontinuálních** hnětacích strojů. Pro maximální plynulost vychází konstrukce obvykle ze šnekových vytlačovacích strojů. Běžný vytlačovací stroj ale nemá velký hnětací účinek. Jeho zvětšení se dosahuje zařazováním různých bariér a hnětacích elementů, kde je hmota vystavena intenzivnímu smykovému namáhání.

Mezi jednošnekové hnětací stroje lze zařadit šnekový vytlačovací stroj s planetovými válci, kde je termoplast míchán a plastikován průchodem mezerami mezi rovnoměrně uloženými vřeteny, pohonnou hlavní hřídelí a pevným pouzdem (obr. 22). Vřetena, hlavní hřídel i pouzdro mají ozubení s úhlem stoupání 45° , což při otáčení umožňuje nejen plastikaci, ale i dostatečnou dopravu materiálu.



Obr. 22 Šnekový vytlačovací stroj s planetovými válci [16]

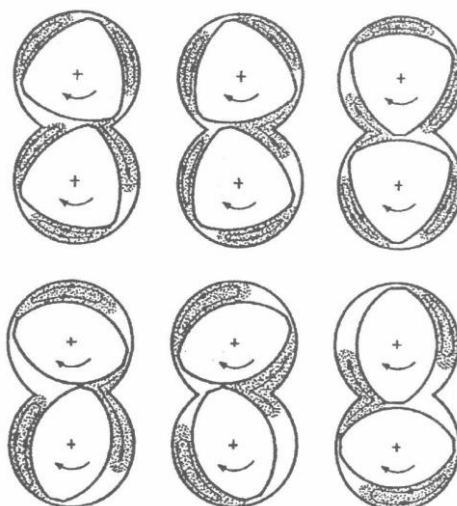
Dalším typem hnětače je KO-hnětač. Jedná se o šnekový vytlačovací stroj s mezerami v závitě šneku, do kterých zasahují v řadách uspořádané a vhodně dimenzované hnětací zuby. Ty jsou upevněné na vnitřní stěně pouzdra (obr. 23). Během provozu se šnek plynule otáčí a vykonává navíc i oscilační pohyb v axiálním směru tak, aby hnětací zuby pouzdra procházely těsně mezerami v závitě šneku. Materiál je tím vystaven smykovému namáhání mezi zuby a šnekem, čímž je hněten a homogenizován. Plášť hnětače je pŕlen v podélném směru, což zajišťuje jeho snadné čištění. Je vyhříván cirkulující vodou. V KO-hnětači lze zpracovávat většinu termoplastů, ale mohou v něm být zpracovávány i reaktoplasty.



1 – šnek, 2 – přerušovaná šroubovice šneku, 3 – dělené pouzdro hnětače, 4 – zuby v pouzdru

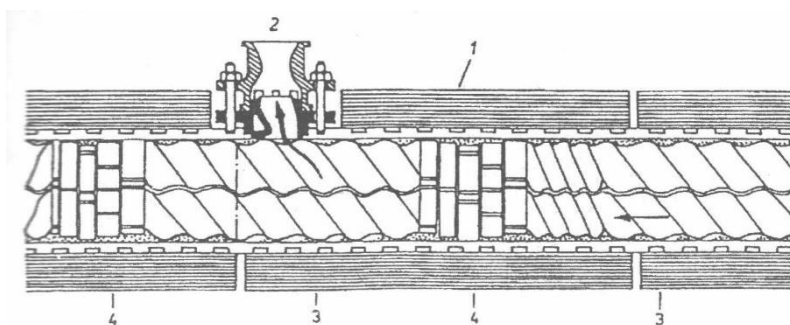
Obr. 23 KO-hnětač [2]

Jinou variantou hnětače je využití dvou šneků. Oproti běžným dvoušnekovým vytlačovacím strojům jsou většinou šneky vybaveny různými hnětacími prvky pro zvýšení hnětacího účinku. Hnětací vložky ve tvaru sférického trojúhelníku mají vzhledem k menšímu prostoru mezi jejich povrchem a povrchem pláště o něco větší hnětací účinek než vložky oválné. Základní princip jejich kooperace je ukázán na obrázku 24.



Obr. 24 Princip působení hnětacích složek trojúhelníkových (nahore) a oválných (dole) [2]

Z dvoušnekových hnětacích strojů se pro zpracování plastů používá dvoušnekový hnětací stroj s hnětacími vložkami typu ZSK (obr. 25). Jde o dvoušnekový vytlačovací stroj se šnekem se stejným smyslem otáčení, které jsou umístěny nad sebou a vzájemně do sebe zasahují. Šneky jsou složeny ze dvou nebo tříchodých šnekových dopravních vložek a hnětacích vložek ve tvaru sférického trujúhelníku nebo oválu. Hnětací vložky jsou vzájemně pootočený tak, že jejich hřbety vytvářejí tříchodý nebo dvouchodý šnek. Vlastní hnětení způsobují síly mezi hnětacími vložkami a pláštěm (obr. 24). Axiální posun a dostatečný tlak hněteného materiálu naopak zaručují dopravní vložky. Poměrem a uspořádáním dopravních a hnětacích vložek je možno přizpůsobit hnětací účinek přímo požadavkům na jednotlivé materiály. Velké dvoušnekové hnětací stroje ZSK jsou obvykle používány ke zpracování surových polymerů s přídavkem různých aditiv (stabilizátorů, antioxidantů, pigmentů, plniv atd.).



1 – vytápění, 2 – odsávání plyných zplodin, 3 – dopravní složky, 4 – hnětací složky

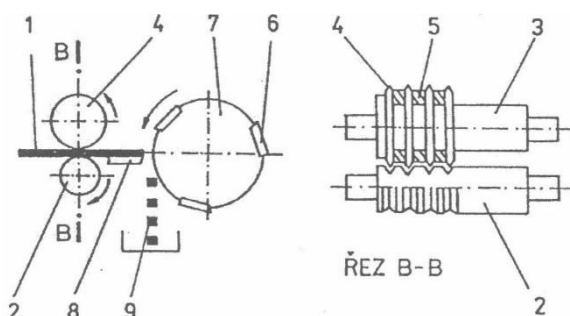
Obr. 25 Schéma dvoušnekového hnětacího stroje s hnětacími vložkami typu ZSK [2]

Z ekonomických důvodů se ale poměrně často hnětací stroje vynechávají a hnětení je prováděno až při samotném vytlačování. Samotný vytlačovací šnek ale není pro hnětení moc efektivní a proto bývají dopravní části šneku doplněny hnětacími složkami (obr. 37).

2.1.2 GRANULACE

Konečným stupněm přípravného zpracování většiny plastů je granulování. Touto operací materiál získává tvar granulí, který je vhodný pro další zpracování. Granule lze snadno a přesně dávkovat do strojů. Jejich výhodou je i relativně velká sypaná hmotnost, dobré tokové vlastnosti a možnost snadného smíšení s dalšími materiály (pigmenty atd.). Výběr granulační metody závisí na vlastnostech zpracovávané taveniny, na prostoru, který je k dispozici pro granulační zařízení, na předpokládaných výkonnostech zařízení, ekonomických požadavcích a na dalších faktorech.

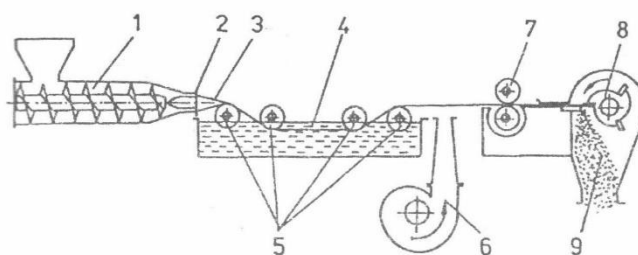
První variantou je granulace z pásu (obr. 26). Horní válec podávacího zařízení je vybaven kotoučovými řezacími čepemi, které zasahují do drážek spodního válce. Tím je dodávaný materiál podélně rozřezán na proužky. Ty jsou následně rozsekány rotujícími noži na granule. Tento způsob granulace ale není určen pro tvrdé materiály a navíc nepatří ani mezi nejproduktivnější možnosti.



1 – pás plastu, 2 – podávací válec, 3 – hřídel, 4 – kotoučové řezací nože, 5 – distanční vložky, 6 – rotační nože, 7 – buben rotačních nožů, 8 – pevný nůž, 9 – granule

Obr. 26 Pásový granulátor [8]

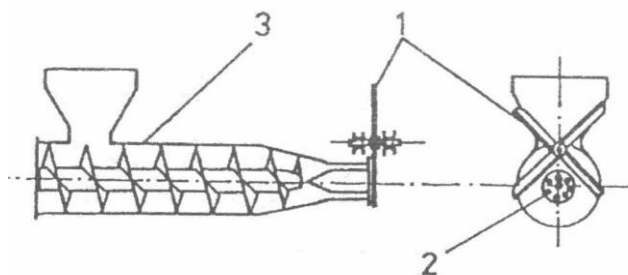
Další možností, která je v dnešní době užívána častěji, je granulace strun. Během té se dá postupovat dvojím způsobem. První možností je granulace za studena, při které jsou struny vytlačené granulační hlavou s mnoha otvory chlazeny ve vodní lázni a po následném odstranění přebytečné vody jsou kolmo rotujícími noži sekány na válečky (obr. 27). U této granulace je ale nevýhodou obtížné zvládnutí mnoha strun v granulačním zařízení. Struny se před ochlazením mohou slepovat nebo se mohou po nadměrném chlazení lámat. Čím větší je počet strun, tím více rostou i potíže a proto se tato metoda používá pouze do výkonnosti $2000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$.



1 – šnekový vytlačovací stroj, 2 – víceotvorová hlava, 3 – struny, 4 – chladicí lázeň, 5 – vodící válečky, 6 – ventilátor, 7 – podávací válečky, 8 – nožový granulátor, 9 – granule

Obr. 27 Granulace za studena [8]

Druhou variantou granulace strun je granulace za horka. Granule jsou seřezávány přímo z čela granulační hlavy s mnoha otvory (obr. 28). Pro tento způsob byla vyvinuta řada metod použitelných pro polymery, které nemají nízkou viskozitu taveniny. Při granulaci za horka je roztavený polymer, vstupující z otvorů hlavy, seřezáván za sucha mnohanožovým řezacím nástrojem nad granulační hlavou. Ten se otáčí vysokou rychlostí a odhazuje odřezané granule pryč od čela hlavy. Granule jsou obvykle následně chlazeny ve vodní lázni a dále pak sušeny. Pro zvýšení chladicího účinku se u některých konstrukčních variant na nožové zařízení vhání směs vzduchu s vodou. Další alternativou je vodní prstenec v bezprostřední blízkosti nožů. Horké granule jsou odstředivou silou odhazovány do vodního prstence, ve kterém jsou ochlazeny a poté dopraveny k sušení.



1 – rotační nůž, 2 – granulační hlava, 3 – šnekový vytlačovací stroj

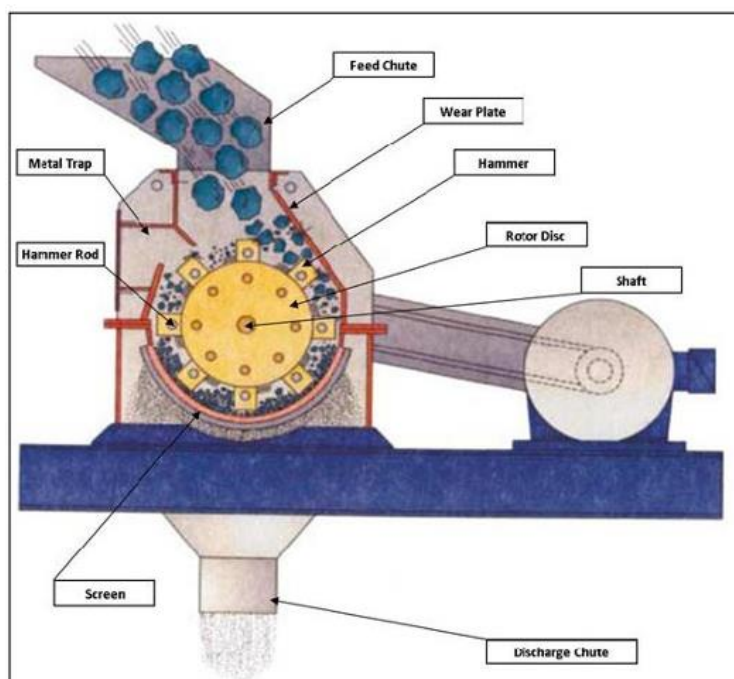
Obr. 28 Granulace za horka [8]

Poslední možností je granulace pod vodou, která je určena především pro polymery s tendencí lpět při granulaci na nožích. I v tomto případě jsou struny seřezávány za rotujícími noži z čela hlavy a následně jsou chlazeny vodou. Voda totiž intenzívně chladí nejen vzniklé granule, ale i rotující nože. Tudiž lze touto metodou bezpečně granulovat nízkoviskózní i lepivé polymery.

