

Návrh vytlačovací hlavy

Bc. Petr Klajn

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr KLAJN**

Osobní číslo: **T10374**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Návrh vytlačovací hlavy**

Zásady pro vypracování:

Teoretická studie procesu vytlačování

Návrh a konstrukce vytlačovací hlavy

Zhodnocení a kontrola navržené vytlačovací hlavy pomocí programu Virtual extrusion laboratory

Závěr

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] VLČEK, Jiří; MAŇAS, Miroslav. Aplikovaná reologie. Vyd. 1. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001. 144 s. ISBN 8073180391

[2] MICHAELI, Walter. Extrusion dies for plastics and rubber : design and engineering computations. Munchen : Hanser, 1992. 338 s. ISBN 3446161902

[3] MAŇAS, Miroslav; STANĚK, Michal; MAŇAS, David. Výrobní stroje a zařízení I. Vyd. 1. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. 264 s. ISBN 978-80-7318-596-1

[4] RAUWENDAAL, Chris. Polymer Extrusion. 4th ed. Munich : Hanser, 2001. 777 s. ISBN 1569903212

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

13. února 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenjka Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10. 5. 2012

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je tvorba soustavy tokových analýz za účelem ověření rozsahu funkčnosti zadané široko-štěrbinové vytlačovací hlavy, která je vyrobena na ústavu Výrobního inženýrství a slouží k výukovým účelům. Tato práce poukazuje na důležitost tvorby tokových simulací při konstrukčním návrhu vytlačovacích hlav. Využívaný software pro tvorbu tokových simulací je program Virtual Extrusion Laboratory. Při hodnocení zadané vytlačovací hlavy z hlediska různých parametrů byly zjišťovány dílčí nedostatky a následně byly vytvořeny vhodné konstrukční návrhy, které z hlediska kontrolovaných parametrů vyhovují. Simulace byly prováděny ve 2D modulu Flat die a ve 3D-FEM modulu. Výsledky byly mezi sebou porovnány a v závěru je provedeno jejich celkové zhodnocení.

Klíčová slova: vytlačovací hlava, simulace, Virtual Extrusion Laboratory

ABSTRACT

The aim of this thesis is the creation of a flow analysis system to verify the functionality of the specified range and flat extrusion die. This die has been produced in laboratories of the Department of Production Engineering and it is used for educational purposes. Diploma work indicated the importance of the flow simulation in design of extrusion dies. Virtual Extrusion Laboratory software has been used for flow simulation of design of assigned extrusion die. After that the new extrusion die corresponding with results of analysis has been designed. 2D and 3D results has been compared each other and evaluated.

Keywords: extrusion die, flow simulation, Virtual Extrusion Laboratory

Zde bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Doc. Miroslavu Maňasovi za věcné rady, ochotu, čas a pomoc při vypracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Dr. Švábíkovi, Doc. Vlčkovi a celé firmě Compuplast za poskytnutí licence a věcných rad při tvorbě v programu Virtual Extrusion Laboratory.

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

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 VYTLAČOVÁNÍ POLYMERŮ.....	13
1.1 PÍSTOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE.....	13
1.2 DISKOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE.....	14
1.3 ŠNEKOVÉ VYTLAČOVACÍ STROJE	16
1.3.1 Vstupní pásmo.....	18
1.3.2 Přechodové pásmo.....	18
1.3.3 Výstupní pásmo.....	19
1.3.4 Vytlačovací šneky	21
1.3.5 Druhy konstrukce vytlačovacích šneků.....	22
2 VYTLAČOVANÉ MATERIÁLY A JEJICH REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ.....	24
2.1 REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ.....	25
2.1.1 Viskozita	25
2.1.2 ITT- index toku taveniny.....	28
2.1.3 Normálová napětí	30
2.1.4 Elongační viskozita	31
2.1.5 Relaxace napětí	31
2.2 HLAVNÍ KOMERČNÍ TYPY VYTLAČOVANÝCH MATERIÁLŮ	32
2.2.1 Polyetylen o vysoké hustotě (Vysoko-hustotní polyetylen)	32
2.2.2 Polyetylen o nízké hustotě (nízko-hustotní polyetylen)	33
2.2.3 Polypropylen	33
2.2.4 Polyvinylchlorid	34
2.2.5 Polystyren	34
2.2.6 Polyetylentereftalát.....	35
2.2.7 Akrylonitril-butadien-styren.....	35
2.2.8 Další běžně využívané materiály.....	36
2.3 NEGATIVNÍ JEVI PŘI VYTLAČOVÁNÍ	37
2.3.1 Degradace materiálu.....	37
2.3.2 Narůstání profilu	38
2.3.3 Shark skin.....	40
2.3.4 Die drool.....	40
2.3.5 Nestejnorodost vrstev	41
2.3.6 Nestability na rozhraní	41
3 VYTLAČOVACÍ HLAVY	43

3.1	DESIGNERSKÉ POŽADAVKY NA VYTLAČOVACÍ HLAVY:.....	43
3.2	ROZDĚLENÍ VYTLAČOVACÍCH HLAV	43
3.3	PLOCHÁ VYTLAČOVACÍ HLAVA	46
3.4	PLOCHÁ VYTLAČOVACÍ HLAVA NA PROFILY	48
3.5	KRUHOVÁ VYTLAČOVACÍ HLAVA	48
3.5.1	Hlava s žebry	49
3.5.2	Ze strany plněná hlava.....	50
3.5.3	Hlava se spirálovým trnem.....	51
4	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST	54
5	KONTROLOVANÝ TYP VYTLAČOVACÍ HLAVY	55
5.1	ŠIROKO-ŠTĚRBINOVÁ VYTLAČOVACÍ HLAVA	55
6	ANALÝZA NÁVRHU.....	57
6.1	ANALÝZA VYROBENÉ ŠIROKO-ŠTĚRBINOVÉ HLAVY V MODULU FLAT DIE	57
6.1.1	Tvorba tokové geometrie – Die geometry	57
6.1.2	Volba materiálu a procesních podmínek – Project data	60
6.1.3	Výsledky zadané vytlačovací hlavy.....	62
6.1.4	Zhodnocení výsledků	62
6.1.5	Závěr.....	64
6.2	OPTIMALIZACE ŠIROKO-ŠTĚRBINOVÉ HLAVY V MODULU FLAT DIE	65
6.2.1	Závěr.....	67
6.3	REGULACE ŠÍŘKY VÝSTUPNÍ ŠTĚRBINY VYROBENÉ VYTLAČOVACÍ HLAVY V MODULU FLAT DIE	68
6.3.1	Zhodnocení použitelnosti hlavy pro různé tloušťky vytlačovaného produktu	70
6.4	REGULACE ŠÍŘKY VÝSTUPNÍ ŠTĚRBINY OPTIMALIZOVANÉ VYTLAČOVACÍ HLAVY V MODULU FLAT DIE	71
6.4.1	Vytlačovací hlava s regulací výstupní štěrbiny od 1 do 3 mm	72
6.4.2	Zhodnocení výsledků hlavy při vytlačování produktu o tloušťce 1mm	72
6.4.3	Závěr.....	75
6.4.4	Vytlačovací hlava s regulací výstupní štěrbiny od 4 do 7 mm	75
6.4.5	Zhodnocení výsledků hlavy při vytlačování produktu o tloušťce 4mm	76
6.4.6	Závěr.....	79
6.5	ANALÝZA VYTLAČOVACÍCH HLAV PŘI POUŽITÍ RŮZNÝCH MATERIÁLŮ V MODULU FLAT DIE.....	79
6.5.1	Změna materiálu pro zadanou vytlačovací hlavu.....	79
6.5.2	Závěr.....	81
6.6	ANALÝZA VYROBENÉ ŠIROKO-ŠTĚRBINOVÉ HLAVY V MODULU 3D-FEM.....	81
6.6.1	Vytvoření tokové geometrie	81
6.6.2	Importování hlavy do VEL, volba procesních podmínek.....	84
6.6.3	Výsledky zadané vytlačovací hlavy.....	85
6.6.4	Zhodnocení výsledků	85

6.6.5	Závěr.....	90
6.7	ANALÝZA OPTIMALIZOVANÉ ŠIROKO-ŠTĚRBINOVÉ HLAVY V MODULU 3D-FEM.....	90
6.7.1	Zhodnocení výsledků	92
6.7.2	Závěr.....	96
ZÁVĚR		97
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		99
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		101
SEZNAM OBRÁZKŮ		103
SEZNAM TABULEK.....		107
SEZNAM PŘÍLOH.....		108

ÚVOD

Vytlačování polymerních materiálů je dodnes z hlediska zpracovávaného množství polymerů dominantní technologií plastikářského průmyslu. Vždyť každý kilogram vyrobeného polymeru projde alespoň jedenkrát během své “životnosti“ vytačovací stroj. Touto technologií lze vyrábět široká škála výrobků a polotovarů, nejčastěji ve tvaru desek, fólií, trubek, či jiných profilových tvarů.

Vytlačování se během svého působení v plastikářském průmyslu neustále vyvíjí. Vývoj však současně přináší řadu problémů, které je nutné pro požadovanou kvalitu a jakost výrobků řešit. Při řešení těchto problémů se využívá různých metod, včetně virtuálních simulací, které vedou k optimalizaci procesu.

Velmi důležitou částí ve vytačovacím procesu zaujímají vytačovací hlavy. Vytačovací hlavy dávají tvaru výrobku konečný tvar a rozměry, ovlivňují však i jakost povrchu a vzhled. Při navrhování vytačovacích hlav je nutné znát mnoho faktorů (tokové vlastnosti, procesní podmínky atd.), které mohou ovlivnit funkci hlav. Návrh vytačovací hlavy je tedy podmíněn mnoha informacemi nutnými pro její správnou funkci. V současné době se konstrukční návrh hlavy v příslušném programu neobejde bez jejího virtuálního funkčního ověření. Tímto postupem předcházíme problémům a nepříznivým jevům, které by vznikaly ve výrobě. Dodatečná úprava by většinou znamenala náročné či dokonce nemožné opravy s vysokými finančními náklady.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYTLAČOVÁNÍ POLYMERŮ

Vytlačování je technologická operace, při které je polymer v plastickém stavu vytlačován hlavou o různém tvaru do prostoru. K tomu jsou používány vytlačovací stroje, které slouží ke kontinuální nebo diskontinuální výrobě desek, tyčí, fólií, profilů, trubek a jiných výrobků. Po vytlačení následují další operace, jako fixace tvaru a rozměru (kalibrace) a chlazení.

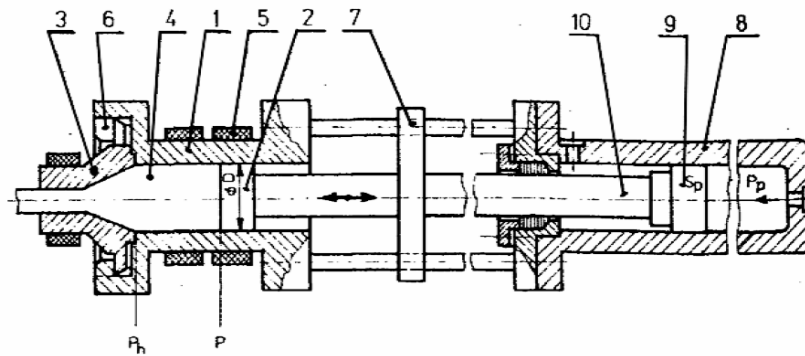
Vytlačovací stroje se dělí podle hlavní pracovní části:

- Pístové
- Diskové
- Šnekové
- Speciální[1,2]

1.1 Pístové vytlačovací stroje

Hlavním pracovním elementem je vytlačovací píst s hydraulickým nebo pneumatickým pohonem. Skládá se z pohonné a pracovní části. Spojení s pracovní částí zabezpečuje pístnice vedená v příčnicku. Pracovní část je tvořena také válcem a pístem s vytlačovací hlavou.

Velikost pístového vytlačovacího stroje je určena maximální vytlačovací silou, průměrem a zdvihem pracovního pístu. Tyto stroje jsou vhodné k vytlačování materiálů citlivých na teplotu, nebo špatnými tokovými vlastnostmi. Nevýhodou je jejich diskontinuální chod.
[1,2]

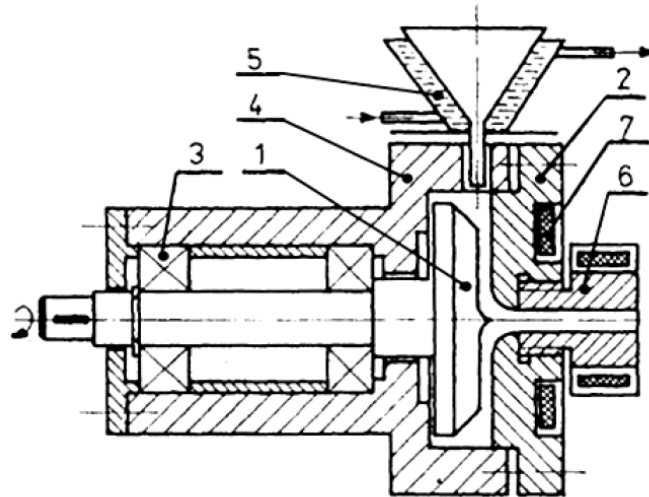


1 - pracovní válec, 2 - pracovní píst, 3 - vytlačovací hlava, 4 - vytlačovaný materiál, 5 - topné tělesa, 6 - bajonetový uzávěr, 7 - vedení pístnice,
8 - hydraulický válec, 9 - píst, 10 - pístnice

Obr. 1 Pístový vytlačovací stroj[1]

1.2 Diskové vytlačovací stroje

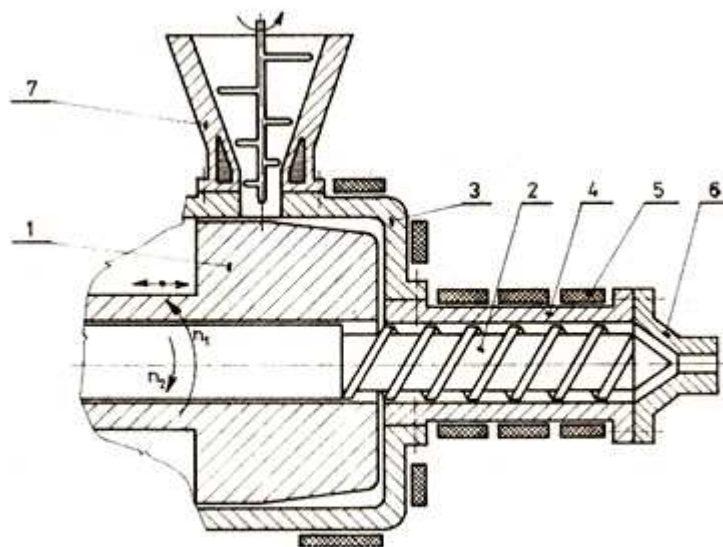
U diskového vytlačovacího stroje se využívá zvláštního chování zpracovávaného materiálu podmíněného jeho viskoelastickými vlastnostmi (Weissenbergův efekt). Hlavní částí je disk uložený na ložiskách, který se otáčí. Materiál vchází do štěrbin z chlazené násypky, natavuje se a dopravuje účinkem elastických napětí v radiálním směru k vytlačovací hlavě. Teplo potřebné k natavení materiálu dodávají také topná tělesa umístěná v čelní desce i na vytlačovací hubici. Vytlačovací tlaky těchto strojů jsou velmi malé (desetiny MPa). Výkon diskového vytlačovacího stroje je určen konstrukčním uspořádáním (průměr, otáčky a tvar pístu), vlastnostmi zpracovávaného materiálu a smykovou rychlostí. Plastikační proces lze ovládat jak změnou otáček disku, tak i změnou velikosti štěrbin.



1 – rotor, 2 – čelní deska, 3- ložisko, 4 – těleso, 5- chlazená násypka, 6 – vytlačovací hlava, 7 – topné těleso

Obr. 2 Diskový vytlačovací stroj[1]

Nevýhodou jsou tedy velmi nízké vytlačovací tlaky. Výhodou je však dobrá homogenizace taveniny a jednoduché ovládání plastikace. Proto byly navrženy kombinované konstrukce využívající výhodné plastikace diskových strojů a vyšších tlakových výkonů pístových, nebo šnekových strojů. [1]



1 - plastikační disk, 2 - pracovní šnek, 3 - statorové těleso, 4 - pracovní válec, 5 - topná tělesa, 6 - vytlačovací hlava, 7 - chlazená násypka

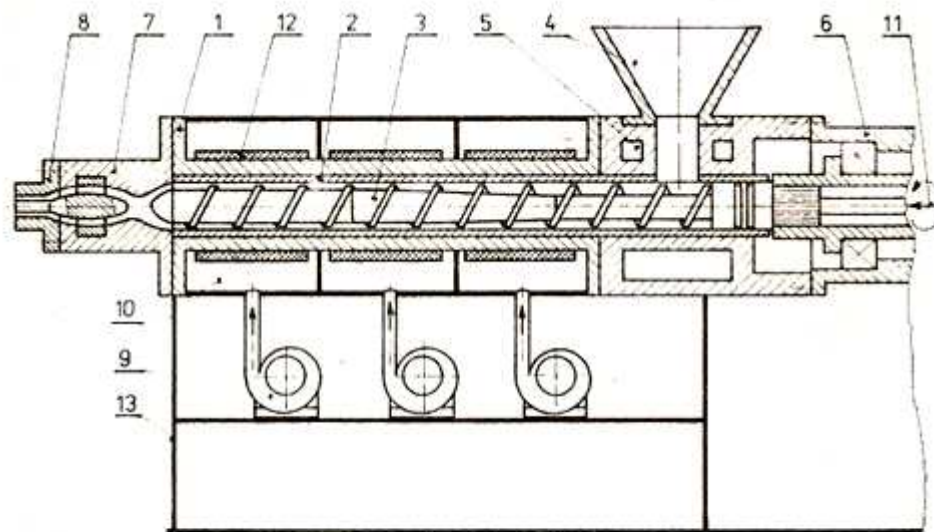
Obr. 3 Diskový vytlačovací stroj se šnekem[1]

1.3 Šnekové vytlačovací stroje

Šnekové vytlačovací stroje vzhledem ke kontinuálnímu způsobu práce obsazují přední místa mezi stroji na zpracovávání plastů. Vyrábějí se v mnoha provedeních a využívají se na výrobu tradičních výrobků (trubky, profily, fólie, desky, monofily či opláštění nebo kaširování), ale také na výrobu vlnitých desek, sítí, nebo orientovaných pásků. Významné je použití šnekových strojů jako plastikačních jednotek u vstřikovacích strojů.

Technický vývoj šnekových vytlačovacích strojů si klade tyto hlavní cíle:

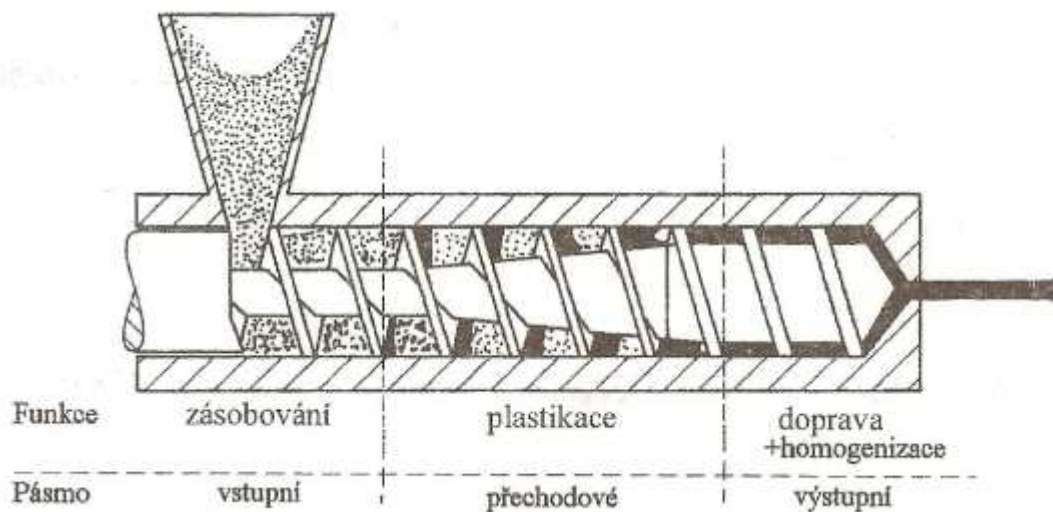
- a) velká vytlačovací výkonnost úměrná otáčkám šneku a co nejméně závislou na protlaku
- b) rovnoměrná doprava taveniny bez pulsací
- c) místně i časově rovnoměrná teplota taveniny
- d) vytlačování taveniny bez orientace
- e) homogenní zamíchání polymeru se všemi přísadami
- f) vytlačení výrobků bez pórů a bublinek, tedy přípravu taveniny bez těkavých podílů i při velké výkonnosti, při plnění granulátem i práškem



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

Obr. 4 Jednošnekový vytlačovací stroj[1]

U většiny vytlačovacích strojů jsou polymery ve formě prášku, granulí, nebo vloček vtahovány z násypky do mezery mezi rotujícím šnekem a vyhřívaným válcem. Princip vytlačovacího stroje je vidět na obrázku 5.



Obr. 5 Princip šnekového vytlačovacího stroje[3]

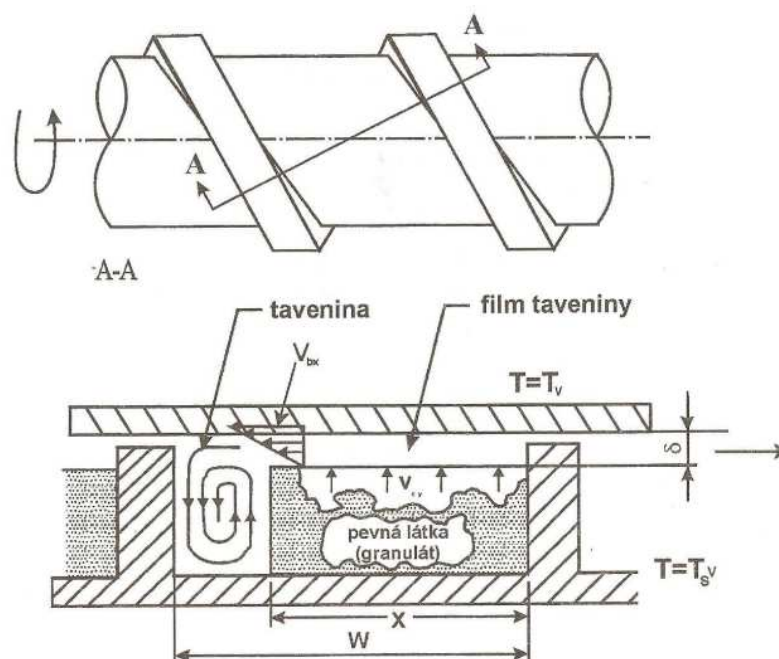
Vytlačovací stroj se dělí na tři hlavní části: vstupní, přechodové a výstupní pásmo. [1,2]

1.3.1 Vstupní pásmo

Vstupní pásmo se nazývá také zásobovací, protože jeho funkcí je hlavně zásobovat vytlačovací stroj požadovaným množstvím materiálu bez fluktuací (dávkové množství se v čase nemění). Kanál je v tomto pásmu hluboký, pojme tedy hodně materiálu. Intenzita dopředného pohybu materiálu je dána třecími poměry mezi materiálem, šnekem a válcem. Maximální výkon je dán minimálním třením mezi granulátem a šnekem, proto jsou šneky leštěny. Výkon je dále umocněn maximálním třením mezi materiálem a válcem, proto jsou válce zdrsňené a někdy pod násypkou záměrně drážkovány, popřípadě je prostor pod násypkou chlazený. S rostoucí intenzitou dopředného pohybu však roste intenzita nárůstu tlaku. Při kritických hodnotách tlaku může dojít k ustřížení závitu šneku. [4]

1.3.2 Přechodové pásmo

Úkolem tohoto pásma je přitlačovat polymer k vyhřáté stěně válce (hloubka kanálu postupně klesá), dochází k tavení a v kanálu se současně vyskytuje jak tuhé lože, tak polymerní tavenina. Tuhé lože se ve směru násypky k vytlačovací hlavě zmenšuje, zásobník taveniny se zvětšuje.



Obr. 6 Tadmorův model pro popis tavení polymeru ve šnekovém kanále[3]

Typickou charakterizací průběhu tavení je relativní šířka tuhého lože:

$$SBR = \frac{X}{W} \quad (1)$$

Dle uvedeného vzorce je zřejmé, že pokud je hodnota relativní šířky tuhého lože (SBR) 1, materiál se ještě nezačal tavit. Pokud však hodnota SBR dosahuje nulové hodnoty, materiál je zcela roztaven.

Při intenzivním stlačování tuhého lože dochází pouze k jeho deformaci, nikoliv k tavení. Natavený materiál je vytlačen nad tuhé lože (jako na obr. 6), avšak následně dochází k penetraci taveniny do tuhého lože, rozpadu a obalení částic tuhého lože taveninou, čímž se vytvoří izolace. Tím vznikají neroztavené kousky, které se mohou objevit na extrudátu. [4]

1.3.3 Výstupní pásma

Úkolem této sekce je doprava a míchání taveniny. Dle této sekce a tlaku v ní rozeznáváme dva typy šneků:

- Dopravní šnek

Ve výstupní sekci dochází ke spotřebě tlaku, je zde pouze dopředný pohyb, dosahuje se velkého výkonu a malého míchání.

- Míchací šnek

Ve výstupní sekci dochází ke generování tlaku, je zde i zpětný pohyb, malý výkon a velké míchání.

Ve výstupní sekci dochází k ohřevu dvěma energetickými zdroji:

- a) teplo z vyhřívaného válce
- b) disipované teplo (přeměna mechanické energie na energii tepelnou)

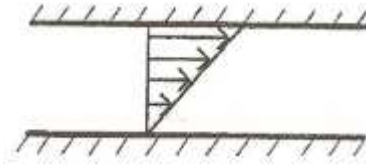
Dominantní příspěvek tepelného zdroje má však teplo z válce.

Pro účinnou výstupní sekci je nutné, aby byl polymer zcela roztaven, teplota taveniny však musí být nižší než teplota, při které dochází k degradaci. Tlak musí být dostatečný na to, aby vytlačil polymer přes vytlačovací hlavu.

Dodávané množství taveniny je určeno výstupní zónou. Uvažujeme jednu z následujících možností:

- Ideální unášivý tok

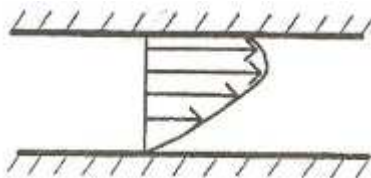
K unášivému toku mezi deskami (Couetteovo proudění) dochází tehdy, když jedna z desek je stacionární a druhá z desek se pohybuje rychlostí v . Pro zachování tohoto tokového pole není zapotřebí žádný tlakový gradient.



Obr. 7 Ideální unášivý tok [3]

- Unášivý tok zvýšený o tlakem generovaný tok

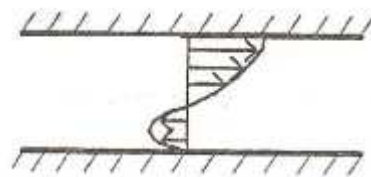
Vzniká, pokud stroj má tendenci dodávat příliš mnoho granulátu.



Obr. 8 Unášivý tok zvýšený o tlakem generovaný tok [3]

- Unášivý tok snížený o tlakem generovaný tok

Je zde uvažována vytlačovací hlava s velkým odporem. Je to spojení domén, které má za následek generování tlaku za současné dopravy polymeru.

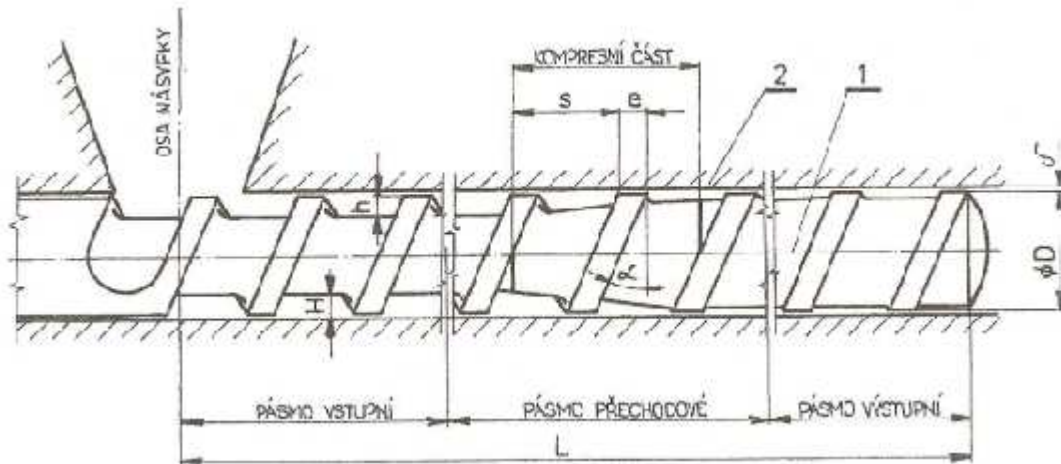


Obr. 9 Unášivý tok snížený o tlakem generovaný tok [3]

Zkušenosti z praxe ukazují, že správná funkce vytlačovacího stroje je podmíněna dodávaným množstvím. To by nemělo být větší, než 20% a menší než 25% množství dodávaného pouze unášivým tokem. [3,4]

1.3.4 Vytlačovací šneky

Úspěšné vytlačování velkou měrou závisí na konstrukci šneku. Šneky tvoří základní funkční prvek vytlačovacího stroje. Základní tvar a parametry jednochodého šneku jsou uvedeny na obrázku 10.



Obr. 10 Jednochodý šnek – názvosloví[3]

h – hloubka šnekového kanálu

s – stoupání šneku

e – šířka vodící plochy

α – úhel stoupání

D – průměr šneku

δ – vůle mezi šnekem a pracovním válcem

kompresní část – část šneku s proměnným objemem šnekového kanálu

Některé typické charakteristiky komerčních jednochodých šneků:

Délky jsou obvykle udávány násobkem průměru.

- Celková délka $20D - 30D$
- Úhel stoupání šroubovice $17,66^\circ$ (obvykle)
- Délka vstupního pásma $4D - 8D$
- Délka výstupního pásma $6D - 10D$
- Hloubka kanálu ve vstupním pásmu $0,1D - 0,15D$

- Hloubka kanálu ve výstupním pásmu 2 – 4 krát menší než ve vstupním pásmu (Poměr objemu šnekového kanálu ve vstupní a výstupní části je obvykle označován jako kompresní poměr). [3]

1.3.5 Druhy konstrukce vytlačovacích šneků

Šneky lze v zásadě rozdělit na:

- a) standardní jednochodé
- b) modifikované jednochodé
- c) vícechodé

Ad b: Modifikace standardního jednochodého šneku:

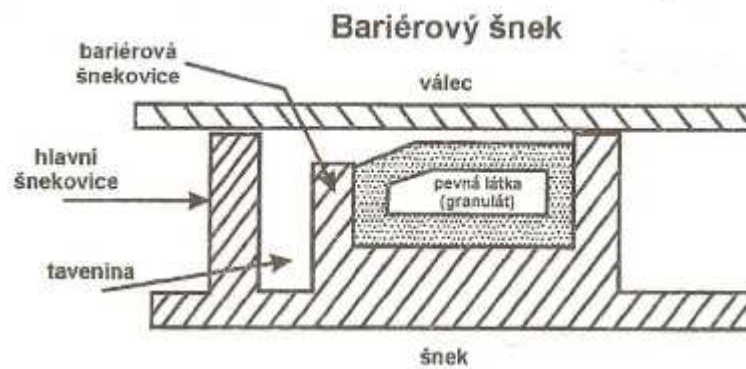
- absence vstupní zóny - redukce zdržných dob
- absence výstupní zóny – redukce smýkání (disipace)
- absence vstupní a výstupní zóny
- přidání šroubovice ve vstupní zóně – stabilizace dopravy granulí ve vstupní sekci
- změna úhlu stoupání šroubovice podél šneku
 - stoupání roste podél šneku (tavenina má více prostoru): redukce smýkání, vhodné pro teplotně citlivé materiály
 - stoupání klesá při konstantní hloubce kanálu: efekt jako u kompresní zóny, vhodné pro kaučuky.
- změna hloubky kanálu ve výstupní zóně (šnek s dekompresní sekci)

Ad c: Vícechodé šneky vytvářejí dva nezávislé kanály. Tuhé lože a tavenina jsou separovány. Všechny konstrukce jsou vyznačovány proměnným objemem šnekového kanálu jak pro taveninu, tak i pro tuhý materiál. Zlepšuje se tak tavení, ale nezlepší se výkonnost vytlačovacího stroje.

