

Porovnání CAE aplikací pro analyzování vstřikovacího procesu

Bc. Tomáš Skála

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš SKÁLA**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Porovnání CAE aplikací pro analyzování
vstřikovacího procesu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Vytvořte reprezentativní analýzy v porovnávaných CAE aplikacích.
3. Vyhodnoťte zjištěné výsledky analýz a proveďte porovnání.
4. Specifikujte klady a zápory porovnávaných CAE aplikací.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] MLEZIVA, Josef, ŠŇUPÁREK, Jaromír. **Polymery : výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha : Sobotáles, 2000. 537 s. ISBN 80-85920727.**

[2] MORRISON, Faith A. **Understanding Rheology. New York : Oxford University Press, 2001. 545 s. ISBN 0-19-514166-0.**

[3] FUH, J. Y. H., et al. **Computer-aided injection mold design and manufacture. New York : Marcel Dekker, 2004. 372 s. Plastics Engineering. ISBN 0824753143.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Štěpán Šanda

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

20. února 2009

Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2009

Ve Zlíně dne 16. února 2009


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

Příjmení a jméno:

Obor:

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

.....

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 nevýdělečně 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 vzdělávacímu 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). Odpírá-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

Tato diplomová práce je zaměřena na porovnání CAE aplikací - Mouldflow a Cadmould pro analýzu vstřikovacího procesu. Práce obsahuje teoretickou část zabývající se rozdělením polymerů, základní charakteristiku reologie polymerů a rozdělení CAD systémů. V praktické části této práce je stručný popis srovnávaných programů na analýzu vstřikovacího procesu a následný popis úpravy vstřikovaných dílů.

Klíčová slova: CAD, Mouldflow, Cadmould, Polymery, Vstřikování

ABSTRACT

This thesis is focused on the comparison of CAE applications – Mouldflow and Cadmould – injection process analysis. The work contains a theoretical part dealing with classification of polymers, the main features of polymer's rheology and classification of CAD systems. In the experimental part of this work there is a brief description of the programs compared to the analysis of the injection process and the subsequent description of the injected parts adjustment.

Keywords: CAD, Mouldflow, Cadmould, Polymers, Injection moulding

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 VSTŘIKOVÁNÍ	11
1.1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	11
1.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ	12
1.2.1 Vstřikovací jednotka	13
1.2.2 Uzavírací jednotka.....	15
1.3 NÁSTROJ – VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	15
1.4 POLYMERY	16
1.4.1 Termoplasty.....	17
1.4.2 Reaktoplasty	20
1.4.3 Elastomery.....	20
2 REOLOGIE POLYMERŮ	21
2.1 VISKOELASTICKÉ CHOVÁNÍ	21
2.1.1 Viskózní chování (Newtonův model)	22
2.1.2 Elastické chování (Hookův model).....	23
2.1.3 Viskoelastické chování (Maxwellův model).....	23
2.1.4 Normálová napětí	24
2.2 ČASOVÁ ZÁVISLOST NAPĚTÍ.....	25
2.2.1 Relaxační čas.....	25
2.2.2 Překmit napětí	26
2.3 VISKOZITA.....	27
2.3.1 Smyková viskozita	27
2.3.2 Elongační viskozita	29
2.3.3 Viskozitní modely	30
2.4 ČISTÝ USTÁLENÝ TOK.....	33
2.5 ČISTÝ USTÁLENÝ ELONGAČNÍ TOK.....	34
2.6 FONTÁNOVÝ TOK.....	34
2.7 VSTŘIKOVACÍ PROCES	35
2.7.1 MAD – Moulding Area Diagram	35
2.7.2 Vady a chyby výrobku.....	35
2.7.3 pVT diagramy	36
3 CAX SYSTÉMY	38
3.1 VYSVĚTLENÍ CAX SYSTÉMŮ.....	39
3.1.1 CAD (Computer Aided Design).....	39
3.1.2 CAM (Computer Aided Manufacturing).....	40
3.1.3 CAE (Computer Aided Engineering).....	40
3.2 CAE PROGRAMY NA PODPORU VSTŘIKOVÁNÍ.....	41
3.2.1 Cadmould 3D – F.....	41