2.2 ODPAD

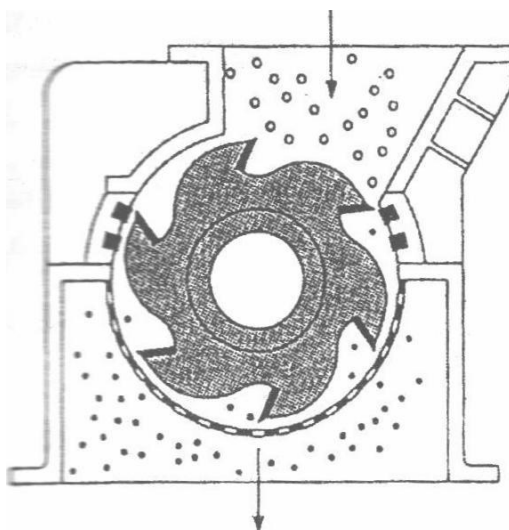
Do tvaru granulí se musí znovu převést i technologický odpad vznikající během zpracování. Nejprve je však nutné odpad rozdrtit a rozemlít do takové míry, aby ho bylo možno znovu zpracovávat.

K hrubému rozrušení velkých kusů odpadu se obvykle používají kotoučové pily a dále pak různé typy kladivových (úderových) mlýnů. Jestliže k rozemletí materiálu nestačí kladivový mlýn (obr. 29), zařazují se do linky jiné varianty mlýnů schopné jemnějšího mletí.



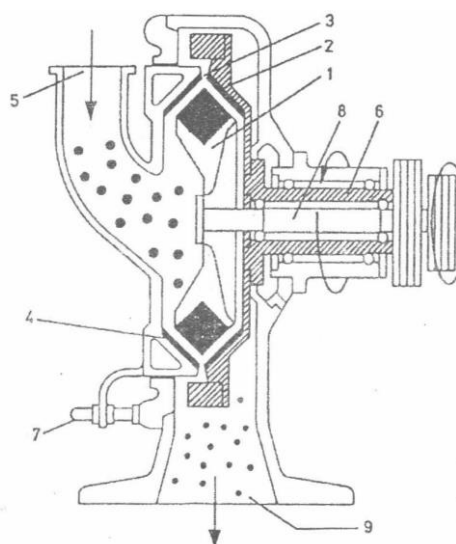
Obr. 29 Kladivový mlýn [9]

Velmi častým typem mlýnů používaných pro tyto účely je nožový mlýn (obr. 30). Ten sestává z několika pevných nožů, uložených radiálně kolem rotoru, který unáší na svém povrchu další nože. Rotor se rychle otáčí a drtí a stříhá mezi noži přicházející materiál. Velikost nadrceného polymeru je dána velikostí ok síta, kterými materiál propadá. Tím je zajištěna rovnoměrná velikost a snadná regulovatelnost.



Obr. 30 Nožový mlýn [8]

Jiným typem, který se uplatňuje stále více, je talířový nárazový mlýn. Jeho výhodou je fakt, že je schopen bez dalšího zásahu rozemlít materiál vycházející z nožových mlýnů na rovnoměrnou zrnitost 100 μ m. Řez talířovým nárazovým mlýnem je uveden na obr. 31. Materiál je vrhán rotorem proti rýhovaným bočnicím, z nichž jedna je poháněna motorem a otáčí se v opačném směru než rotor. Tímto způsobem je mletý materiál intenzivně namáhán až do doby, kdy dosáhne velikosti obvodové štěrbiny mezi bočnicemi. Jemnost mletí je regulována nastavením velikosti štěrbiny pomocí stavitelných šroubů.

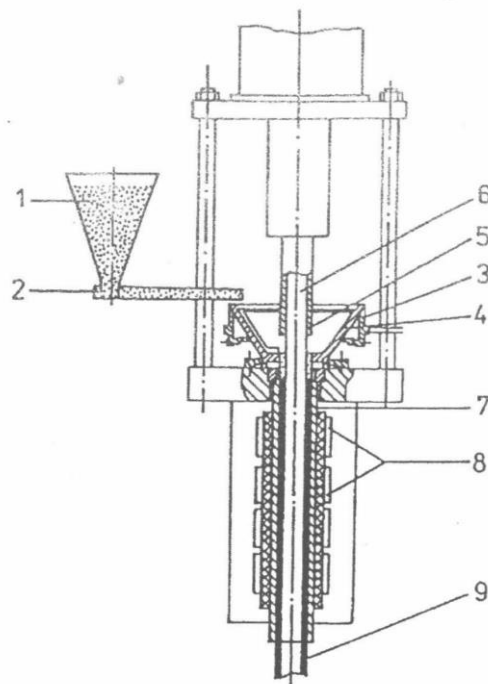


1 – rotor, 2 – otáčející se rýhovaná bočnice, 3 – regulovatelná štěrbina, 4 – neotáčející se axiálně posuvná rýhovaná bočnice, 5 – plnicí hrdlo, 6 – hřídel bočnice, 7 – šrouby axiálního posunu bočnice, 8 – hřídel rotoru, 9 – výpustní otvor

Obr. 31 Talířový nárazový mlýn [8]

2.3 PÍSTOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE

První extrudování polymerů je datováno do čtyřicátých let 19. století, kdy byla pomocí pístových vytlačovacích strojů vytlačována roztavená gutaperča do vodní lázně ve formě vláken. S postupem času a zapracováním šneku do vytlačovacích strojů v průmyslovém zpracování polymerů ale nastal ústup klasických pístových extruderů. Příklad pístového vytlačovacího stroje určeného k vytlačování trubek je na obrázku 32. V některých zpracovatelských závodech se pístové stroje stále používají při zpracování tvrdého PVC a plněných reaktoplastů. Stále mají využití i při vytlačování polytetrafluorethylenu a vysokomolekulárního polyethylenu. Tyto polymery totiž vzhledem ke své velké viskozitě nelze běžnými metodami zpracovávat.



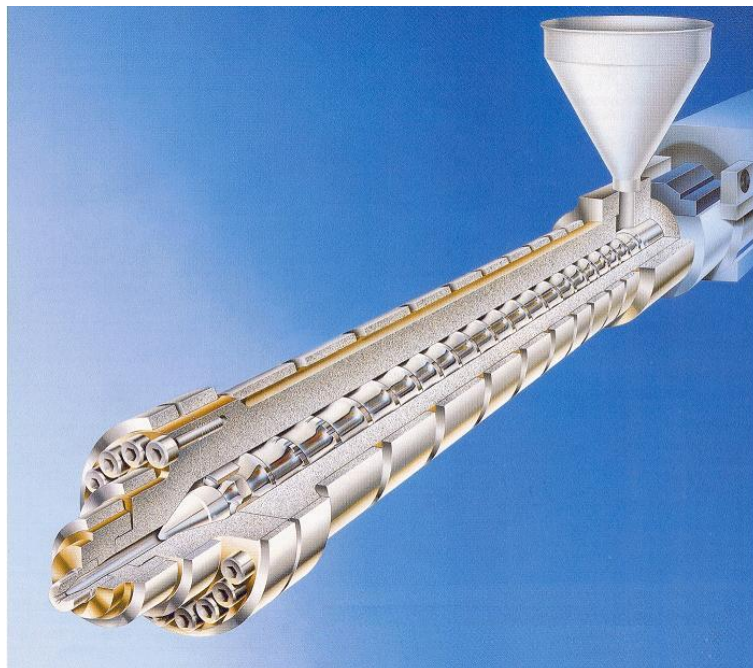
1 – plnicí zásobník, 2 – vibrační žlab, 3 – rotující rozdělovací talíř, 4 – násypka, 5 – píst, 6 – trn, 7 – vytlačovací pouzdro, 8 – vyhřívání, 9 – plastová trubka

Obr. 32 Pístový vytlačovací stroj [2]

2.4 ŠNEKOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE

Častějším a také charakterističtějším zařízením pro vytlačování plastů je šnekový vytlačovací stroj. K vytlačování termoplastů a kaučukových směsí ve formě granulátu, aglomerátu, pelet nebo pásku se využívají převážně jednošnekové stroje. Při zpracování práškových polymerů se uplatňují více stroje dvoušnekové.

Šnekové vytlačovací stroje využívají principu objeveného již Archimédem. Mají obrovskou výhodu v možnosti kontinuální práce, čímž převyšují jiné procesy zpracování. Klasický šnekový extruder zachytává ve vstupním pásmu granulovanou, aglomerovanou nebo práškovou hmotu, kterou dále za pomoci šneku dopravuje směrem k hlavě. V další části se již lehce stlačená hmota dále plastikuje, je promíchávána a dále stlačována. Výstupem je pak materiálově i teplotně homogenní tavenina, která je kontinuálně vtlačena do tvářecí hlavy, která dává tavenině výsledný tvar.



Obr. 33 Tříčtvrteční řez jednošnekovým vytlačovacím strojem [8]

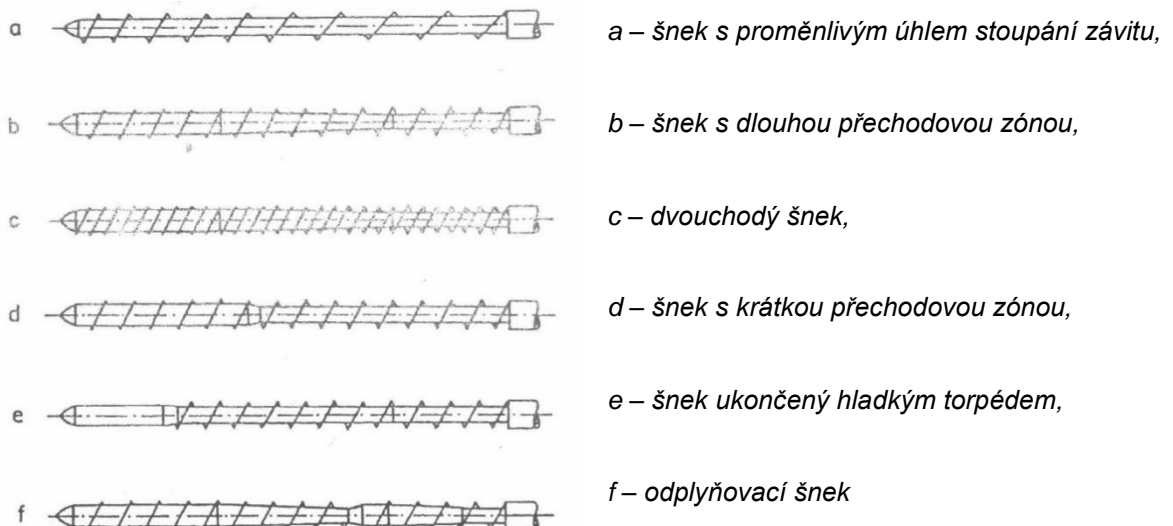
2.4.1 ŠNEK

Velmi důležitým faktorem u šnekových strojů, jak už sám název napovídá, je šnek. Princip dopravního účinku rotujícího šneku znal Archimedes už ve starověku. Jejich průměr bývá běžně od 30 mm až po průměry okolo 150 mm. Pro speciální výrobu může mít šnek průměr až 350 mm.