- taveninový kanál není uzavřený
- taveninový kanál je uzavřený (bariérové šneky)

výhody těchto šneků jsou v dobrém tavení, stabilitě procesu vytlačování a dobrém generování tlaku.

nevýhody jsou v použití pouze pro jeden typ materiálu a obtížná simulace procesu. [3,4]

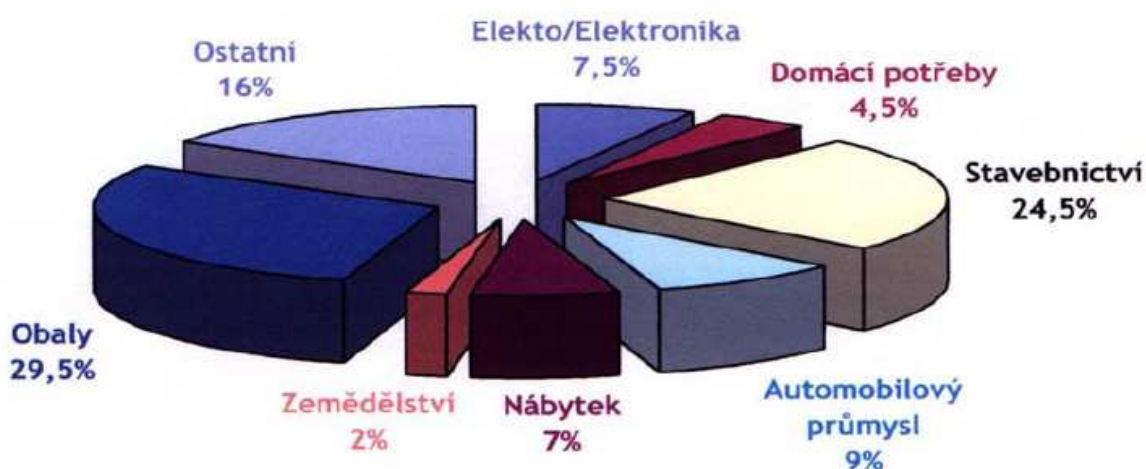


Obr. 11 Princip bariérového šneku[3]

2 VYTLAČOVANÉ MATERIÁLY A JEJICH REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ

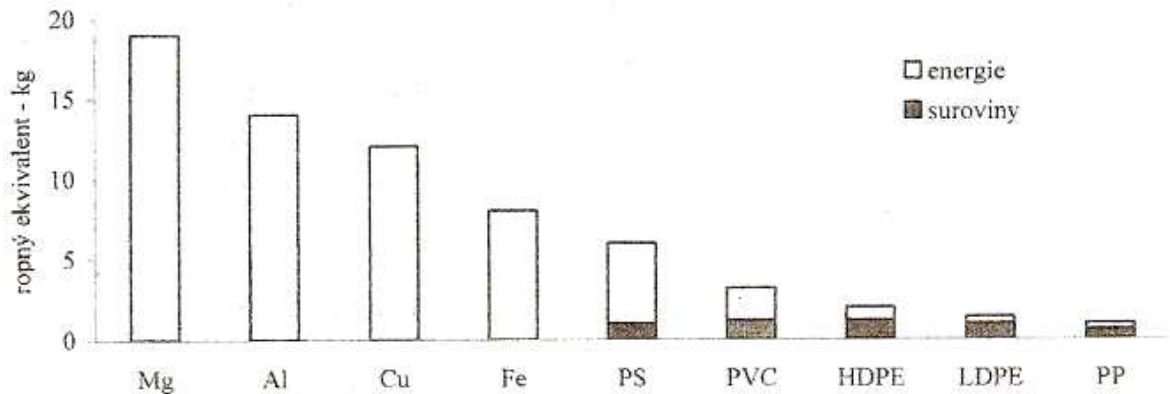
V roce 2000 byla průměrná světová spotřeba polymerů asi 240 kg na osobu a neustále stoupá. Velká většina světové produkce patří mezi polymery syntetické.

V současné době se považuje vývoj jednotlivých druhů polymerů a také jejich monomerů za ukončený. Na níže uvedeném grafu je znázorněna světová spotřeba plastů ve vybraných průmyslových odvětvích pro rok 2003.



Obr. 12 Světová spotřeba plastů v různých průmyslových odvětvích pro rok 2003[9]

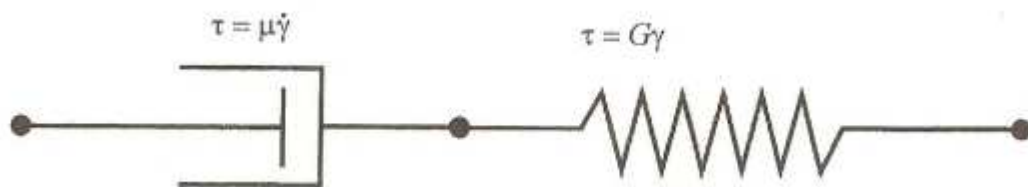
Pro vytlačování, které má na spotřebě plastů velký vliv, se využívají hlavně komerční typy plastů. Ty se vyznačují poměrně dobrými vlastnostmi a příznivou cenou. Pro stále rostoucí spotřebu plastů hovoří nejen velmi dobré vlastnosti, ale také energetické nároky na jejich výrobu. Spotřeba energie a surovin (tzv. energetický ekvivalent ropy) pro výrobu materiálu o objemu 1 litru je mnohem nižší u polymerů, než u dalších konstrukčních materiálů, zejména kovů. [3,9]



Obr. 13 Energetická spotřeba pro výrobu různých typů materiálů [3]

2.1 Reologické chování polymerů

Určení tokových vlastností a reologického chování jsou důležité nejen pro výrobce surovin, ale také pro výrobce strojů a zpracovatele. Dodavatelé surovin používají hodnoty naměřené viskozity ke zjištění stejnoměrné kvality a kontroly parametrů při výrobě. Reologické chování je také označováno jako viskoelastické. Tavenina se chová viskózně (jako kapalina), ale také elasticky (jako pružná látka). Toto chování graficky vyjadřuje Maxwellův model. [2,3]



Obr. 14 Maxwellův model[3]

2.1.1 Viskozita

Viskózní vlastnosti látek jsou charakterizovány viskozitou, což je míra odporu kapaliny proti aplikované smykové síle.

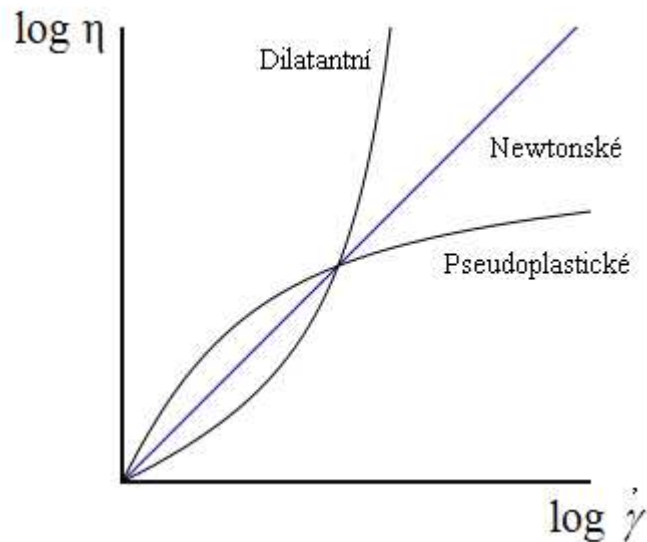
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} [Pa.s] \quad (2)$$

τ – smykové napětí [Pa]

$\dot{\gamma}$ – smyková rychlost [1/s]

Existují kapaliny, které mají viskozitu nezávislou na smykové rychlosti. Tyto kapaliny se nazývají newtonské (voda). Dále materiály, u kterých s rostoucí smykovou rychlostí roste i viskozita, se nazývají dilatantní (suspenze, škrob a voda). Materiály, které s rostoucí smykovou rychlostí snižují svou viskozitu, označujeme jako pseudoplastické (plasty).

- Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace



Obr. 15 Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace[4]

Jednoduchý způsob pro popis hodnot viskozity polymerních tavenin nám ukazuje mocninový zákon.

Power-Law model:

$$\eta_{(T,\dot{\gamma})} = m \cdot \alpha \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

m – měřítko konzistence (čím je m větší, tím je tavenina viskóznější)

n – stupeň neneutonského chování ($n=1$ pro newtonské látky, $n<1$ pro smykově závislé polymery)

α – teplotní funkce

- Závislost viskozity na distribuci molekulových hmotností.

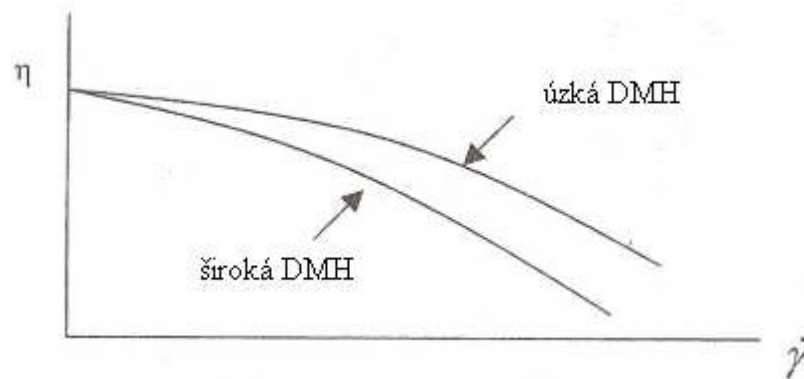
Při velké polydisperzitě je velká šířka distribuce molekulových hmotností (široká DMH).

Viskozita začíná klesat při relativně nízké rychlosti smykové deformace.

Při malé polydisperzitě je malá šířka distribuce molekulových hmotností (úzká DMH).

Viskozita začne klesat až při relativně vysoké rychlosti smykové deformace.

Polymery se širokou DMH se lépe zpracovávají za nižších tlaků, jsou tedy vhodné např. pro vytlačování. Naopak polymery s úzkou DMH vyžadují vyšší tlaky – vstřikování.



Obr. 16 Závislost viskozity na smykové rychlosti pro polymery s různou distribucí molekulových hmotností (DMH) [3]

- Závislost viskozity na teplotě a tlaku

Viskozita je silně závislá na teplotě. Se zvyšující se teplotou viskozita polymerů klesá.

$$\eta \approx e^{-\frac{A}{T}} \quad (3)$$

T – teplotně citlivostní parametr [°K]

Viskozita je dále závislá na tlaku, Se stoupajícím tlakem stoupá i viskozita.

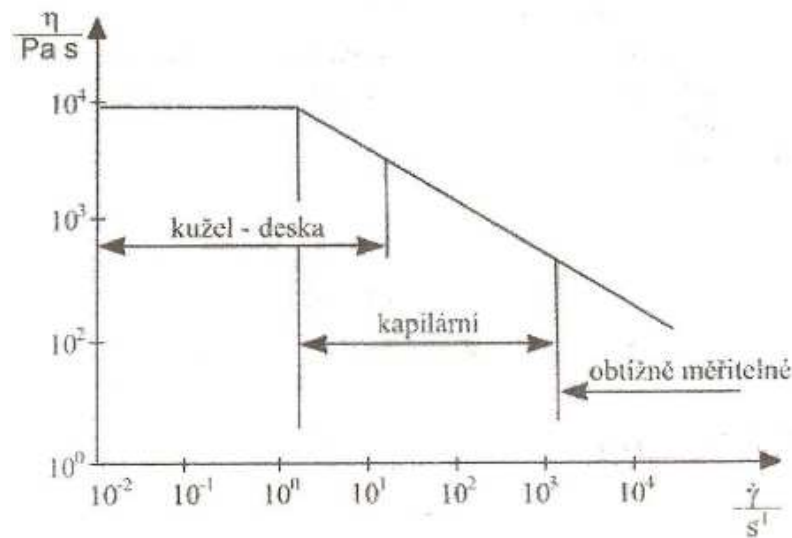
$$\eta \approx e^{\beta p} \quad (4)$$

β – tlakově citlivostní parametr [Pa]

Viskozita lze měřit těmito přístroji:

- viskozimetr válec-válec (méně používaný pro taveniny, z důvodu čištění nádoby a válce)
- viskozimetr kužel-deska
- kapilární viskozimetr [3,4]

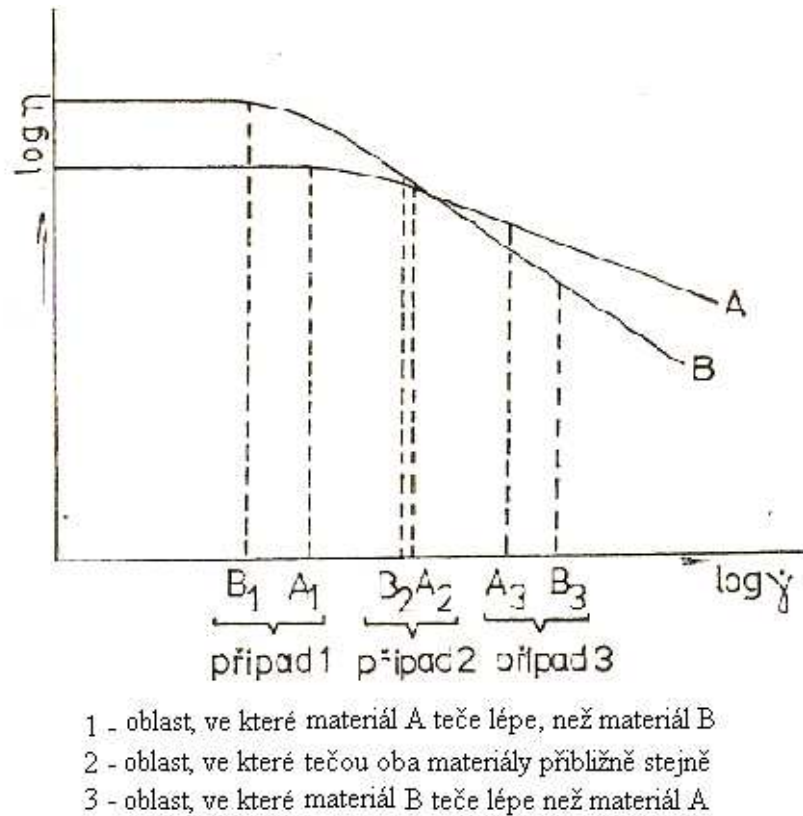
Oblast použití jednotlivých viskozimetrů je uvedena na obr. 17.



Obr. 17 Oblasti použití jednotlivých typů viskozimetrů [3]

2.1.2 ITT- index toku taveniny

Tato veličina je zavedena normou a užívají ji výrobci i technologové v oblasti zpracování plastů. ITT (nebo také MFI- z anglického melt flow index) je definován jako hmotnost materiálu v gramech, který proteče definovanou tryskou za 10 minut, při přesně stanoveném zatížení pístu a dané teplotě. Tím je dán tlak v komoře plastometru a tedy i hodnota smykového napětí. ITT je bod na tokové křivce a jeho poloha není stálá, nýbrž se mění se změnou rychlosti smykové deformace $\dot{\gamma}$, tzn. S tokovými vlastnostmi taveniny. Charakterizace materiálu podle jednoho bodu je poměrně nepřesné a problematické. Proto využíváme pro popis tokových vlastností polymerní taveniny celou tokovou křivku. Také k porovnání materiálů slouží celá toková křivka, nikoliv pouze ITT. Na obrázku 18 lze vidět mylné srovnání dvou tavenin na základě ITT.



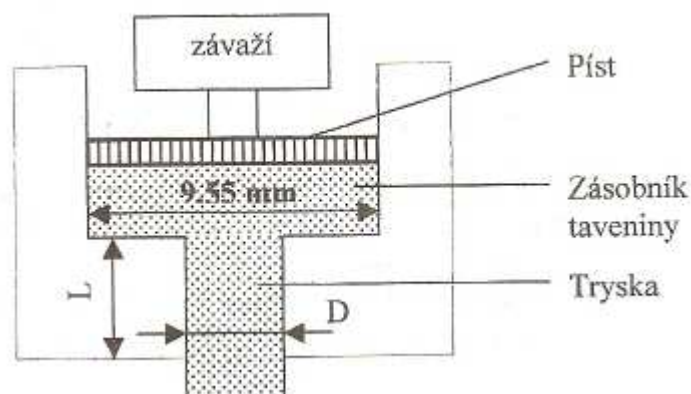
Obr. 18 Určení hodnot ITT pro dva materiály a různá zatížení [2]

Dle normy ASTM jsou rozměry trysky: $D=2,095\text{mm}$

$$L=8\text{mm}$$

Zatížení a teploty se pro různé druhy materiálů mění.

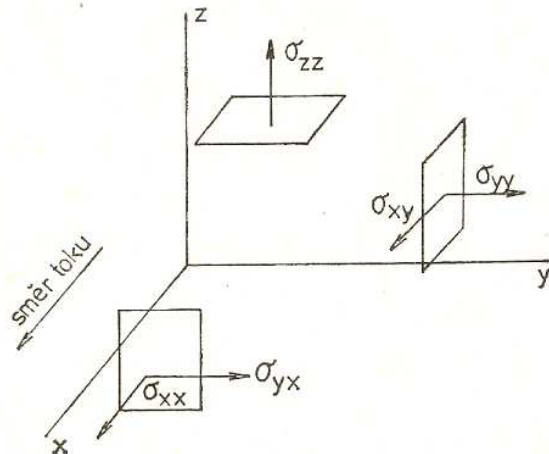
Nízká hodnota ITT určuje vysokou viskozitu a molekulovou hmotnost, naopak vysoká hodnota ITT znamená nízkou viskozitu a molekulovou hmotnost. Jinými slovy polymerní tavenina s nízkou hodnotou ITT hůře teče a naopak.[2,3]



Obr. 19 Princip měření ITT na kapilárním viskozimetru [3]

2.1.3 Normálová napětí

Smykové napětí, které úzce souvisí s viskozitou, působí při jednorozměrném toku v rovině, na kterou je kolmý gradient rychlosti. Při jednorozměrném toku se objevují i další napětí, které působí v normálových směrech.



Obr. 20 Směr působení složek napětí [2]

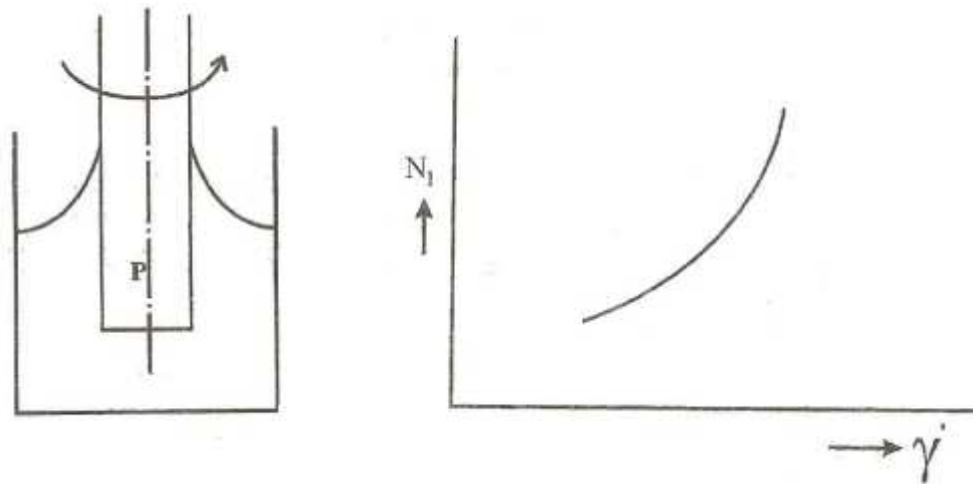
Jelikož se taveniny v reologii považují za nestlačitelné, nemá smysl se zabývat normálovými složkami, fyzikální význam mají pouze jejich rozdíly:

$$\text{První rozdíl normálových napětí } N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad (5)$$

$$\text{Druhý rozdíl normálových napětí } N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \quad (6)$$

První rozdíl normálových napětí se měří na kapilárním nebo rotačním viskozimetru. U kapilárního viskozimetru je princip takový, že normálová napětí působí ve stejném směru, jako tlak. Na výstupu je tlak nulový, měří se síla, která působí na jednotku plochy, kolmo na osu y . U kapalin bez normálových napětí (voda) se na výstupu naměří nulová síla. Tato síla pak slouží k určení rozdílu normálových napětí.

Při měření na Viskozimetru kužel-deska využíváme stoupání po tyči, neboli Weissenbergova efektu.



Obr. 21 Chování polymerů při rotaci (Weissenbergův efekt) a první rozdíl normálových napětí N_1 [3]

Normálové napětí slouží také pro charakterizační účely. Polymery se širokou distribucí molekulových hmotností (MWD) vykazují velké rozdíly normálových napětí.

První rozdíl normálových napětí je hlavní příčinou narůstání taveniny, když polymer opouští vytlačovací hlavu. [2,3]

2.1.4 Elongační viskozita

Přilehlé materiálové částice (ve směru toku) se pohybují rozdílnými rychlostmi. Elongační tok vzniká při měnícím se rozměru štěrbin, nebo vyfukování fólií dutých výrobků apod. Elongační viskozitu je obtížné měřit.

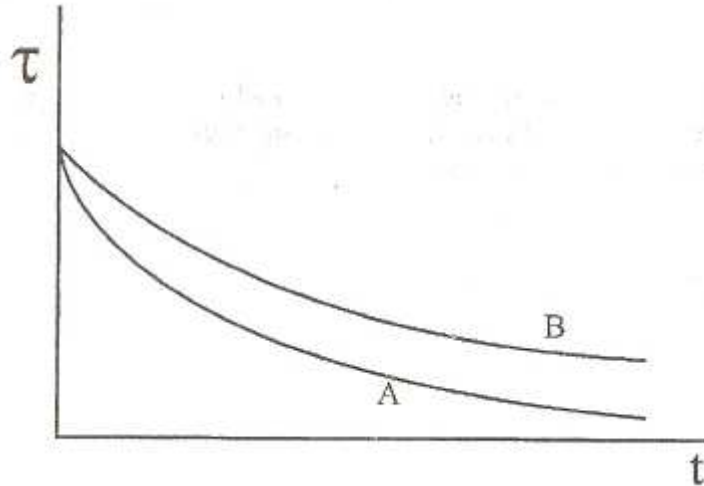
$$\eta_E = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) / \dot{\epsilon} \quad (7)$$

$\dot{\epsilon}$ - rychlost elongační deformace, charakterizuje intenzitu elongačního toku. [3]

2.1.5 Relaxace napětí

Význam této veličiny je pochopen při odvolání na mechanický analog (obr. 14). Při vyvození náhlého protažení pružina okamžitě reaguje. Avšak napětí se uvolňuje postupně (exponenciálně), dochází k pohybu tlumiče. Pokud je doba protahování dostatečná, napětí bude nulové. Při měření např. na rotačních viskozimetrech, můžeme pozorovat, že když je

rotace náhle zastavena ($\dot{\gamma}=0$), měřené napětí není okamžitě nulové, ale uvolňuje se exponenciálně.



Obr. 22 Relaxace dvou polymerů [3]

Na obrázku 22 je vidět, že polymer B má delší relaxační čas, než polymer A. Průběhy relaxace jednotlivých polymerů tak můžou být použity pro účely charakterizace. Z toho lze usuzovat, že není dostačující charakterizace polymerů pouze jejich viskozitou, je také nutné znát jejich relaxační doby. Při dlouhých dobách relaxace je možné, že materiál při zpracování ztuhne dříve, než dojde k úplnému relaxování napětí. Při tomto jevu budou vyráběné výrobky se značným množstvím zamrznutých napětí. Může tak docházet k nežádoucím jevům deformace a smrštění, nebo vzniku trhlin a stárnutí. Charakteristické relaxační doby polymerů jsou 10^{-2} - 10^2 sekund. [3]

2.2 Hlavní komerční typy vytlačovaných materiálů

V technické praxi se můžeme setkat s různými typy polymerních materiálů, které se liší vlastnostmi a tedy i oblastí, kde je jejich použití vhodné. Polymery jsou označovány svým názvem, nebo mezinárodně uznávanou zkratkou. V současnosti jeden typ polymeru vyrábí velké množství firem, které uvádí polymery pod svými obchodními názvy. [3]

2.2.1 Polyetylen o vysoké hustotě (Vysoko-hustotní polyetylen)

Mezinárodně uznávaná zkratka: **HDPE**

Některé typy obchodních názvů: Densothene, Hilex, Rholene, Sarolene H.

Tento materiál je tvořen lineárními řetězci, které se navzájem snadno spojují.

Používá se pro výrobu láhví a nádob, izolace kabelů a drátů. [3,5,8]

Tab. 1 Vybrané vlastnosti HDPE[8]

Fyzikální vlastnosti HDPE	
Hustota	956 kg/m ³
Teplota tavení	130 °C
Teplota zpracování	210 °C
Youngův modul pružnosti	0,911 GPa
Tepelná vodivost	0,4 W/m.K
Měrné teplo	1,8 – 1,88 kJ/kg.K
Cena	1,4 - 1,5 EUR/kg

2.2.2 Polyetylen o nízké hustotě (nízko-hustotní polyetylen)

Mezinárodně uznávaná zkratka: **LDPE**

Některé typy obchodních názvů: Diothene, Fertene, Suprathen.

Má dlouhá a krátká rozvětvení. Větvení brání řetězcům, aby se mohli těsně sbalit.

Je ohebný a měkký, používá se na výrobu lahví, pytlů a fólií, opláštění drátů či výrobu hraček. [3,5,8]

Tab. 2 Vybrané vlastnosti LDPE[8]

Fyzikální vlastnosti LDPE	
Hustota	910 - 940 kg/m ³
Teplota tavení	107 – 115 °C
Teplota zpracování	200 - 213 °C
Youngův modul pružnosti	0,14 – 0,35 GPa
Tepelná vodivost	0,3 W/m.K
Měrné teplo	2,2 kJ/kg.K
Cena	1,4 - 1,5 EUR/kg

2.2.3 Polypropylen

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PP**

Některé typy obchodních názvů: Propilex, Avisun, Cournova, Daplen, Hostalen PP, Moplen, Mopten, Mosten.

Vyznačuje se některými výhodnými vlastnostmi, např.: tuhostí, nebo odolností proti chemikáliím. Používá se pro výrobu vláken, zavazadel, fólií, textilií a automobilových dílů. [3,5,8]

Tab. 3 Vybrané vlastnosti PP[8]

Fyzikální vlastnosti PP	
Hustota	850 kg/m ³
Teplota tavení	165 °C
Teplota degradace	286 °C
Youngův modul pružnosti	1 - 1,35 GPa
Tepelná vodivost	0,17 – 0,22W/m.K
Měrné teplo	2 kJ/kg.K
Cena	1 – 1,15 EUR/kg

2.2.4 Polyvinylchlorid

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PVC**

Některé typy obchodních názvů: Cautex, Craylene, Craylon, Crystophane, Exxon, Genotherm, Hostalit, Igelite, Neralit, Novodur, Vinoflex.

Je to druhý nejvíce používaný termoplast v praxi. Je měkký a dost chemicky nestabilní. Využívá se tvrdý i měkčený PVC pro fóliové desky, čalounění, výrobu trubek, potrubí, profilů, oken a dveří. [3,5,8]

Tab. 4 Vybrané vlastnosti PVC[8]

Fyzikální vlastnosti PVC	
Hustota	1 160 - 1 450 kg/m ³
Teplota tavení	200 - 212 °C
Teplota zpracování	180 - 210 °C
Youngův modul pružnosti	1,12 - 4,83 GPa
Tepelná vodivost	0,15 - 0,29 W/m.K
Měrné teplo	0,15 - 0,29 kJ/kg.K
Cena	1,3 - 1,8 EUR/kg

2.2.5 Polystyren

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PS**

Některé typy obchodních názvů: Distrene, Dylene, Edistir, Fostacryl, Kralon, Krasten, Lustrex, Pelaspan, Styrolux.

Amorfní polymer, který je často průhledný a tuhý. Používá se pro výrobu obalů, izolací a různých automobilových dílců. Nevýhodou je však špatná tepelná odolnost, křehkost, ale také postupné žloutnutí na světle. [3,5,8]

Tab. 5 Vybrané vlastnosti PS[8]

Fyzikální vlastnosti PS	
Hustota	1 030 - 1 050 kg/m ³
Teplota tavení	200 - 240 °C
Teplota zpracování	190 – 274 °C
Youngův modul pružnosti	3 - 3,6 Gpa
Tepelná vodivost	0,08 W/m.K
Měrné teplo	1,3 kJ/kg.K
Cena	1 – 1,15 EUR/kg

2.2.6 Polyetylentereftalát

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PET (PETP)**

Některé typy obchodních názvů: Arnite, Dakron, Hostaphan, Melinex, Mylar, Slotera, Tergal, Tesil.

Používá se jako obalový materiál na potraviny, nápoje a jiné kapaliny, kreditní karty, fotografické a rentgenové filmy. Mají vysokou pevnost, dobré mechanické vlastnosti, jsou lehce tvarovatelné a recyklovatelné. [3,5,8]

Tab. 6 Vybrané vlastnosti PET[8]

Fyzikální vlastnosti PET	
Hustota	1290 – 1 400 kg/m ³
Teplota tavení	212 - 265 °C
Youngův modul pružnosti	2,76 - 4,14 Gpa
Tepelná vodivost	0,138 – 0,151 W/m.K
Měrné teplo	1,418 – 1,474 kJ/kg.K
Cena	1,5 – 1,6 EUR/kg

2.2.7 Akrylonitril-butadien-styren

Mezinárodně uznávaná zkratka: **ABS**

Některé typy obchodních názvů: Abselex P, Abson, Afcoryl, Blendex, Beneron, Crycolac, Dylel, Editer, Forsan, Kralastic, Sicoflex, Terluran, Tyblene.

ABS je houževnatý a pružný materiál, z optického hlediska většinou zakalený. Jeho výhodné vlastnosti jsou vysoká pevnost a rázová houževnatost. Je lehce zpracovatelný lisováním a vytlačováním, používají se pro širokou škálu výrobků, od různých drobných uzavěří, kufříků, automobilových součástek, až po celosvětově známé skládačky Lego. [3,5,8]

Tab. 7 Vybrané vlastnosti ABS [8]

Fyzikální vlastnosti ABS	
Hustota	1 010 - 1 210 kg/m ³
Teplota zpracování	160 - 274 °C
Youngův modul pružnosti	1,5 – 6,1 Gpa
Tepelná vodivost	0,128 - 0,19 W/m.K
Měrné teplo	1,4 - 2,13 kJ/kg.K
Cena	2 – 2,4 EUR/kg

2.2.8 Další běžně využívané materiály

Polyamid

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PA6,PA66**

Některé typy obchodních názvů: Alkamid, Capran, Durethan, Nilon, Silon, Ultramid.

Polymetylmetakrylát

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PMMA**

Některé typy obchodních názvů: Akrylon, Dentakryl, Plexigas, Umacryl, Umaplex

Polykarbonát

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PC**

Některé typy obchodních názvů: Lexan, Makrolon, Merlon, Plastokarbon, Vondafol PC.

Polytetrafluoretylen

Mezinárodně uznávaná zkratka: **PTFE**

Některé typy obchodních názvů: Ftoroplast, Teflon, Tetran, Trilon, Umaflon. [5]

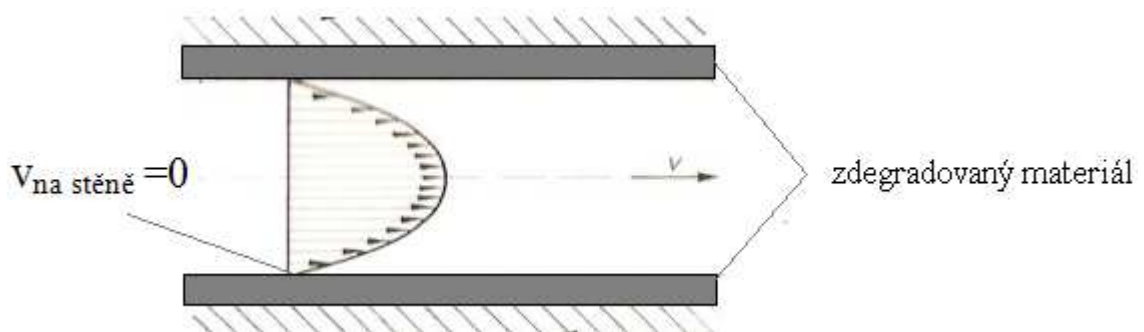
2.3 Negativní jevy při vytlačování

Při procesu vytlačování může docházet k negativním jevům, které zhoršují mechanické nebo optické vlastnosti výrobků. Mají za následek také ekonomicky náročnější výrobu. Hlavní problémové jevy vznikající při vytlačování:

- Degradace materiálu
- Narůstání profilu
- Shark skin (žraločí kůže)
- Die drool (slintání hlavy)
- Nestejnorodost vrstev (koextruze)
- Nestability na rozhraní (koextruze) [4]

2.3.1 Degradace materiálu

Při vytlačování může vznikat degradace materiálu. Materiál má u stěny velmi dlouhé zdržné doby, dochází tedy k degradaci. Je zde nulová rychlost, ale nenulové smykové napětí a smyková rychlost. Tavenina využívá pouze takové velikosti kanálu, jaká je ve skutečnosti potřeba.



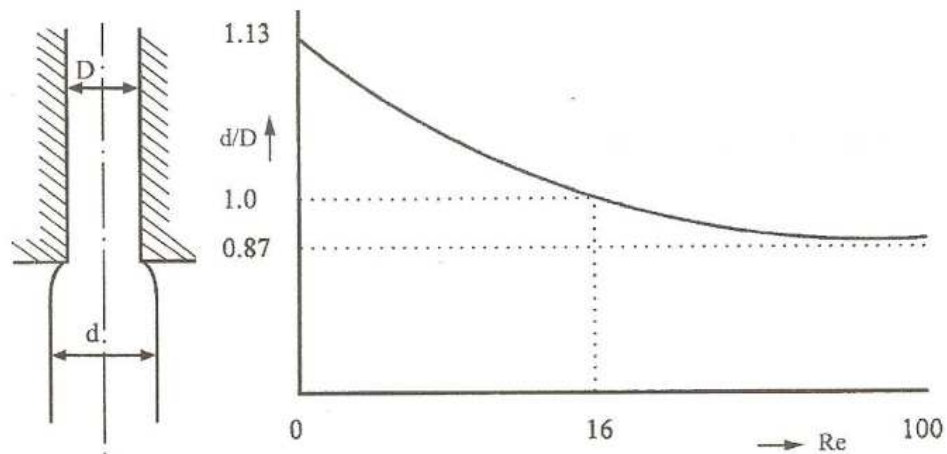
Obr. 23 Degradace materiálu při průtoku kanálem [6]

$\tau_{xy\min} = 30kPa$ - napětí, při kterém už bude docházet k vymývání degradovaného materiálu.

Je nutná znalost teplotní stability polymeru. Řešení tohoto problému spočívá ve zmenšení teploty, nebo zmenšení průměru kanálu a tedy zvýšení τ_{xy} . [4]

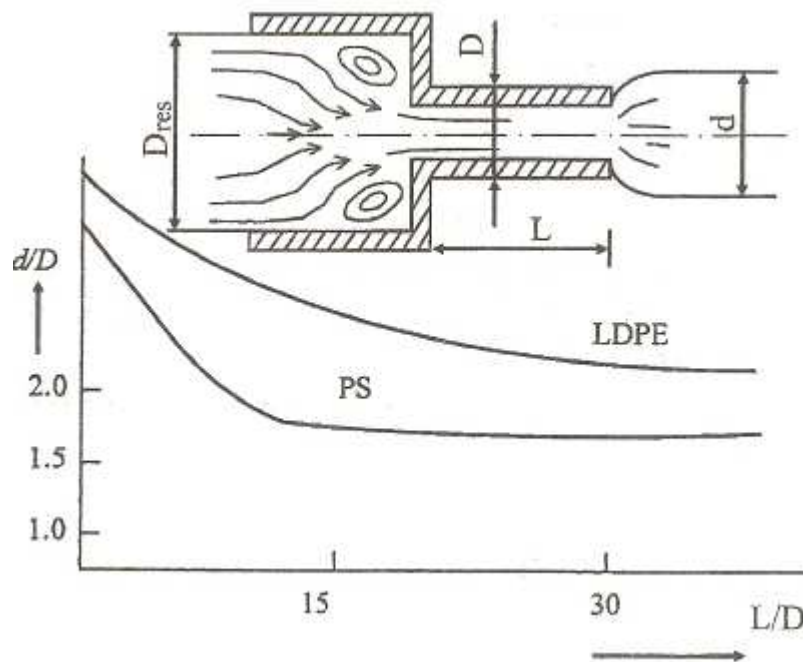
2.3.2 Narůstání profilu

Pokud newtonská kapalina vychází z hlavy do atmosféry, při velmi nízkých Reynoldsových číslech můžeme pozorovat narůstání. To je způsobeno přeskupením proudnic na výstupu.