3.2.2	Moldflow Plastics Insight® (MPI®).....	43
4	METODY VÝPOČTU CADMOULD 3D-F A MPI®	48
4.1	CADMOULD 3D – F.....	48
4.2	MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT (MPI)	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	52
5	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	53
6	OKRAJOVÉ PODMÍNKY ANALÝZ.....	54
6.1	VÝROBKY.....	54
6.1.1	Krytka.....	54
6.1.2	Redukce.....	55
6.1.3	Světlomet.....	56
6.2	PROCESNÍ PODMÍNKY	56
6.2.1	Nastavení analýzy v programu CADMOULD	56
6.2.2	Krytka.....	58
6.2.3	Redukce.....	60
6.2.4	Světlomet.....	62
6.2.5	Nastavení analýzy v programu Moldflow Plastics Insight.....	64
6.2.6	Krytka.....	66
6.2.7	Redukce.....	66
6.2.8	Světlomet.....	67
6.3	VSTRÍKOVACÍ STROJE	68
6.4	POUŽITÁ POČÍTAČOVÁ SESTAVA	69
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	71
7.1	KRYTKA	71
7.2	REDUKCE	75
7.3	SVĚTLOMET.....	77
8	POROVNÁNÍ POUŽITÝCH ROZMĚRŮ	79
8.1	PRÁCE S MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT.....	79
8.2	PRÁCE S CADMOULD 3D – F	79
8.3	VÝHODY A NEVÝHODY	80
	ZÁVĚR	82
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
	SEZNAM TABULEK.....	89
	SEZNAM PŘÍLOH.....	90

ÚVOD

Plasty jsou všude kolem nás a používají se téměř ve všech oborech. Plastové výrobky nahrazují materiály, jako jsou například dřevo, ocel, sklo atd. Důvodů proč se tyto materiály nahrazují, je několik. Patří sem cena materiálu, hmotnost, stejné mechanické vlastnosti někdy i lepší a teplota zpracování. Nejčastějším způsobem výroby plastových výrobků je technologie vstřikování. Technologie vstřikování plastů patří v dnešní době mezi nejpoužívanější výrobní procesy plastových výrobků pro všechny odvětví v průmyslu. Touto technologií se vyrábějí jak výrobky z termoplastů a reaktoplastů.

Technologie vstřikování je poměrně složitý a přesný proces, skládá se z několika částí, nejdříve se musí navrhnout a vyrobit forma, dále určit vstřikovací stroj a nakonec navrhnout správné vstřikovací podmínky, aby výrobek byl co nejdokonalejší. Návrh a výroba formy je nejdůležitějším parametrem pro správnost výrobku, záleží jen na zkušenostech a zručnosti konstruktéra jak danou formu navrhne, a posléze jak přesně a za jakou cenu je vyrobena. V dnešní moderní výrobě je nemyslitelné pracovat bez důsledné automatizace předvýrobních etap jako například design výrobku, technologického postupu výroby, její příprava a plánování. Využívají se všechny možnosti výpočetní techniky, která se pomalu stává nepostradatelnou součástí našeho života. Nasazení výpočetní techniky velice usnadňuje konstruktérům navrhování a design výrobku a zvyšuje produktivitu práce. Například je možné simulovat tok polymeru v navržené dutině formy, jestliže jsou zjištěny nedostatky, tak stačí opravit pouze datový model.

V dnešní době existuje spousta konstrukčních programů, které konstruktéra zastupují při práci. Tyto systémy jsou označovány souhrnně zkratkou CAx (Computer Aided x), kde písmenko x znamená další název procesu, kde se tyto programy používají jako např. CAD (D – Design), CAE (E – Engeneering) atd. Mezi tyto programy patří Moldflow Plastics Insight® a Cadmould 3D – F. Tyto programy slouží na analýzu vstřikování plastů, o tom také pojednává tato diplomová práce.

V teoretické části je popsáno základní rozdělení polymerů a základní reologické vlastnosti polymerů. Dále je zde rozdělení CAD softwaru a jeho vysvětlení a nakonec popis CAE softwaru Cadmould 3D – F a Moldflow Plastics Insight®. Praktická část obsahuje analýzy zadaných výrobků v obou programech.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikováním se zpracovávají plasty i kaučukové směsi. Touto technologií se vyrábějí výrobky, které mají buď charakter konečného výrobku, nebo to jsou polotovary, nebo díly pro další zkompletování samostatného celku. Technologie vstřikování umožňuje výrobu relativně složitých součástí například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu ve zdravotnictví atd. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. [1]