Charakteristickými rozměry šneku je průměr D a účinná délka šneku L , která se vyjadřuje v násobcích průměru (např. $L=20D$). Běžný úhel stoupání šneku je $\alpha=17,7^\circ$.

U extruderů na plasty bývá délka šneku obvykle 20-25 D u menších a 25-30 D u větších strojů. Účinná délka šneku je rovněž závislá na vkládaném materiálu a jeho vlastnostech. Pro vytlačování kaučuků to je 4-6 D při zásobování již předeřátou směsí. Pokud je směs vkládaná za studena, je nutné volit délku šneku v rozpětí 10-18 D .

Teoreticky by každý polymerní materiál měl mít svůj vlastní šnek. Ale protože dosud nebyl navržen univerzální šnek pro všechny plasty, tak zde (obr. 34) uvádím nejdůležitější tvary šneku.



Obr. 34 Typy šneků [2]

Provedení *a* se používá hlavně při zpracování elastomerů a PVC. Šnek s krátkou přechodovou částí (obr. 34*d*) a s dlouhou výstupní částí 5D až 20D se používá pro snadno tekoucí, teplotně stabilní plasty. Nověji je dáována přednost třízónovým šnekům s dlouhou přechodovou částí (obr. 34*b*), kdy se vzájemný poměr vstupu, přechodové části a výstupu nastavuje podle vlastností daného plastu. Další alternativou tvaru šneku je zakončení torpédem (obr. 34*e*). V tomto případě nastává zlepšení teplotní homogenity taveniny.

Pro výrobu šneků se používají houževnaté materiály s velkou povrchovou tvrdostí. Pro vytlačování korozivních látek (např. PVC) se šneky tvrdě chromují nebo se vyrábí z odolných slitin s vysokým obsahem niklu. Poslední dobou se vodící plochy závitů šneku pancéřují slitinami s velkou odolností vůči oděru. Ty jsou pak schopny odolávat i abrazivním účinkům plněných plastů a kaučuků.

Pohon šneku bývá v provozu velmi namáhán, a proto musí být vyroben dostatečně robustně tak, aby snesl i krátkodobé přetížení. Musí umožňovat nastavení otáček šneku takové, aby se otáčky co nejlépe přizpůsobily požadavkům výroby.

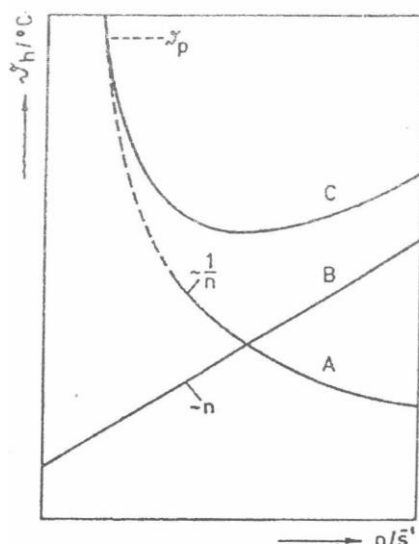
Tlaky vyvozené šnekem jsou zachycovány axiálním a radiálním ložiskem. Obvykle je používán systém dvou radiálních ložisek a jednoho mohutného, nejčastěji kuželíkového, axiálního ložiska.

Pouzdro šneku bývá u menších strojů vyrobeno z nitridační oceli, zatímco pouzdra strojů větší bývají odlévána z ocelí a vypouzdřena vložkou buď z nitridační oceli, nebo ze speciální slitiny s velkou odolností vůči oděru a korozi.

Šnekový vytlačovací stroj je zásobován plnicím otvorem. Okolí tohoto otvoru bývá chlazeno vodou, což usnadňuje plnění šneku termoplastickými materiály a také voda zabraňuje přehřívání ložisek přenosem tepla pouzdem nebo jádrem šneku. Šnekové extrudery určené ke zpracovávání práškových plastů jsou vybaveny pomocným šikmým šnekem, který zaručuje kontinuální plnění strojů.

Násypka je upevněna na plnicím otvoru. Zpravidla bývá kónického tvaru a vyrábí se obvykle z nerezavějícího plechu s průzorem. Velikost násypky je dána velikostí stroje. Do samotné násypky by se ale měl vejít materiál odpovídající 1 až 2 hodinovému provozu. Je-li šnekový vytlačovací stroj zásobován granulátem, suchou směsí, aglomerátem apod., může násypka být vybavena míchadlem, které zabraňuje vytváření můstků. V mnohých případech je vhodné použití předsoušení granulí, k čemuž slouží násypkový sušič.

Šnekový vytlačovací stroj musí být pro většinu aplikací vybaven topným systémem, který musí být regulovatelný v širším rozsahu teplot. Ohřev vytlačovaného polymeru na požadovanou teplotu se děje kromě ohřevu z pouzdra i přeměnou mechanické energie v teplo. Podíl obou zdrojů tepelné energie je závislý na otáčkách, jak je znázorněno na v grafu 2.



A – podíl tepla převedeného pouzdrem šnekového vytlačovacího stroje, B – podíl třecího tepla, C – skutečná teplota hmoty, ϑ_p – teplota pouzdra

Graf 2 Závislost teploty vytlačované hmoty ϑ_p na otáčkách šneku n vytlačovacího stroje [2]

Z toho vyplývá, že při konstantní teplotě pouzdra účinnost tohoto zdroje klesá s narůstajícími otáčkami, a tedy i se zrychleným průchodem hmoty. Tření je při vysokých otáčkách logicky větší a vzrůstá tedy i podíl tepelné energie z něj získané. Součet obou zdrojů tepla udává skutečný průběh teploty hmoty v závislosti na otáčkách šneku.

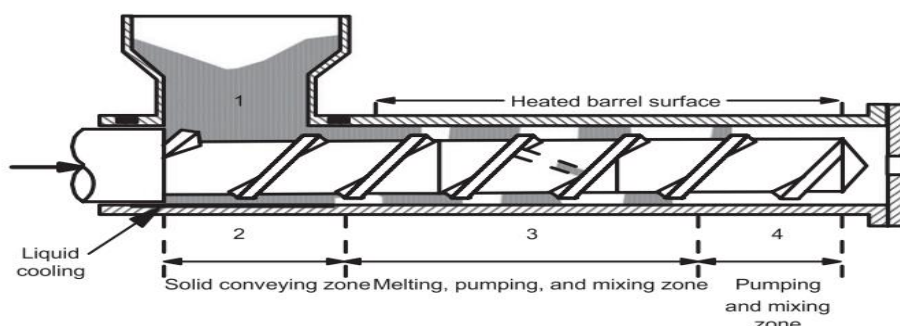
Ohřev vytlačovacích strojů bývá nejčastěji realizován pomocí elektrického vytápění nebo v menší míře také cirkulující kapalinou.

Elektrické vytápění bývá odporové nebo indukční. Výhodou odporového vytápění je možnost dosáhnout prakticky libovolné teploty. Dále pak snadná regulace, malá spotřeba místa, malé náklady na pořízení i na údržbu. Výhodou indukčního vytápění je oproti tomu vznik tepla v pouzdře v bezprostřední blízkosti plastu. Díky tomu je vytápění rovnoměrné a regulace teploty je jednodušší. Stroje udržují danou teplotu s odchylkou maximálně 1°C. Nevýhodami indukčního ohřevu ale jsou větší spotřeba místa stejně jako pořizovací náklady ve srovnání s odporovým. Elektrické topení bývá obvykle kombinováno s chlazením vzduchovými ventilátory. Některé stroje používají k chlazení vstřikování malých dávek vody do kanálků pouzdra. Její odpaření pojme velké množství tepla a chlazení je tak velmi účinné. Takto se zabraňuje přehřívání plastu.

U vytápění cirkulující kapalinou, kterou bývá tlaková voda nebo olej, je výhodou možnost zvolit, zda kapalina bude topit nebo naopak chladit. Vytápění je rovnoměrné a lehce regulovatelné. Nevýhodou jsou však potíže s těsněním a s čerpadly.

Teplota bývá standardně měřena PD a PID regulátory. Tlak v tavenině se měří membránovými tlakoměry, které měří průhyb membrány. Průhyb je tenzometricky sledován a vyhodnocován.

2.4.1.1 Jednošnekové extrudery

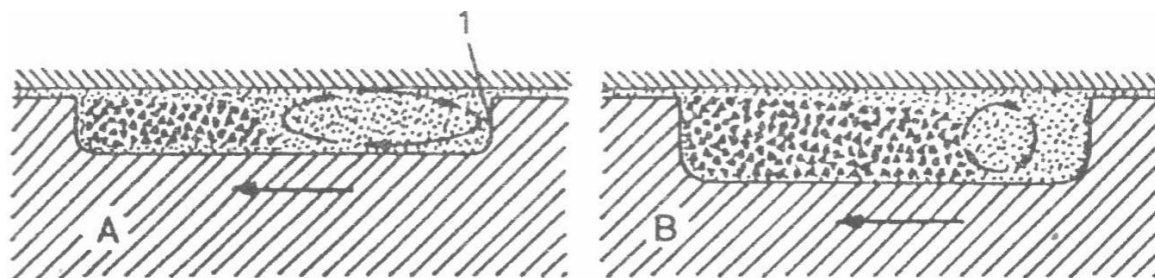


Obr. 35 Jednošnekový vytlačovací stroj [4]

Obvyklé dělení šneku vytlačovacího stroje je na část vstupní, přechodovou a výstupní. U přípravy plastů se rozlišuje zóna dopravy tuhého materiálu, zóna tavení (existence tuhého polymeru a jeho taveniny) a zóna vytlačovací, která obsahuje již pouze taveninu plastu. V případě vytlačování kaučuků se jedná pouze o jednu zónu s taveninou.

V části dopravy tuhého materiálu (vstupní zóna) je plast, který je ve formě granulí nebo prášku přiváděn násypkou do vytlačovacího stroje, zachycován šnekem. Profil šneku je zpočátku zaplněn pouze z části. Polymerní materiál je následně vlivem gravitace a třením o čelo profilu posouván směrem k hlavě vytlačovacího stroje. Postupně je materiál stlačován, zahříván především teplem vzniklým třením, až vznikne tzv. zátka polymeru. Další pohyb této zátky je dán třecími poměry mezi ní, povrchem šneku a vnitřní stěnou válce. Podmínkou účinné dopravy je, aby síly tření zátky o stěnu válce byly větší než třecí síly na povrchu šneku. Toho se docílí teplotou šneku především ve vstupním pásmu šneku. Pokud je podmínka splněna, zátka klouže po povrchu šneku a posouvá se směrem k hlavě. Při pohybu zátky profilem šneku vzrůstá v zátce tlak, zátka se zhutňuje a od povrchu válce se natavuje.

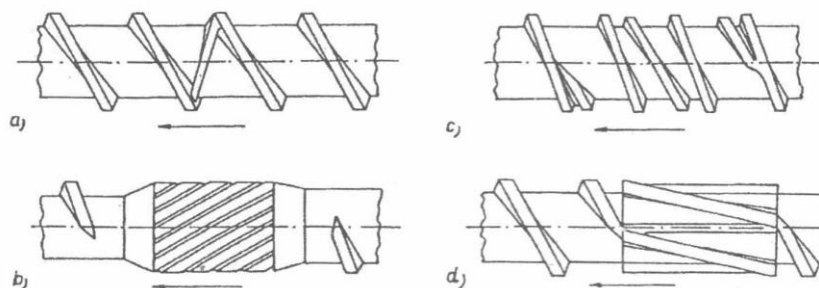
Postupně se velikost natavené vrstvy rozšiřuje, až začne být stírána čelem žebra šneku a polymer vstupuje do zóny tavení. V této přechodové zóně se tuhý polymer převádí na taveninu, a to teplem přiváděným pouzdrem, teplem vzniklým třením a smykovým namáháním zpracovávaného materiálu. Natavená hmota klouže po čele šneku a začíná se hromadit v drážce před přední stranou žebra šneku (viz. Obr 36).