Obr. 24 Narůstání profilu a závislost narůstání na rychlosti proudění [3]

Polymery jsou vytlačovány při nízkých Reynoldsových číslech ($Re=10^{-4}$ až 10^{-1}) a lze u nich pozorovat poměrně vysoké narůstání $d/D=1,5$ až 4 , výjimečně i více. Narůstání je závislé na L/D hlavy.



Obr. 25 Vliv poměru L/D hlavy a narůstání polymerů [3]

Na narůstání profilu má vliv:

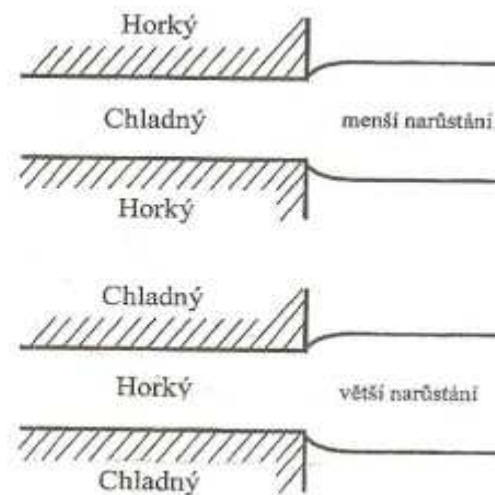
- rychlostní přerozdělení
- paměť materiálu
- 1. rozdíl normálových napětí
- teplota

Při rychlostním přerozdělení se přerozděluje parabolický rychlostní profil na obdélníkový profil, na konci vytlačovací hlavy. Částice uprostřed se zbrzdí a odtlačí sousední elementy od sebe.

Vliv paměti materiálu spočívá v délce výstupní štěrby. Pokud je výstupní štěrbina krátká, materiál si zapamatuje svůj předchozí tvar a způsobí tak narůstání.

Intenzitu narůstání vlivem N_1 ovlivníme průměrem kapiláry popřípadě distribucí molárních hmotností. Polymery s širší distribucí vykazují větší N_1 a tedy větší narůstání.

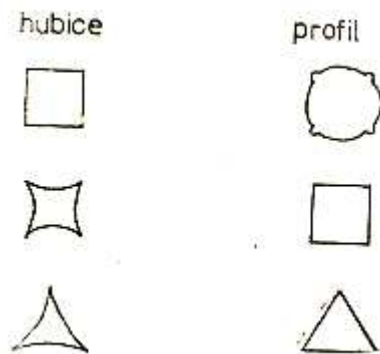
Vliv teploty je následující: pokud je stěna chlazená, viskozita taveniny je zde vysoká. U stěny je teda malá rychlost a dochází k velkému přerozdělení rychlostí na výstupu, což způsobí vyšší narůstání profilu za hubicí.



Obr. 26 Narůstání vlivem teploty stěny [3]

Teorie, které se snaží vysvětlit narůstání, jsou konstruovány pro tok v geometricky jednoduchém kanále (nekonečná kruhová tryska). Přenos výsledků na složitější tvary je potom principiálně jednoduché, avšak matematicky může být velmi složitá. První teorii, která vystihuje proces narůstání, a zároveň je posuzována jako nejvhodnější, podal Tanner.

Narůstání profilu je nutné kompenzovat úpravou výstupního průřezu vytlačovací hlavy, příklady jsou vidět na obrázku 27. [2,3,4]



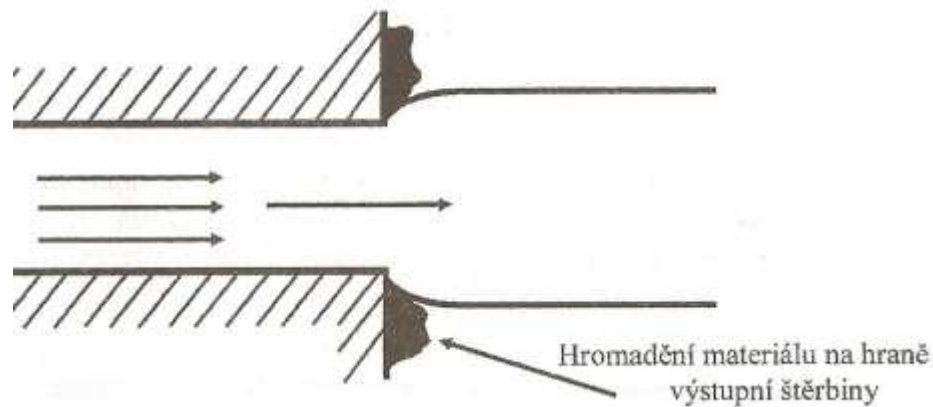
Obr. 27 Tvar hubice a výsledného profilu ovlivněného narůstáním[2]

2.3.3 Shark skin

Shark skin (někdy taky nazýván povrchový lom) je jev, při němž dochází ke vzniku zvrásněného povrchu vytlačovaného materiálu. Tento jev vzniká, pokud je smykové napětí na stěně $\tau_{xy} > 140 \text{ kPa}$. Je tedy dána limitní hodnota smykového napětí pro vytlačování. Při ještě vyšších tlacích (200-400 kPa) získáme kompletně deformované výrobky, přičemž deformace mohou být pravidelné, nebo zcela nepravidelné. Příčina vzniku tohoto jevu má spojitost s výstupní částí vytlačovací hlavy. [3,4]

2.3.4 Die drool

Jev Die drool je zjednodušeně řečeno hromadění taveniny na výstupní štěrbině. Dochází k degradaci nahromaděného materiálu a následně jeho ulpívání na povrchu vytlačeného produktu (obr. 28). V závislosti na závažnosti problému je nutné po několika hodinách či dnech přerušit spojitý proces a výstupní štěrbinu vytlačovací hlavy očistit. Příčiny dosud nejsou známy, formování nárůstku je nespojitě a nepravidelné. Příčiny vzniku jsou spojovány s napětími na konci vytlačovací hlavy, nedostatečné nebo chybějící pokovení výstupní štěrbině, nebo vlhkost materiálu. Jeden z prvků snižující narůstání je mírné zkosení hran (6-12°). [3,4]



Obr. 28 Hromadění materiálu na výstupní hraně [3]

2.3.5 Nestejnorodost vrstev

U vrstev, které nejsou stejnorodé, může docházet k zapouzdřování. Na zapouzdřování má vliv: viskozita, N_1 a N_2 , geometrie vytlačovací hlavy (přerozdělení u plochých hlav).

Při rozdílných viskozitách dochází k tomu, že méně viskózní tavenina se snaží zapouzdřit taveninu s větší viskozitou.

Další příčinou vzniku zapouzdřování je elasticita (N_1 a N_2). Čím větší je elasticita, tím je větší zapouzdřování. Důvodem je vznik vírů v nekruhových geometriích.

I při stejné viskozitě a nulové elasticitě dochází k zapouzdřování, důvodem je charakter a intenzita rychlostního přerozdělení mezi plnicím blokem a výstupní štěrbinou koextruzní ploché hlavy. [4]

2.3.6 Nestability na rozhraní

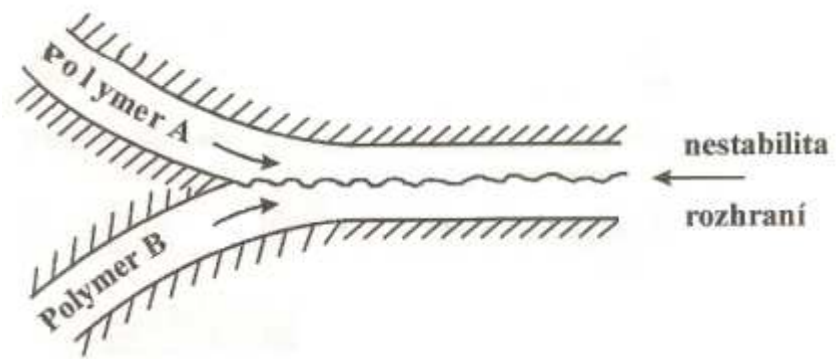
Nestability na rozhraní se projevují, pokud je napětí na rozhraní vrstev $\tau_{xy} > 40 \text{ kPa}$. Jejich výskyt souvisí s nestejnou rychlostí taveniny v oblasti soutoku. Obvyklý způsob odstranění je sladění toku a viskozity na rozhraní.

- Nestability Zig-Zag

Mají vysokou frekvenci (5-10Hz) malou amplitudu a vznikají ve výstupní štěrbině.

- Nestability Wawe

Mají nízkou frekvenci (do 0,2Hz), vysokou amplitudu a vznikají v oblasti soutoku vrstev. [3,4]



Obr. 29 Nestability na rozhraní materiálů při koextruzi [3]

3 VYTLAČOVACÍ HLAVY

Základní úlohou vytlačovací hlavy je formování taveniny z vytlačovacího stroje do požadovaného tvaru. Vytlačovací hlava musí mít takový profil, který zaručí pravidelný a trvalý materiálový tok.

Funkcí vytlačovacích hlav je tedy dosažení požadované tloušťkové distribuce při zajištění teplotní, napěťové, rychlostní a tlakové homogenity. [2,4]

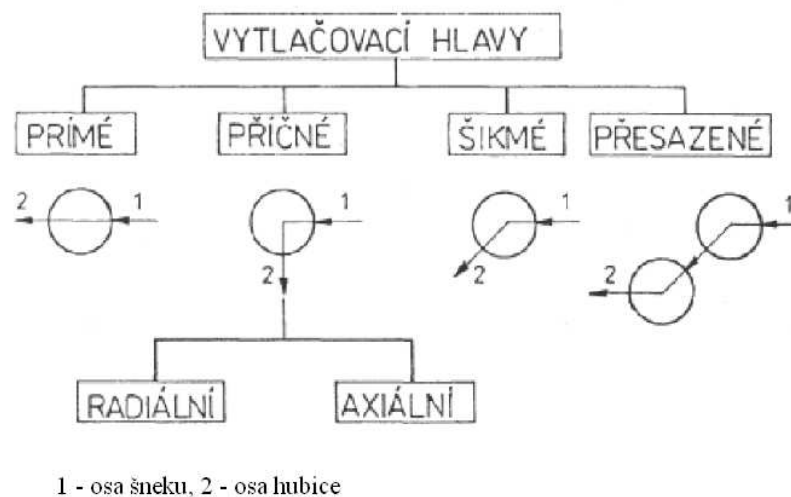
3.1 Designerské požadavky na vytlačovací hlavy:

1. Vytlačovací hlava musí vytvářet rozumný tlakový spád mezi 5 až 20 MPa (při koextruzi až 35 MPa).
2. Vytlačovací hlava nesmí obsahovat místa, které způsobují disipaci polymerních tavenin, jinak dojde k tloušťkové variaci v důsledku teplotních nehomogenit.
3. Vytlačovací hlava nesmí obsahovat mrtvá místa, jinak dojde k degradaci v důsledku velkých zdržných dob.
4. Napětí během toku by mělo být nejmenší možné a vyrovnané v příčném směru. V opačném případě bude docházet k narůstání a vzniku zamrzlých napětí.
5. Počet stokových čar musí být nejmenší možný s optimální orientací (musí být co nejkratší a v nejméně namáhaných místech).
6. Vytlačovací hlava by měla být funkční při různých procesních podmínkách a při použití různých materiálů (univerzálnost).
7. Vytlačovací hlava by měla být relativně jednoduchá (z hlediska výroby i údržby). [4]

3.2 Rozdělení vytlačovacích hlav

Vzhledem k rozsáhlému sortimentu výrobků, které můžeme na vytlačovacích strojích vyrábět, budou konstrukce vytlačovacích hlav velmi rozmanité. Vytlačovací hlavy dělíme podle polohy osy šneku a osy hubice, nebo také podle typu a funkce.

Rozdělení vytlačovacích hlav dle polohy osy šneku a osy hubice je znázorněno na obrázku 30.



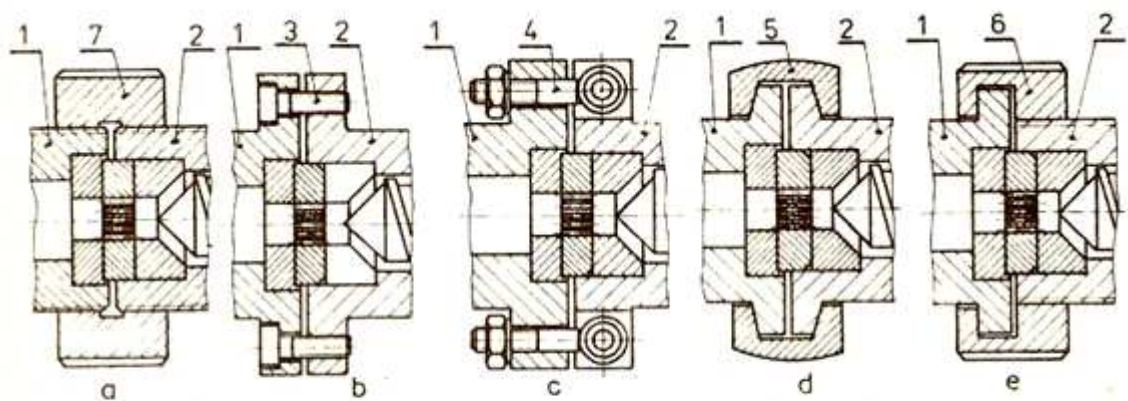
Obr. 30 Rozdělení vytlačovacích hlav [1]

Přímé hlavy se využívají hlavně při výrobě trubek a tyčí, profilů a fólií. Příčné hlavy jsou běžně používány u opláštění a vyfukování fólií. Šikmé hlavy mají uplatnění při výrobě tenkých fólií a přesazené hlavy se používají například při výrobě trubek s vnitřní kalibrací.

Rozdělení vytlačovacích hlav dle typu a funkce:

- Plochá vytlačovací hlava (vhodná na fólie a povlaky)
- Vytlačovací hlava na profily (okenní profily)
- Kruhová vytlačovací hlava (vhodná na fólie, trubky a tyče)
- Opláštěvací vytlačovací hlava (oppláštění drátů a kabelů)

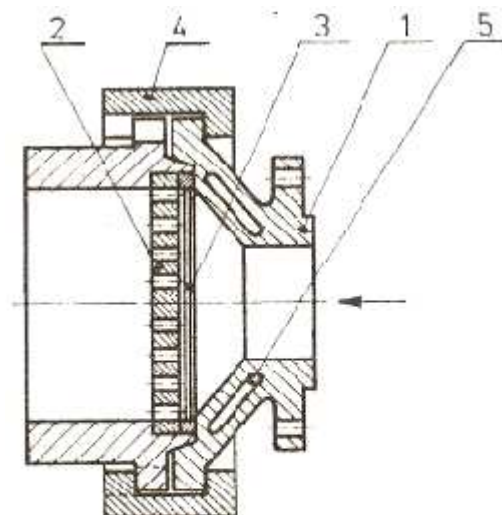
Hlava bývá připojena ke šnekovému vytlačovacímu stroji několika způsoby. Musí být hlavně pevné a těsné, zároveň však musí umožňovat snadnou montáž a demontáž. Nejjednodušší způsob je prosté šroubové spojení, kdy se kontrolují závity na otlačení. Ve většině případů se vytlačovací hlavy připojují přírubovými spoji. Velmi rychlou výměnu vytlačovacích hlav umožňuje objímkový, nebo bajonetový uzávěr.



a - prostý šroubový spoj, b - přírubový spoj, c - přírubový spoj se sklopnými šrouby,
 d - objímkový spoj, e - bajonetový spoj
 1 - vytlačovací hlava, 2 - pracovní válec, 3 - šroub, 4 - odklopný šroub, 5 - objímka,
 6 - objímka bajonetu, 7 - matice

Obr. 31 Spojení vytlačovací hlavy s vytlačovacím strojem [1]

Mezi pracovní válec a vytlačovací hlavu se často vkládá lamač, o který je opřena sada sít. Při průchodu tavenina sít jsou zachyceny případné nehomogenity, což je velmi důležité u tenkých výrobků (fólie, opláštění, duše). Síta i lamač mají za následek zvýšení průtokového odporu, což ovlivňuje dobu setrvání materiálu ve vytlačovacím stroji. Lamač je většinou kruhová deska opatřená otvory, ty musí být řešeny tak, aby nevytvářely mrtvé prostory. Výhodou u vytlačovacích hlav bývá výměna sít bez demontáže hlavy. [1,4]

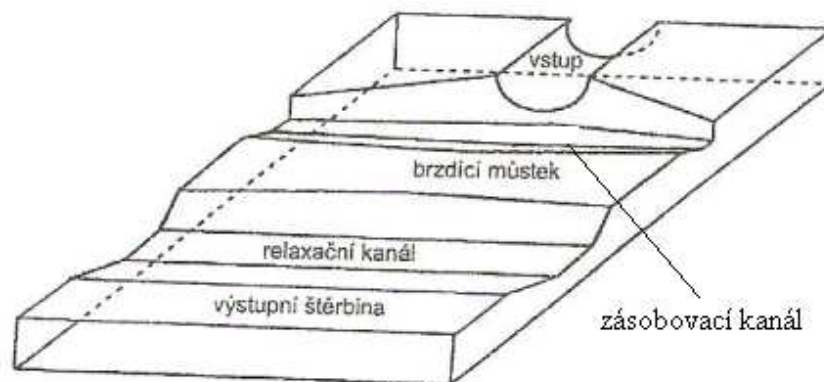


1 - těleso hlavy, 2 - lamač, 3 - sada
 čistících sít, 4 - objímka bajonetového
 uzávěru, 5 - temperační kanál

Obr. 32 Čistící hlava [1]

3.3 Plochá vytlačovací hlava

Ploché (široko-štěrbinové) vytlačovací hlavy slouží pro vytlačování desek a fólií. Hmota je v celé šíři štěrbině rozváděna příčným rozvodným kanálem. Tok polymerní taveniny je preferován ve směru nejmenšího odporu. Pro dosažení rovnoměrné tloušťky fólie či desky je potřeba zajistit, aby odpor v různých částech hlavy byl přibližně stejný. Velké síly, oddalující horní části hlavy od dolní (otvírání hlavy), zapříčiňují ohýbání výstupní štěrbiny. Jsou důsledkem relativně velké plochy a vysoké viskozity polymeru.



Obr. 33 Základní sekce ploché vytlačovací hlavy [3]

Rozvodný (zásobovací) kanál

Relativně hluboký kanál podél hlavy, jeho cílem je distribuce taveniny ze středu kanálu k jeho kraji. Pro zajištění adekvátní výstupní rychlosti taveniny z této sekce je nutná redukce objemu na konci rozvodného kanálu.

Brzdný můstek

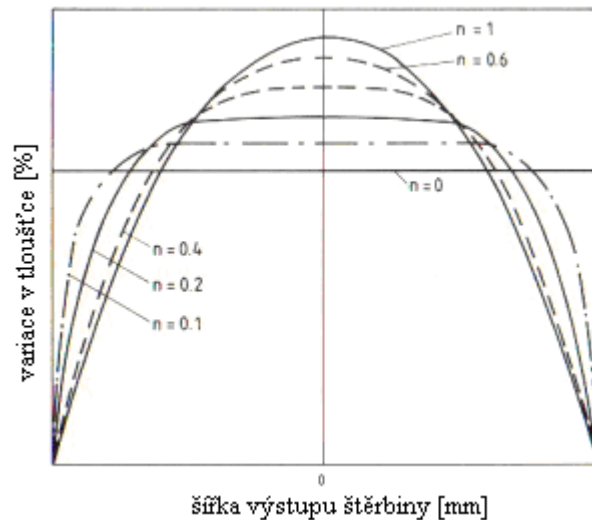
Relativně plynký kanál podél hlavy, který následuje za rozvodným kanálem. Cílem této části je vytvoření konstantního rychlostního profilu podél hlavy (zajištění dobré distribuce materiálu podél hlavy).

Relaxační komora

Relativně hluboký kanál podél hlavy, který následuje za brzdícím můstkem. Cílem této sekce je zpomalení toku a tedy poskytnutí času pro relaxaci napětí a zapomenutí předchozí tokové historie.

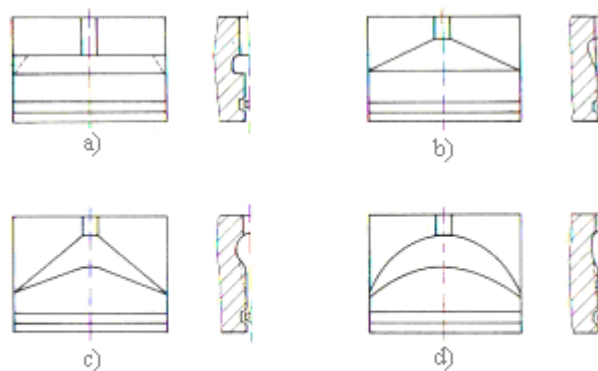
Výstupní štěrbiná

Poslední sekce ploché hlavy, slouží k nastavení tloušťky fólie nebo povlaku. Velikost výstupní štěrby je obvykle možno nastavit tak, aby se eliminovaly variace v tloušťce (variace v tloušťce je procentuelní změna tloušťky v daném bodě fólie vzhledem k průměrné tloušťce fólie). Na variace v tloušťce má největší vliv index neneutonského chování n (pro polymery typické $n=0,2$ až $0,5$) a elongační viskozita. Při zvyšující se elongační viskozitě roste variace v tloušťce. [3,4]



Obr. 34 Vliv indexu neneutonského chování na variaci v tloušťce [6]

Typy plochých hlav, dle tvaru brzdného můstku:



a,b) T-shape die (T-tvar),
c) Fish tail die (rybí ocas)
d) Coathanger die (věšákový typ)

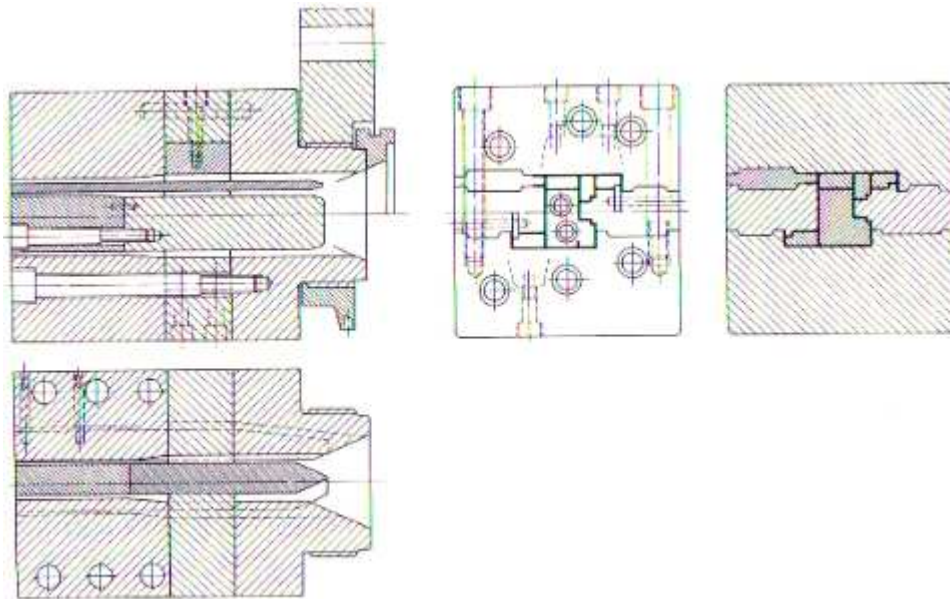
Obr. 35 Typy hlav dle tvaru brzdného můstku [6]

3.4 Plochá vytláčovací hlava na profily

Cílem je účinná redistribuce polymerní taveniny uvnitř profilové hlavy pro vytlačování daného profilu. Profilové hlavy dělíme dle tloušťky stěn. Profily s relativně tlustými stěnami je velmi obtížné modelovat (nutnost použít 3D modelování). Hlavním problémem u profilů, které mají různé tloušťky stěn je zvlnění vytlačeného profilu za hlavou. Materiál teče cestou nejmenšího odporu, a proto největší část taveniny teče nejširšími štěrbinami, zatímco v úzkých kanálech je taveniny nedostatek.

Design profilové hlavy

Cílem návrhu profilové hlavy je konvertovat tok z kruhového kanálu vycházejícího z vytlačovacího stroje do toku, jenž vytváří požadovaný profil. Design musí být navržen tak, aby rychlosti ve všech částech profilu (na výstupu) byly stejné. K tomu je využívána metoda CFMM (metoda minimalizace křížících se proudů). [4]



Obr. 36 Hlava na výrobu okenních profilů [6]

3.5 Kruhová vytláčovací hlava

Cílem této hlavy je redistribuce taveniny z toku v trubce do kruhového prstence.

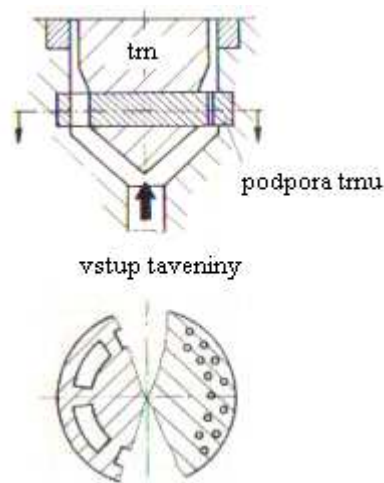
Základní druhy kruhových hlav:

- Hlava s žebry (spider die)
- Hlava plněná ze strany (side fed die)

- Hlava se spirálovým trnem (spiral mandrel die)
- Plochá spirálová hlava (flat spiral die) [4]

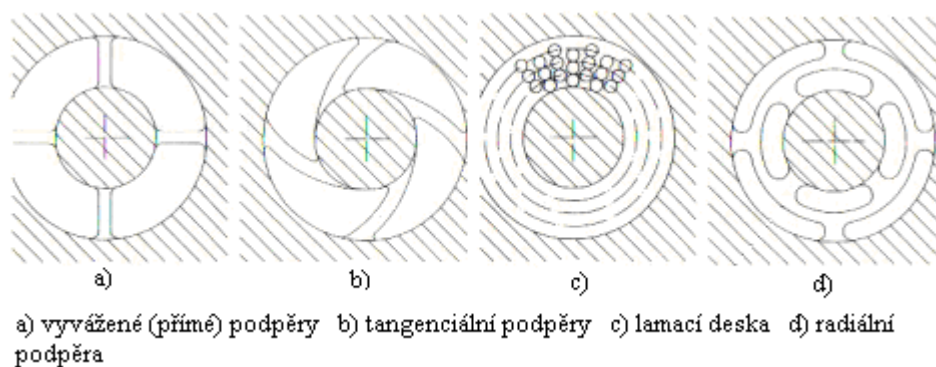
3.5.1 Hlava s žebry

Hlavní nevýhodou těchto hlav jsou stokové čáry. Stokové čáry vznikají na vycházejícím produktu, jsou způsobeny obtékáním podpory (žebra) trnu. Jsou nežádoucím optickým defektem, jejich vlivem také vznikají slabá místa produktu (praskání).



Obr. 37 Hlava s žebry [6]

Modifikovaný tvar podpěr zajišťuje lepší orientaci stokových čar. Druhy podpěr pro trn jsou vidět na obrázku 38.

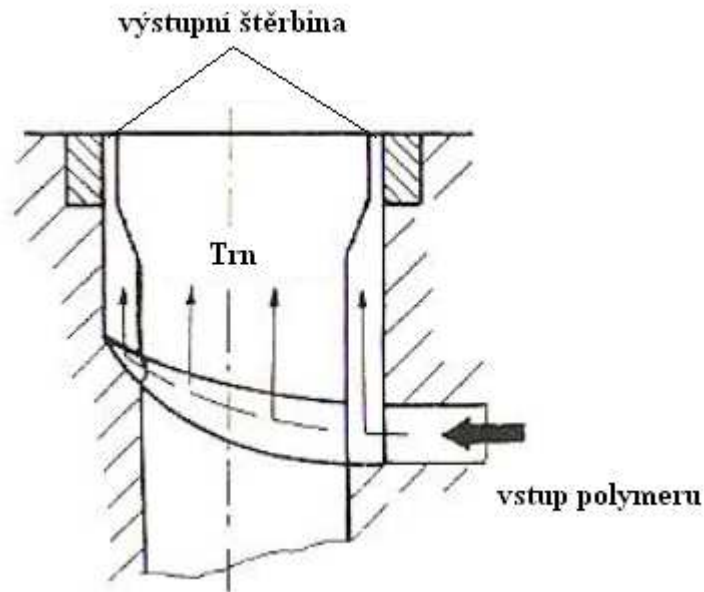


Obr. 38 Druhy podpěr pro trn [6]

Výhodou hlav se žebry je jednoduchý reologický design, jednoduchý mechanický design a malá spotřeba tlaku. Nevýhodou jsou stokové čáry, žádné míchání materiálu a potenciální výskyt mrtvých míst. [4, 6]

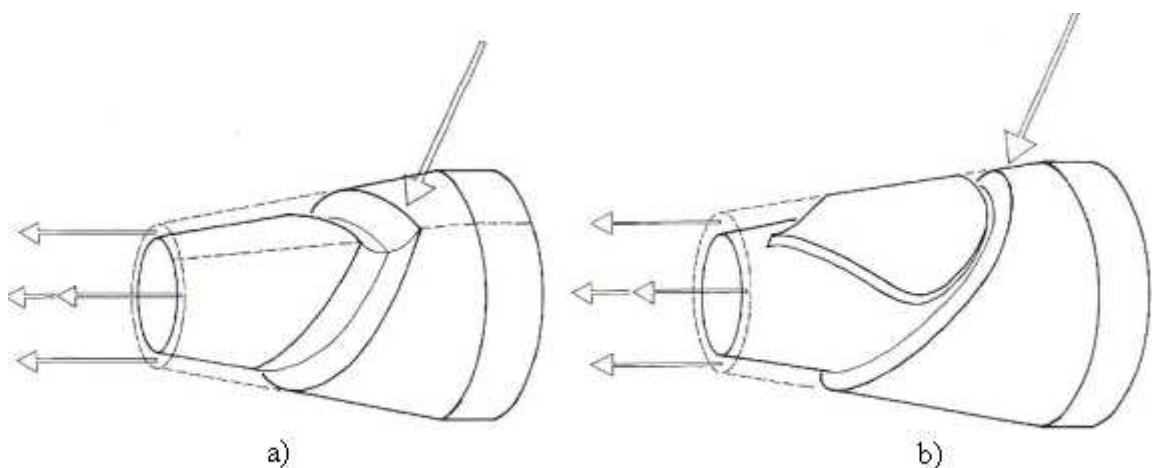
3.5.2 Ze strany plněná hlava

Ze strany plněná hlava je v podstatě plochá hlava, která je stočena tak, že výstupní štěrbinu je kruhová. Tato hlava vytváří pouze jednu stokovou čáru (u trnu s rozvodným kanálem ve tvaru srdce), v místě naproti plnicího otvoru. Tavenina vstupuje ze strany a obtéká trn, ten je podepřen pod vstupním kanálem pro taveninu.



Obr. 39 Ze strany plněná hlava [6]

U těchto hlav je také nutné vyvážení toku, aby byla zajištěna dobrá distribuce taveniny. Snaha taveniny je tedy nejkratší cestou (přednostní tok kolem trnu na straně vstupu). [4,6]

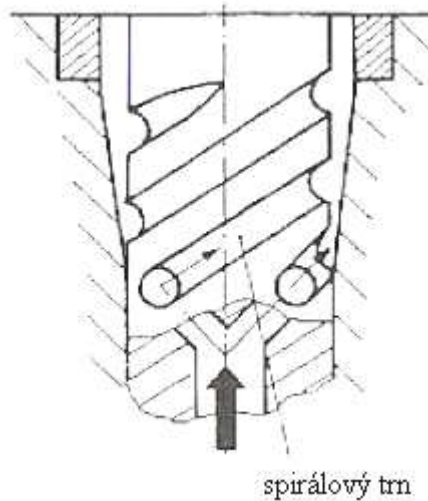


- a) trn s rozvodným kanálem ve tvaru ramínka na šaty
 b) trn s rozvodným kanálem ve tvaru srdce

Obr. 40 Trny ze strany plněných vytlačovacích hlav [6]

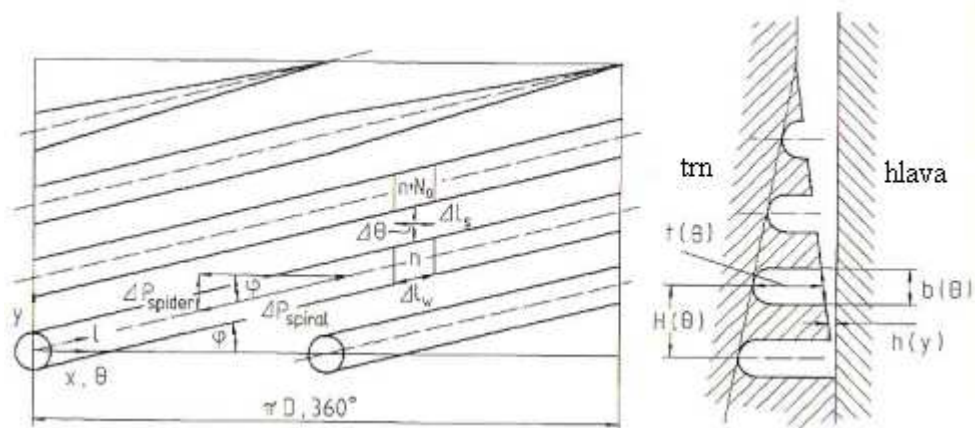
3.5.3 Hlava se spirálovým trnem

Tyto konstrukce jsou v současnosti s výhodami používané pro postupy s vysokým výkonem. Tavenina se do hlavy dostává axiálně, poté je radiálními kanály dopravována ke spirálovému trnu tak, aby se minimalizovala nejednotnost na výstupu z hlavy.