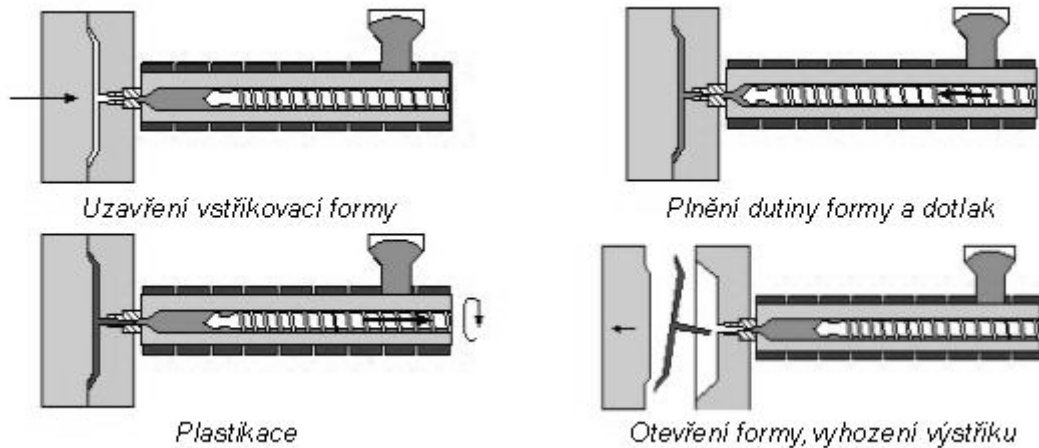
Vstřikování je cyklický tvářecí proces, při kterém se materiál plastickém stavu vstřikuje do dutiny formy za vysokého tlaku. Na vstřikování se podílí výchozí materiál, ze kterého se vyrábí požadovaný výrobek. Výrobní cyklus, především vstřikovací stroj a ostatní zařízení umožňující přípravu taveniny a její dopravu za daných podmínek. Nakonec forma jako nástroj pro tváření taveniny, ze které vznikne konečný výrobek. Tito činitelé určují vlastnosti a kvalitu konečného výrobku (výstřiku). [2]

1.1 Technologie vstřikování

Vstřikování je způsob tváření plastů, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu z pomocné tlakové komory (šnek, píst) vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny (kovové formy), kde ztuhne ve finální výrobek. Tlaková komora je součástí vstřikovacího stroje a zásoba vstřikovaného materiálu se v ní stále doplňuje během cyklu. Výhody vstřikování jsou krátký čas cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou, ale i konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. [10]

Vstřikování charakterizuje vstřikovací cyklus (Obr. 1), který se skládá z cyklu plastikační jednotky a cyklu formy. Nejdříve dojde k uzavření vstřikovací formy. Ve vstřikovací jednotce dochází k plastikaci polymeru (přechod tuhé fáze polymeru na taveninu), který je dodáván ve formě granulí. Posléze je vstřikovací jednotka přisunuta k formě, a po dosednutí vstřikovací jednotky k formě dojde vstříknutí polymeru. Po naplnění dutiny formy taveninou dochází k chladnutí taveniny. Chladnutí taveniny je provázáno objemovými změnami. Po zatuhnutí vtokového systému dochází k dalšímu tuhnutí ve formě. Ve vstřik-

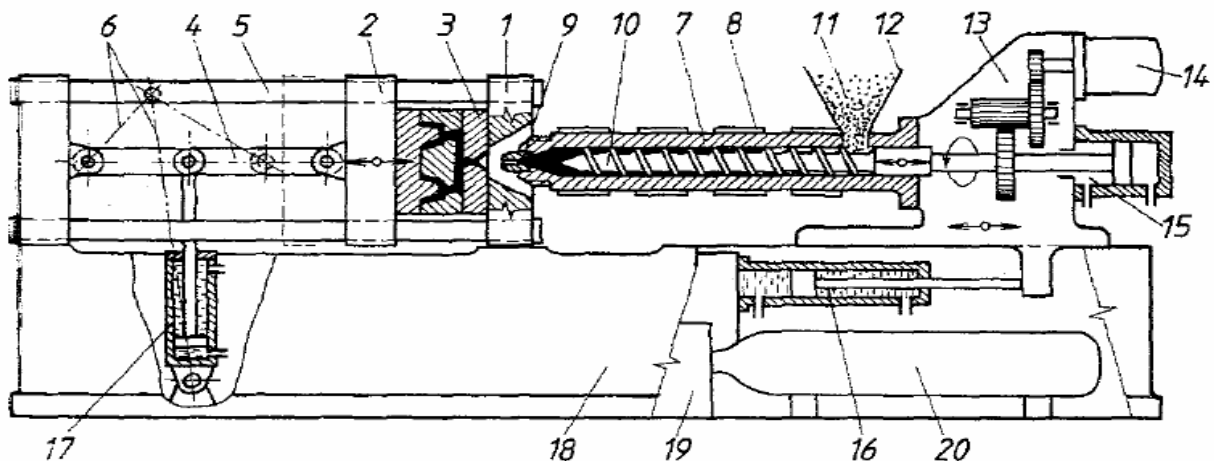
kovací jednotce mezitím probíhá příprava taveniny a celý cyklus se opakuje. [1]. Diagram vstřikovacího cyklu je v příloze PI.