A – mělký profil, B – hluboký profil; 1 – čelo žebra šneku

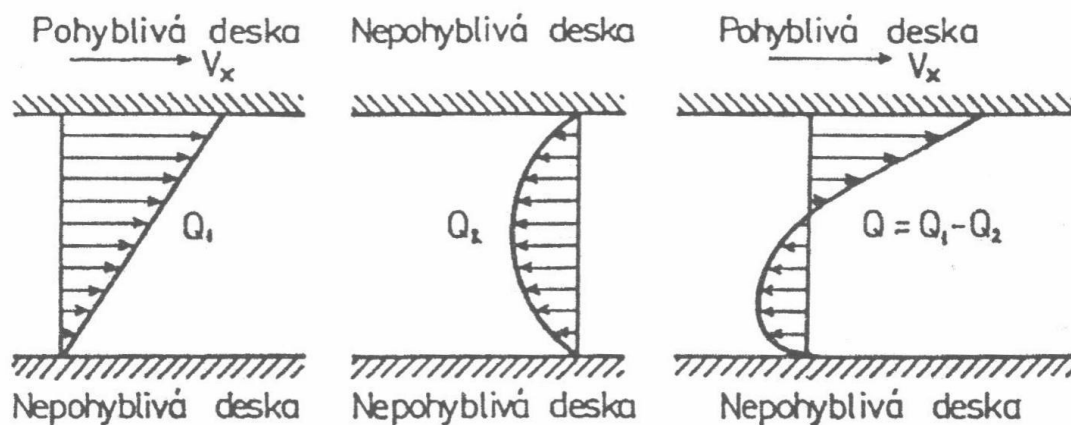
Obr. 36 Tavení polymeru v profilu šneku [2]

Do tohoto kruhového profilu je tak uváděno stále větší množství hmoty, až je granulát nakonec zcela roztavený. Velkým nedostatkem jednošnekových extrudérů je skutečnost, že uvnitř víru v profilu šneku zůstávají trvale částice, které vůbec nepřijdou do styku s rozehrátou stěnou pouzdra a které kromě toho nejsou ani namáhány smykovými silami. Takto se vytváří v drážce provazce nepromíchaného materiálu. Z tohoto důvodu bývají vloženy do tavicí zóny šneku různé hnětací elementy – viz obr. 37.



Obr. 37 Různé typy hnětacích elementů pro jednošnekový vytlačovací stroj [2]

Poslední částí šneku je vytlačovací nebo také výstupní zóna. Je to konečná část šneku a přepravuje již pouze taveninu. Tok taveniny v této zóně je uskutečňován působením sil viskózního tření, které jsou následkem vzájemného pohybu povrchu šneku a pouzdra. Při běžné představě lze dopravní působení ve šneku objasnit dvoudeskovým modelem. Předpokládá se rozvinutí šneku do roviny. Na obr. 38 je pak dobře vidět složený výsledný rychlostní profil. Příčný tok, který vychází z otáčivého pohybu šneku je obvykle tak malý, že se neprojeví a je možné ho zanedbat.

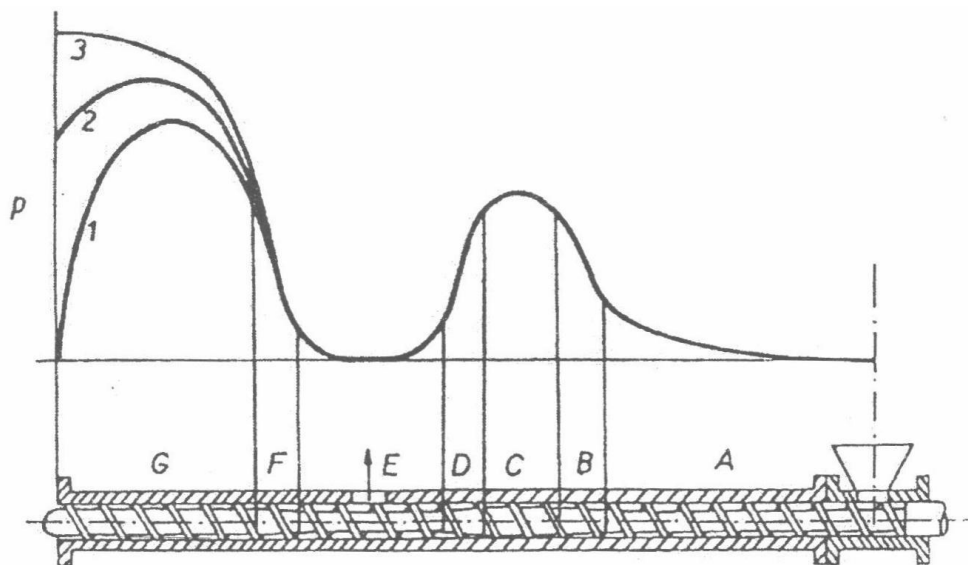


Obr. 38 Rychlostní profil vlečného toku Q_1 , tlakového toku Q_2 a výsledného toku Q u dvoudeskového modelu [2]

MODIFIKACE VYTLAČOVACÍCH STROJŮ

Jednou z možností je *rychloběžný šnekový vytlačovací stroj na plasty*, který pracuje v autogenním režimu. Dosahuje se toho po překročení určité hranice rychlosti otáčení šneku, kdy podíl mechanické energie přeměněné vnitřním třením v teplo, stačí k roztavení materiálu. Tudíž po dosažení provozní teploty je hmota uvnitř extruderu tavena bez vnějšího přívodu tepla. Nevýhodou této možnosti je ale rychlejší opotřebení šneku, pouzdra i ložisek stejně jako velké tepelné namáhání vytlačovaného materiálu.

Druhým příkladem jednošnekového vytlačovacího stroje je použití *odplyňovacího šneku*. To umožňuje zvětšit míchací účinek šnekového vytlačovacího stroje. (obr. 39) V odplyňovací části jsou z horkého plastikovaného materiálu odsávány těkavé podíly. Použití je tedy vhodné hlavně pro výrobu desek, kdy se požaduje materiál bez těkavých podílů, které mohou vytvářet bublinky.



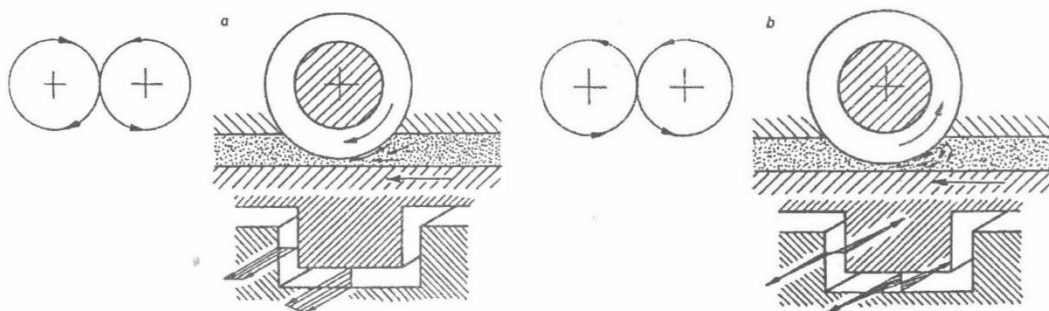
A – vstupní část, B – 1. přechodová část, C – 1. výstupní část, D – uvolnění, E – odplyňovací část, F – 2. přechodová část, G – 2. výstupní část; 1 – otevřené pouzdro, 2,3 – připojené vytlačovací hlavy se vzrůstajícím odporem

Obr. 39 Průběh tlaku ve šnekovém vytlačovacím stroji s odplyňovacím šnekem [2]

2.4.1.2 Dvoušnekové extrudery

Hlavními přednostmi dvoušnekového vytlačovacího stroje v porovnání s jednošnekovým jsou:

- Nucená doprava materiálu dělá vytlačovací výkonost nezávislou na typu polymeru
- Rychlejší a dokonalejší tavení polymeru umožňuje použití strojů s kratšími šneky při dokonalejším míchání
- Šneky jsou samočisticí, což zabraňuje uváznutí materiálu ve stroji.

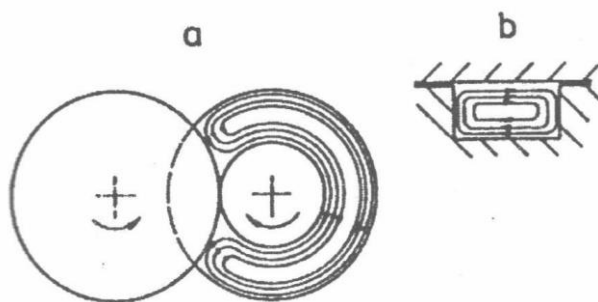


Obr. 40 Princip hnětení plastu v dvoušnekovém vytlačovacím stroji [2]

a) se šneky s opačným smyslem otáčení (protiběžné)

b) se šneky se stejným smyslem otáčení (stejnoběžné)

U dvoušnekových vytlačovacích strojů do sebe šneky obvykle zasahují. Tím při otáčení dochází ke vzniku komor vytvořených profilem jednoho šneku a závitem druhého. Při otáčení šneků se komory posouvají a tím nuceně dopravují materiál k hlavě. Dvoušnekový stroj má navíc oproti jednošnekovému i lepší hnětací vlastnosti. Ty jsou závislé na směru otáčení šneků a na vůli mezi závitem jednoho šneku a profilem druhého. Při otáčení šneků proti sobě nastává menší hnětací účinek než u strojů se stejnoběžnými šneky (obr. 40). Důležitým faktorem hnětení je vůle mezi profilem jednoho šneku a závitem druhého. Pokud je například vůle téměř nulová u šneků, které se otáčejí proti sobě, vzniká proudění, které je znázorněno na obr. 41. Nedochozí k dostatečné výměně hmoty mezi komorami a vzniká tím nebezpečí situace, kdy dochází pouze k malému namáhání.



Obr. 41 Princip hnětení plastu v dvoušnekovém vytlačovacím stroji [2]

- a) šneky s opačným směrem otáčení (protiběžné)
- b) šneky se stejným směrem otáčení (stejnoběžné)

K ohřevu plastu se obvykle využívá vytápění stěnou pouzdra. Vzhledem k menší možnosti toku materiálu profilem šneku v podélném směru jsou ale dvoušnekové vytlačovací stroje citlivější na vstupní změny.

Největším rozdílem mezi stejnoběžnými a protiběžnými šneky je množství potřebných otáček. Stroje se stejným směrem otáčení šneků pracují s trojnásobnými až sedminásobnými otáčkami při stejném průměru šneku než stroje s protichodými šneky. Rozdíl v otáčkách se tím promítne i do nutného většího příkonu motoru, ale zároveň poskytují i výrazně vyšší vytlačovací výkon. Pomaloběžné dvoušnekové stroje s protiběžnými šneky jsou pro svou dobrou dopravní účinnost a pro vytváření vysokého tlaku standardně používány pro vytlačování výrobků z tvrdého PVC (desky, trubky atd.), zatímco stroje se stejným směrem otáčení jsou většinou určeny spíše k přípravě směsí v operacích přípravného zpracování. Mají-li být užity pro vytlačování výrobků, zařazují se buď mezi vytlačovací stroj a hlavu.

Nevýhodou dvoušnekových extruderů oproti jednošnekovým je jejich vyšší cena a větší konstrukční náročnost v oblasti pohonu šneků a hlavně uložení axiálních ložisek.

2.4.2 HLAVY VYTLAČOVACÍCH STROJŮ

Hlavou vytlačovacího stroje nazýváme tu část, v níž získává tavenina tokem kanálem vhodného tvaru finální tvar. Hlava musí být vyrobená takovým způsobem, aby zaručila pravidelný a trvalý tok materiálu. Nesmí v ní tedy existovat žádné mrtvé prostory, ve kterých by se materiál mohl hromadit nebo zastavit a zůstat tak dlouho v kontaktu s vyhřívanou stěnou hlavy. V tomto případě by materiál degradoval nebo by předčasně vulkanizoval.