Obr. 41 Hlava se spirálovým trnem [6]

U tohoto typu hlavy dochází k intenzivnímu míchání. Tavenina teče ve spirále a zároveň může unikat v osové směru vlivem štěrbin mezi trnem a tělem hlavy (obr. 42). Stokové čáry mají lepší orientaci, než ostatní typy hlav.



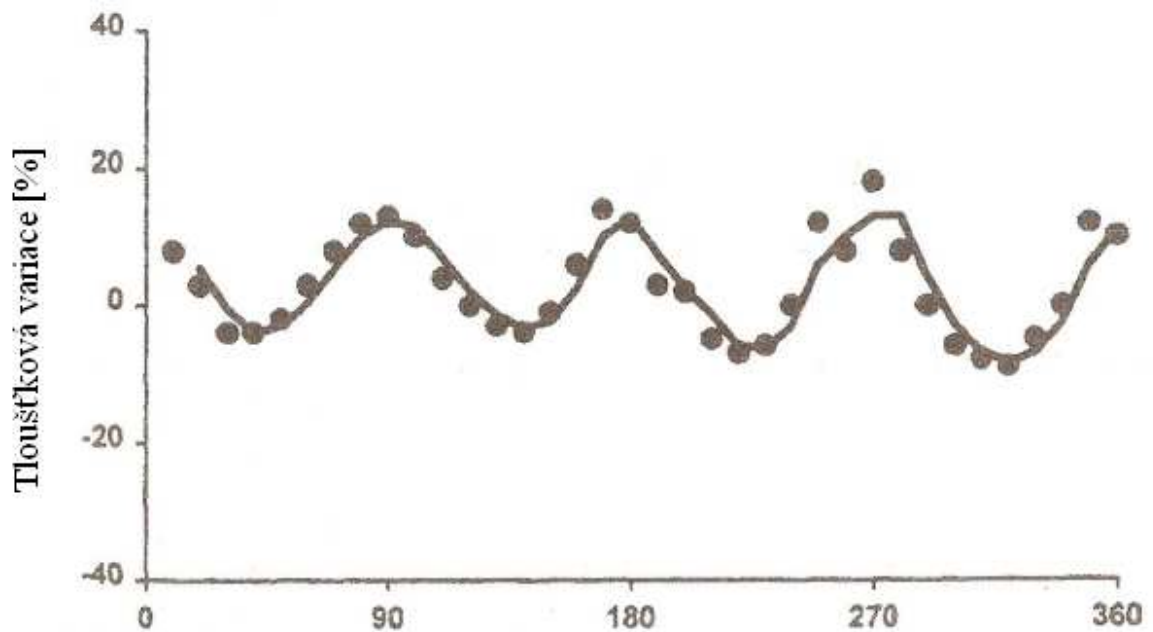
Obr. 42 Rozvinutá hlava se spirálovým trnem [6]

Základní charakteristiky:

- Počet spirál je 0,2 až 0,5 spirály na 1cm průměru trnu.
- Hloubka spirály klesá obvykle lineárně s její délkou.

- Průměr výstupní kruhové štěrbině je 20 mm až 2 m.
- Průtok je 0,5 až 1 kilogram za hodinu na 1 mm průměru výstupní štěrbině.

Při špatném návrhu spirál vznikají Port lines (kanálové čáry). Jsou jedním z typů stokových čar, které vznikají jako důsledek předčasného výtoku ze spirálového tokového kanálu. Řešení vytlačovacích hlav se spirálovým trnem přináší mnohé zlepšení při vyfukování fólií, avšak jejich řešení při požadavku vyrovnaného průtoku není vůbec jednoduché. Nerovnoměrnosti se projeví v pulzaci, která má za následek nerovnoměrnou tloušťku fólie. [3,4,6]



Obr. 43 Kolísání tloušťky fólie [3]

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je vypracovat:

Teoretickou studii o procesu vytlačování

Návrh a konstrukce vytlačovací hlavy

Analýza návrhu vytlačovací hlavy pomocí programu Virtual extrusion laboratory.

Při řešení se bude vycházet z již vypracovaných návrhů a realizované vytlačovací hlavy určené pro výukové účely.

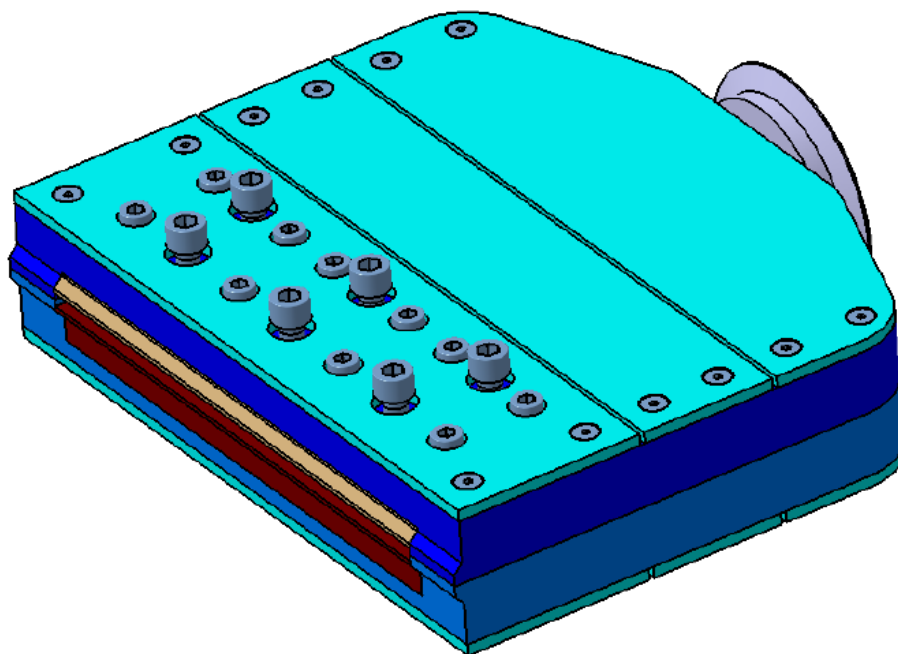
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 KONTROLOVANÝ TYP VYTLAČOVACÍ HLAVY

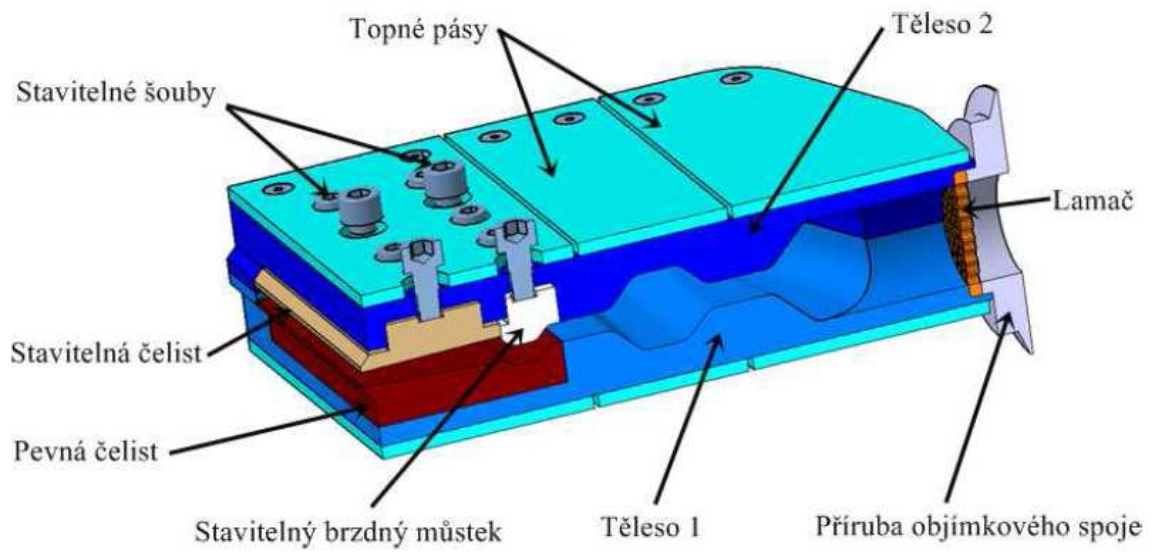
Pro celkovou náročnost vytvoření vytlačovacích hlav, ať už z hlediska návrhu, konstrukce, ověření funkčnosti ve virtuálních simulacích, nebo výroby byla převzata již navržená vytlačovací hlava, která je vyrobena a vystavena v dílnách UVI. Tyto modely hlav umožňují lépe pochopit problematiku vytlačovacích hlav ať už z hlediska distribuce taveniny, uchycení vytlačovací hlavy na stroj, nebo také možnosti regulace tloušťky výsledného produktu. Z hlediska kontroly v programu Virtual Extrusion laboratory byla zhodnocena širokoštěrbinová hlava.

5.1 Širokoštěrbinová vytlačovací hlava

Tyto hlavy slouží pro výrobu desek a fólií. Výroba širokoštěrbinové hlavy byla realizována v roce 2011 studentem Janem Lažou. [8] Hlava byla vyráběna s úmyslem vytvořit principiálně funkční model, který však bude sloužit pouze k výukovým účelům. Z tohoto důvodu je hlava vyrobená z PMMA. Tento materiál má dobré mechanické a optické vlastnosti, je čirý a bezbarvý i v silných vrstvách. Nejdříve byla hlava navržena v programu Catia V5 R18, následovalo vyhotovení CNC programů v softwaru NX 7.5 a poté byla realizována výroba jednotlivých částí a jejich montáž.



Obr. 44 Model vytlačovací hlavy vytvořený v Catii V5R18 [8]



Obr. 45 Řez vytlačovací hlavy s popisem hlavních částí [8]



Obr. 46 Vyrobený výukový model široko-štěrbinové vytlačovací hlavy [8]

6 ANALÝZA NÁVRHU

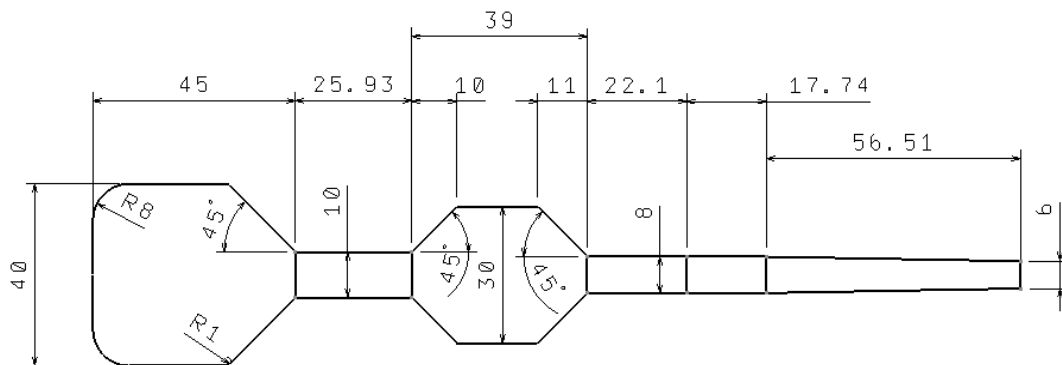
Pro analýzy návrhu vytlačovací hlavy byl využit program Virtual Extrusion Laboratory od společnosti Compuplast International a.s.[13] Program Virtual Extrusion Laboratory (dále jen VEL) je využíván při procesech vytlačování, vstřikování, vyfukování a tvarování. Nachází široké uplatnění při simulacích toku v různých typech hlav, nejčastěji ploché hlavy pro vytlačování desek a povlaků, spirálové hlavy pro výrobu tubulární fólie a trubek, profilové hlavy pro vytlačování nejrůznějších tvarů z plastů a pryže, ale také koextruzní hlavy pro současné vytlačování několika vrstev různých typů materiálů. Lze zde také simulovat návrh šnekového vytlačovacího stroje od jednoduchého provedení, až po velmi složité s více míchacími sekcemi nebo evakuační zónou. V modulu “extrusion calculator“ lze provést snadno a rychle charakteristiky toku v nejběžnějších typech tokových geometrií. S výhodou se používá jako praktická učební pomůcka pro pochopení simulace toku materiálu.

6.1 Analýza vyrobené široko-štěrbinové hlavy v modulu Flat die

Pro simulace toku v široko-štěrbinové hlavě byl využit modul Flat Die. Tento modul se zabývá problematikou toku materiálu v široko-štěrbinových hlavách zobrazovaných ve 2D prostředí. Před započítáním tvorby analýz bylo nutné vymodelovat vytlačovací hlavu v příslušném modulu tak, aby odpovídala, popřípadě se maximálně přibližovala reálné geometrii. S ohledem na tvorbu sítě v tomto modulu musela být provedena úprava geometrie. Nebylo možné vytvořit identické zaoblení v zásobovacím kanále a také zde bylo nutné vytvořit symetrickou verzi regulovatelného brzdného můstku a výstupní štěrbinu.

6.1.1 Tvorba tokové geometrie – Die geometry

Vytlačovací hlava se od modelu ve VELu lišila drobnými úpravami. V záložce Die geometry je vytvořena geometrie vytlačovací hlavy, její rozměry jsou uvedeny na obr. 47.

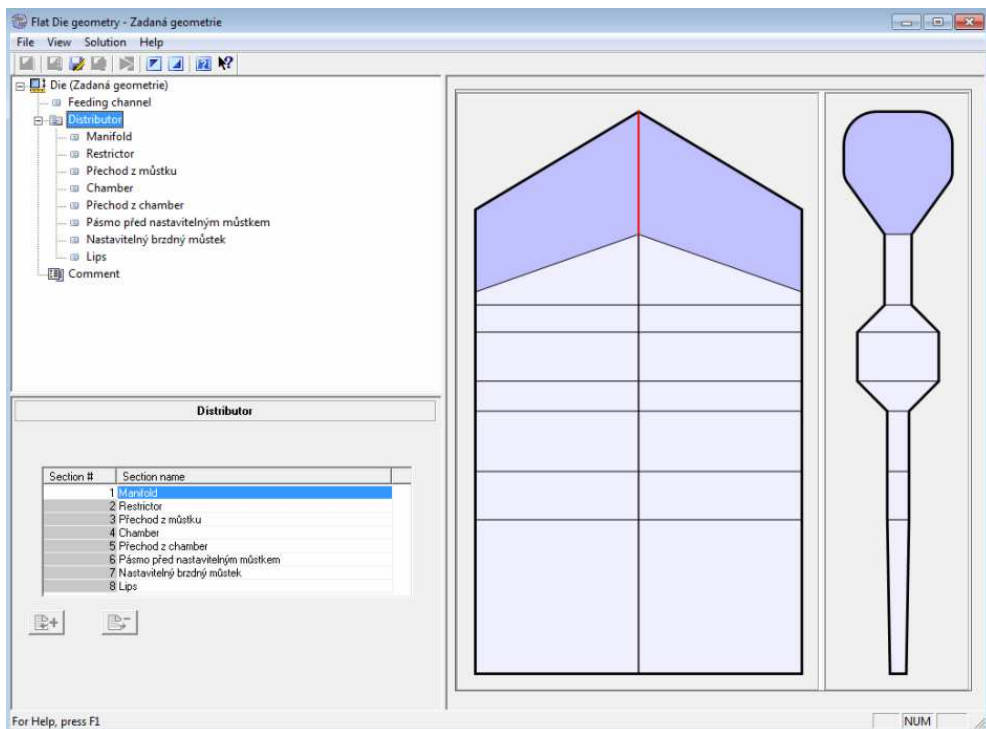


Obr. 47 Rozměry tokových kanálů vylačovací hlavy

Základní rozměry pro definici plnicího kanálu:

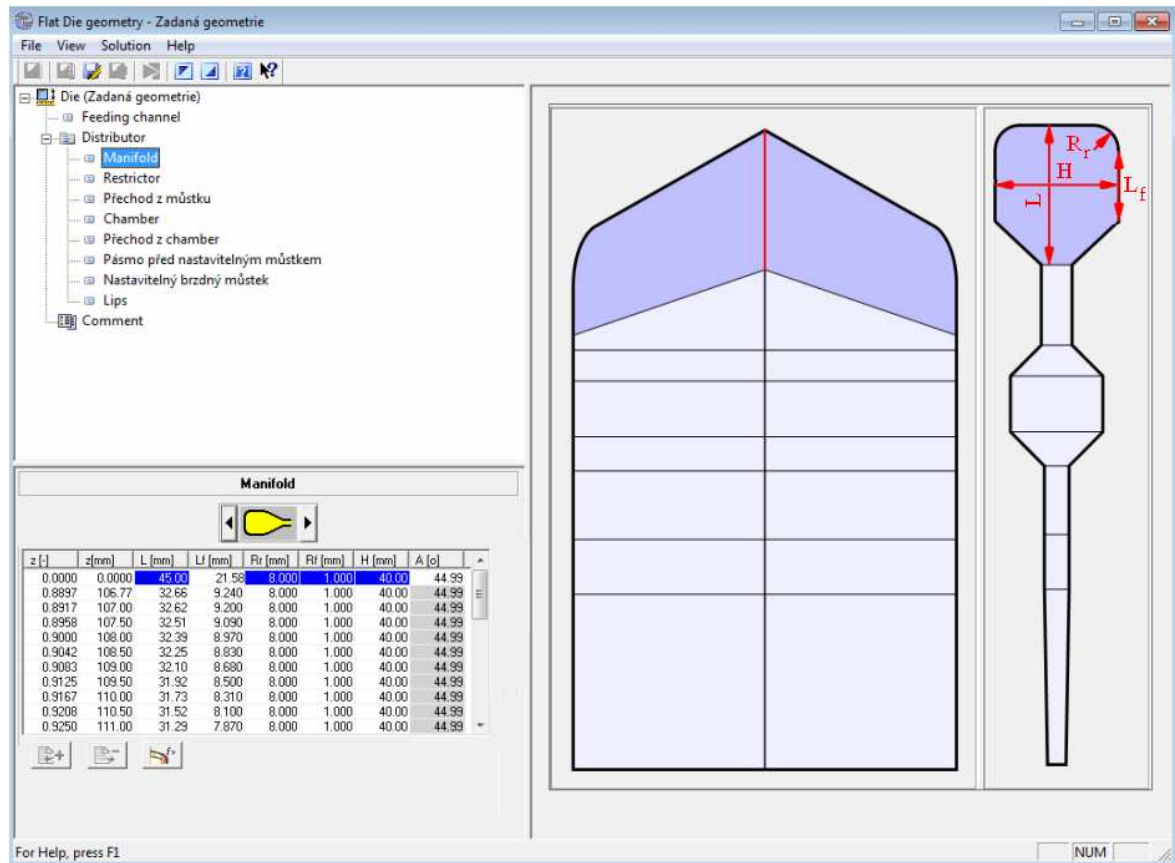
- Šířka výstupní štěrbině 240 mm
- Průměr plnicího kanálu 40 mm
- Délka plnicího kanálu 31,46 mm
- Výstupní rádius plnicího kanálu 2 mm

Pro vytvoření geometrie hlavy bylo nutné zvolit počet sekcí po celé délce hlavy v záložce Distributor. Všechny fáze jsou vidět na obrázku 48.



Obr. 48 Rozdělení vylačovací hlavy na příslušný počet sekcí

Na základě geometrie vyrobeného modelu byl proveden návrh zásobovacího kanálu při využití softwaru Catia V5R18. Zde bylo vytvořeno zaoblení a na něm vyhovující počet bodů. Souřadnice bodů byly použity při konstrukci ve VELu. Tyto body byly propojeny a vzniklo zaoblení.



Obr. 49 Návrh zásobovacího kanálu

Restrictor neboli brzdny můstek byl volen ve tvaru „ramínka na šaty“. Vstupní úhel na brzdny můstek má hodnotu 45° , šířka štěrbinu brzdného můstku má hodnotu 10mm. Určením délky brzdného můstku ve středu a na krajích je vytvořen jeho požadovaný tvar.

Další sekcí je Chamber (relaxační kanál), který má šířku štěrbinu 30mm a délku i s přechodovými sekcemi 39mm. Vstupní přechodová část má rozměr $10 \times 45^\circ$. Výstupní přechodová část má rozměry $11 \times 45^\circ$.

Před výstupní štěrbinou jsou dvě sekce a to: Pásmo před nastavitelným můstkem a Nastavitelný brzdny můstek. Nastavitelný brzdny můstek umožňuje regulaci průtoku při změně tloušťky výstupní štěrbinu. Šířka jeho štěrbinu je nastavena stejná, jako sekce před ním, tedy 8mm. Délka pásma před nastavitelným můstkem je 22,1mm a délka nastavitelného

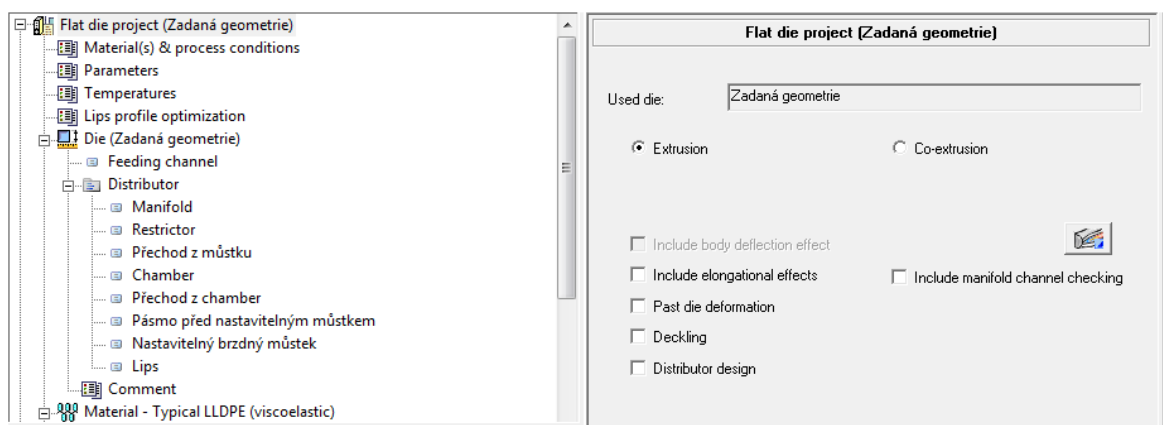
brzdného můstku je 17,74mm. Nastavitelný brzdny můstek je nutné vytvořit symetrický, jelikož modul Flat die nepodporuje tvorbu asymetrických tvarů.

Výstupní šterbina udává výsledny tvar a tloušťku vytlačovaného produktu. Má regulovatelnou šířku. Pro defaultní analýzu byla stanovena šířka 6mm a délka kanálu výstupní šterbiny 56,51mm. Rozměry všech uvedených částí jsou znázorněny na obrázku 47.

6.1.2 Volba materiálu a procesních podmínek – Project data

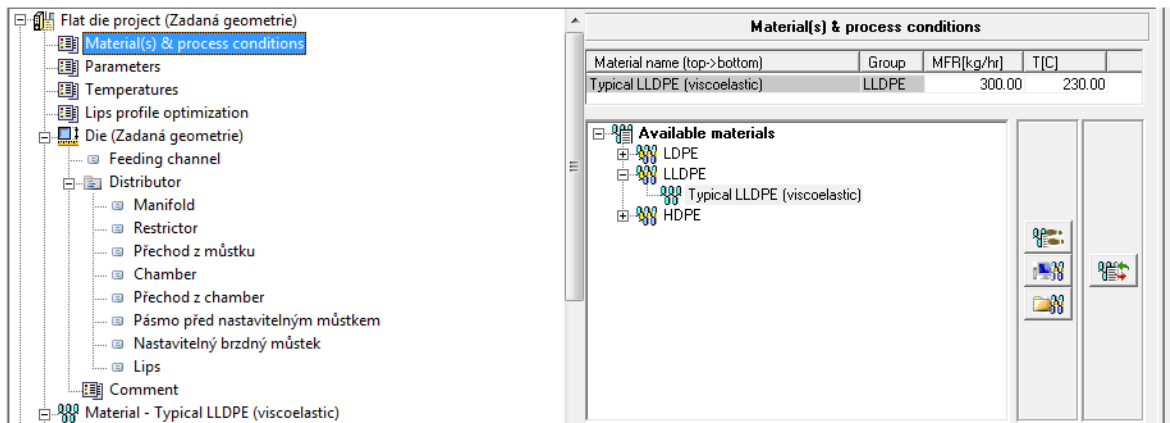
Po vytvoření tokové geometrie vytlačovací hlavy je v záložce Project data provedena volba materiálu a procesních podmínek. Pro defaultní nastavení analýzy zadané hlavy byly voleny smyšlené hodnoty, které mají prokázat, zda je zadaná geometrie hlavy funkční, nebo ne.

V první záložce Flat die project je nastaven druh vytlačování, tedy vytlačování jednoho materiálu (ne co-extruze). Dále je zde možnost zahrnout do výpočtu elongační efekty, deformace hlavy, obložení, kontrolu zásobovacího kanálu (manifold), nebo funkci Distributor design, která pomáhá automaticky navrhovat zásobovací kanál a brzdny můstek.



Obr. 50 Flat die project

V záložce Materials a process conditions je nastaven typ vytlačovaného materiálu, jeho hmotnostní průtok a teplota. Jako vytlačovaný materiál byl zvolen LLDPE z databáze programu VEL. Tento materiál má předdefinované vlastnosti včetně teploty zpracování. Zvolená teplota zpracování (referenční teplota) je 230°C, hmotnostní průtok (MFR) je 300kg/h.



Obr. 51 Materiál a procesní podmínky

V další záložce Parameters lze nastavit počet iterací (zpřesnění vypočtených výsledků), počet dílů na které je vytlačovací hlava rozdělena, nebo typ výpočtu.

Záložka Temperatures umožňuje zadávat teploty topných pásů v dílčích místech celé vytlačovací hlavy. V defaultním nastavení byla nastavena konstantní teplota 230°C.

V záložce Lips profile optimization (optimalizace výstupní štěrbinu) lze upravit výstupní štěrbinu tak, aby nedocházelo k variaci v tloušťce. Při prvotním výpočtu jsou hodnoty šířky štěrbinu nezměněny.

Pokud jsou materiál a procesní podmínky definovány, je možné provést analýzu vytlačovací hlavy. Hodnoty, které musí být pro daný materiál splněny, jsou uvedeny v záložce Checking parameters.

Checking parameters		
Maximum pressure.....	20.00	MPa
Minimum Shear rate.....	8.000	1/s
Minimum Shear Stress.....	30.00	kPa
Maximum Shear stress.....	140.00	kPa
Zig-zag Shear stress.....	60.00	kPa
Maximum Elongation rate.....	50.00	1/s
Maximum Elongation stress.....	200.00	kPa
Maximum T total stress.....	400.00	kPa
Minimum Shear stress for dispersion.....	40.00	kPa
Minimum Elongational stress for dispersion.....	10.00	kPa

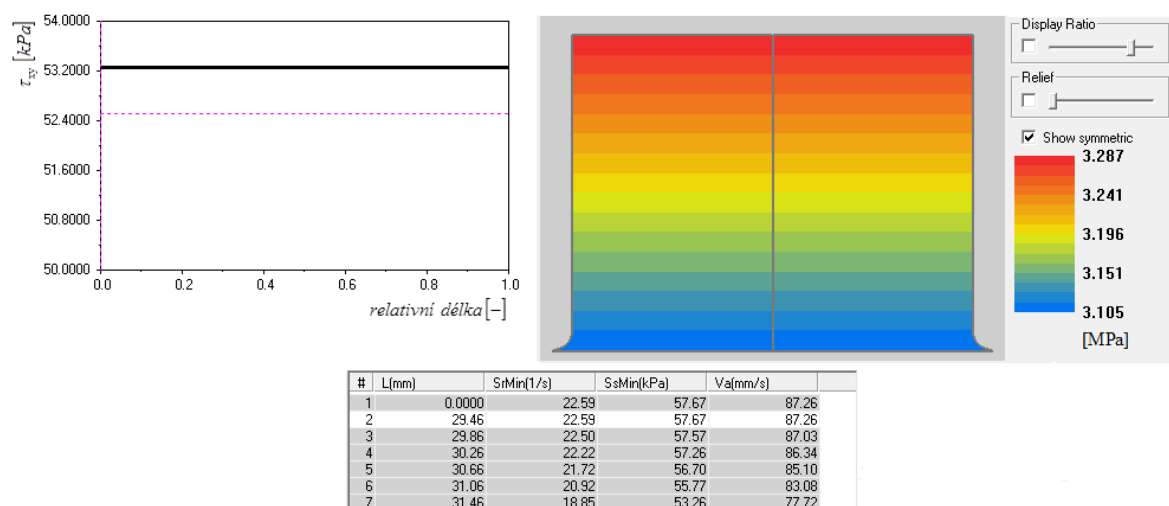
Obr. 52 Materiálové parametry

6.1.3 Výsledky zadané vytlačovací hlavy

Po spuštění výpočtu pod tlačítkem Solve jsou vypočteny tokové vlastnosti vytlačovací hlavy pro daný materiál a dané procesní podmínky. V záložce Results jsou všechny vyhodnocené parametry. Zjišťovat lze tokové vlastnosti v plnicím kanále, tokové vlastnosti na konci vytlačovací hlavy, tokové vlastnosti napříč vytlačovací hlavou ve všech sekcích, vlastnosti podél vytlačovací hlavy, nebo tokové vlastnosti po šířce tokové štěrbiny všech sekcí vytlačovací hlavy.

6.1.4 Zhodnocení výsledků

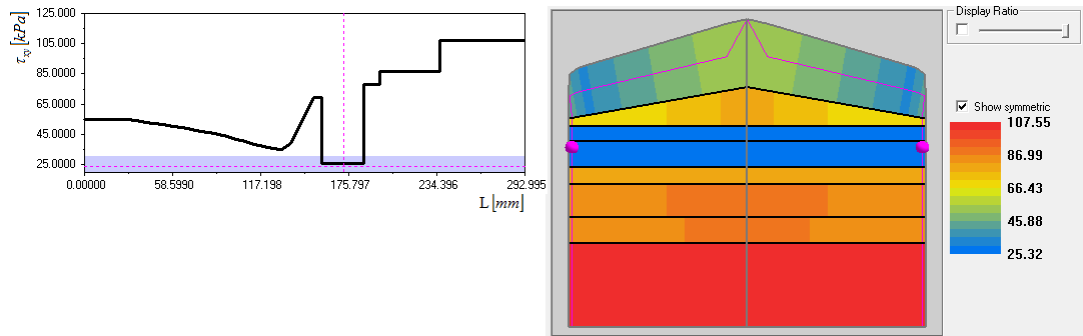
Počáteční kontrola je zaměřena na plnicí kanál zde musí být splněno, že smykové napětí τ_{xy} , rychlost smykové deformace $\dot{\gamma}$ a tlak budou v povolených hodnotách (povolené hodnoty jsou uvedeny na obr. 52).



Obr. 53 Výsledky toku plnicím kanálem

Z grafu a tabulky je zřejmé, že smykové napětí na stěně se pohybuje v intervalu 30-140 kPa, rychlost smykové deformace je vyšší, než 8s^{-1} a tlak se pohybuje pod hodnotou 20MPa. Plnicí kanál tedy vyhovuje všem podmínkám.

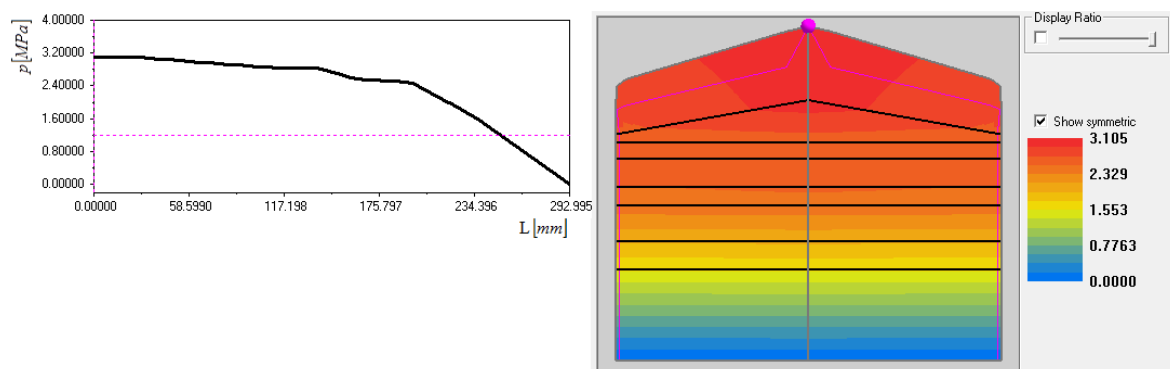
Další kontrolované úseky byly prověřovány současně po celé délce profilu vytlačovací hlavy. Smykové napětí bylo zjišťováno u stěny, kde se očekávají jeho lokální maxima či minima a kde se také předpokládají největší zdržné doby.



Obr. 54 Smykové napětí po délce vytlačovací hlavy

Z obrázku 54 je vidět, že smykové napětí na stěně dosahuje v přechodu z můstku a relaxčním kanále hodnot kolem 25 kPa. Zde bude docházet k nepříznivému jevu degradace materiálu.

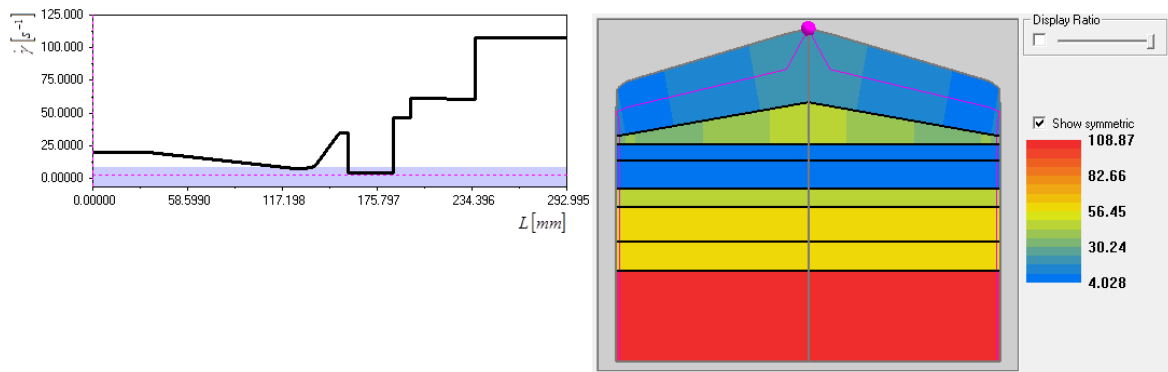
Při kontrole tlaku ve vytlačovací hlavě byla zvolena pozice uprostřed.