Obr. 1 Vstřikovací cyklus [10]

1.2 Vstřikovací stroj

Celý vstřikovací cyklus realizují vstřikovací stroje, které musejí mít uzavírací jednotku ovládající formu (uzavírání, otvírání a vyhazování výstřiku) a vstřikovací jednotku kde se připravuje tavenina a její vstříknutí do formy. [4]

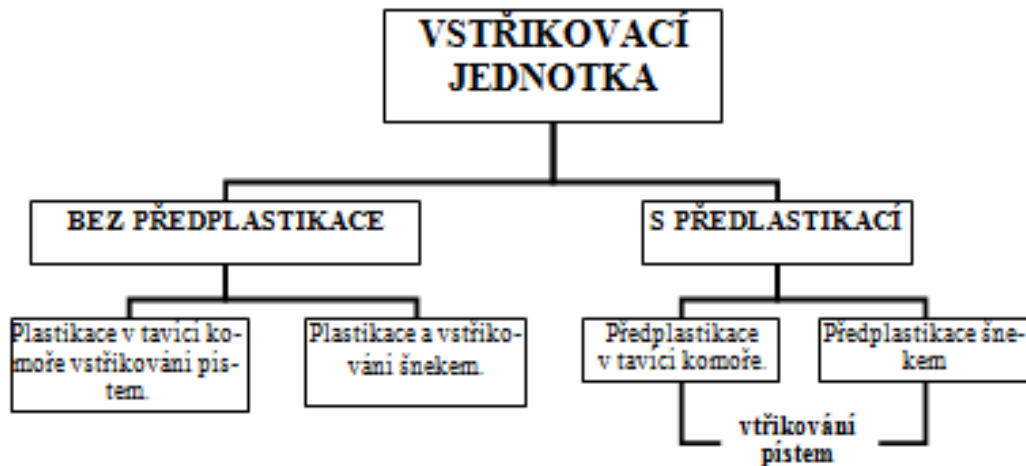


Obr. 2 Vstřikovací stroj [10]

1 - pevná upínací deska, 2 - posuvná upínací deska, 3 - forma, 4 - kloubový uzávěr formy, 5 - vodící tyče, 6 - osy pák při otevřené poloze formy, 7 - topný válec, 8 - elektrické topení, 9 - tryska, 10 - šnek, 11 - termoplast, 12 - násypka, 13 - převodovka s regulací otáček šneku, 14 - elektromotor, 15 - hydraulický posuv šneku, 16 - hydraulický posuv vstřikovací jednotky, 17 - hydraulické ovládání kloubového uzávěru, 18 - lože, 19 - čerpadlo s hydraulickým rozvaděčem, 20 - plynový hydraulický akumulátor