Zpravidla je mezi zakončení šneku a hlavu vkládán lamač. Lamač je děrovaná deska s otvory o velikosti 3 až 8 mm a jeho úkolem je finální homogenizace plastu vystupujícího ze šneku. Používá se též jako opěra pro čistící síta, díky nimž se materiál zbavuje nečistot a nerozpracovaných příměsí.

Základní dělení vytlačovacích hlav:

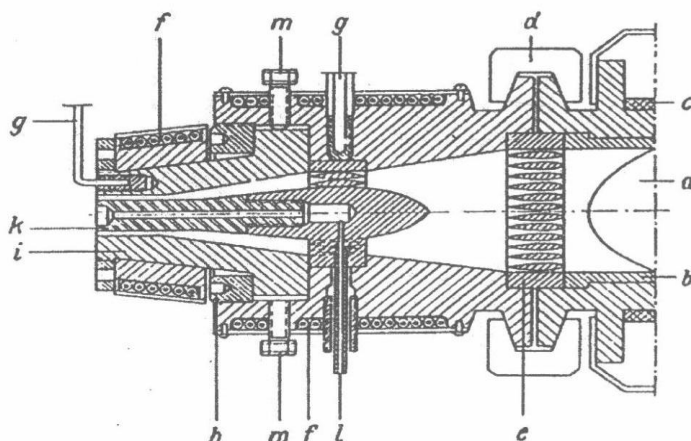
1. hlavy přímé
 - a. s kruhovým symetrickým průřezem, určené pro vytlačování trubek a tyčí
 - b. s jiným, často komplikovaným průřezem pro vytlačování profilů
2. hlavy nepřímé, tzn. hlavy příčné a úhlové, určené pro opláštování a dále také hlavy pro vyfukování fólií, dutých předmětů atd.
3. širokoštěrbinové hlavy, tj. hlavy pro vytlačování desek, fólií apod.
4. speciální hlavy sloužící k vytlačování sítí nebo vícevrstvých produktů

2.4.2.1 Přímé hlavy

Příklad přímé hlavy pro vytlačování trubek je zobrazen na obr. 42. Dle vnějšího a vnitřního průměru trubky jsou voleny vyměnitelné hubice a trn. Pomocí hubice lze posouvat stavěcími šrouby ve směru osy trnu a tím dosáhnout rovnoměrné tloušťky stěny po obvodu trubky. Nevýhodou přímých hlav je vznik slabých míst v oblastech, ve kterých se opět spojuje proud taveniny rozdělený žebry rozdělovače. Tato nevýhoda se dá ale odstranit pomocí konstrukcí, z nichž nejběžnější je spirálový rozdělovač. Hloubka spirálových kanálů je postupně zmenšována a zároveň se naopak zvětšuje mezera mezi hřbetem závitů a vnitřní stěnou hlavy. Díky této úpravě mohou proudy taveniny vytékat z jednotlivých kanálů a postupně se mísit bez vzniku slabých míst.

I když se trubky a tyče počítají v zásadě k profilům, je pojem profil používán hlavně pro geometricky složitější výrobky. Hlavy pro jejich vytlačování bývají kvůli tomu také náročnější na konstrukci. Důležité přitom je, aby hubice i trn byly dostatečně dlouhé a umožnily relaxaci napětí v tavenině. Pro menší výrobu nenáročných profilů se tvar průřezu jednoduše vyfrézuje do jediné desky, která je upnuta do hlavy stroje. Tyto hlavy jsou levné, ale proudění taveniny v nich je nerovnoměrné. V praxi pak nacházejí uplatnění hlavně u vytlačování kaučukových směsí.

Při výpočtu rozměrů hubice musí být uvažováno i narůstání taveniny za hubicí, objemová kontrakce při chlazení a změna rozměru protažením. Proto u tenkostěnných profilů bývá hubice zvětšena o 5 až 10%, zatímco u masivních naopak o 10% zmenšena.



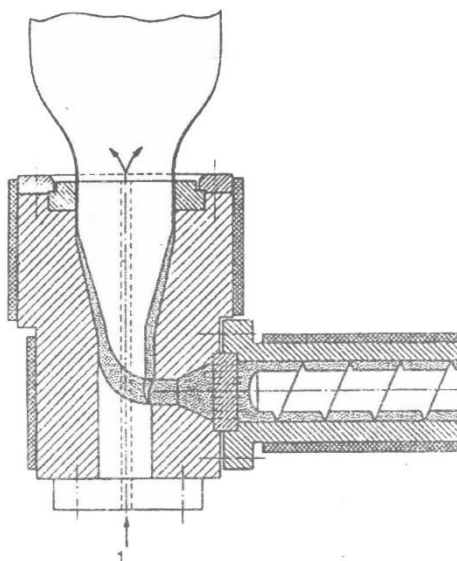
a – zakončení šneku, b – pouzdro, c – vytápění, d – uchycení hlavy objímkou, e – lamač, f – odporové vytápění hlavy, g – termočlánek, h – uchycení hubice, i – hubice, k – dutý trn, l – přívod tlakového vzduchu, m – stavěcí šrouby

Obr. 42 Přímá hlava pro vytlačování trubek [2]

2.4.2.2 Nepřímé hlavy

Nepřímé hlavy jsou určeny hlavně k opláštování vodičů, kabelů nebo profilů. Tyto hlavy mají vrtaný trn, kterým prochází opláštovaný objekt. Nepřímým uspořádáním se vyhneme nutnosti vést jej přes vrtaný šnek. Tyto hlavy mají různý úhel odklonu od osy šnekového extruderu. U příčných hlav je úhel 90°, u šikmých je pak menší (30° až 60°). Čím vyšší je úhel odklonu od osy šnekového vytlačovacího stroje, tím větší jsou i potíže vyvolané nerovnoměrným tokem polymeru vlivem nerovnoměrné délky tokové dráhy.

Příkladem mohou být i hlavy pro vyfukování fólií (obr. 43). Nejdůležitějším faktorem je v tomto případě nejen naprosto konstantní tloušťka, ale také stejná viskozita vytlačované trubky v plastickém stavu. Díky tomu pak může jejím nafouknutím vzniknout kvalitní fólie.



1 – přívod tlakového vzduchu

Obr. 43 Hlava pro vyfukování fólie s radiálním vtokem [2]

2.4.2.3 Další alternativy vytlačovacích hlav

Širokoštěrbinová hlava

- používá se hlavně pro výrobu fólií a desek

Hlava pro vytlačování sítí

- víceotvorová hlava vytlačuje struny půlkruhovými otvory na vnějším okraji trnu i na vnitřním okraji trubice
- trn i hubice se otáčejí proti sobě a při setkání obou otvorů se struny spojí a vzniká síť

Střížná hlava

- rotující částí pouze trn
- časté použití při vytlačování napěněných profilů

Hlavy pro vícevrstvé struktury

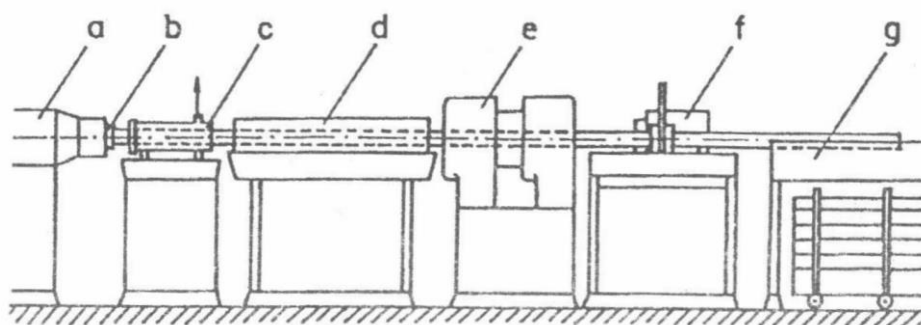
- pro obalové materiály obsahující více vrstev různých polymerů
- dva nebo více vytlačovacích strojů je napojených na jednu vytlačovací hlavu
- každá vrstva výsledné fólie má charakteristické vlastnosti pro její polymer (nízká propustnost kyslíku, mechanické vlastnosti)

Vytlačovací hlavy pro kaučuky

Při konstruování vytlačovacích hlav pro kaučuky platí stejné zásady jako u plastů. Některé hlavy jsou i velmi podobné, jako např. pro vytlačování hadic (=trubek u plastů). U kaučuků je ale třeba přivádět separační prostředek (klouzek) dovnitř hadice, aby před vulkanizací nedocházelo ke slepování.

2.5 TECHNOLOGIE VYTLAČOVÁNÍ TRUBEK POMOCÍ ŠNEKOVÉHO VYTLAČOVACÍHO STROJE

Trubky bývají standardně vytlačovány na lince podobné obr. 44. Linka se skládá ze šnekového vytlačovacího stroje a dále z kalibračního, chladicího, odtahovacího, řezacího a odkládacího zařízení. Obvyklými materiály pro výrobu trubek jsou PVC, PE-HD a PE-LD.



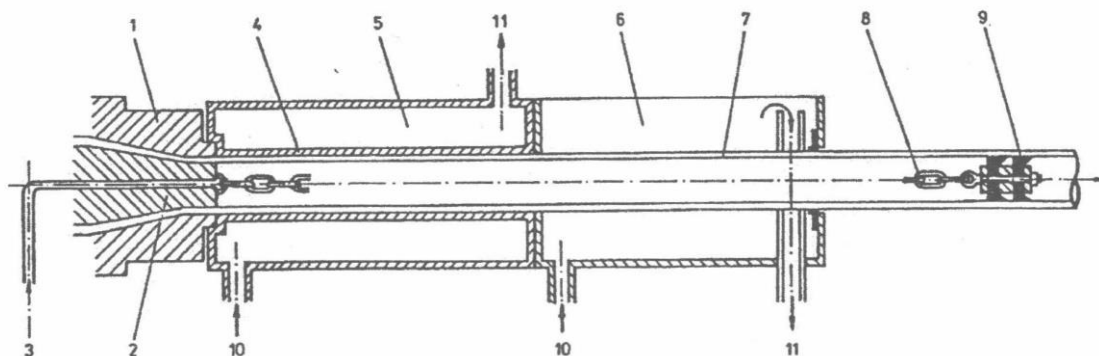
a – vytlačovací stroj, b – vytlačovací hlava, c – kalibrace, d – chladicí lázeň, e – odtah, f – řezání, g – stohovací zařízení

Obr. 44 Linka pro vytlačování trubek [2]

Jednošnekové vytlačovací stroje jsou pro vytlačovací proces užívány častěji. Dvoušnekové stroje jsou v permanenci především pro neměkčený PVC.

Kalibrační zařízení je do procesu zařazeno za účelem ochlazení vytlačované trubky tak, aby získala stabilní tvar o požadovaném rozměru.

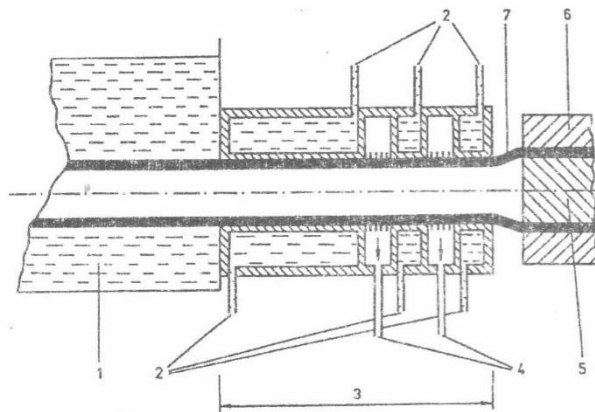
Pro výrobu trubek většího průměru (nad 150 mm) se používá *přetlaková kalibrace* (obr. 45). Do vytlačované trubky je trnem přiváděn vzduch. Uzávěr přívodu vzduchu může být buď zátka nasazená na volném konci trubky nebo vlečná zátka uchycená k trnu kotvicím lankem nebo řetězem. Přetlak vzduchu bývá pro malé trubky větší než pro velké.