Obr. 55 Tlaková ztráta po délce vytlačovací hlavy

Na obrázku 55 je patrné, že maximální tlak dosahuje hodnot přes 3 MPa. Podmínka maximálního tlaku ve vytlačovací hlavě ($p_{\max}=20\text{MPa}$) je tedy splněna.

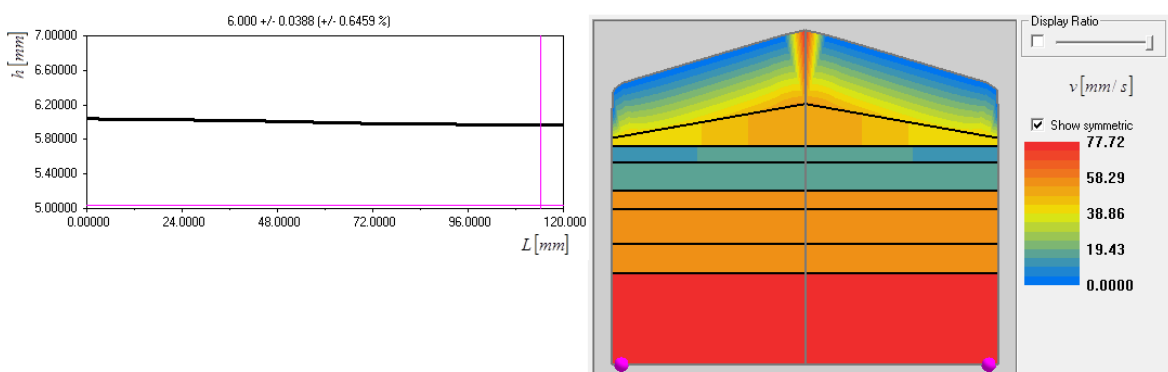
Další kontrolovanou veličinou po délce vytlačovací hlavy je rychlost smykové deformace. Pro kontrolu byla zvolena pozice u stěny, kde se opět předpokládají kritické hodnoty.



Obr. 56 Rychlost smykové deformace po délce vytlačovací hlavy

Rychlost smykové deformace $\dot{\gamma}$ dosahuje v rozvodném kanále, přechodu z můstku a v relaxačním kanále hodnot nižších, než je přípustná minimální hodnota $8s^{-1}$. V těchto místech bude tavenina degradovat.

Poslední a zásadní vliv na funkci hlavy má variace v tloušťce. Ta určuje procentuální změnu tloušťky po délce vytlačovaného produktu. Variace v tloušťce byla zjišťována po délce výstupní štěrbině na konci vytlačovací hlavy.



Obr. 57 Rychlostní přerozdělení po délce hlavy a variace v tloušťce

Z obrázku 57 je patrné, jak se rychlostní tok vlivem všech částí hlavy přerozděluje a tvoří tak na konci vytlačovací hlavy konstantní rychlostní profil. Rychlostní profil se mění ještě za brzdým můstkem, což poukazuje na neefektivní funkci brzdého můstku. Zjištěná variace v tloušťce je 0,6459%, což je vzhledem k celkové tloušťce produktu zanedbatelné.

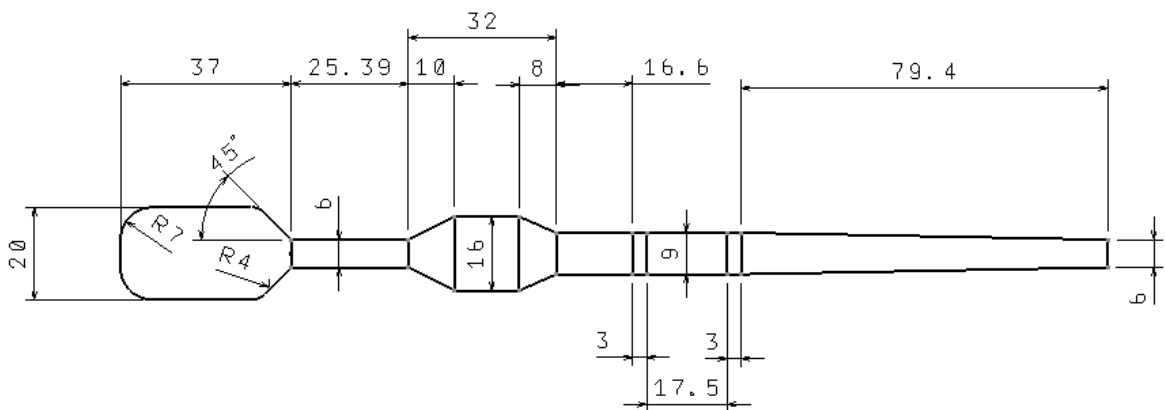
6.1.5 Závěr

Vyrobený model široko-štěrbinové hlavy z hlediska zadaných materiálových parametrů nevyhovuje. Hlavní vliv na špatnou funkci vytlačovací hlavy má tvar a velikost rozvodného

a relaxačního kanálu. V těchto místech byly zjištěny nízké hodnoty smykového napětí a smykové deformace, které vedou k degradaci materiálu. V neposlední řadě je nutné také uvažovat špatnou funkci brzdného můstku, respektive jeho neúplné rychlostní přerozdělení toku taveniny. Dá se předpokládat, že hlava bude vykazovat lepší vlastnosti při vyšším hmotnostním průtoku.

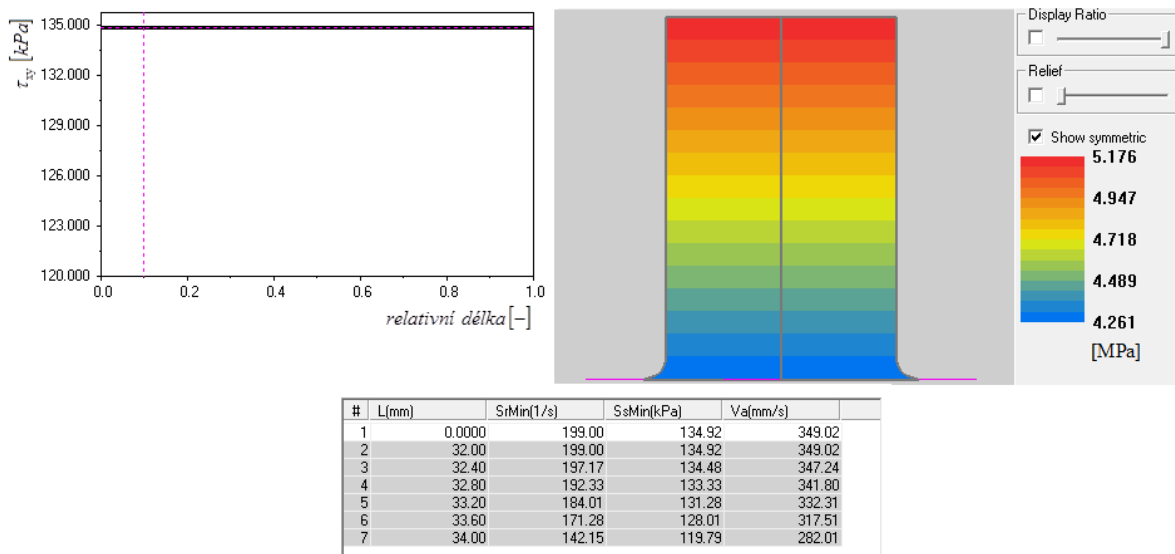
6.2 Optimalizace široko-štěrbínové hlavy v modulu Flat die

Předcházející řešení vytlačovací hlavy nevyhovovalo zadaným procesním parametrům. Proto byla upravena její geometrie, čímž bylo dosaženo splnění všech materiálových podmínek (obr. 52). Procesní podmínky i materiál je totožný jako u předcházející vytlačovací hlavy.



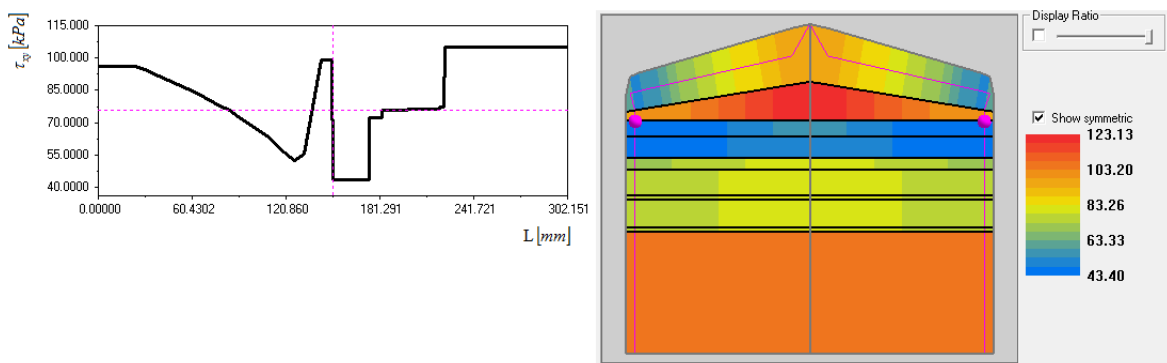
Obr. 58 Profil optimalizované vytlačovací hlavy

Profil vytlačovací hlavy byl změněn tak, aby nedocházelo k degradaci materiálu, nebo k nepříznivému jevu žraločí kůže (Shark skin) ve zmiňovaných sekcích. Jeho geometrie je znázorněna na obr. 58.



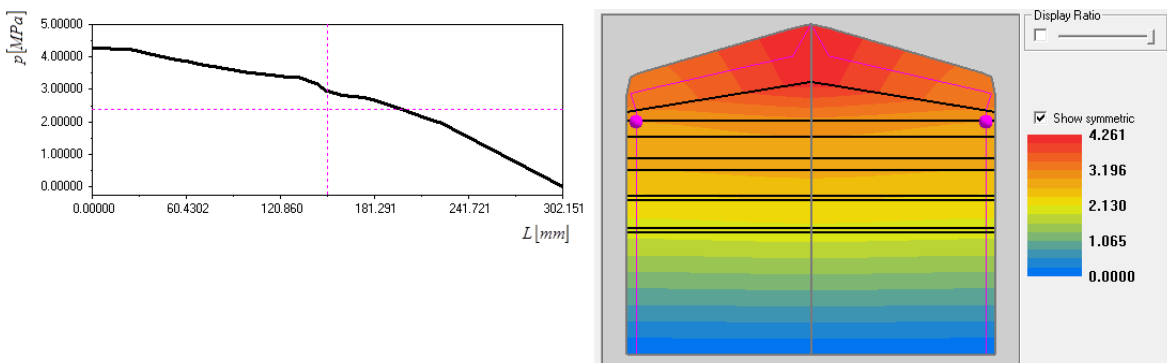
Obr. 59 Výsledky toku plnicím kanálem- optimalizovaná hlava

Průměr plnicího kanálu byl změněn, Na obr. 59 jsou uvedeny hodnoty smykového napětí, smykové deformace a tlaku, po úpravách geometrie jsou všechny podmínky splněny.



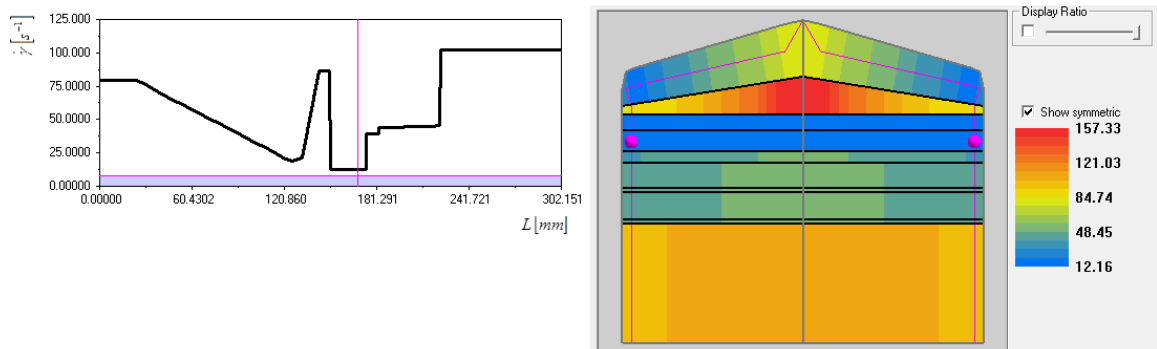
Obr. 60 Smykové napětí po délce optimalizované vytlačovací hlavy

Optimalizovaná hlava byla opět prověřena po celé délce tokového profilu. Z hlediska splnění povolených hodnot smykového napětí je upravená vytlačovací hlava vyhovující.



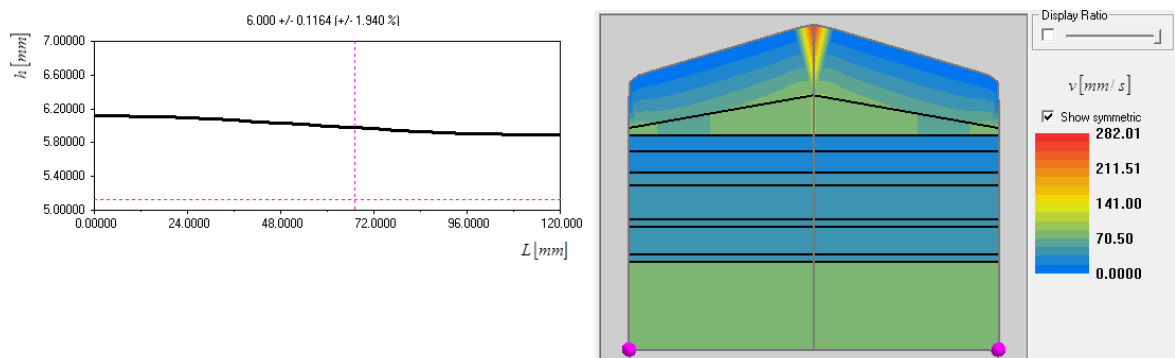
Obr. 61 Tlaková ztráta po délce optimalizované vytlačovací hlavy

Tlakové hodnoty jsou jednoznačně pod povolenou hodnotou 20MPa což je znázorněno na obr. 61.



Obr. 62 Rychlost smykové deformace po délce optimalizované vytlačovací hlavy

Hodnoty rychlosti smykové deformace se vlivem úpravy geometrie hlavy dostaly nad povolenou mez, tedy $8s^{-1}$, což zaručuje, že ve vytlačovací hlavě nebude materiál degradovat.



Obr. 63 Rychlostní přerozdělení po délce optimalizované hlavy a variace v tloušťce

Na obr. 63 je vidět, že rychlost taveniny oproti neoptimalizované hlavě je téměř čtyřnásobná. Za brzdým můstkem je docíleno konstantního rychlostního profilu, variace v tloušťce se zvýšila, avšak z hlediska běžných hodnot při vytlačování desek a fólií (kolem 3%) je hodnota variace v tloušťce 1,94% akceptovatelná.

6.2.1 Závěr

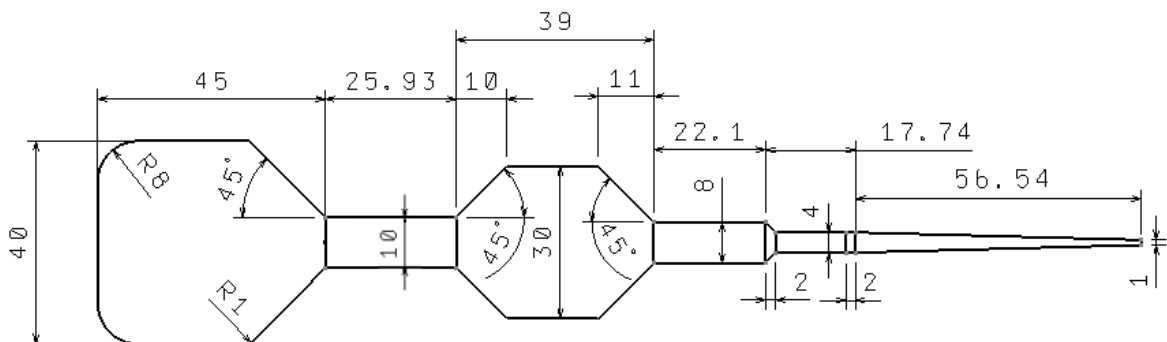
Optimalizovaná geometrie vytlačovací hlavy dle obr. 58 z hlediska zadaných materiálových parametrů vyhovuje. V hlavě nevznikají kritické hodnoty tlaku a nedochází zde ani k degradaci nebo k poruchám typu Shark skin.

6.3 Regulace šířky výstupní štěrbinvy vyrobené vytlačovací hlavy v modulu Flat die

V předchozích analýzách byly prováděny simulace vytlačování produktu o tloušťce 6mm. Vytlačovací hlava je však konstruována tak, aby se šířka výstupní štěrbinvy dala regulovat v rozsahu od 1 do 7 mm. Geometrie vytlačovací hlavy zůstává stejná jako v kapitole 6.1, mění se pouze tvar regulovatelného brzdného můstku a šířka výstupní štěrbinvy. Průměr plnicího kanálu zůstává konstantní, tedy 40mm. Hmotnostní průtok (MFR) je měněn v závislosti na materiálových podmínkách tak, aby nedocházelo k degradaci v plnicím kanále. Geometrie profilu vytlačovací hlavy pro jednotlivé tloušťky vytlačovaného produktu jsou uvedeny na obr. 64 – 70.

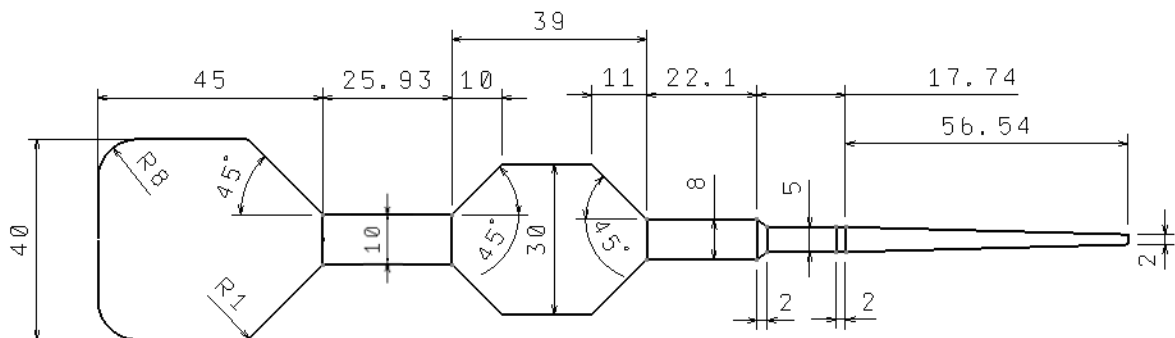
- Minimální hmotnostní průtok pro průměr plnicího kanálu 40 mm je 132kg/h.
- Teplota LLDPE při vytlačování pro všechny šířky výstupní štěrbinvy je 230°C.

- **Šířka výstupní štěrbinvy 1mm**



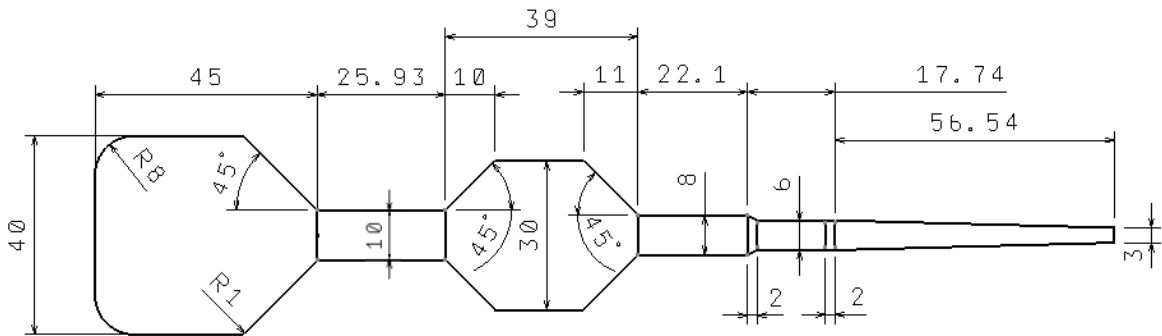
Obr. 64 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 1mm

- **Šířka výstupní štěrbinvy 2mm**



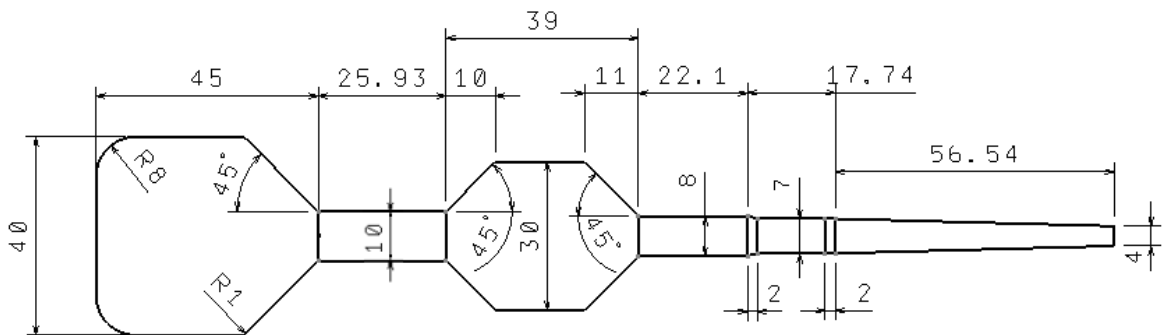
Obr. 65 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 2mm

- Šířka výstupní štěrbinou 3mm



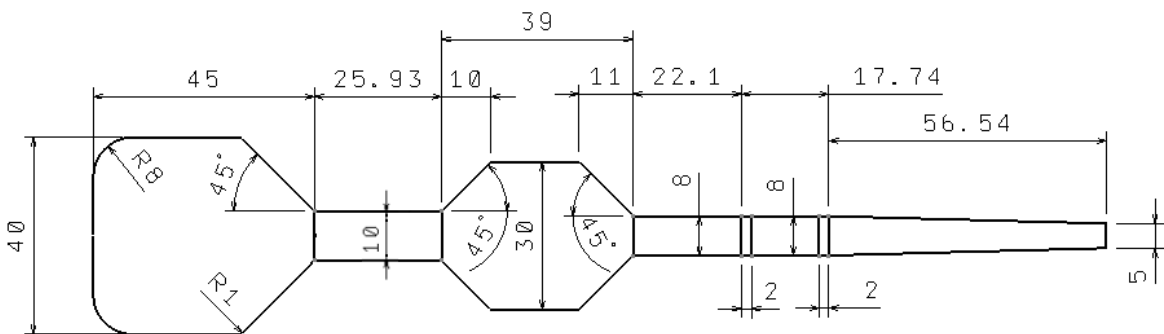
Obr. 66 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 3mm

- Šířka výstupní štěrbinou 4mm



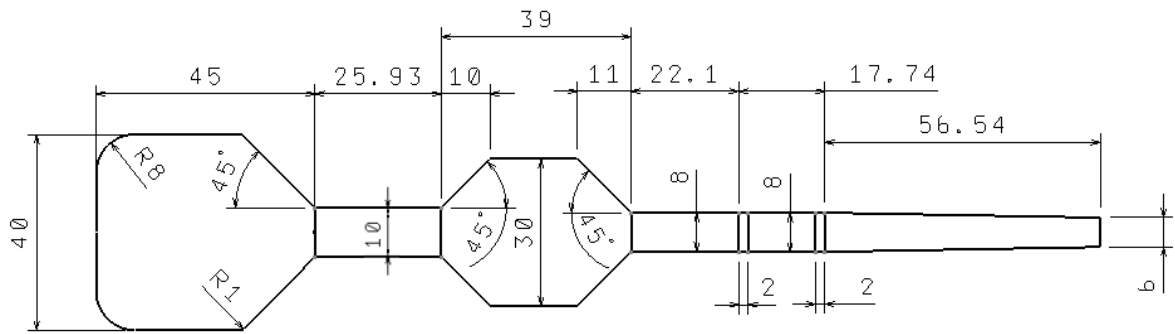
Obr. 67 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 4mm

- Šířka výstupní štěrbinou 5mm



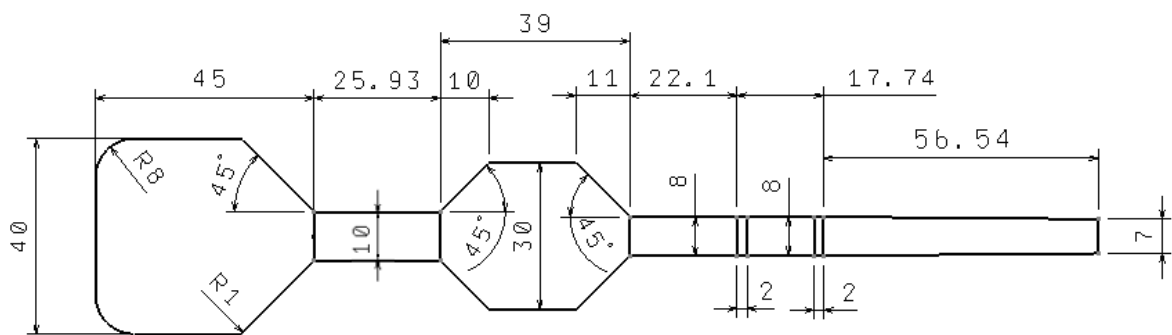
Obr. 68 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 5mm

- Šířka výstupní štěrbinou 6mm



Obr. 69 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 6mm

- Šířka výstupní štěrbinou 7mm

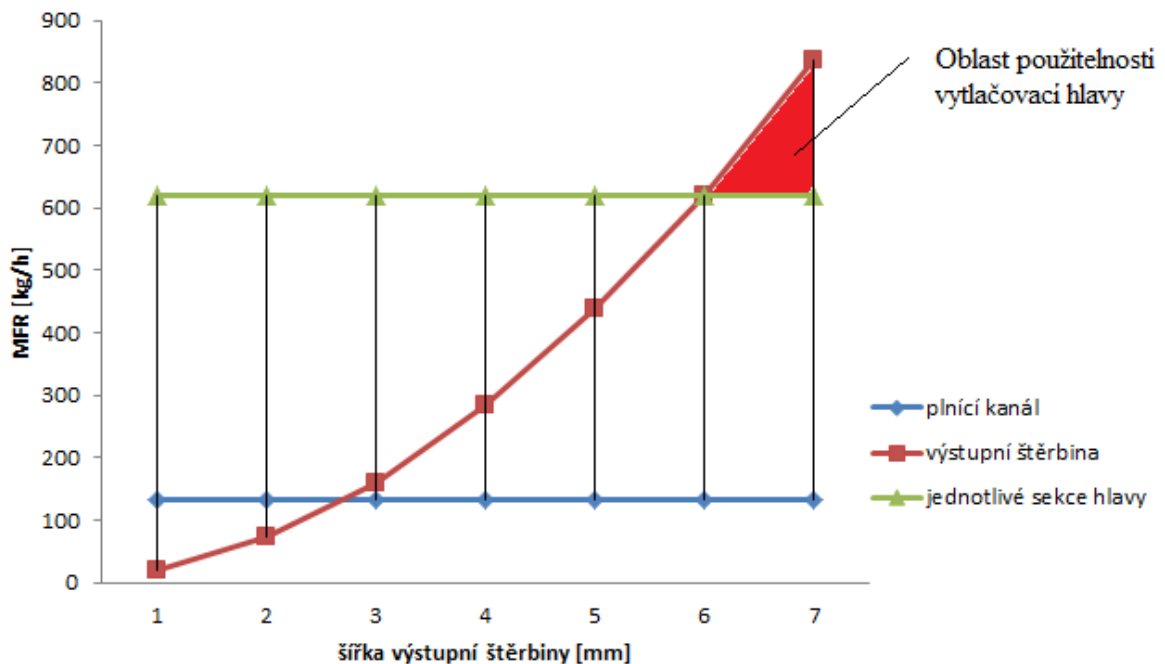


Obr. 70 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 7mm

6.3.1 Zhodnocení použitelnosti hlavy pro různé tloušťky vytlačovaného produktu

Při analýze možných změn rozměrů výstupní štěrbinou bylo zjištěno, že funkčnost a univerzálnost hlavy vytvořit různé tloušťky vytlačovaného produktu je velmi omezená. Při simulacích byl hmotnostní průtok nejdříve volen nejnižší možný tak, aby nedocházelo k degradaci v plnicím kanále. Následně byly provedeny simulace toku hlavou pro zjištění největšího možného hmotnostního průtoku výstupní štěrbinou. Závěrem pak byla zjištěna minimální hodnota hmotnostního průtoku v jednotlivých sekcích vytlačovací hlavy mezi plnicím kanálem a výstupní štěrbinou. Při simulacích byly minimální a maximální hodnoty MFR určovány z hlediska dovolených hodnot smykového napětí a rychlosti smykové deformace. Tyto simulace byly provedeny pro každou šířku štěrbinou zvlášť a výsledné hodnoty byly vyneseny do grafu. Z analýz a grafu zadané vytlačovací hlavy vyplývá, že pro správnou funkci bez vzniku nežádoucích vlastností produktu, včetně degradace, je nutné vytvořit hmotnostní průtok nejméně 618kg/h. Vzhledem k uvedené hodnotě lze usoudit, že zadaná vytlačovací hlava není schopná vytvořit libovolné tloušťky produktu dle regulace

výstupní štěrbině. Vytlačovací hlava umožňuje vytlačovat pouze tloušťku 6 až 7 mm při stejném nebo vyšším hmotnostním průtoku než 618kg/h.

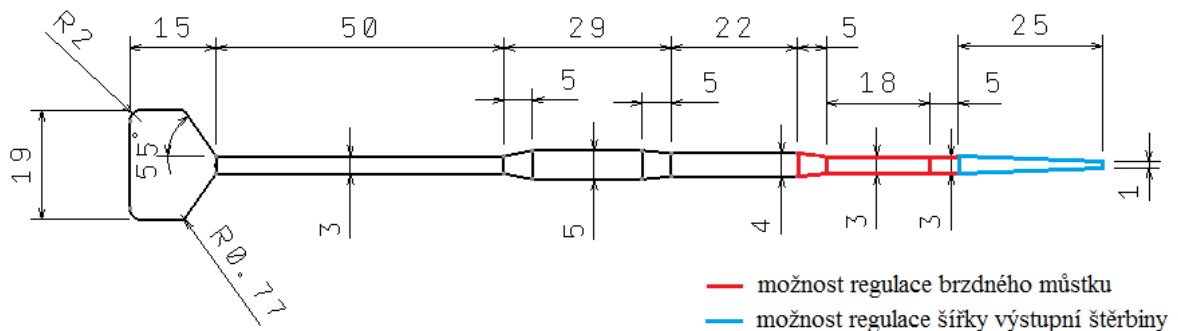


Obr. 71 Hmotnostní průtoky v závislosti na tloušťce výstupní štěrbině

6.4 Regulace šířky výstupní štěrbině optimalizované vytlačovací hlavy v modulu Flat die

Vyrobená vytlačovací hlava neodpovídá parametrům, pro které byla vyrobena, a její použití by bylo jen velmi omezené. Proto v této kapitole bylo na snaze vytvořit hlavu, která bude vytlačovat produkty v požadovaných tloušťkách v rozmezí od 1 do 7mm a současně bude splňovat materiálové podmínky. Při návrzích geometrie hlavy a následných analýzách však bylo zjištěno, že variabilita šířky výstupní štěrbině je příliš velká a není možné vytvořit geometrii, která by vytlačovala materiál ve všech tloušťkách bez vzniku nežádoucích vad na produktu. Byly proto navrženy dvě vytlačovací hlavy s tloušťkami vytlačovaného profilu 1 - 3 mm a 4 - 7 mm.

6.4.1 Vytlačovací hlava s regulací výstupní štěrby od 1 do 3 mm



Obr. 72 Profil hlavy pro vytlačování tloušťky od 1 do 3 mm

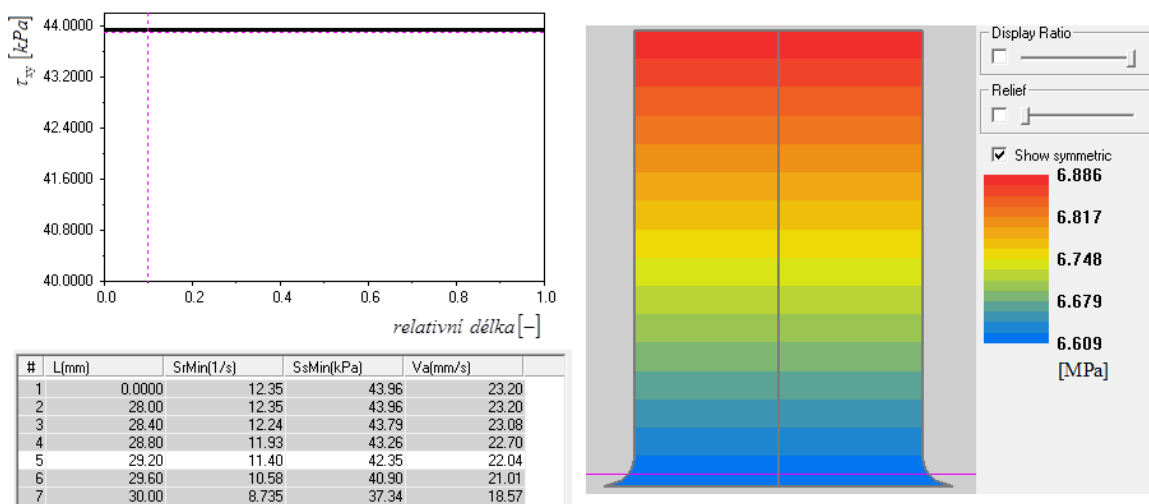
Na obr. 72 je profil tokového kanálu vytlačovací hlavy, která má regulovatelný brzdný můstek a šířku výstupní štěrby. Nejvíce omezené vytlačování vzhledem k hmotnostnímu průtoku má hlava nastavená pro vytlačování tloušťky 1mm.