1.2.1 Vstříkovací jednotka

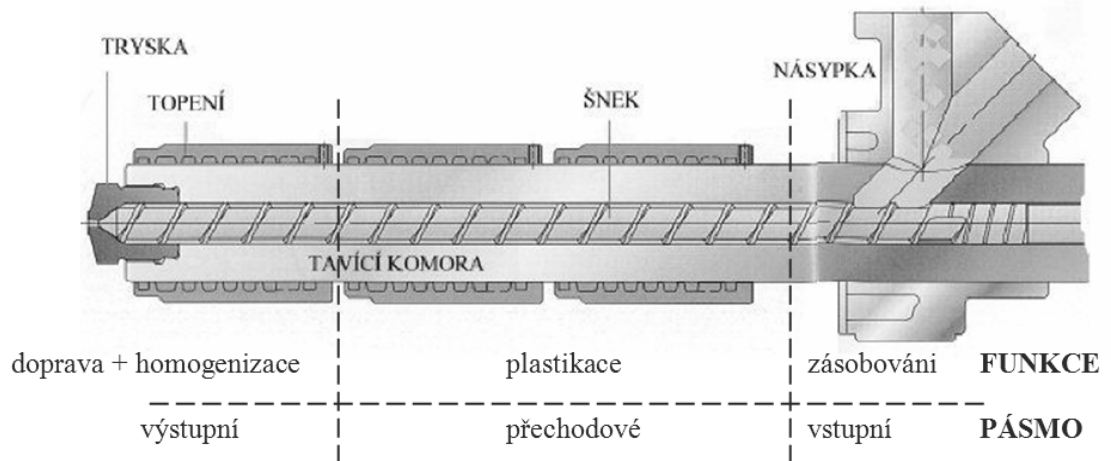
Vstříkovací jednotka zajišťuje co nejdokonalejší plastikaci materiálu (přechod tuhé fáze polymeru na taveninu) a homogenizaci taveniny. Dále zaručuje dostatečný vstříkovací tlak. Vstříkovací jednotky se dělí podle způsobu plastikace. (Obr. 3)



Obr. 3 Vstříkovací jednotky

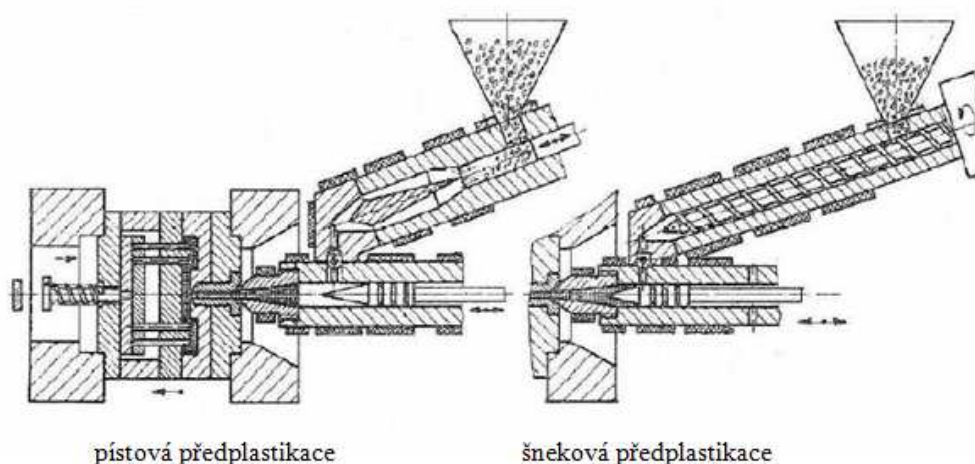
Ve vstříkovací jednotce bez předplastikace probíhá plastikace v tavicí komoře (pístová plastikace) nebo v pracovním válci (šneková plastikace). Při pístové plastikaci se dávkuje zpracováváný materiál do tavicí komory a to buď objemově, nebo hmotově. V tavicí komoře se materiál roztaví a tavenina se vstříkne pomocí vstříkovacího pístu do dutiny formy. Teplo potřebné na ohřátí materiálu se dodává pomocí topných pásů, které jsou kolem tavicí komory. [4]

Při šnekové plastikaci (Obr. 4) se šnek otáčí a v hrdle násypky nabírá granulovaný plast, který stlačuje a dopravuje jej do vytápěných částí tavicí komory. V této části komory se z granulátu stává tavenina, která se hromadí před čelem šneku. Šnek během otáčení ustupuje dozadu. Po zplastikování potřebného množství plastu se otáčivý pohyb šneku zastaví a šnek se bez otáčení pohybuje dopředu jako píst a vstříkuje taveninu do dutiny formy, aby se roztavený plast nedostal zpátky, je šnek opatřen zpětným ventilem. Jelikož plastikace nové dávky plastu může probíhat ještě ve fázi chlazení výstřiku ve formě, je výrobní cyklus kratší oproti pístovým strojům. [4]