1 – hubice, 2 – trn, 3 – přívod stlačeného vzduchu, 4 – kalibrační pouzdro, 5, 6 – chladicí voda, 7 – trubka, 8 – řetěz, 9 – vlečená zátka, 10 – přívod chladicí vody, 11 – odvod chladicí vody

Obr. 45 Přetlaková kalibrace [2]

Z důvodu problémů s uzavíráním trubky začala být používána metoda *vakuové kalibrace* (obr. 46). Ta využívá principu vnějšího podtlaku. Vakuové kalibrační zařízení se skládá z pouzdra rozděleného na tři části. Okrajová část pouzdra slouží k ochlazení vytlačované trubky a střední částí je trubka působením sníženého tlaku přisávána řadou otvorů ke kalibračnímu pouzdru. Přitisknutím na pouzdro se trubka povrchově ochladí a po průchodu poslední částí pouzdra už zachovává konstantní tvar. Vakuová kalibrace je vhodnější kvůli omezenému vnitřnímu přetlaku hlavně pro menší průměr trubek (méně než 150 mm) a také pro trubky se slabší stěnou. Při výrobě trubek bývá často používána i kalibrace v evakuované nádrži s kalibračními clonami. Tím rozumíme vzduchotěsné vodní lázně vybavené sprchovacím zařízením.



1 – chladicí lázeň, 2 – přívod a odvod chladicí vody, 3 – vakuové kalibrační zařízení, 4 – přípoj vakua, 5 – trn, 6 – hubice, 7 – vytlačovaná trubka

Obr. 46 Vakuová kalibrace [2]

Chladicí zařízení navazuje na kalibraci a dokončuje chlazení. Trubka se tak při dalším zpracování již nedeformuje. Trubky procházejí vanou o délce 2 až 6 metrů, kde jsou chlazeny cirkulující vodou. Pro vyšší účinnost chlazení se cirkulující voda nahrazuje tryskami. Přesná délka chladicí vany je závislá na termofyzikálních vlastnostech vytlačovaného materiálu, na teplotě a také na konkrétním provedení chladicí sekce (cirkulace, trysky, apod.).

Odtahovací zařízení slouží k odtažení vytlačené trubky směrem pryč od vytlačovací hlavy. Pro malé a ohebné trubky, kde stačí malá síla, se používá zejména kladkového odtahu. Pro velké síly a nestabilní produkty slouží housenkové odtahovací zařízení, ve kterém produkt odtahují dva nad sebou ležící housenkové pásy s plochými články vyloženými měkkou pryží. U větších průměrů trubek nebo pro trubky s menší tuhostí se používá až 12 housenkových rovnoměrně rozmístěných pásů, aby bylo zaručeno lepší podepření a zachycení trubky. Síla v odtahovacím zařízení musí být dostatečná k překonání tření v kalibračním a chladicím zařízení.

Řezacím zařízením nejčastěji charakterizujeme okružní pilu. Ta se při řezání trubek o velkých průměrech posouvá společně s řezanou trubkou, aby došlo k přesnému kolmému řezu.

Poslední složkou vytlačovací linky je navíjení (u měkkých materiálů) nebo stohování (u tvrdých materiálů) vytlačených trubek.

Vytlačování trubek je stabilní proces, u kterého není třeba dlouhých a náročných kontrol. U velkých trubek se měří většinou pouze tloušťka stěny (ultrazvukem) a délka výsledné trubky. Zbylá měření bývají obvykle pouze informativní a slouží ke správné regulaci a k plynulému chodu procesu.



Obr. 47 Kompletní linka pro vytlačování plastů [14]

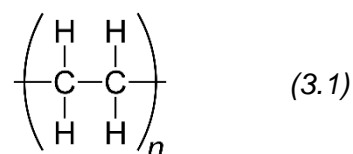
3 NÁVRH VYTLAČOVACÍHO STROJE

V této části přichází na řadu konkrétní návrh vytlačovacího stroje. U šnekového vytlačovacího stroje si zvolím konstantní rychlost vytlačování, podle které následně dopočítám objemový průtok a potřebný tlak pro jeho vytlačování.

Výpočet zjednoduším pouze na fázi vytlačení z vytlačovací hlavy. Děje ve šneku zanedbám a stejně tak zanedbám i následné chlazení.

3.1 VOLBA PLASTU

Z širokého spektra plastů jsem si zvolil polyethylen (PE).



Polyethylen je termoplast, z čehož vyplývá řada jeho vlastností. Zvýšením teploty ho lze uvést z tuhého stavu do stavu plastického. Tato změna je ale vratná. Za normálních podmínek je tento plast bílý a v tenčích vrstvách průhledný.

Jak už název napovídá, vzniká PE polymerací ethylenu. Podle hustoty se nejčastěji dělí na dva základní typy. Vysokohustotní PE-HD (nebo také HDPE, z anglického High Density = vysoká hustota) a nízkohustotní PE-LD (LDPE).

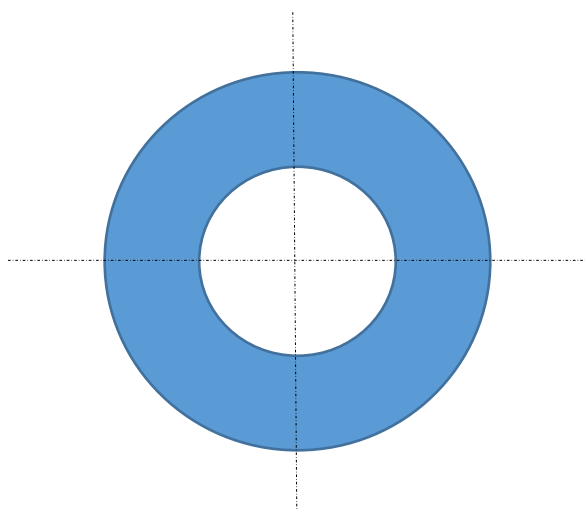
Polyethylen za běžných teplot odolává vodě, neoxidujícím chemikáliím včetně kyselin, zásad a solí, stejně jako polárním rozpouštědlům. PE je odolný vůči nízkým teplotám, křehne při -120°C . Při zahřátí je naopak tvarově stálý do 100°C . Jeho hlavní využití je pro výrobu fólií, trubek, plášťů kabelů nebo kanystrů. Stejně tak se používá i pro spotřební zboží (výrobky pro domácnost, hračky) a je nejrozšířenějším obalovým materiálem.



Obr. 48 Granule polyethylenu [10]

3.2 VOLBA GEOMETRIE

Polyethylen bývá vytlačován nejčastěji ve formě trubek. Proto jsem si i já vybral tento tvar. Přesněji budu navrhovat trubku z PE-HD. Tyto potrubní systémy jsou nejčastěji používány pro rozvody v zemi (rozvody plynu, vody a dalších energetických nebo telekomunikačních linek). Jejich průměr může být od desítek až po stovky milimetrů. Jednotlivé trubky se dají propojovat buď svařováním, nebo mechanickými spojkami. U trubek z tohoto materiálu je předpokládaná životnost zhruba 50 let.



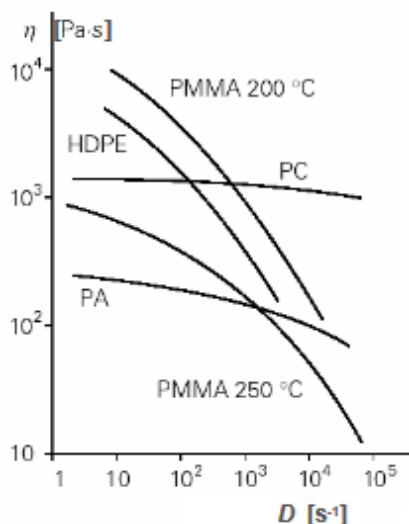
Obr. 49 Řez trubkou



Obr. 50 PE-HD trubky [11]

3.3 TOKOVÉ VLASTNOSTI

Pro modelový výpočet využijí tokové vlastnosti PE. Vzhledem k tomu, že se nejedná o newtonskou kapalinu, ale o kapalinu pseudoplastickou popsanou mocninovým modelem, vycházím ze závislosti viskozity na smykové rychlosti. Newtonův zákon platí totiž pouze u nízkomolekulárních kapalin za izotermických podmínek. U těchto newtonských látek je viskozita nezávislá na smykové rychlosti a je tudíž konstantní. U polymerních tavenin ale viskozita klesá s rostoucí smykovou rychlostí. Zjištění viskozity bývá proto nejčastěji experimentální a znázorňuje se graficky (graf 3). Tento výstup se poté vyhodnocuje ve formě dvojparametrického mocninového modelu s parametry index toku n [1] a koeficient konzistence K [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$]. Pro zjednodušení nebudu vycházet z grafických hodnot, ale využiji již vyhodnocená čísla.



Graf 3 Závislosti viskozity η vybraných polymerů na smykové rychlosti D [12]

Reologická data:

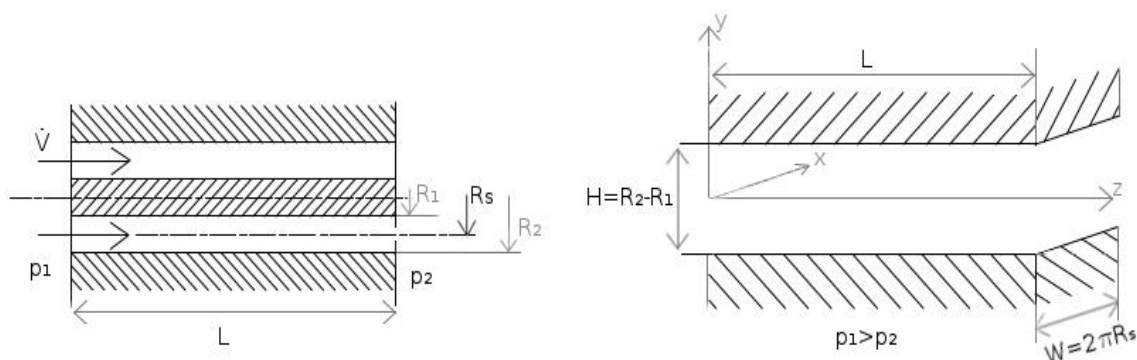
T [°C]	n [-]	k [MPa·s ⁿ]	$\dot{\gamma}$ 1) [s ⁻¹]
140	0,34	0,0456	20 ÷ 1000
160	0,37	0,0338	20 ÷ 1000
180	0,40	0,0253	20 ÷ 1000
200	0,42	0,0192	20 ÷ 1000
220	0,44	0,0137	20 ÷ 1000
240	0,47	0,0093	20 ÷ 1000

Tabulka 2 Reologická data mocninového modelu PE v závislosti na teplotě [13]

3.4 ODVOZENÍ VZTAHŮ

3.4.1 PŘEDPOKLADY

Trubku rozvinu do roviny a získám tím tok PE-HD ve štěrbině (obr. 51). Jedná se tudíž o proudění mezi dvěma rovnoběžnými nepohyblivými deskami. Počátek souřadného systému volím uprostřed štěrbině a osa z tím bude zároveň i osou štěrbině. Díky tomuto zjednodušení postačí počítat pouze s polovinou štěrbině, protože získávám symetrickou plochu. Písmenem H budu značit výšku štěrbině ve směru osy y , písmenem W její šířku ve směru x a písmenem L délku ve směru osy z .



Obr. 51 Schéma toku látky v trubce a její následné rozvinutí do roviny

- $H \ll W, L$
- Proudění je pouze ve směru osy z . $\Rightarrow u_x = u_y = \emptyset$
- Předpokládám ustálené proudění, tj. stacionární proudění, rychlost je tudíž na čase nezávislá (pro konstantní otáčky šneku).

$$\Rightarrow \frac{\partial u_z}{\partial t} = \emptyset$$

- Výpočet budu provádět aproximativním řešením. Podmínka pro newtonské látky je:

$$\kappa = \frac{R_1}{R_2} > 0,5 \quad (3.2)$$

- Při dodržení této podmínky je chyba na průtoku menší než 4%. Ač je tato podmínka pro proudění newtonské látky a nikoliv mocninné, můžeme ji i tak považovat za dostatečný důkaz relativně přesného řešení.