6.4.2 Zhodnocení výsledků hlavy při vytlačování produktu o tloušťce 1mm

Vzhledem k základní zadané geometrii vytlačovací hlavy bylo nutno provést úpravu geometrie, především v oblasti zásobovacího kanálu. Zde při nízkém hmotnostním průtoku vznikala silná degradace, proto byl profil rozvodného kanálu zmenšen a přechodový úhel na brzdny můstek byl zvětšen na 55°, aby se co nejvíce přerozdělil tok ke kraji. Následné sekce (jejich geometrie) byly měněny tak, aby vyhovovaly materiálovým podmínkám. Kritickým místem je v návrhu taky relaxační kanál, který byl z důvodu vzniku degradace zmenšen. Tato změna však může na druhé straně vést k nedostatečné relaxaci napětí a na vytlačeném produktu tak mohou vznikat zamrzlá napětí, které způsobují deformace, vznik trhlin a stárnutí. Velmi důležitým parametrem pro vytlačování bez nežádoucích vlastností je tedy volba materiálu respektive jeho reologické vlastnosti. Pro analýzu byl opět použit materiál LLDPE. Teplota zpracování je 230°C, hmotnostní průtok (MFR) je 18kg/h

Základní rozměry pro definici plnicího kanálu:

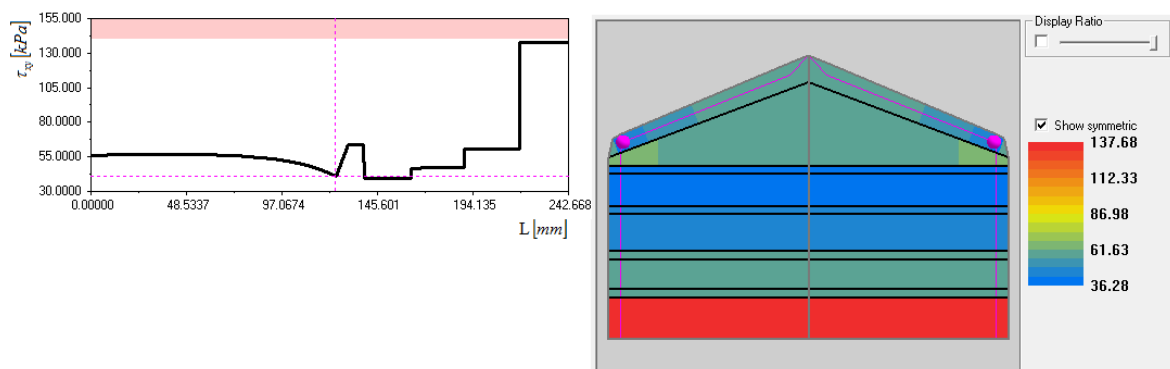
- Šířka výstupní štěrby 240 mm
- Průměr plnicího kanálu 19 mm
- Délka plnicího kanálu 30 mm
- Výstupní radius plnicího kanálu 2 mm



Obr. 73 Výsledky toku plnicím kanálem (štěrbina 1mm)

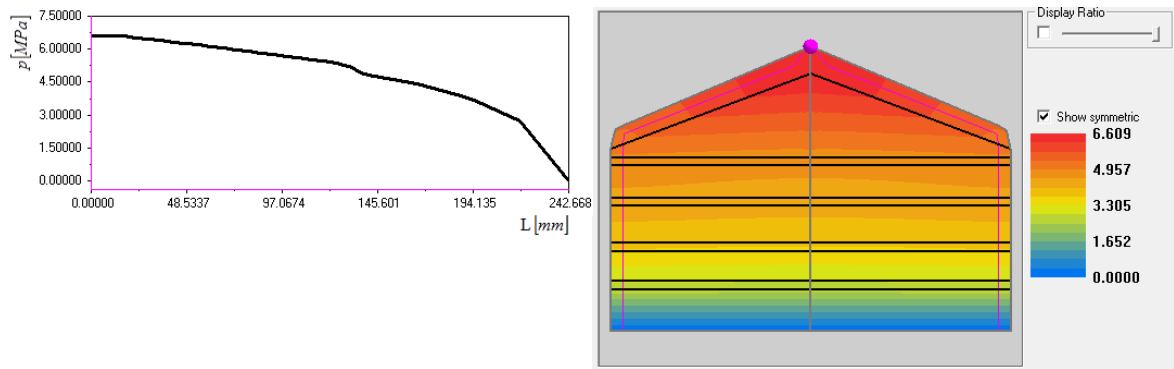
Z obr. 73 je vidět, že smykové napětí v plnicím kanále se pohybuje kolem 40kPa, rychlost smykové deformace je vyšší, než předepsaná minimální hodnota $8s^{-1}$. Tlak dosahuje hodnot kolem 7MPa. Dle materiálových parametrů (obr. 52) lze usuzovat, že plnicí kanál vyhovuje.

Další kontrolované úseky byly prověřovány současně po celé délce profilu analogicky, jako v kapitole 6.1.4.



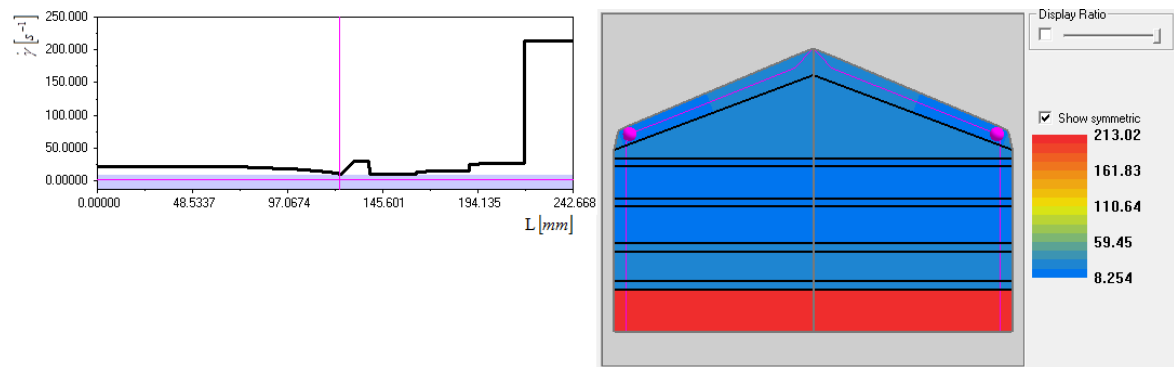
Obr. 74 Smykové napětí po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 1mm)

Z obr. 74 vyplývá, že smykové napětí ve výstupní štěrbině dosahuje hodnot těsně pod maximální povolenou hodnotou 140kPa, naopak v zásobovacím a relaxačním kanále dosahuje smykové napětí hodnot kolem dolní povolené hranice. Interval povolených hodnot 30-140kPa však je dodržen.



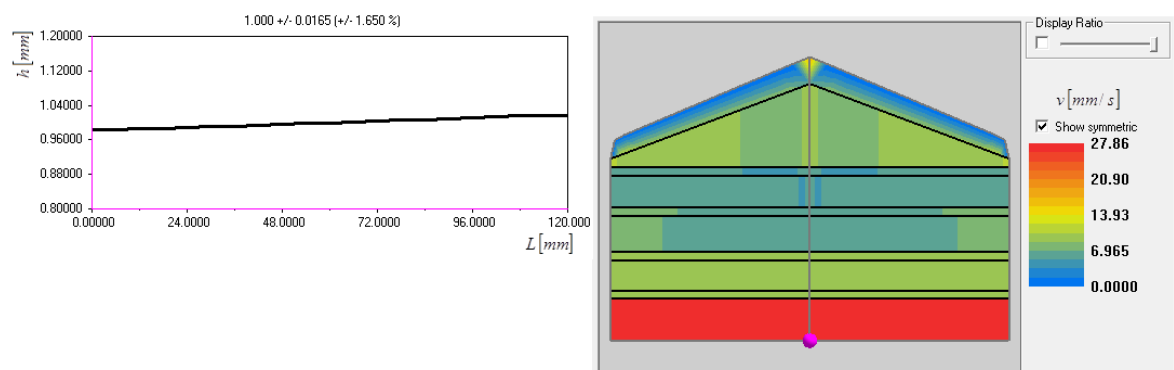
Obr. 75 Tlaková ztráta po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 1mm)

Tlak po délce vytlačovací hlavy je pod povolenou hodnotou 20MPa, podmínka hodnoty tlaku je tedy také splněna.



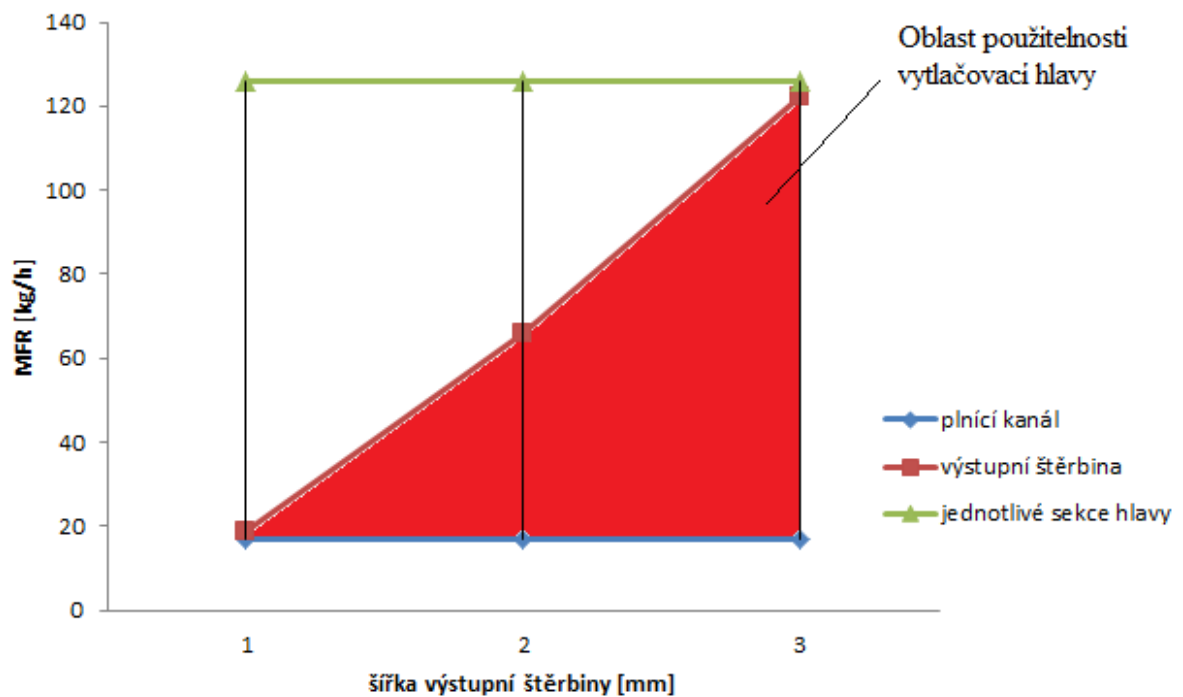
Obr. 76 Rychlost smykové deformace po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 1mm)

Rychlost smykové deformace $\dot{\gamma}$ je ve všech úsecích vytlačovací hlavy nad povolenou hodnotou $8s^{-1}$. Degradace vlivem nízké smykové deformace se po celé délce hlavy nevyskytuje.



Obr. 77 Rychlostní přerozdělení po délce hlavy a variace v tloušťce (štěrbina 1mm)

Na obr. 77 je rychlostní přerozdělení toku taveniny a variace v tloušťce. Variace v tloušťce je 1,65% což je 0,0165mm. Z hlediska vytlačování je tato tolerance vyhovující.

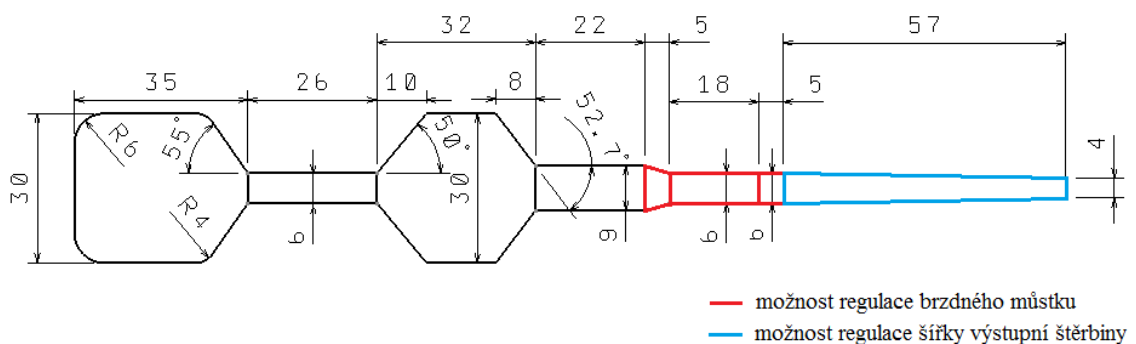


Obr. 78 Hmotnostní průtoky v závislosti na tloušťce výstupní štěrby (štěrbina 1-3mm)

6.4.3 Závěr

Návrh geometrie vytlačovací hlavy pro vytlačování tloušťky produktu od 1 do 3 mm procházel řadou úprav tak, aby byly splněny všechny materiálové podmínky a to ve všech regulovatelných tloušťkách. Z obr. 78 je patrné, že při tloušťce produktu 1mm je hmotnostní průtok velmi omezen. Se zvětšující se tloušťkou variabilita hmotnostního průtoku a tedy i množství vyrobeného produktu stoupá.

6.4.4 Vytlačovací hlava s regulací výstupní štěrby od 4 do 7 mm



Obr. 79 Profil hlavy pro vytlačování tloušťky od 4 do 7 mm

Na obr. 79 je profil tokového kanálu vytlačovací hlavy, která má regulovatelný brzdný můstek a šířku výstupní štěrby. Možnosti regulace výstupní štěrby jsou od 4 do 7 mm.

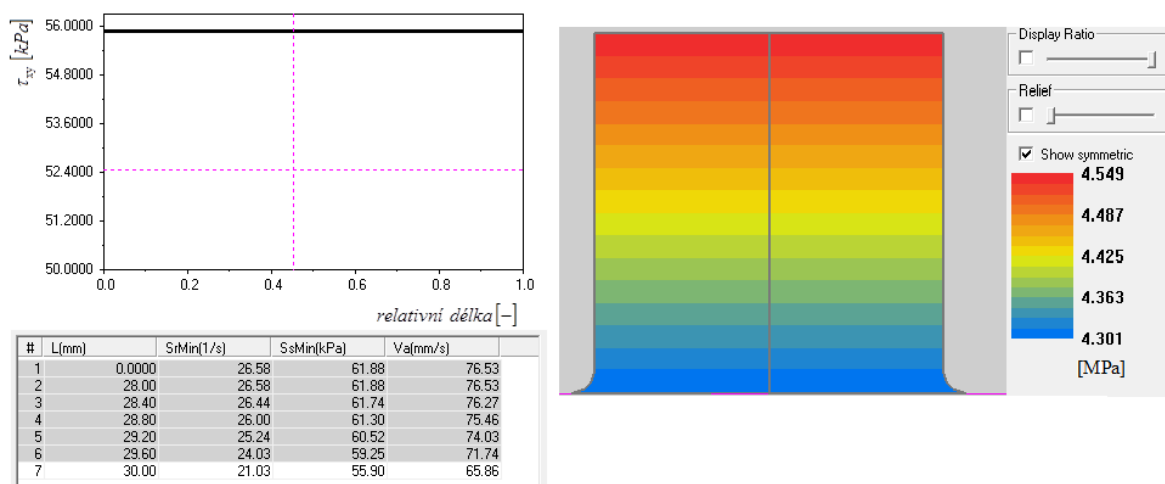
6.4.5 Zhodnocení výsledků hlavy při vytlačování produktu o tloušťce 4mm

Navržená geometrie byla optimalizována tak, aby umožnila vytlačování různých tloušťek produktů v intervalu od 4 do 7mm. Profil vzhledem k základní geometrii hlavy změnil průměr plnicího kanálu (stejný rozměr, jako hloubka zásobovacího kanálu) na 30 mm. Byl zde také zvětšen přechodový úhel na brzdný můstek, jehož hodnota je 55°. Další rozměry jsou vidět na obr. 79.

Pro analýzu byl použit materiál LLDPE. Teplota zpracování je 230°C, hmotnostní průtok (MFR) je 148kg/h

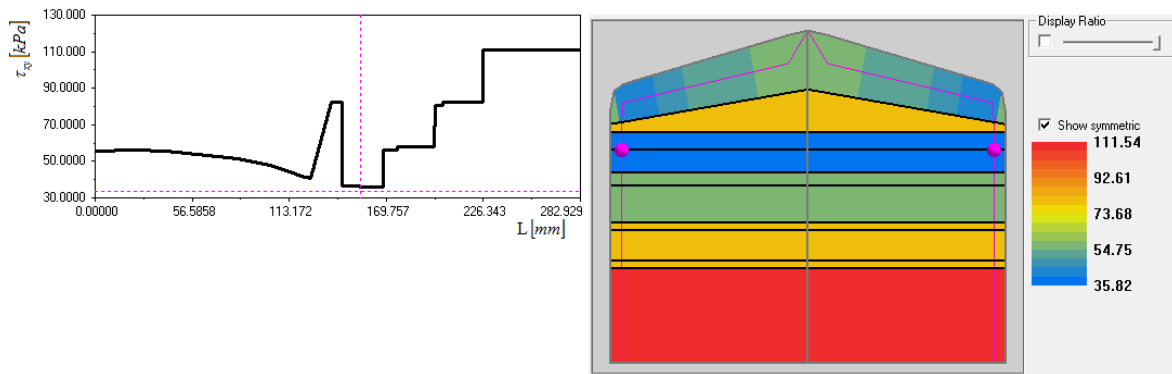
Základní rozměry pro definici plnicího kanálu:

- Šířka výstupní štěrby 240 mm
- Průměr plnicího kanálu 30 mm
- Délka plnicího kanálu 30 mm
- Výstupní radius plnicího kanálu 2 mm



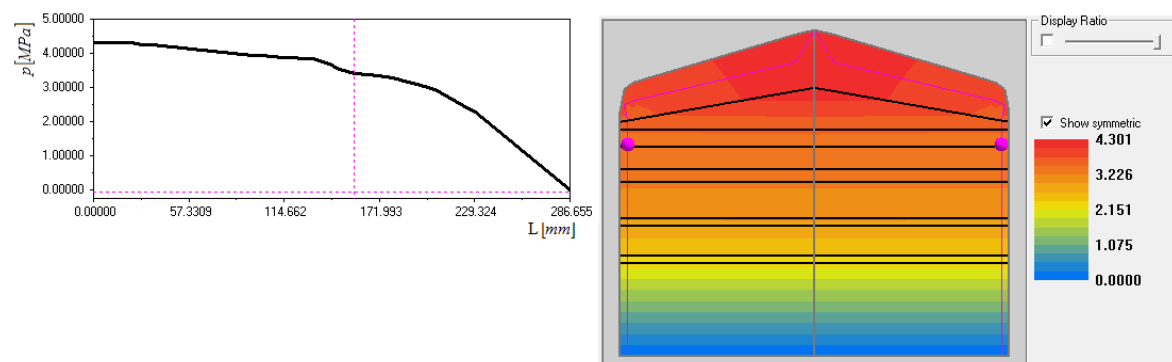
Obr. 80 Výsledky toku plnicím kanálem (štěrbina 4mm)

Průměr plnicího kanálu byl oproti předcházející hlavě zvětšen na 30mm, tlak je zde při stejném hmotnostním průtoku nižší a tedy taktéž vyhovující. Smykové napětí a rychlost smykové deformace mají hodnoty v povolených mezích (obr. 52), jejich hodnoty v plnicím kanále jsou uvedeny na obr. 80.



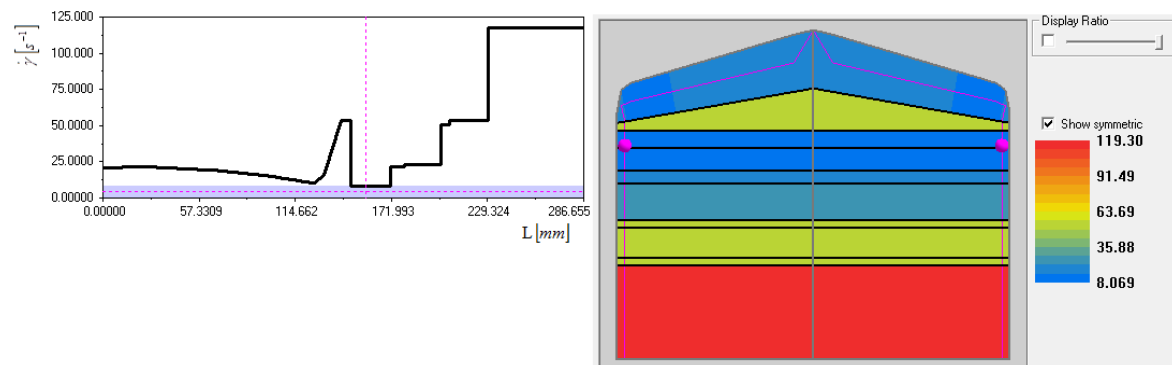
Obr. 81 Smykové napětí po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 4mm)

Na obr. 81 jsou uvedeny hodnoty smykového napětí po délce vytlačovací hlavy. Je zde zřejmé, že nejnižší hodnoty vznikají v relaxačním kanále. Avšak bereme-li v úvahu že je hmotnostní průtok volen nejnižší možný (vzhledem k vzniku nežádoucích vlastností), lze předpovídat, že při vyšších hodnotách průtoku se i hodnoty smykového napětí v relaxačním kanále budou zvětšovat.



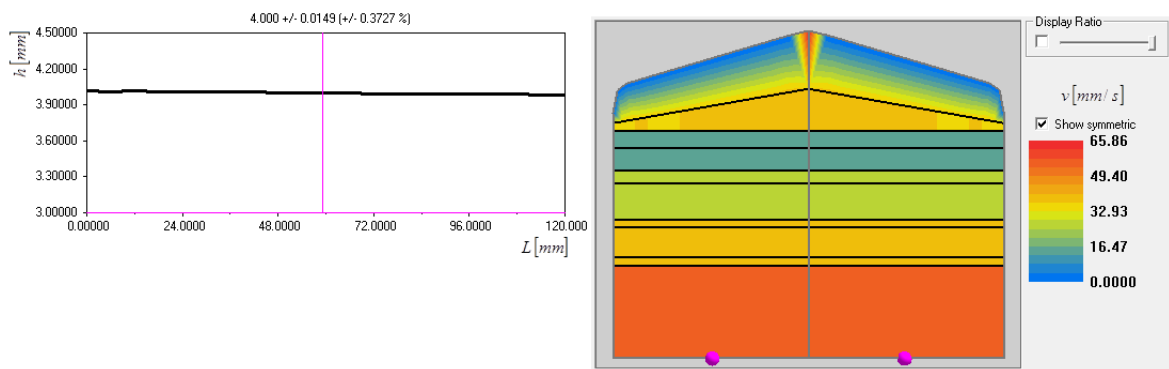
Obr. 82 Tlaková ztráta po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 4mm)

Hodnota tlaku je při hmotnostním průtoku 148kg/h 4,103MPa, což je pod maximální povolenou hodnotou 20MPa. Hlava z hlediska vzniku vysokých tlakových ztrát vyhovuje.



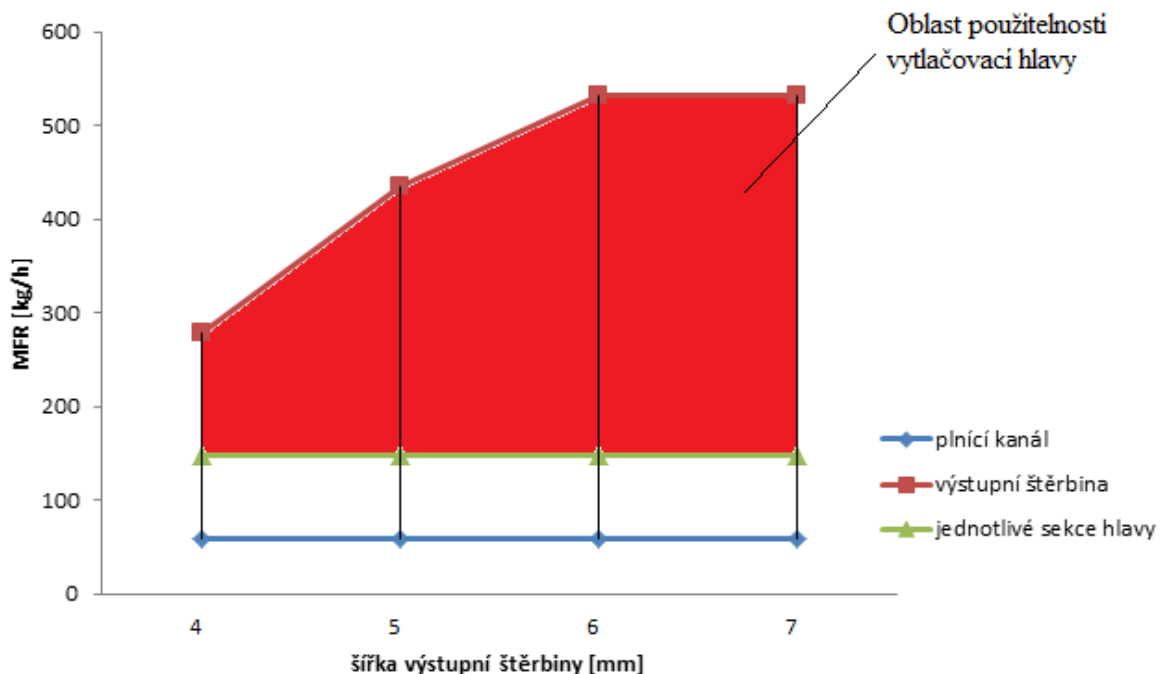
Obr. 83 Rychlost smykové deformace po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 4mm)

Obdobně jako u smykového napětí je rychlost smykové deformace nejnižší v relaxačním kanále. Jak již ale bylo uvedeno, jedná se o minimální hodnotu hmotnostního průtoku a při vzniku vad na vytlačeném produktu je možné zvýšit hmotnostní průtok a tedy i rychlost smykové deformace. Hodnoty hmotnostního průtoku pro různé šířky výstupní štěrby jsou uvedeny na obr. 85.



Obr. 84 Rychlostní přerozdělení po délce hlavy a variace v tloušťce (štěrbina 4mm)

Variace v tloušťce je 0,3727% což je 0,0149mm. Rychlostní přerozdělení ukazuje, že za brzdným můstkem už je tok materiálu po šířce hlavy konstantní.



Obr. 85 Hmotnostní průtoky v závislosti na tloušťce výstupní štěrby (štěrbina 4-7mm)

6.4.6 Závěr

Navržená hlava, která umožňuje vytlačovat produkt o tloušťce od 4 do 7 mm je z hlediska materiálových podmínek vyhovující, je zde také velmi pozitivní rychlostní přerozdělení a tedy vhodně navržený zásobovací kanál a brzdový můstek. Z hlediska hmotnostního průtoku má tato hlava poměrně široké pásmo použitelnosti. Hodnoty hmotnostního průtoku pro šířky výstupní štěrby 4,5,6 a 7 mm jsou uvedeny na obr. 85.

6.5 Analýza vytlačovacích hlav při použití různých materiálů v modulu Flat die

V této kapitole byla provedena analýza zadané vytlačovací hlavy, za použití různých druhů materiálů. Vytlačovací hlavou byl simulován tok nejběžněji vytlačovaných materiálů, při kterém byl sledován vliv na vlastnosti vytlačovaného produktu.

Použité typy materiálů byly převzaty z knihovny programu VEL. Teplota vytlačovaných materiálů byla volena jako tzv. referenční teplota, která je udána v materiálových parametrech pro každý materiál. Typy materiálů použité při simulacích: LDPE, HDPE, PP, ABS, PVC, PET, PS. Vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v kapitole 2.2.

6.5.1 Změna materiálu pro zadanou vytlačovací hlavu

Při analýze zadané vytlačovací hlavy bylo zjišťováno, zda hlava není vhodnější pro jiné typy materiálů, než je LLDPE. Hmotnostní průtok byl nejprve volen stejný, jako při simulaci v kapitole 6.1. Následně byla zjišťována funkčnost hlavy při variabilním hmotnostním průtoku.

- LDPE

Materiál LDPE vykazoval při simulaci nízké smykové napětí v plnicím kanále, ale také téměř po celé délce vytlačovací hlavy. V relaxačním kanále jsou navíc nízké rychlosti smykové deformace.

Při zvýšení hmotnostního průtoku je vznik degradace v jednotlivých sekcích postupně odstraněn, avšak hlava je plně funkční (bez nežádoucích vad produktu) až při hmotnostních průtocích kolem 3000kg/h. Tento hmotnostní průtok je vzhledem ke kapacitě běžných vytlačovacích strojů příliš vysoký.

- HDPE

V případě vytlačování HDPE jsou hodnoty smykového napětí ještě nižší, po celé délce hlavy bude docházet k silné degradaci.

Zvýšením hmotnostního průtoku je situace obdobná, jako u LDPE, tedy správná funkce hlavy při vytlačování HDPE je podmíněna příliš vysokým hmotnostním průtokem.

- PP

Vytlačování PP je rovněž při hmotnostním průtoku 300kg/h podmíněno degradací v plnicím, zásobovacím a relaxačním kanále.

Při zvýšení hmotnostního průtoku na 1000kg/h vzniká degradace vlivem smykového napětí pouze v relaxačním kanále a to až po hodnotu 2060kg/h.

- ABS

V případě vytlačování ABS jsou hodnoty smykového napětí a smykové deformace v plnicím kanále příznivější, avšak vlivem nízké smykové deformace bude materiál degradovat v zásobovacím a relaxačním kanále.

Zvýšení hmotnostního průtoku na 860kg/h lze eliminovat degradace v relaxačním kanále, ale tímto zvýšením bude vznikat Shark skin ve všech částech za relaxačním kanálem.

- PVC

Vytlačování PVC při hmotnostním průtoku 300kg/h bylo doprovázeno degradací pouze v relaxačním kanále.

Zvýšením hmotnostního průtoku na 352kg/h hlava vzhledem k materiálovým podmínkám vyhovuje.

- PET

Pro vytlačování PET je zadaná vytlačovací hlava zcela nevhodná. Při vytlačování 300kg/h hlava vykazovala v některých místech téměř nulové smykové napětí.

Ani při extrémním zvýšením MFR se hodnoty smykového napětí téměř nezměnily.

- PS

Simulace toku PS zadanou hlavou při hmotnostním průtoku 300kg/h vykazovala vznik degradace v relaxačním kanále vlivem nízkého smykového napětí.

Degradace je eliminována při zvýšení průtoku na 720kg/h.

6.5.2 Závěr

Z provedených simulací toku zadanou vytlačovací hlavou je zřejmé, že vytlačovací hlava není vhodná pro ani jeden z dodatečně testovaných materiálů při hmotnostním průtoku 300kg/h. V případě PVC a PS lze docílit vytlačování produktu s dodržáním materiálových podmínek zvýšením hmotnostního průtoku. Pro ostatní materiály je hlava nepoužitelná. Zásadní vliv na špatnou funkci hlavy mají tvar a rozměry relaxačního a zásobovacího kanálu.

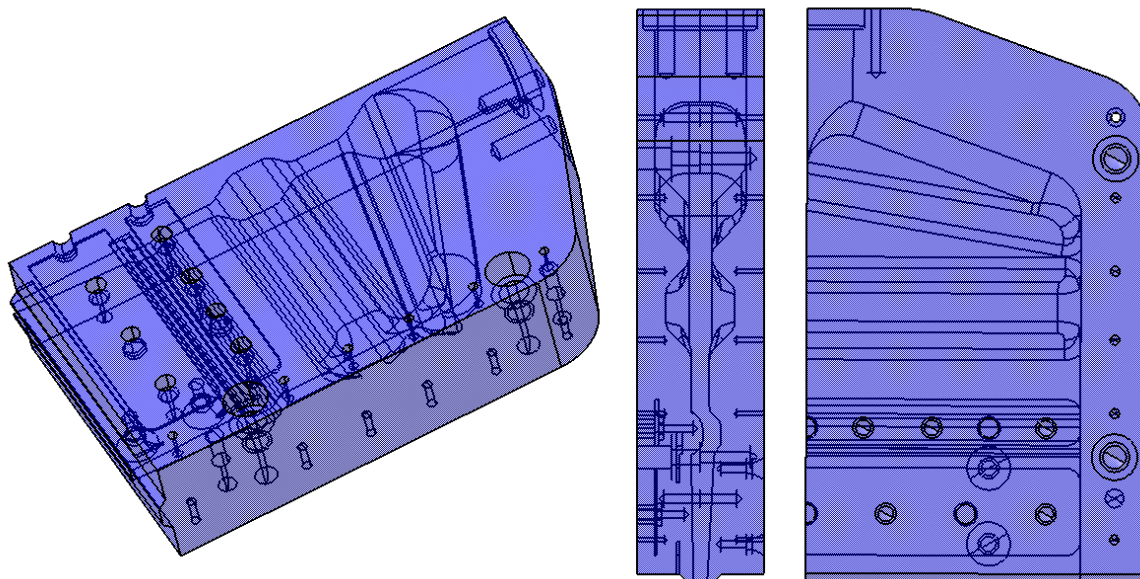
6.6 Analýza vyrobené široko-štěrbínové hlavy v modulu 3D-FEM

V kapitole 6.1 byla provedena analýza zadané vytlačovací hlavy a její následná optimalizace v modulu Flat die. Tento modul se zabývá pouze plošným řešením vytlačovací hlavy, tedy ve 2D. V této kapitole je však vytlačovací hlava řešena ve 3D prostředí a výsledky simulací jsou pak podrobeny srovnání s 2D-řešením.

Modul 3D-FEM se používá pro analýzy a návrhy 3D tokových kanálů volitelného tvaru. Na základě metody konečných prvků (FEM) může tento modul na základě matematické analýzy poskytnout velmi podrobné informace o proudovém poli. Využívá se při řešení míchacích sekcí vytlačovacích šneků, profilových hlav, spirálových hlav, nebo plochých hlav. Výhodou je zde lepší grafický design rozhraní, lepší materiálová databáze, možnosti animace průtoku, nebo pokročilé sledování částic.

6.6.1 Vytvoření tokové geometrie

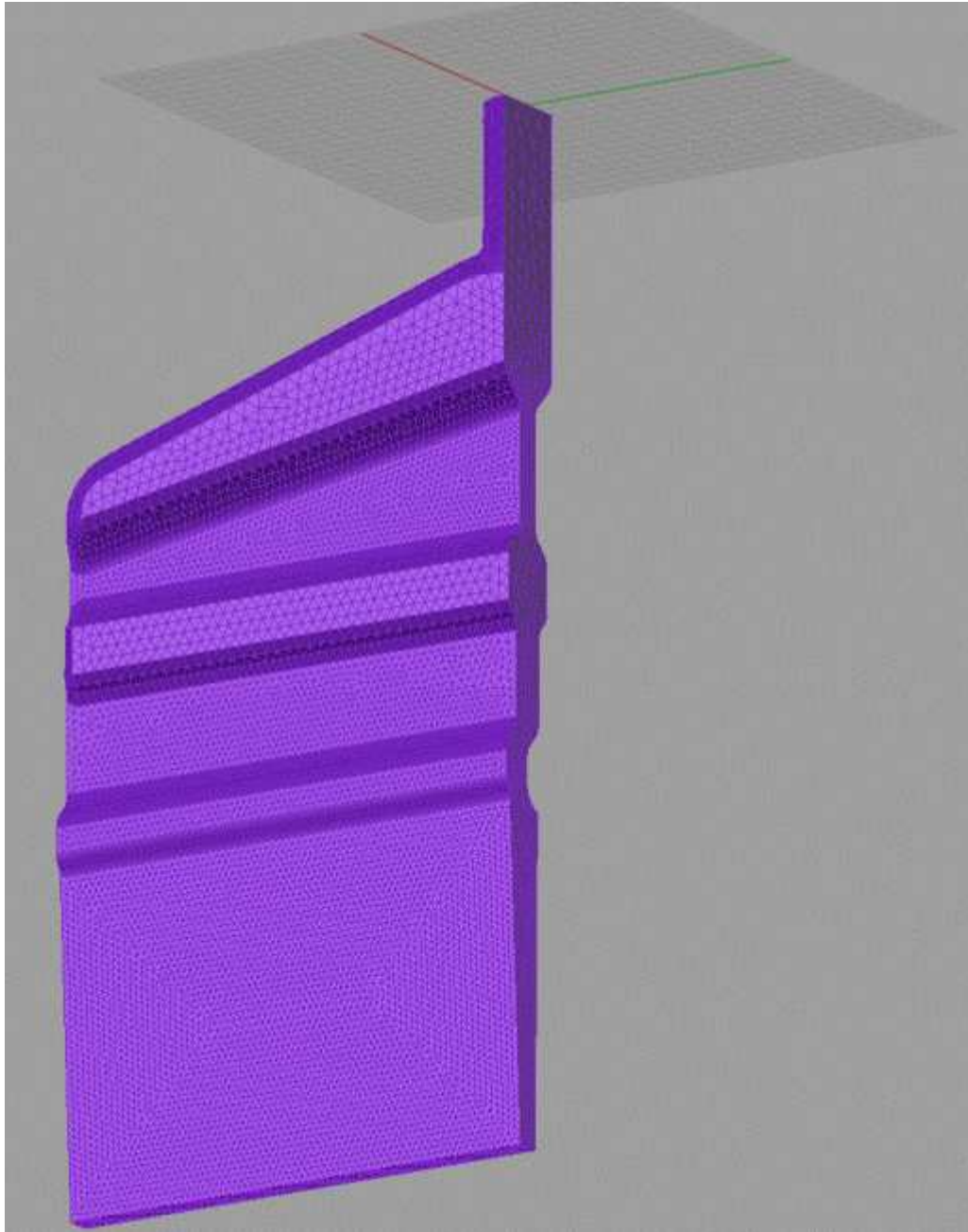
Při tvorbě geometrie nevznikal problém jako u modulu Flat die, kde bylo nutné vytvořit symetrickou verzi vytlačovací hlavy, a proto její geometrie nebyla totožná se zadanou. Základním požadavkem pro simulaci bylo tedy vytvoření tokové geometrie kanálu. Zde bylo nutné vytvořit model ve formátu *.stp a ten v příslušném nástroji („Meshru“) vysít'ovat. Z hlediska simulace bylo snahou vytvořit geometrii hlavy, která bude mít co nejméně elementů (kvůli náročnému až nemožnému řešení) a přitom bude vykazovat pozitivní výsledky. Jelikož je hlava podle osy toku symetrická, byla vytvořena pouze polovina modelu a tím se i celkový počet elementů snížil o polovinu.



Obr. 86 Polovina modelu zadané vytlačovací hlavy

Při vytvoření symetrické poloviny vytlačovací hlavy bylo nutné, aby byl osový kříž v dělicí rovině, a aby osa Z směřovala ve směru toku.

Po uložení ve formátu *.stp byla hlava importována do programu Rhino Ceros. Zde byly odstraněny přebytečné geometrie, jako jsou otvory pro šrouby, mezery mezi deskami, nebo také vnější tvar hlavy tak, aby zůstal pouze profil tokového kanálu vytlačovací hlavy. Po finální úpravě geometrie následovalo vysítování v programu Moldex3D. Vysítovaný profil tokového kanálu je vidět na obr. 87.

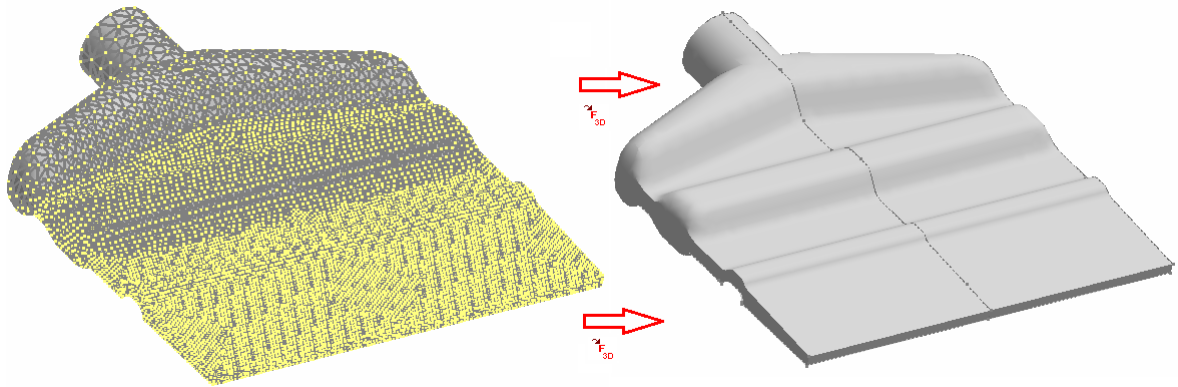


Obr. 87 Vysítovaný profil tokového kanálu vytlačovací hlavy

Při tvorbě sítě vznikaly problémy s napojením elementů, hlavně v místech zaoblení. Ty byly upraveny tak, aby nedocházelo k překrývání elementů nebo volným hranám na vytvořené síti. Síť bylo nutné, vzhledem k celkové velikosti hlavy, tvořit s rozdílnou velikostí elementů. V hlubokých kanálech (zásobovací kanál, relaxační kanál) byly vytvořeny elementy o velikosti 7mm, postupně se však měnily, až po výstupní šterbinu, kde byla velikost elementů 1,7 mm. Vzhledem k šířce výstupní šterbiny 6mm jsou při jejím vysítování vytvořeny alespoň 4 elementy po šířce výstupní šterbiny. To zajistí, že výsledky analýzy budou vykazovat dostatečnou přesnost.

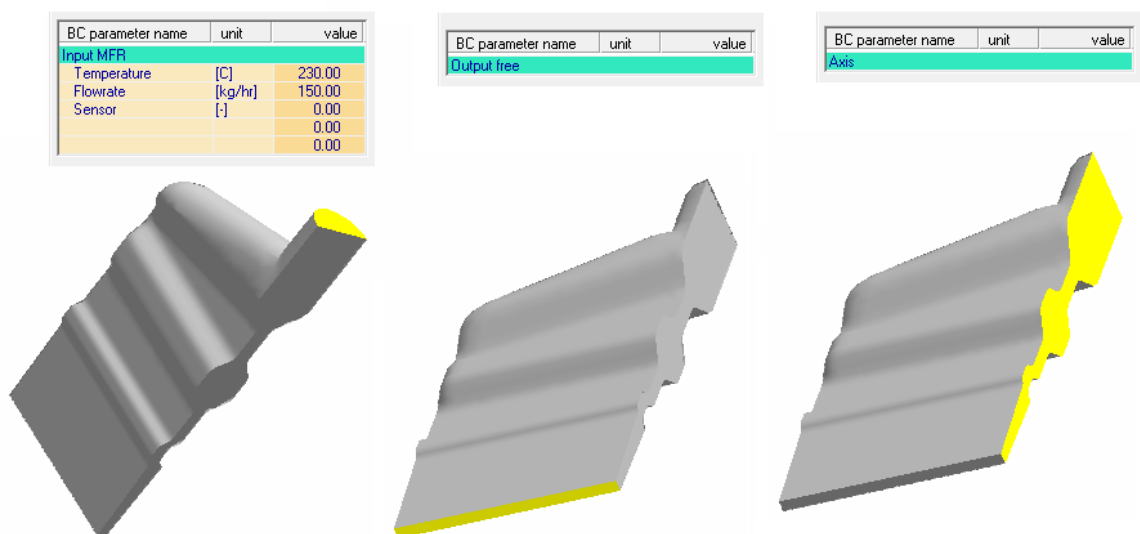
6.6.2 Importování hlavy do VEL, volba procesních podmínek

Po vytvoření a opravě byla síť importována do modulu 3D-FEM, pod záložkou Import a Rhino & Coretech mesh file. Síť byla poté převedena na 3D průtokovou mřížku (3D flow grid).



Obr. 88 Vytvoření 3D průtokové mřížky

Vytvořené síti byl následně přiřazen materiál. Ten byl stejně jako při řešení ve Flat die zvolen LLDPE (viscoelastic) s teplotou 230°C. Pod záložkou Boundary Conditions byl následně definován vstup, výstup a osa toku. V parametrech vstupu byl zvolen poloviční hmotnostní průtok, vzhledem k polovině tokové domény, tedy 150kg/h. Výstup byl zvolen volný (free). Osa toku je volena jako osa Z vytvořené tokové geometrie.



Obr. 89 Definice vstupu, výstupu a osy toku

Po definici všech hraničních podmínek byl v nastavení řešení (solver settings) stanoven počet iterací 100. Tato hodnota zajistí, aby řešení ne

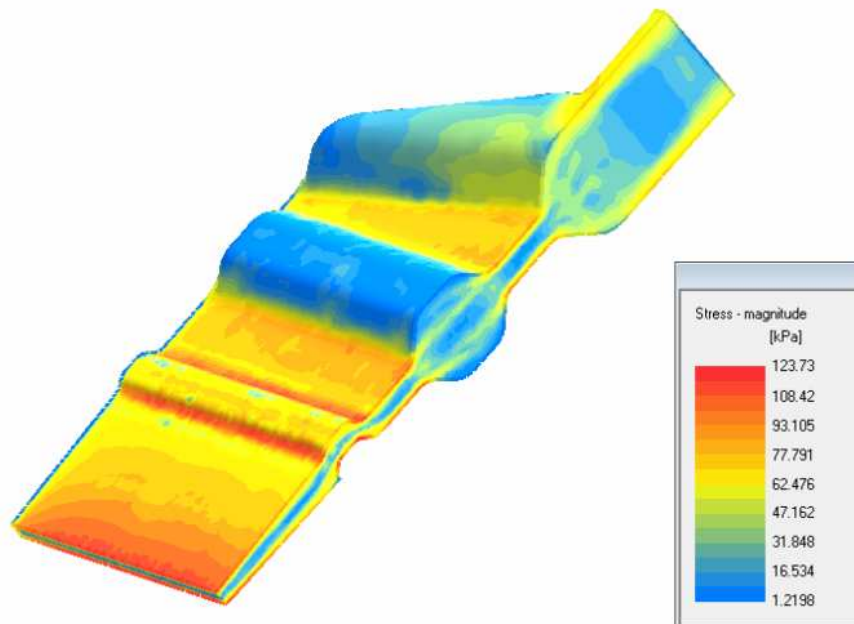
6.6.3 Výsledky zadané vytlačovací hlavy

Kompletní simulace toku zadanou vytlačovací hlavou lze hodnotit ve všech místech tokové geometrie pomocí různých funkcí modulu 3D-FEM. Výsledky jsou hodnoceny tak, aby mohly být porovnány s výsledky z modulu Flat die. Ke zjištění hodnot, které jsou nutné k určení funkčnosti hlavy, byly využívány funkce Pathline, 1D Cut a 2D Cut.

6.6.4 Zhodnocení výsledků

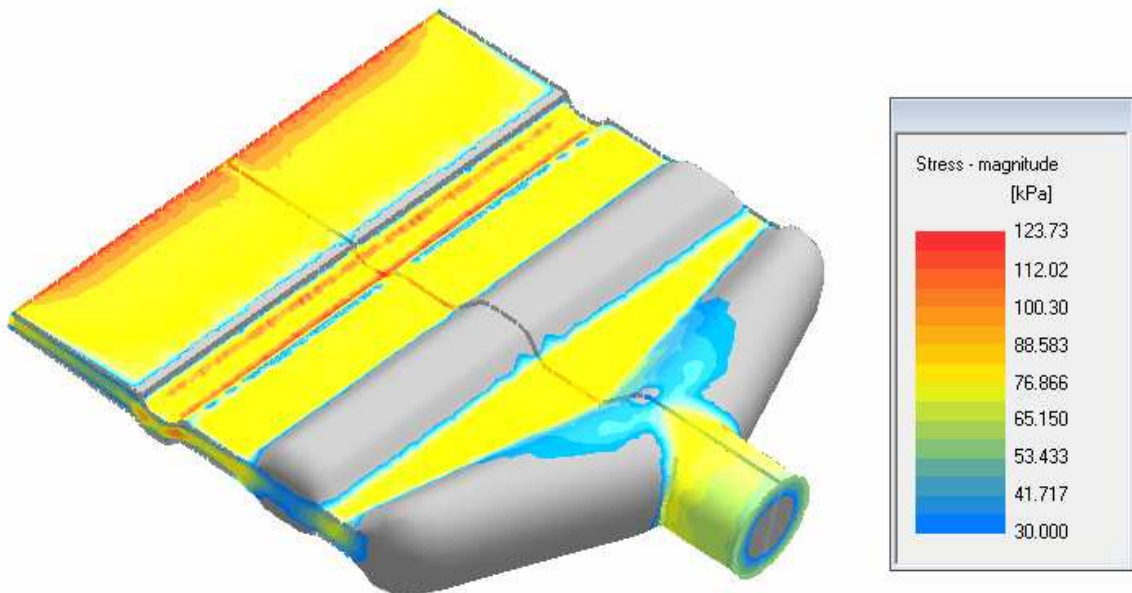
- Smykové napětí

Tak, jako v modulu Flat die byla počáteční kontrola zaměřena na smykové napětí. Toto napětí vykazuje ve výsledcích hodnoty od 1,2198 po 123,73 kPa. Modul 3D-FEM však uvažuje hodnoty smykového napětí po celém průřezu vytlačovací hlavy.



Obr. 90 Smykové napětí po průřezu zadané vytlačovací hlavy

Kontrolované smykové napětí je zjišťováno pouze na stěnách vytlačovací hlavy. Pro toto omezení byla využita funkce lokálních limitů tak, aby byly zobrazeny všechny oblasti, které nevyhovují povolenému napěťovému intervalu 30-140kPa.

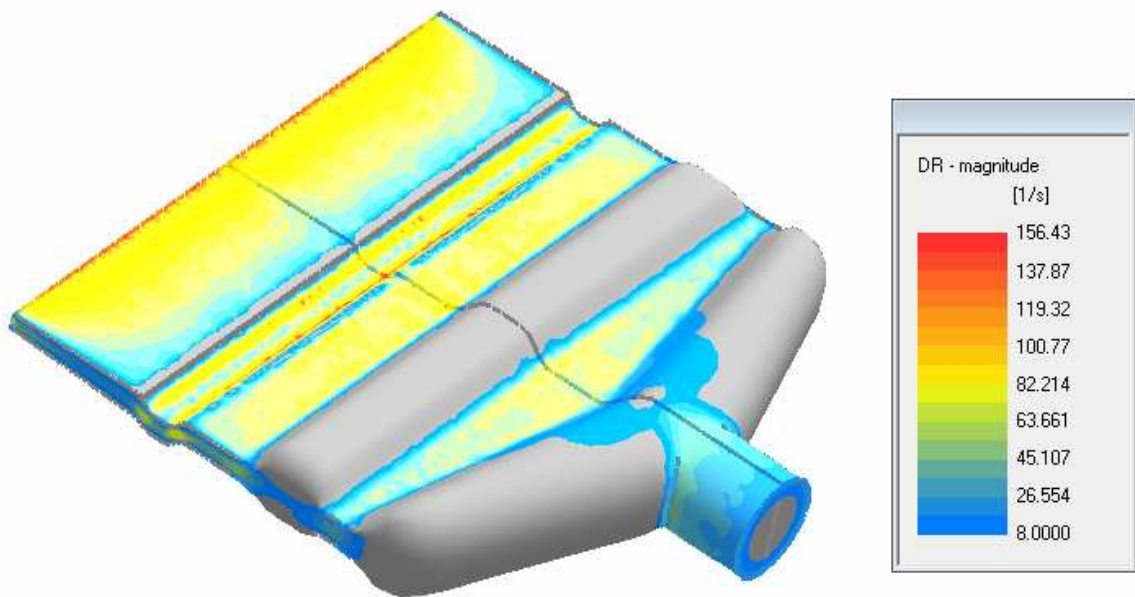


Obr. 91 Hodnoty smykového napětí na stěně zadané vytlačovací hlavy

Z obr. 91 je zřejmé, že nevybarvená (šedá) místa jsou nižší, než 30kPa. V zadané vytlačovací hlavě vzniká degradace vlivem nízkého smykového napětí na stěně. Hlavními místy vzniku degradace jsou zásobovací a relaxační kanál. Z výsledků tedy vyplývá, že je profil zásobovacího a relaxačního kanálu nevhodně navrhnout, respektive je pro hmotnostní průtok 300kg/h jejich velikost příliš velká. Oproti modulu Flat die, kde byla hlava symetrická, je zde zjištěno, že k degradaci může dojít také za regulovatelným brzdícím můstkem.

- Rychlost smykové deformace

Rychlost smykové deformace je hodnocena taktéž na stěnách vytlačovací hlavy. Hodnoty smykové deformace jsou vidět na obr. 92.

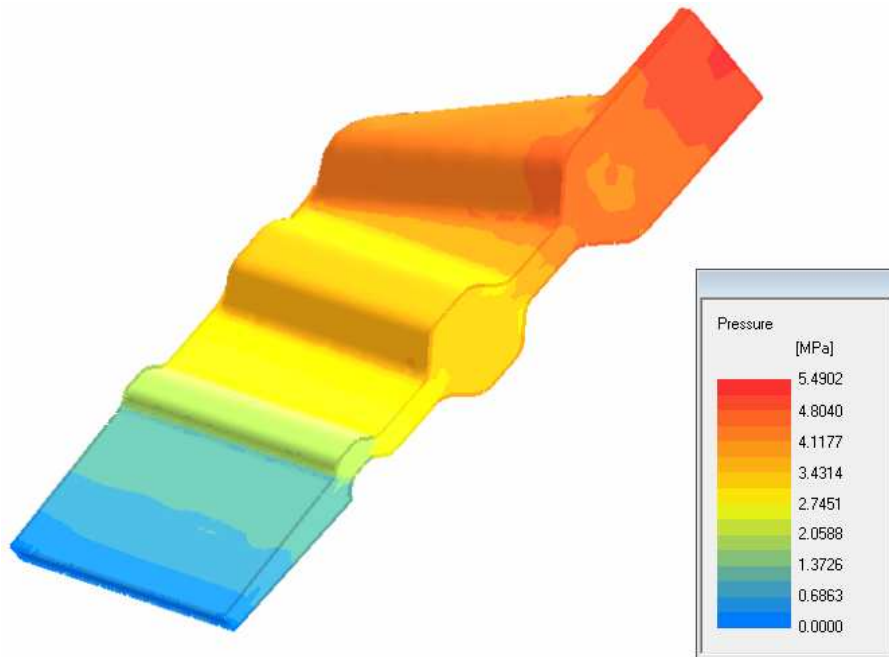


Obr. 92 Rychlost smykové deformace na stěně zadané vytlačovací hlavy

Místa vzniku degradace vlivem smykového napětí a rychlosti smykové deformace jsou analogická. Degradace vlivem nízké smykové deformace vzniká hlavně v oblasti zásobovacího a relaxačního kanálu. Nezanedbatelným místem, kde je možný výskyt degradace, je přechod z regulovatelného brzdného můstku do výstupní štěrbině.

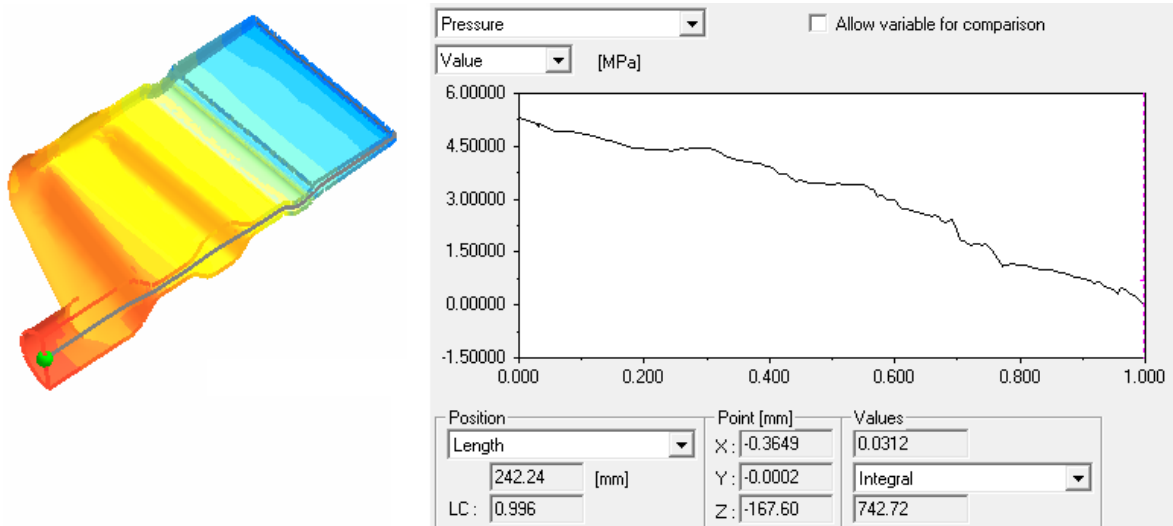
- Tlaková ztráta

Tlak při simulaci toku vytlačovací hlavou byl zjišťován po celém průřezu. Při hodnocení tlakové ztráty bylo zjištěno, že oproti výsledkům v modulu Flat die vznikal rozdíl tlaků přes 2 MPa. Při detailnějším prozkoumání i za pomoci modulu 2D-FEM bylo zjištěno, že je odchylka způsobená nedokonalě vytvořenou mřížkou, respektive velikostí elementů ve vstupní části vytlačovací hlavy. Výsledky tlakové ztráty jsou vidět na obr. 93.



Obr. 93 Tlaková ztráta v zadané vytlačovací hlavě

Z obrázku je patrné, že tlak jednoznačně dosahuje nižších hodnot, než je maximální hodnota 20MPa.

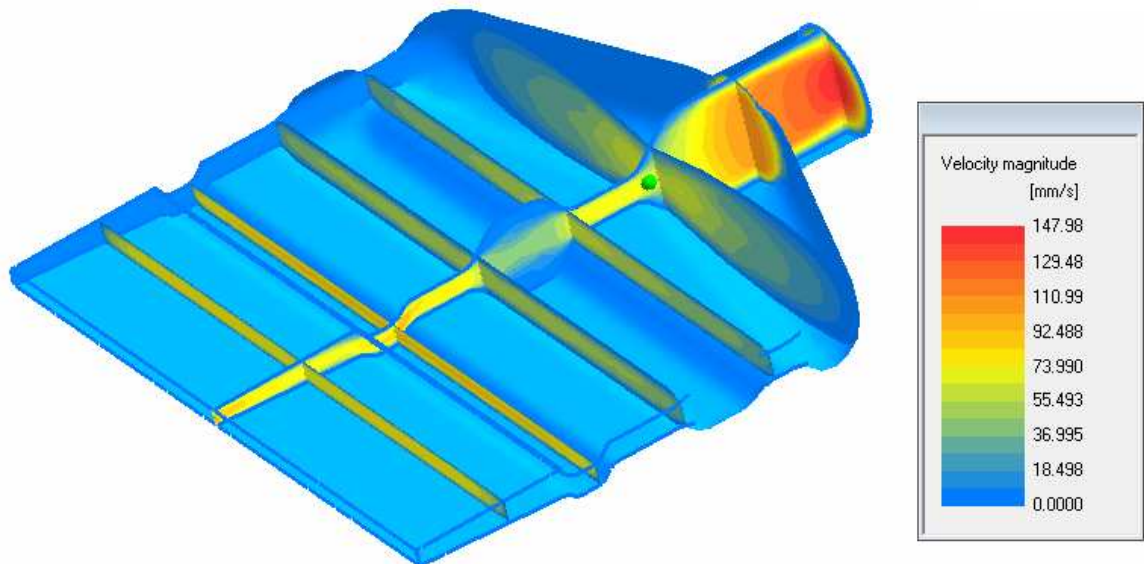


Obr. 94 Průběh tlaku po délce zadané vytlačovací hlavy

Na obr. 94 je průběh tlaku po délce vytlačovací hlavy. Při tomto zobrazení bylo využito funkce pathline, která umožnila zjišťovat hodnoty tlaku ve všech místech hlavy a porovnávat s výsledky z modulu Flat die.

- Rychlostní přerozdělení

Při zjišťování rychlostního průřezdělení ve vytlačovací hlavě bylo využito funkce 2D Cut. Na obr. 95 je zobrazen profil vytlačovací hlavy, na kterém je vytvořeno 6 řezů v ose Z. Na těchto řezech je vykreslena rychlost taveniny.

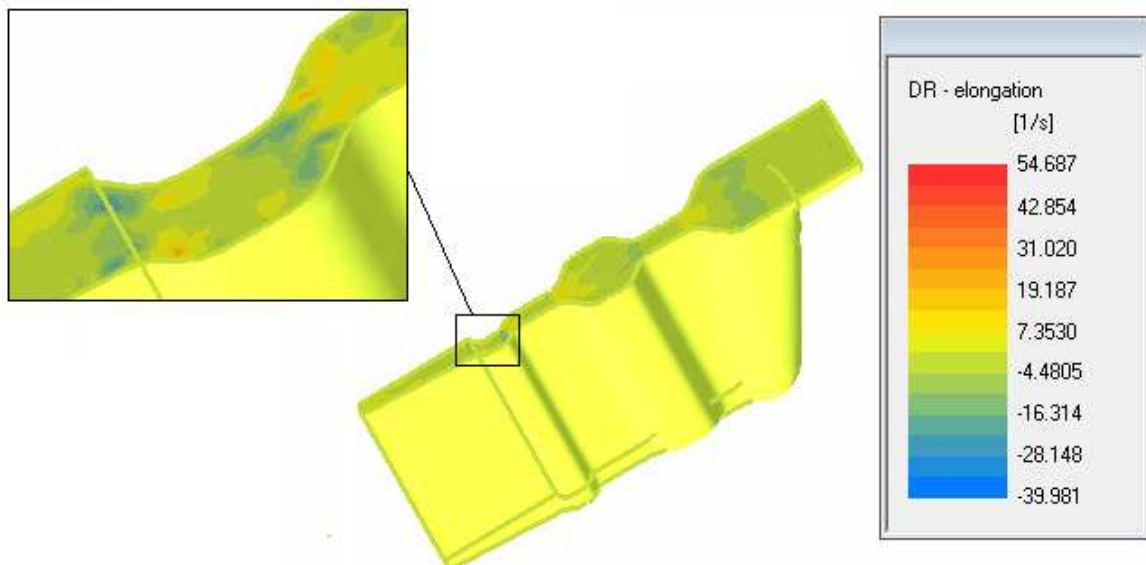


Obr. 95 Rychlostní průřezdělení taveniny v zadané vytlačovací hlavě

Z obrázku je patrné, jak se rychlostní profil po délce vytlačovací hlavy mění. V místě regulovatelného brzdného můstku se rychlost prudce zvýšila, lze zde předpokládat vysokou elongační deformaci.

- Rychlost elongační deformace

Z materiálových parametrů (obr. 52) lze vyčíst, že rychlost elongační deformace je pro LLDPE 50 s^{-1} .



Obr. 96 Detail oblasti regulovatelného brzdného můstku a hodnoty elongační deformace v zadané vytlačovací hlavě

Z detailu na obr. 96 je vidět, že v oblasti regulovatelného brzdného můstku hodnoty elongační deformace převyšují povolenou hodnotu 50 s^{-1} . Regulovatelný brzdný můstek je tedy nevhodně navrhnout a jeho geometrie by měla být vhodně upravena (vzhledem ke hmotnostnímu průtoku 300 kg/h).

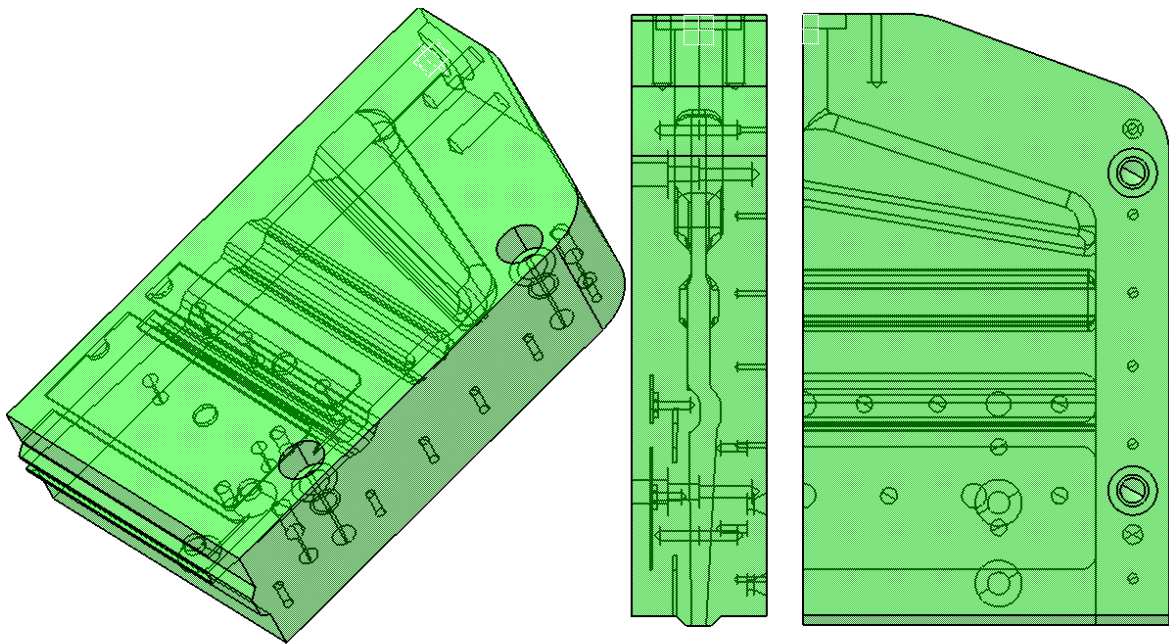
6.6.5 Závěr

Simulací toku zadanou vytlačovací hlavou ve 3D-FEM modulu bylo zjištěno, že dle materiálových parametrů pro LLDPE je hlava pro hmotnostní průtok 300 kg/h nevhodná. Z hlediska smykového napětí na stěně vzniká degradace v zásobovacím a relaxačním kanále. Rychlost smykové deformace v relaxačním a zásobovacím kanále dosahuje také kritických hodnot a proto je zde taktéž předpokládána degradace. V místech regulovatelného brzdného můstku jsou zjištěny vysoké hodnoty elongační deformace, které mohou tvořit víry a mají vliv na tloušťkovou distribuci vytlačovaného produktu.

6.7 Analýza optimalizované široko-štěrbínové hlavy v modulu 3D-FEM

Tak, jako v modulu Flat die v kapitole 6.2 byla optimalizovanou tokovou geometrií provedena simulace toku taveniny. Výsledky byly zhodnoceny a porovnány s výsledky z modulu Flat die.

Optimalizovaná hlava v modulu Flat die vyhovuje z hlediska všech materiálových parametrů, zároveň má brzdný můstek optimální rychlostní přerozdělení tak, aby za brzdným můstkem byl rovnoměrný rychlostní profil. Zde je použita stejná geometrie, jako v kapitole 6.2 avšak je zde totožný tvar regulovatelného brzdného můstku, jako u zadané hlavy. Závěrem této analýzy je tedy rozdíl mezi simulací ve Flat die a ve 3D-FEM.



Obr. 97 Polovina modelu optimalizované vytlačovací hlavy

Postup tvorby tokové domény optimalizované vytlačovací hlavy a zadání procesních podmínek byl analogický jako v kapitole 6.6. Z modelu ve formátu *.stp byla vytvořena síť tokové geometrie. Vzhledem k symetrii byla použita pouze polovina vytlačovací hlavy. Síť byla opět tvořena tak, aby měla co nejméně elementů a současně vykazovala pozitivní výsledky.

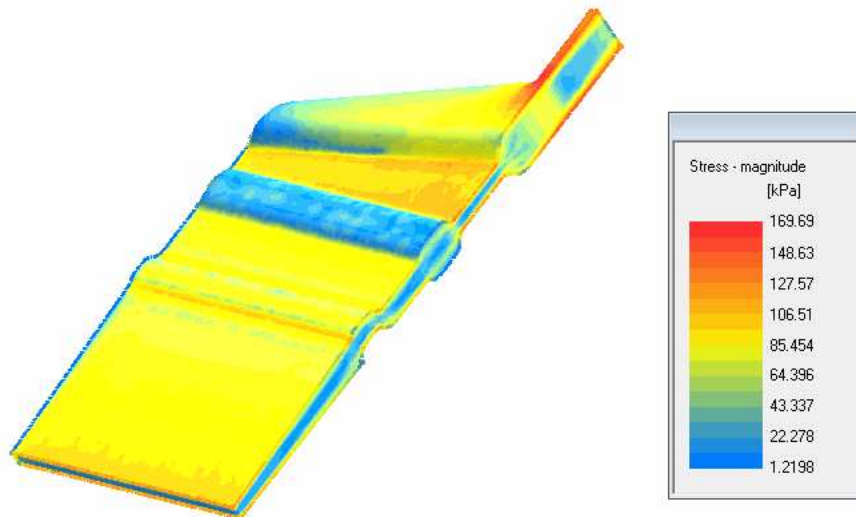
Po úpravách chyb sítě následoval import do 3D-FEM modulu. Ve VELu byla síť převedena na 3D průtokovou mřížku.