3.4.2 ROVNICE KONTINUITY PRO NESTLAČITELNÉ TEKUTINY

Tato rovnice určuje zachování hmotnosti v pevném kontrolním objemu. Pokud rovnici používáme za předpokladu stacionárního proudění, získáme následující tvar:

$$\nabla \cdot \vec{u} = \emptyset \quad (3.3)$$

Rovnici je možné snadno rozepsat do kartézských souřadnic.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \emptyset \quad (3.4)$$

Z důvodu nulového proudění v osách x a y vypadá výsledný vzorec takto.

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = \emptyset \quad (3.5)$$

3.4.3 CAUCHYHO ROVNICE

Cauchyho rovnicí vyjadřujeme obecnou bilanci hybnosti. Pro pevný kontrolní objem má následující tvar:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (3.6)$$

$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \sim$ časová složka setrvačné síly; $\rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \sim$ konvektivní složka setrvačné síly;

$-\nabla p \sim$ tlakové síly; $\nabla \cdot \vec{\tau} \sim$ vazké síly; $\rho \vec{f} \sim$ vnější objemové síly

Pokud Cauchyho rovnici rozepíšeme do směru proudění (osa z), získáme tento tvar:

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \cdot \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \Delta p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.7)$$

Tato rovnice se ale velice zjednoduší, pokud dosadíme následující zavedené předpoklady.

Jedná se o stacionární proudění.

$$\Rightarrow \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0$$

Proudění pouze ve směru osy z.

$$\Rightarrow u_x = u_y = 0$$

Vycházíme přitom z rovnice kontinuity (3.5).

$$\Rightarrow \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

Na soustavu nepůsobí žádné vnější síly ve směru osy z.

$$\Rightarrow f_z = 0$$

Díky těmto zjednodušením vyjádřím znovu Cauchyho rovnici.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (3.8)$$

3.4.4 KONSTRUKTIVNÍ ROVNICE

Konstruktivní rovnicí rozumíme závislost napětí $\vec{\tau}$ na tenzoru deformace $\vec{\Delta}$. Pro neneutonské látky vypadá takto:

$$\vec{\tau} = 2\eta \vec{\Delta} \quad (3.9)$$

η [Pa · s] je zdánlivá viskozita, která se u neneutonských látek mění s rychlostí deformace. η je funkcí druhého invariantu.

$$\eta = f(\bar{II}) \quad (3.10)$$

\bar{II} je záporný dvojnásobek druhého invariantu II .

$$(\bar{II}) = \vec{\Delta} : \vec{\Delta} \quad (3.11)$$

Přičemž druhý invariant vypadá takto:

$$II = \frac{1}{2} \left(-\vec{\Delta} : \vec{\Delta} \right) \quad (3.12)$$

Obecně je druhý invariant roven:

$$II = \frac{1}{2} \left[\left(\text{tr} \vec{\Delta} \right)^2 - \vec{\Delta} : \vec{\Delta} \right] \quad (3.13)$$

V tomto případě je ale možné zanedbat $\text{tr} \vec{\Delta}$, protože pro nestlačitelné tekutiny je roven \emptyset .

$\vec{\Delta}$ [1/s] je tenzor rychlosti deformace a vyjádřit ho můžeme následujícím vztahem:

$$\vec{\Delta} = \frac{1}{2} [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \quad (3.14)$$

Pokud budeme chtít i tuto rovnici přepsat do složek, budou jednotlivé rovnice vypadat takto:

$$\Delta_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = \emptyset \quad (3.15)$$

$$\Delta_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (3.16)$$

$$\Delta_{zz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \emptyset \quad (3.17)$$

Díky zjednodušení konstruktivní rovnice tedy získáváme tento tvar:

$$\tau_{yz} = 2\eta \Delta_{yz} = 2\eta \frac{1}{2} \frac{\partial u_z}{\partial y} = \eta \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (3.18)$$

Při následném dosazení do Cauchyho rovnice (3.8) získáváme rovnici:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad (3.19)$$

Vzhledem k tomu, že je druhá derivace rovna 0, znamená to, že je první derivace rovna konstantě. Tato derivace lze tedy nahradit totálním diferenciálem.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (3.20)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\Delta p}{L}$$

kde L je délka štěrbinou a Δp je rozdíl tlaků před a za štěrbinou.

V tuto chvíli již můžu dosadit do rovnice (3.19) a dále nahradím parciální derivaci derivací obyčejnou.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{d\tau_{yz}}{dy} \quad (3.21)$$

Pro integraci výraz upravím a integruji.

$$\int d\tau_{yz} = \int \frac{\Delta p}{L} dy \quad (3.22)$$

$$\tau_{yz} = \frac{\Delta p}{L} y + C \quad (3.23)$$

Konstanta C se určí z okrajové podmínky pro štěrbinu, kdy při ($y=0$) je $\frac{\partial u_z}{\partial y} = 0$, protože $u_z = u_{zmax}$ je konstanta. Ze vztahu (3.18) je $\tau_{yz} = 0$, a tudíž je konstanta $C = 0$

$$\tau_{yz} = \frac{\Delta p}{L} y \quad (3.24)$$

3.4.5 ODVOZENÍ RYCHLOSTNÍHO PROFILU A PRŮTOKU VE ŠTĚRBINĚ PRO MOCNINNÉ LÁTKY

Pro zdánlivou viskozitu u čistě viskózních látek platí následující vztah:

$$\eta = K \left| \sqrt{2\dot{\gamma}} \right|^{n-1} = K \left| \sqrt{2(\Delta_{yz}\Delta_{zy} + \Delta_{zy}\Delta_{yz})} \right|^{n-1} \quad (3.25)$$

Z důvodu symetrie tenzoru $\vec{\Delta}$ se $\Delta_{yz} = \Delta_{zy}$, výraz upravím.

$$\eta = K \left| \sqrt{4\Delta_{yz}^2} \right|^{n-1} = K \left| \sqrt{4 \left(\frac{1}{2} \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2} \right|^{n-1} \quad (3.26)$$

$$\eta = K \left| \frac{\partial u_z}{\partial y} \right|^{n-1} \quad (3.27)$$

Tento vztah (3.27) a tenzor rychlosti deformace z (3.16) dosadím do vztahu (3.28).

$$\tau_{yz} = 2\eta\Delta_{yz} = 2K \left| \frac{\partial u_z}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{1}{2} \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (3.28)$$

Po úpravě dosadím za τ_{yz} z (3.24).

$$\frac{\Delta p}{L} y = K \left| \frac{\partial u_z}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (3.29)$$

S rostoucí hodnotou y se přibližujeme ke stěně, na ní už je pak rychlost nulová. Proto derivace bude rovna záporné hodnotě.

$$\left| \frac{\partial u_z}{\partial y} \right| = - \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (3.30)$$

Po odstranění absolutní hodnoty z rovnice (3.28) získám tento vztah:

$$\frac{\Delta p}{L} y = K \left(- \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^1 \quad (3.31)$$

Po vynásobení obou stran (-1) sečteme indexy a získáme rovnici:

$$- \frac{\Delta p}{L} y = K \left(- \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^{n-1+1} = K \left(- \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^n \quad (3.32)$$

Rovnici si připravím na integraci vydělením K a následným umocněním $\frac{1}{n}$. Poté následuje separace proměnných a integrace.

$$\left(-\frac{\Delta p}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} y^{\frac{1}{n}} = \left(-\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)^1 \quad (3.33)$$

$$-\frac{\partial u_z}{\partial y} = \left(-\frac{\Delta p}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} y^{\frac{1}{n}} \quad (3.34)$$

$$\int -\partial u_z = \int \left(-\frac{\Delta p}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} y^{\frac{1}{n}} \partial y \quad (3.35)$$

$$u_z = -\left(-\frac{\Delta p}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{y^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1} + C \quad (3.36)$$

Z okrajové podmínky nulové rychlosti tečení na stěně vypočítám konstantu C .

$$y = \pm \frac{H}{2} \rightarrow u_z = 0$$

Pro $+\frac{H}{2}$ dosadím:

$$u_z = -\left(-\frac{\Delta p}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+1} \frac{n}{1+n} + C = 0 \quad (3.37)$$

$$C = \left(-\frac{\Delta p}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+1} \frac{n}{1+n} \quad (3.38)$$

Za Δp dosadím rozdíl krajních tlaků $p_2 - p_1$. Vzhledem k tomu, že na vstupu je tlak vyšší než na výstupu, bude tato hodnota záporná. Z tohoto důvodu bude tlaková ztráta $\Delta p_z = -\Delta p$.

Pokud tedy dosadím konstantu do vztahu pro rychlostní profil, získám tuto rovnici:

$$u_z = \left(\frac{\Delta p_z}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1+n}{n}} - y^{\frac{1+n}{n}} \right] \quad (3.39)$$

Pro určení maximální rychlosti stačí úvaha uvažovat, že na stěnách je rychlost nulová. Z toho vyplývá, že největší rychlost bude uprostřed a y se tedy rovná nule.

$$u_{zmax} = \left(\frac{\Delta p_z}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+n} \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1+n}{n}} \quad (3.40)$$

Pro vyjádření objemového průtoku je nutné rovnici u_z vynásobit šířkou (rozvinutým obvodem) a integrovat podle souřadnice y . Tím dostáváme tuto rovnici:

$$\dot{V} = 2W \int_0^{\frac{H}{2}} u_z dy \quad (3.41)$$

Nyní už stačí pouze dosadit za u_z z rovnice (3.39).

$$\dot{V} = 2W \int_0^{\frac{H}{2}} \left\{ \left(\frac{\Delta p_z}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1+n}{n}} - y^{\frac{1+n}{n}} \right] \right\} dy \quad (3.42)$$

Po integraci pak dostávám výsledný vztah pro objemový průtok štěrbinou.

$$\dot{V} = 2W \left(\frac{\Delta p_z}{LK}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+2n} \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1+2n}{n}} \quad (3.43)$$

Z tohoto vztahu je tedy patrné, že objemový průtok závisí na materiálových vlastnostech, rozměrech štěrbin a tlakové ztrátě.

3.5 DOSAZENÍ KONKRÉTNÍCH HODNOT

Pro vytlačování jsem si vybral trubku Tr 20x3, která bude zhotovena z vysokohustotního polyethylenu. Pro výpočet je třeba nejdřív určit výchozí hodnoty.

Standardní teplota pro vytlačování PE-HD je zhruba 180°C, při kterých PE-HD nabývá těchto hodnot (Tabulka 3):

	ρ [kg/m ³]	n [-]	K [Pa·s ⁿ]
T [°C]	801	0,40	$2,53 \cdot 10^4$

Tabulka 3 Vybrané hodnoty pro PE o teplotě $T=180^\circ\text{C}$ [13]

Rozměry Tr 20x3 ale nemůžu brát jako konečné. Jak jsem již zmínil v kapitole o přímých hlavách, dochází po vytlačení ke smrštění. Proto je nutné zvětšit vnější průměr o pět až deset procent. Spolu s ním se změní i vnitřní průměr a vytlačovací rozměry tedy budou 21x3. Pro délku hlavy použiji vztah $L \sim 1,5 \cdot D$. Zbývá tedy už jen zvolit požadovanou rychlost vytlačování. Tu jsem si stanovil na 50 metrů za hodinu.