Před spuštěním analýzy byly přiřazeny procesní podmínky a materiál. Všechny hodnoty jsou stejné jako v modulu Flat die s ohledem na to, že je využita pouze polovina optimalizované vytlačovací hlavy. Hmotnostní průtok je 150kg/h, použitý materiál je LLDPE s teplotou 230°C. Počet iterací je 100, teplota bude po celé délce hlavy uvažována opět konstantní.

6.7.1 Zhodnocení výsledků

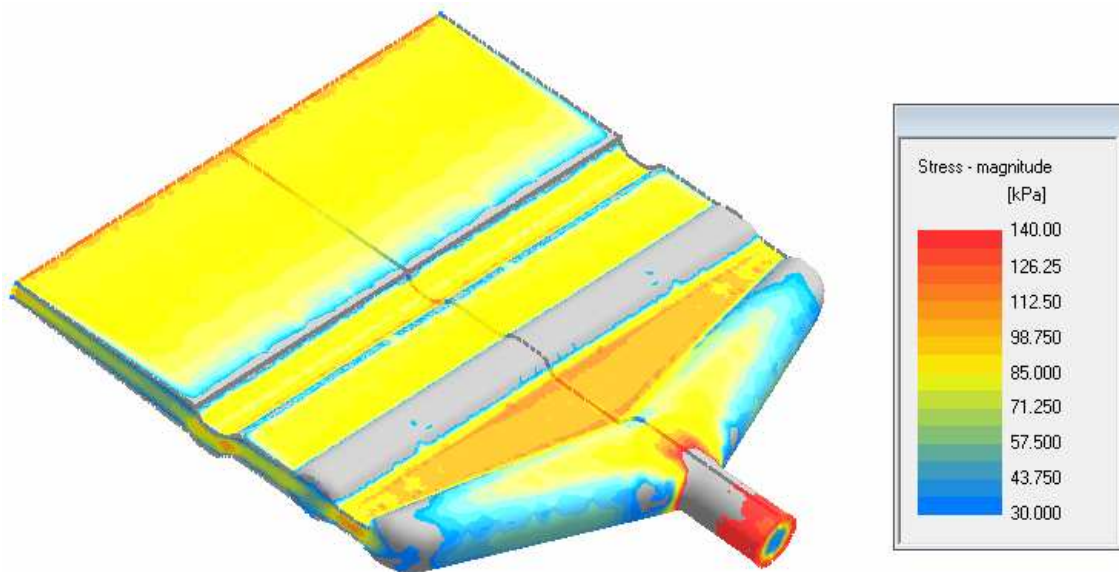
- Smykové napětí

Hodnoty smykového napětí na stěně optimalizované vytlačovací hlavy jsou uvedeny na obr. 98. Zde je uvedena polovina hlavy s výsledky smykového napětí po celém průřezu.



Obr. 98 Smykové napětí po průřezu optimalizované vytlačovací hlavy

Hodnoty napětí jsou uvedeny na grafické stupnici. Zde je patrné, že jsou přesaženy hodnoty pod minimální hodnotu 30kPa i maximální hodnotu 140kPa. Je však na místě, ověřit si, zda jsou skutečně nepovolené hodnoty na stěně vytlačovací hlavy.

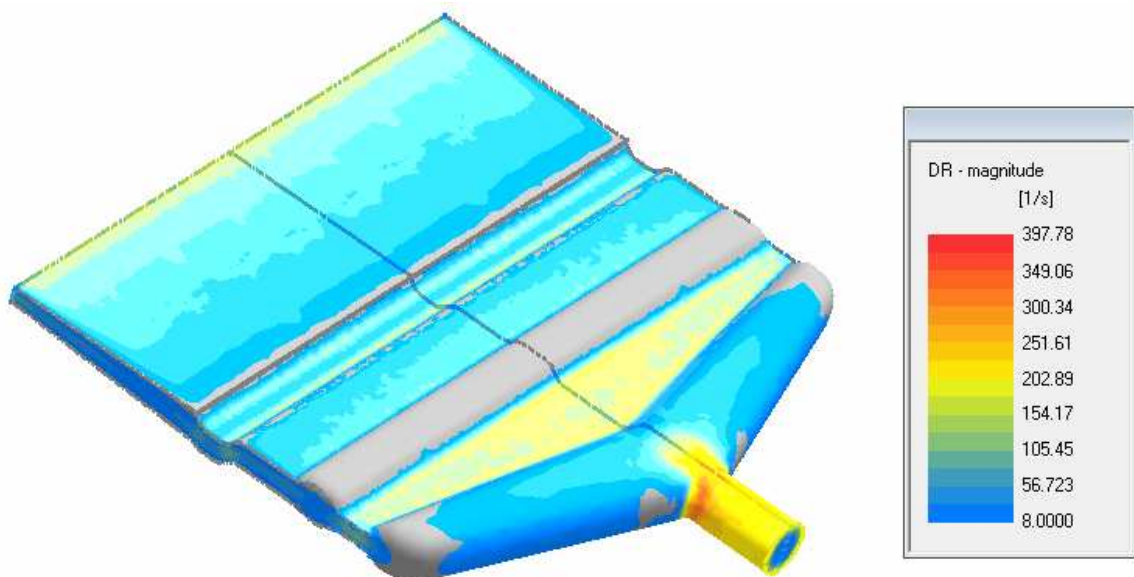


Obr. 99 Smykové napětí na stěně optimalizované vytlačovací hlavy

Na obr. 99 je vytlačovací hlava se zobrazenými hodnotami smykového napětí na stěně. Z obrázku je zřejmé, že nevybarvené části vykazují jiné hodnoty, než jsou v zobrazeném intervalu 30-140kPa. Při detailnějším rozboru je zjištěno, že v zaobleních na kraji zásobovacího kanálu jsou nižší hodnoty, než 30kPa, což znamená, že zde bude docházet k degradaci. Kromě zásobovacího kanálu jsou nevyhovující hodnoty také v relaxačním kanále. Naopak vysoké hodnoty smykového napětí se objevují v plnicím kanále. Zde je však brána v úvahu nízká hustota mřížky a předpokládá se, že v porovnání s hodnotami v modulu Flat die se vznik nepříznivého jevu Shark skin neuvažuje.

- Rychlost smykové deformace

Rychlost smykové deformace je zobrazena na obr. 100. Hodnoty jsou omezeny dolní hranicí 8 s^{-1} , pod kterou vzniká nepříznivý jev degradace materiálu.

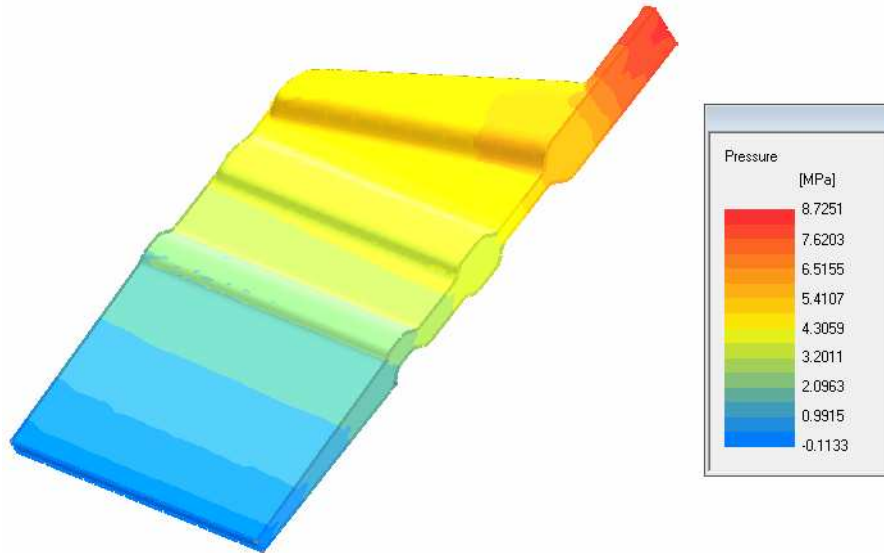


Obr. 100 Rychlost smykové deformace na stěně optimalizované vytlačovací hlavy

I u optimalizované vytlačovací hlavy lze pozorovat nízké hodnoty rychlosti smykové deformace, které budou způsobovat degradaci. Hlavním problémovým místem je relaxační kanál, kde bude materiál degradovat téměř po celé jeho délce. Zde je nutné snížit jeho průřez avšak s ohledem na relaxační čas LLDPE. Mírný pokles pod povolenou hodnotu 8 s^{-1} vykazuje také rozvodný kanál.

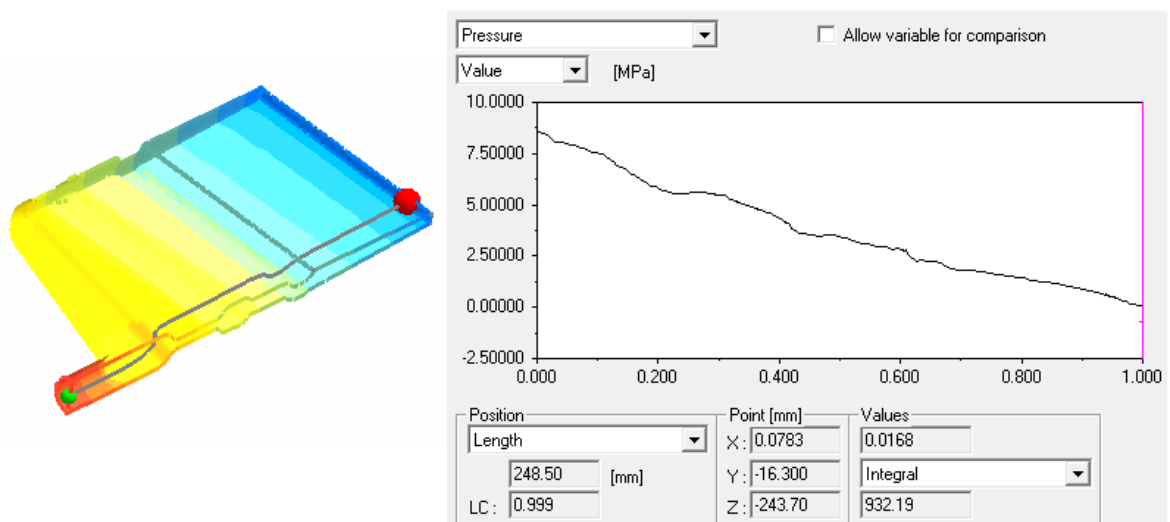
- Tlaková ztráta

Tlakový spád po délce optimalizované vytlačovací hlavy je zobrazen na obr. 101. Zde jsou opět předpokládány hodnoty na bezpečné straně (pod hodnotou 20MPa) a kvalita mřížky je zde nižší.



Obr. 101 Tlaková ztráta po délce optimalizované vytlačovací hlavy

Z obrázku 101 je patrné, že maximální tlak je v plnicím kanále a dosahuje hodnot okolo 8,7MPa. Tato hodnota je v porovnání s výsledky z modulu Flat die příliš vysoká. Je to však způsobeno již dříve zmíněnou kvalitou mřížky. I dle výsledků z 3D analýzy hlava z hlediska tlakových hodnot vyhovuje.

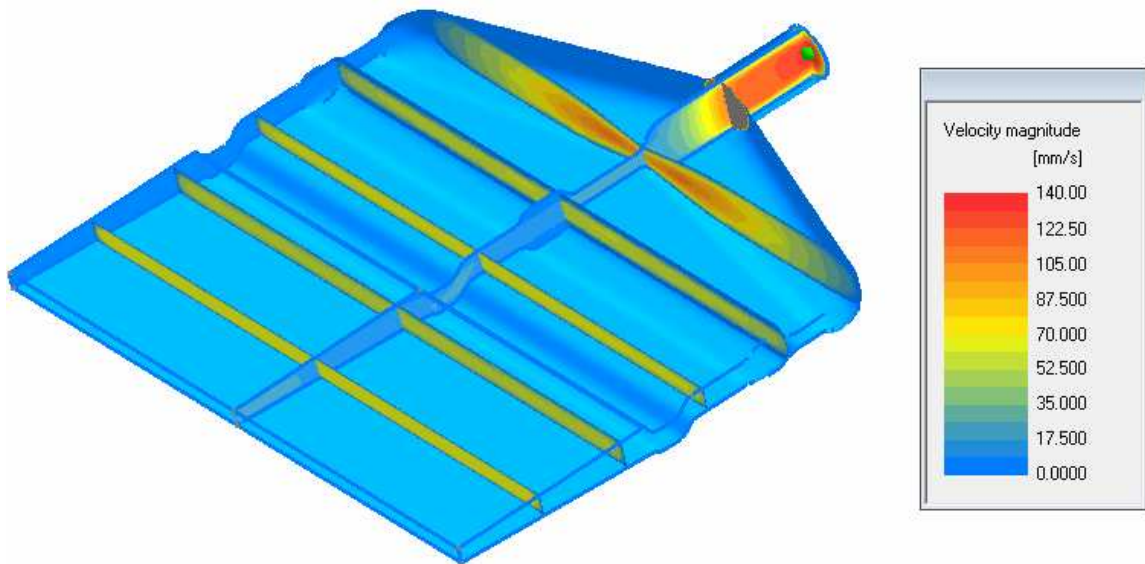


Obr. 102 Průběh tlaku po délce optimalizované vytlačovací hlavy

Na obr. 102 je průběh tlaku po délce optimalizované vylačovací hlavy. I zde je využito funkce pathline. Zde je také možné porovnávat tlak ve všech sekcích vylačovací hlavy s výsledky z modulu Flat die.

- Rychlostní přerozdělení

Rychlostní přerozdělení je zobrazeno na obr. 103. Zde byla zjištěna maximální rychlost na vstupu plnicího kanálu a měla hodnotu 565,09mm/s. Vzhledem k tomu, že je v hlavě rychlost několikanásobně nižší, byly vytvořeny řezy v ose Z pomocí funkce 2D Cut a na těchto řezech je vykreslena rychlost.

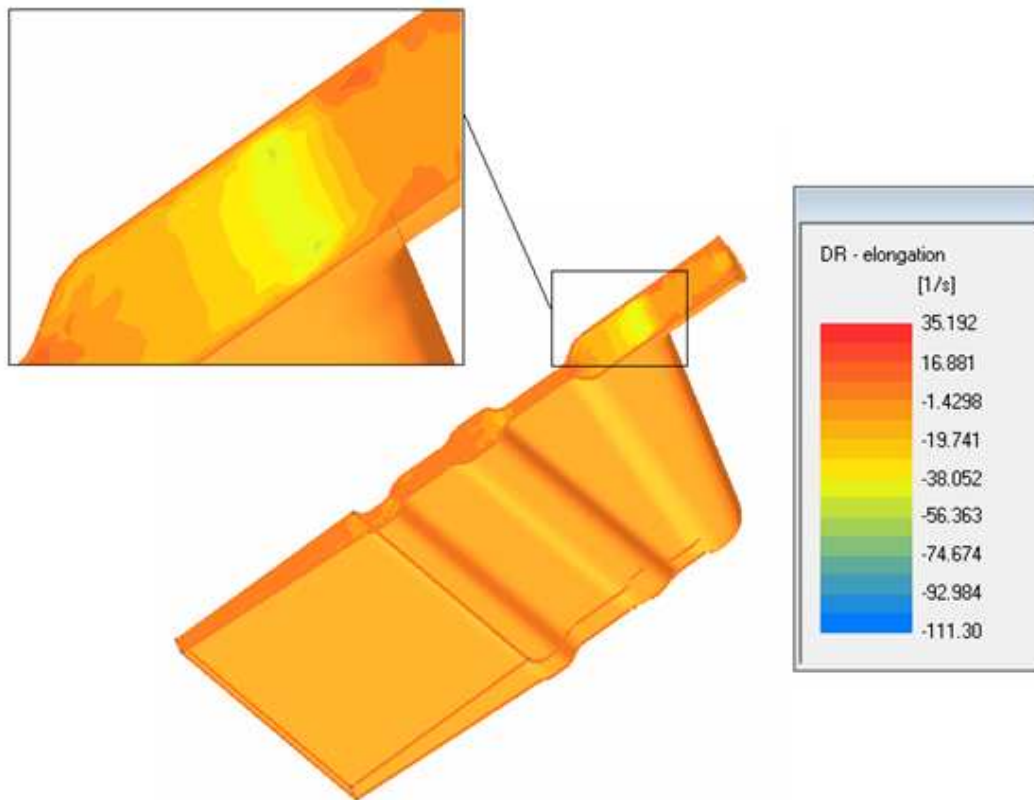


Obr. 103 Rychlostní přerozdělení taveniny v optimalizované vylačovací hlavě

Na vytvořených řezech jsou vykresleny hodnoty v lokálním omezení 0 až 140 mm/s. Důležitým místem je zde řez za brzdným můstkem. Z výsledků vyplývá, že geometrie brzdného můstku byla zvolena vhodně. Hodnoty rychlostí za brzdným můstkem jsou téměř konstantní.

- Rychlost elongační deformace

V zadané vylačovací hlavě byla rychlost elongační deformace mírně překročena v místě regulovatelného brzdného můstku. Zde je tedy provedena kontrola z hlediska vysoké elongační deformace po délce optimalizované vylačovací hlavy. Hodnoty jsou vykresleny na obr. 104.



Obr. 104 Detail oblasti výstupu z plnicího kanálu a hodnoty elongační deformace v optimalizované vytlačovací hlavě

V místě regulovatelného brzdného můstku jsou hodnoty rychlosti elongační deformace v povolených mezích tedy pod 50 s^{-1} . Problém však vzniká v místě výstupu z plnicího kanálu. Jako vhodné řešení se zde nabízí zvětšení zaoblení v přechodu z plnicího do zásobovacího kanálu. Tím se rychlost přilehlých částic ve směru toku mění plynuleji a velikost rychlosti elongační deformace nedosahuje tak vysokých hodnot.

6.7.2 Závěr

Při simulaci toku optimalizovanou vytlačovací hlavou ve 3D-FEM modulu bylo zjištěno, že vytlačovací hlava nevyhovuje z důvodů kritických hodnot smykového napětí, rychlosti smykové deformace a také vysokých hodnot elongační deformace. Vytlačovací hlava vyžaduje další úpravy tokových kanálů, zejména geometrie brzdného můstku a rozvodného kanálu. Z provedené analýzy vyplývá doporučení pro využití 3D-FEM simulace, hlavně v případech, kdy 2D řešení v modulu Flat die dává výsledky na hranicích spolehlivosti. Zpřesnění výsledků pomocí 3D-FEM dává možnosti předejít následným úpravám vytlačovací hlavy.

ZÁVĚR

Hlavním cílem v této diplomové práci bylo provést simulace toku polymerní taveniny vytlačovací hlavou, která je vyrobena na Ústavu výrobního inženýrství. Simulace byly nejprve prováděny v modulu 2D Flat die, který je určen výhradně pro simulace toku širokoštěrbínovou vytlačovací hlavou. Z počátku je provedena analýza širokoštěrbínové hlavy se zvolenými procesními podmínkami pro materiál LLDPE s teplotou 230°C a hmotnostním průtokem 300kg/h. Zde bylo jednoznačně konstatováno, že by v hlavě materiál degradoval a tedy že je geometrie hlavy pro zvolené procesní podmínky a zvolený materiál nevhodná. Následně byla vytvořena pro stejné procesní podmínky hlava, která při simulaci toku pracovala bezchybně. Tato hlava je nazvána Optimalizovaná, jelikož soustavou analýz byly odstraněny negativní jevy ve všech sekcích vytlačovací hlavy.

Další kapitola je věnována změně šířky výstupní štěrbin. Byla měněna šířka výstupní štěrbin a byl sledován vliv geometrických úprav na vlastnosti vytlačované polymerní taveniny. Simulacemi bylo zjištěno, že hlava umožňuje vytlačovat materiál LLDPE při teplotě 230°C pouze v tloušťce 6 a 7 mm a to pouze při vyšších hmotnostních průtocích, než je 618kg/h.

V následující kapitole byla vytlačovací hlava upravena tak, aby umožnila vytlačovat produkt v rozmezí od 1 do 7 mm. Provedenými analýzami bylo zjištěno, že není možné vytvořit geometrii s tak širokým rozmezím vytlačované tloušťky. Proto byl vypracován návrh geometrie dvou vytlačovacích hlav s šířkami štěrbin od 1 do 3 mm a od 4 do 7 mm. Poté byly zhodnoceny simulace toku pro šířku štěrbin 1 mm a pro šířku štěrbin 4mm s následným určením výrobní kapacity pro materiál LLDPE s teplotou 230°C a hmotnostním průtokem 300kg/h.

Z hlediska použitého materiálu byly v kapitole 6.5 provedeny také simulace toku vytlačovací hlavou při změně materiálů. Z analýz vyplynulo, že nejen pro LLDPE, ale pro většinu běžně vytlačovaných materiálů je hlava nevhodná. Hlava umožňuje vytlačovat s dodržáním materiálových parametrů jen PVC a PS, a to jen při dostatečně vysokém hmotnostním průtoku.

Po kompletním zhodnocení hlavy v modulu Flat die byly simulace toku provedeny také ve 3D v modulu 3D-FEM. Zde byly zanalyzovány stejné tokové geometrie jako u vyrobené vytlačovací hlavy a její následné optimalizace v kapitole 6.1 respektive 6.2. Simulací toku

LLDPE zadanou vytlačovací hlavou byly zjištěny analogické nedostatky jako v modulu Flat die. 3D-FEM umožnil detailní prozkoumání toku celou tokovou doménou, zejména rychlostní přerozdělení a rychlost elongační deformace. Oproti modulu Flat die zde byly zjištěny nedostatky v překročení rychlosti elongační deformace. Použitá geometrie byla totožná se zadanou a nebylo zde tedy zapotřebí vytvořit symetrickou verzi vytlačovací hlavy, jako tomu bylo ve Flat die.

V poslední kapitole byla provedena analýza toku optimalizovanou vytlačovací hlavou. Bylo zjištěno, že ve srovnání s výsledky z Flat die modulu, kde byly splněny všechny materiálové podmínky, vytlačovací hlava při simulaci ve 3D-FEM vykazovala negativní jevy degradace a Shark skin. Rozdíly jsou způsobeny především nevhodnou aproximací geometrie ve Flat die, ale také hustota sítě vytlačovací hlavy ve 3D-FEM modulu.

Z provedených analýz ve 2D i 3D je zřejmé, jak je důležité před samotnou konstrukcí vytlačovací hlavy provést simulace toku a tím i jednoznačně určit správnou funkci hlavy bez vzniku nepříznivých jevů na vytlačovaném produktu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇAS, Miroslav a Josef HELŠTÝN. *Výrobní stroje a zařízení: Gumárenské a plastikářské stroje II.* 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 199 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0213-X.
- [2] ŠTĚPEK, Jiří, Jiří ZELINGER a Antonín KUTA. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 637 s.
- [3] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK. *Aplikovaná reologie.* Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001, 144 s. ISBN 80-731-8039-1.
- [4] ZATLOUKAL, Martin. *Aplikovaná reologie: (poznámky z přednášek).* Zlín: UTB Zlín, 2010.
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav. *Základní pojmy z chemie a technologie polymerů, jejich mezinárodní zkratky a obchodní názvy.* 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1996, 56 s. ISBN 80-708-0265-0.
- [6] MICHAELI, Walter. *Extrusion dies for plastics and rubber: design engineering computations.* 2nd rev. ed. New York: Distributed in the U.S.A. and Canada by Oxford University Press, c1992, 340 s. ISBN 0195209109X.
- [7] AGASSANT, J. *Polymer processing: principles and modeling.* New York: Distributed in the U.S.A. and Canada by Oxford University Press, c1991, 475 s. ISBN 0195208641X.
- [8] LAŽA, Jan. *Návrh a realizace Široko-šěrbinové vytlačovací hlavy.* 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Jakub černý.
- [9] COMPUPLAST INTERNATIONAL, Inc. *Tutorial for 3D FEM Module: Version 6.5.* Zlín.
- [10]

Elektronické odkazy:

- [11] Termoplasty. In: [online]. [cit. 2012-01-26]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=186>
- [12] [online]. [cit. 2012-01-26]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>

- [13] Compuplast International a.s. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z:
<http://www.compuplast.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

VEL	Virtual extrusion laboratory	
FEM	Finite element method (metoda konečných prvků)	
MFR	Mass flow rate (hmotnostní průtok)	
SBR	Relativní šířka tuhého lože	
DMH	Distribuce molekulových hmotností	
LDPE	Nízko-hustotní polyetylen	
LLDPE	Lineární nízko-hustotní polyetylen	
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylen	
PP	Polypropylen	
PVC	Polyvinylchlorid	
PS	Polystyren	
PET (PETP)	Polyethylentereftalát	
ABS	Akrylonitril-butadien-styren	
PA6 (PA66)	Polyamid 6	
PC	Polykarbonát	
PTFE	Polytetrafluoretylen	
PMMA	Polymethylmetakrylát	
X	Šířka tuhého lože	mm
W	Šířka tokového kanálu	mm
η	Smyková viskozita	Pa.s
τ	Smykové napětí	Pa
$\dot{\gamma}$	Rychlost smykové deformace	s ⁻¹
n	Index neneutonského chování	

α	Teplotní funkce	°K
T	Teplotně citlivostní parametr	°K
β	Tlakově citlivostní parametr	Pa
ITT	Index toku taveniny	g/10min
N1	1. rozdíl normálových napětí	Pa
N2	2. rozdíl normálových napětí	Pa
η_E	Elongační viskozita	Pa.s
$\dot{\epsilon}$	Rychlost elongační deformace	s ⁻¹

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Pístový vytlačovací stroj[1]</i>	14
<i>Obr. 2 Diskový vytlačovací stroj[1]</i>	15
<i>Obr. 3 Diskový vytlačovací stroj se šnekem[1]</i>	15
<i>Obr. 4 Jednošnekový vytlačovací stroj[1]</i>	17
<i>Obr. 5 Princip šnekového vytlačovacího stroje[3]</i>	17
<i>Obr. 6 Tadmorův model pro popis tavení polymeru ve šnekovém kanále[3]</i>	18
<i>Obr. 7 Ideální unášivý tok [3]</i>	20
<i>Obr. 8 Unášivý tok zvýšený o tlakem generovaný tok [3]</i>	20
<i>Obr. 9 Unášivý tok snižený o tlakem generovaný tok [3]</i>	20
<i>Obr. 10 Jednochodý šnek – názvosloví[3]</i>	21
<i>Obr. 11 Princip bariérového šneku[3]</i>	23
<i>Obr. 12 Světová spotřeba plastů v různých průmyslových odvětvích pro rok 2003[9]</i>	24
<i>Obr. 13 Energetická spotřeba pro výrobu různých typů materiálů [3]</i>	25
<i>Obr. 14 Maxwellův model[3]</i>	25
<i>Obr. 15 Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace[4]</i>	26
<i>Obr. 16 Závislost viskozity na smykové rychlosti pro polymery s různou distribucí molekulových hmotností (DMH) [3]</i>	27
<i>Obr. 17 Oblasti použití jednotlivých typů viskozimetrů [3]</i>	28
<i>Obr. 18 Určení hodnot ITT pro dva materiály a různá zatížení [2]</i>	29
<i>Obr. 19 Princip měření ITT na kapilárním viskozimetru [3]</i>	29
<i>Obr. 20 Směr působení složek napětí [2]</i>	30
<i>Obr. 21 Chování polymerů při rotaci (Weissenbergův efekt) a první rozdíl normálových napětí N_1 [3]</i>	31
<i>Obr. 22 Relaxace dvou polymerů [3]</i>	32
<i>Obr. 23 Degradace materiálu při průtoku kanálem [6]</i>	37
<i>Obr. 24 Narůstání profilu a závislost narůstání na rychlosti proudění [3]</i>	38
<i>Obr. 25 Vliv poměru L/D hlavy a narůstání polymerů [3]</i>	38
<i>Obr. 26 Narůstání vlivem teploty stěny [3]</i>	39
<i>Obr. 27 Tvar hubice a výsledného profilu ovlivněného narůstáním[2]</i>	40
<i>Obr. 28 Hromadění materiálu na výstupní hraně [3]</i>	41
<i>Obr. 29 Nestability na rozhraní materiálů při koextruzi [3]</i>	42

<i>Obr. 30 Rozdělení vylačovacích hlav [1]</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 31 Spojení vylačovací hlavy s vylačovacím strojem [1]</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 32 Čistící hlava [1]</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 33 Základní sekce ploché vylačovací hlavy [3]</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 34 Vliv indexu nenewtonského chování na variaci v tloušťce [6].....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 35 Typy hlav dle tvaru brzděného můstku [6].....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 36 Hlava na výrobu okenních profilů [6].....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 37 Hlava s žebry [6]</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 38 Druhy podpěr pro trn [6]</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 39 Ze strany plněná hlava [6]</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 40 Trny ze strany plněných vylačovacích hlav [6].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 41 Hlava se spirálovým trnem [6].....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 42 Rozvinutá hlava se spirálovým trnem [6]</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 43 Kolísání tloušťky fólie [3]</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 44 Model vylačovací hlavy vytvořený v Catii V5R18 [8].....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 45 Řez vylačovací hlavy s popisem hlavních částí [8]</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 46 Vyroběný výukový model široko-štěrbínové vylačovací hlavy [8]</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 47 Rozměry tokových kanálů vylačovací hlavy</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 48 Rozdělení vylačovací hlavy na příslušný počet sekcí</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 49 Návrh zásobovacího kanálu</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 50 Flat die project</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 51 Materiál a procesní podmínky.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 52 Materiálové parametry.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 53 Výsledky toku plnicím kanálem</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 54 Smykové napětí po délce vylačovací hlavy.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 55 Tlaková ztráta po délce vylačovací hlavy.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 56 Rychlost smykové deformace po délce vylačovací hlavy.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 57 Rychlostní přerozdělení po délce hlavy a variace v tloušťce</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 58 Profil optimalizované vylačovací hlavy</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 59 Výsledky toku plnicím kanálem- optimalizovaná hlava.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 60 Smykové napětí po délce optimalizované vylačovací hlavy</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 61 Tlaková ztráta po délce optimalizované vylačovací hlavy</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 62 Rychlost smykové deformace po délce optimalizované vylačovací hlavy</i>	<i>67</i>

<i>Obr. 63 Rychlostní přerozdělení po délce optimalizované hlavy a variace v tloušťce</i>	67
<i>Obr. 64 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 1mm</i>	68
<i>Obr. 65 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 2mm</i>	68
<i>Obr. 66 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 3mm</i>	69
<i>Obr. 67 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 4mm</i>	69
<i>Obr. 68 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 5mm</i>	69
<i>Obr. 69 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 6mm</i>	70
<i>Obr. 70 Tokový kanál s výstupní štěrbinou 7mm</i>	70
<i>Obr. 71 Hmotnostní průtoky v závislosti na tloušťce výstupní štěrbiny</i>	71
<i>Obr. 72 Profil hlavy pro vytlačování tloušťky od 1 do 3 mm</i>	72
<i>Obr. 73 Výsledky toku plnicím kanálem (štěrbina 1mm)</i>	73
<i>Obr. 74 Smykové napětí po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 1mm)</i>	73
<i>Obr. 75 Tlaková ztráta po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 1mm)</i>	74
<i>Obr. 76 Rychlost smykové deformace po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 1mm)</i>	74
<i>Obr. 77 Rychlostní přerozdělení po délce hlavy a variace v tloušťce (štěrbina 1mm)</i>	74
<i>Obr. 78 Hmotnostní průtoky v závislosti na tloušťce výstupní štěrbiny (štěrbina 1-3mm)</i>	75
<i>Obr. 79 Profil hlavy pro vytlačování tloušťky od 4 do 7 mm</i>	75
<i>Obr. 80 Výsledky toku plnicím kanálem (štěrbina 4mm)</i>	76
<i>Obr. 81 Smykové napětí po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 4mm)</i>	77
<i>Obr. 82 Tlaková ztráta po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 4mm)</i>	77
<i>Obr. 83 Rychlost smykové deformace po délce vytlačovací hlavy (štěrbina 4mm)</i>	77
<i>Obr. 84 Rychlostní přerozdělení po délce hlavy a variace v tloušťce (štěrbina 4mm)</i>	78
<i>Obr. 85 Hmotnostní průtoky v závislosti na tloušťce výstupní štěrbiny (štěrbina 4-7mm)</i>	78
<i>Obr. 86 Polovina modelu zadané vytlačovací hlavy</i>	82
<i>Obr. 87 Vysíťovaný profil tokového kanálu vytlačovací hlavy</i>	83
<i>Obr. 88 Vytvoření 3D průtokové mřížky</i>	84
<i>Obr. 89 Definice vstupu, výstupu a osy toku</i>	84
<i>Obr. 90 Smykové napětí po průřezu zadané vytlačovací hlavy</i>	85
<i>Obr. 91 Hodnoty smykového napětí na stěně zadané vytlačovací hlavy</i>	86
<i>Obr. 92 Rychlost smykové deformace na stěně zadané vytlačovací hlavy</i>	87
<i>Obr. 93 Tlaková ztráta v zadané vytlačovací hlavě</i>	88

<i>Obr. 94 Průběh tlaku po délce zadané vytlačovací hlavy.....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 95 Rychlostní přerozdělení taveniny v zadané vytlačovací hlavě.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 96 Detail oblasti regulovatelného brzdného můstku a hodnoty elongační deformace v zadané vytlačovací hlavě</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 97 Polovina modelu optimalizované vytlačovací hlavy.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 98 Smykové napětí po průřezu optimalizované vytlačovací hlavy</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 99 Smykové napětí na stěně optimalizované vytlačovací hlavy.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 100 Rychlost smykové deformace na stěně optimalizované vytlačovací hlavy</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 101 Tlaková ztráta po délce optimalizované vytlačovací hlavy</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 102 Průběh tlaku po délce optimalizované vytlačovací hlavy.....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 103 Rychlostní přerozdělení taveniny v optimalizované vytlačovací hlavě</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 104 Detail oblasti výstupu z plnicího kanálu a hodnoty elongační deformace v optimalizované vytlačovací hlavě</i>	<i>96</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Vybrané vlastnosti HDPE[8]</i>	33
<i>Tab. 2 Vybrané vlastnosti LDPE[8]</i>	33
<i>Tab. 3 Vybrané vlastnosti PP[8]</i>	34
<i>Tab. 4 Vybrané vlastnosti PVC[8]</i>	34
<i>Tab. 5 Vybrané vlastnosti PS[8]</i>	35
<i>Tab. 6 Vybrané vlastnosti PET[8]</i>	35
<i>Tab. 7 Vybrané vlastnosti ABS [8]</i>	36

SEZNAM PŘÍLOH

P I – CD s vytvořenými analýzami