3.5.1 VSTUPNÍ HODNOTY:

$$D_1 = 15\text{mm} \Rightarrow R_1 = 7,5\text{mm}$$

$$D_2 = 21\text{mm} \Rightarrow R_2 = 10,5\text{mm}$$

$$L = 30\text{mm}$$

$$\rho = 801\text{kg/m}^3$$

$$n = 0,40$$

$$K = 2,53 \cdot 10^4 \text{Pa} \cdot \text{s}^n$$

$$\kappa = \frac{7,5}{10,5} = 0,714$$

Předpoklad je tedy splněn. Nyní už tedy k samotnému výpočtu.

$$\dot{V} = \bar{u} \cdot \pi (R_2^2 - R_1^2) \quad (3.44)$$

$$\dot{V} = \frac{50}{60 \cdot 60} \cdot \pi \cdot (0,0105^2 - 0,0075^2)$$

$$\dot{V} = 2,356 \times 10^{-6} \text{m}^3 \text{s}^{-1} = 8,482 \times 10^{-3} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$$

Pro výpočet šířky štěrbiny použiji střední průměr R_S .

$$R_S = \frac{R_1 + R_2}{2} = \frac{0,00705 + 0,0105}{2} = 0,008775 \text{m} \quad (3.45)$$

$$W = 2\pi R_S = 2\pi \cdot 0,008775 = 0,0551 \text{m} \quad (3.46)$$

Nyní již dosadím vypočítané hodnoty do (3.43).

$$\dot{V} = 2W \left(\frac{\Delta p_z}{LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+2n} \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1+2n}{n}}$$

Z této rovnice pak vyjádřím potřebný tlak.

$$\Delta p_z = \left(\frac{\dot{V}}{2 \cdot W \cdot \left(\frac{n}{1+2n} \right) \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1+2n}{n}}} \right)^n \cdot KL$$

$$\Delta p_z = \left(\frac{2,356 \times 10^{-6}}{2 \cdot 0,0551 \cdot \left(\frac{0,40}{1+2 \cdot 0,40} \right) \cdot \left(\frac{0,003}{2} \right)^{\frac{1+2 \cdot 0,40}{0,40}}} \right)^{0,40} \cdot 2,53 \times 10^4 \cdot 0,03$$

$$\Delta p_z = 2\,272\,793,568 \text{ Pa} = 2,3 \text{ MPa}$$

Pro návrh konkrétního vytlačovacího stroje je ale nutné připočítat, z důvodu nepřesností při odhadu geometrie vytlačovací hlavy, 50% k vypočtenému tlaku. Výsledný tlak na výstupu vytlačovací hlavy tedy bude 3,41 MPa.

Na vytlačování trubky Tr 20x3 rychlostí 50 metrů za hodinu bude nutné dohledat extrudér s výstupním tlakem minimálně $\Delta p_z = 3,41 \text{ MPa}$ a s objemovým průtokem $\dot{V} = 8,482 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

ZÁVĚR

- Provedl jsem porovnání jednotlivých metod zpracování plastů a bioplastů. Následně jsem si vybral proces vytlačování.
- Pro vytlačování jsem vymezil základní pojmy a dále podrobněji rozebral jednotlivé části vytlačovacích strojů a jejich funkce.
- Ve třetí části jsem si následně vybral vysokohustotní polyethylen a z něj jsem se rozhodl vyrábět Tr 20x3 rychlostí 50 metrů za hodinu.
- Nejprve jsem si tedy trubku rozvinul do roviny a odvodil jsem vztahy pro výpočet objemového průtoku a tlaku potřebného na výstupu z vytlačovací hlavy.
- Dosadil jsem konkrétní hodnoty do odvozených vztahů a dopočítal jsem požadované hodnoty.
- Vytlačovací stroj odpovídající mnou vybraným vstupním parametrům tak musí mít objemový průtok $\dot{V} = 8,482 \times 10^{-3} m^3 h^{-1}$ a minimální tlak na výstupu z vytlačovací hlavy $\Delta p_z = 3,41 MPa$.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [2] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. ISBN 80-7080-367-3.
- [3] EBNESAJJAD, Sina. *Handbook of biopolymers and biodegradable plastics: properties, processing and applications*. Waltham, MA: Elsevier/William Andrew, 2013. PDL handbook series. ISBN 1455728349.
- [4] ULRICH, Henri. *Introduction to industrial polymers*. New York: Distributed in the United States of America by Macmillan Pub. Co., c1982. ISBN 0195207424.
- [5] BAIRD, Donald G. a Dimitris I. COLLIAS. *Polymer processing: principles and design*. Second edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. ISBN 9780470930588.
- [6] HAN, Chang Dae. *Rheology and processing of polymeric materials*. New York: Oxford University Press, 2007. ISBN 0195187830.
- [7] PROKOPOVÁ, Irena: *Makromolekulární chemie* [online]. Version 1.0. Praha : VŠCHT Praha, 2007 [cit. 2016-08-02]. P. 016. Available from www: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/016.html>. ISBN 978-80-7080-662-3
- [8] LENFELD, Petr. Katedra tváření kovů a plastů, FS, TU v Liberci – Skripta [online]. Dostupné na www: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.
- [9] How a Hammer Mill Works. [Http://web.hammermills.com](http://web.hammermills.com) [online]. New York: Cassie Brown, 2012 [cit. 2016-08-03]. Dostupné z: <http://web.hammermills.com/blog/bid/77964/Size-Reduction-101-How-a-Hammer-Mill-Works>
- [10] Lluís tgn. Sample of granulated polyethylene [fotografie]. Polyethylene [online]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12749082>. Formát: 3376x2728.
- [11] Tlakové potrubí HDPE80. *Elmo-plast a.s.* [online]. Alojzov: Elmo-plast a.s., 2014 [cit. 2016-08-05]. Dostupné z: <http://elmoplast.cz/polyetylen/tlakove-potrubipe80/>

[12] BĚHÁLEK, Luboš. Katedra strojírenské technologie, FS, TU v Liberci – Skripta [online]. Dostupné na www:

<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>

[13] ŠESTÁK, Jiří, Jaromír BUKOVSKÝ a Milan HOUŠKA. *Tepelné pochody: transportní a termodynamická data*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02934-4.

[14] XINRONG TECHNOLOGY. Extrusion line 3 [fotografie]. Plastic Profile Extrusion Line [online]. Dostupné z: <http://www.xinrongpm.com/product/plastic-profile-extrusion-line.html>

[15] Statické mísiče [online]. Krnov: Flowservice s.r.o., 2016 [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.flowservice.cz/cerpadla/staticke-misice-flowmix-serie-s/>

[16] Planetary Roller Extruder/Plastic Extruder [online]. Beijing: Beijing Huatengzhengcheng Industry and Trade Co., Ltd., 2016 [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://btrust.en.made-in-china.com/product/USfxzhFcbbWP/China-Planetary-Roller-Extruder-Plastic-Extruder.html>

SEZNAM NEJČASTĚJI POUŽÍVANÝCH SYMBOLŮ

C	integrační konstanta	
\vec{f}	vektor objemových sil působících na jednotku hmotnosti	$[m/s^2]$
H	výška štěrbiny	$[m]$
K	koeficient konzistence	$[Pa \cdot s^n]$
L	délka štěrbiny	$[m]$
n	index toku	$[1]$
p	tlak	$[Pa]$
Δp_z	tlaková ztráta	$[Pa]$
t	čas	$[s]$
T	teplota	$[^\circ C; K]$
\vec{u}	rychlost	$[m/s]$
V	objem	$[m^3]$
\dot{V}	objemový průtok	$[m^3/s]$
W	šířka štěrbiny	$[m]$
PE	polyethylen	
$PE-HD$	vysokohustotní polyethylen	
$PE-LD$	nízkohustotní polyethylen	
PET	polyethylentereftalát	
PP	polypropylen	
PS	polystyren	
PC	polykarbonát	
PVC	polyvinylchlorid	
$\vec{\Delta}$	tenzor rychlosti deformace	$[1/s]$
$\vec{\delta}$	jednotkový symetrický tenzor	$[1]$
η	zdánlivá viskozita	$[Pa \cdot s]$
ρ	hustota	$[kg/m^3]$
$\vec{\tau}$	celková dynamická napětí	$[Pa]$
\vec{II}	záporný dvojnásobek druhého invariantu tenzoru rychlosti deformace	$[1/s^2]$
∇	Hamiltonův operátor nabla	$[1/m]$

Dolní indexy

x	do směru x
y	do směru y
z	do směru z

Symbols nad písmeny

\rightarrow	vektor
\Rightarrow	tenzor

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip vysokotlakého přímého lisování [1]	11
Obr. 2 Klasifikace čtyřválců na typy I, L, F a Z [1]	12
Obr. 3 Linka pro válcování fólií z měkčeného PVC [8]	12
Obr. 4 Jednošnekový vytlačovací stroj [8].....	13
Obr. 5 Linka na výrobu trubek z PVC [8].....	13
Obr. 6 Vstřikovací cyklus [8].....	14
Obr. 7 Princip vstřikovacího vyfukování s přerušovaným procesem [8]	15
Obr. 8 Znárodnění pozitivního (vlevo) a negativního (vpravo) vakuového tvarování [1]	15
Obr. 9 Schéma vytlačovacího šnekového stroje [1]	16
Obr. 10 Vytlačovací stroje v praxi [14].....	17
Obr. 11 Schéma vytlačovacího procesu.....	17
Obr. 12 Schematické znárodnění distribučního a dispergačního míchání [2].....	18
Obr. 13 Příklady míchadel pro lopatkový (a) a turbínový míchač (b) [2].....	19
Obr. 14 Lopatkový míchač [2]	19
Obr. 15 Fluidační míchač [8]	19
Obr. 16 Statický směšovač [15].....	20
Obr. 17 Bubnový mísič [8]	21
Obr. 18 Dvouramenný mísič [2].....	21
Obr. 19 Různé typy míchadel a hnětadel [2]	21
Obr. 20 Tlakové poměry mezi válci vzhledem k ose středu štěrbiny [2].....	22
Obr. 21 Tlakový hnětič [2]	23
Obr. 22 Šnekový vytlačovací stroj s planetovými válci [16]	24
Obr. 23 KO-hnětač [2]	25
Obr. 24 Princip působení hnětacích složek trojúhelníkových (nahore) a oválných (dole) [2].....	25
Obr. 25 Schéma dvoušnekového hnětacího stroje s hnětacími vložkami typu ZSK [2]	26
Obr. 26 Pásový granulátor [8]	27
Obr. 27 Granulace za studena [8]	28
Obr. 28 Granulace za horka [8].....	28
Obr. 29 Kladivový mlýn [9]	29
Obr. 30 Nožový mlýn [8].....	30
Obr. 31 Talířový nárazový mlýn [8]	30
Obr. 32 Pístový vytlačovací stroj [2].....	31
Obr. 33 Tříčtvrteční řez jednošnekovým vytlačovacím strojem [8]	32
Obr. 34 Typy šneků [2].....	33
Obr. 35 Jednošnekový vytlačovací stroj [4].....	36
Obr. 36 Tavení polymeru v profilu šneku [2]	37
Obr. 37 Různé typy hnětacích elementů pro jednošnekový vytlačovací stroj [2]	38
Obr. 38 Rychlostní profil vlečného toku Q_1 , tlakového toku Q_2 a výsledného toku Q u dvoudeskového modelu [2].....	38
Obr. 39 Průběh tlaku ve šnekovém vytlačovacím stroji s odplyňovacím šnekem [2].....	39
Obr. 40 Princip hnětení plastu v dvoušnekovém vytlačovacím stroji [2].....	40
Obr. 41 Princip hnětení plastu v dvoušnekovém vytlačovacím stroji [2].....	41
Obr. 42 Přímá hlava pro vytlačování trubek [2]	43
Obr. 43 Hlava pro vyfukování fólie s radiálním vtokem [2]	44
Obr. 44 Linka pro vytlačování trubek [2].....	45

Obr. 45 Přetlaková kalibrace [2]	46
Obr. 46 Vakuová kalibrace [2]	47
Obr. 47 Kompletní linka pro vytlačování plastů [14]	48
Obr. 48 Granule polyethylenu [10]	49
Obr. 49 Řez trubkou	50
Obr. 50 PE-HD trubky [11]	50
Obr. 51 Schéma toku látky v trubce a její následné rozvinutí do roviny	52

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost tlaku mezi válci P na šířce štěrbin h [2]	22
Graf 2 Závislost teploty vytlačované hmoty ϑ_p na otáčkách šneku n vytlačovacího stroje [2]	35
Graf 3 Závislosti viskozity η vybraných polymerů na smykové rychlosti D [12]	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]	9
Tabulka 2 Reologická data mocninového modelu PE v závislosti na teplotě [13]	51
Tabulka 3 Vybrané hodnoty pro PE o teplotě $T=180^\circ\text{C}$ [13]	60