Obr. 4 Šneková plastikační jednotka

Zajištění dostatečného plastikačního výkonu a dokonalé homogenizace taveniny vedly k rozdělení vstřikovací jednotky na část plastikační a část vstřikovací. Zpracovávaný materiál se plastikuje v oddělené plastikační jednotce a takto připravená tavenina se dopravuje do vstřikovacího válce, odkud se pak vstříkne pístem do formy. Toto uspořádání umožňuje výrazné zkrácení vstřikovacího cyklu. Plastikace probíhá v plastikační komoře (pístová plastikace) nebo v pracovním válci (šneková plastikace). Vstříknutí taveniny je provedeno v obou případech vstřikovacím pístem. [4]



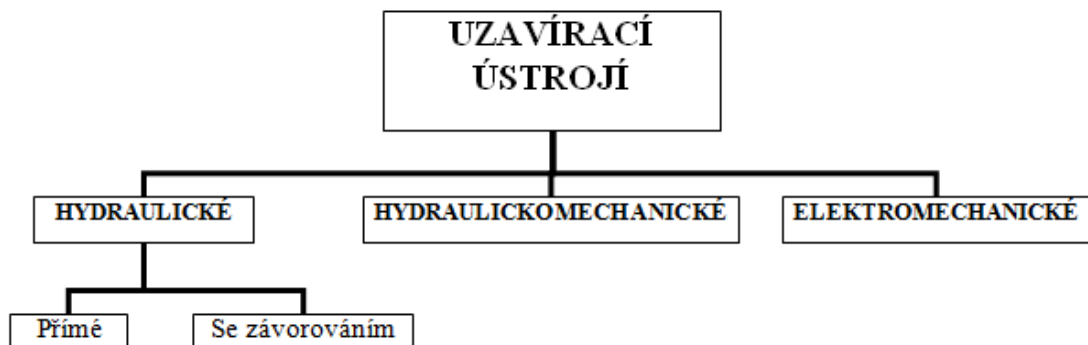
Obr. 5 Vstřikovací jednotka s předplastikací

1.2.2 Uzavírací jednotka

Hlavním cílem uzavírací jednotky je zaručit spolehlivé otevírání a uzavírání formy. Uzavírací síla uzavírací jednotky musí být větší než vstřikovací tlak jinak by došlo k otevření formy a následnému vytečení polymeru ven. Vstřikovací stroje mají nejčastěji sloupovou nosnou konstrukci. Menší stroje zpravidla mívají dvou sloupovou konstrukci, větší stroje čtyř sloupovou konstrukci. Vodící nebo nosné sloupy spojují desky lisu a zároveň slouží k vedení jeho pohyblivých částí. [10]

Otevření a bezpečné uzavření formy zajišťuje uzavírací ústrojí. Požadovaná uzavírací síla je závislá na velikosti stroje, na velikosti plochy průřezu výstřiku v dělicí rovině a na velikosti vstřikovacího tlaku. [10]

Podle druhu pohonu lze rozdělit uzavírací jednotku na hydraulickou, hydraulickomechanickou, elektromechanickou. (Obr. 6) [4]



Obr. 6 Rozdělení uzavíracích jednotek

1.3 Nástroj – vstřikovací forma

Vstřikovací formy se používají při zpracování termoplastů, reaktoplastů i kaučukových směsí. Řešení vstřikovací formy vychází z technologického hlediska příslušného výrobku. V podstatě se musí respektovat jak vlastnosti zpracovávaných materiálů, tak možnosti výrobních zařízení i dané požadavky na kvalitu výrobků a produktivitu práce. Zpravidla se požaduje, aby výstřiky nevyžadovaly náročné dokončovací operace. Forma dává tavenině po ochlazení výsledný tvar a rozměry výrobku, při zachování požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností. Její dobrá kvalita plní požadavky [4]:

- technické, které zaručují správnou funkci formy, která musí vyrobit požadovaný počet součástí v náležité kvalitě a přesnosti. Má také splňovat podmínku snadné manipulace i obsluhy při výrobě součástí.
- ekonomické, které se vyznačují nízkou pořizovací cenou, snadnou a rychlou výrobou dílů při vysoké produktivitě práce.
- Společensko-estetické, které umožňují vytvářet vhodné prostředí pro bezpečnou práci. Vyžaduje dodržení všech bezpečnostních zásad při konstrukci, výrobě i provozu formy.

Důležitým úkolem při konstrukci forem je všeobecné stanovení rozměrů a výrobních tolerancí tvarových částí formy. Pro výpočet a stanovení těchto rozměrů jsou rozhodující smrštění, tolerance jednotlivých rozměrů výstřiku, apod. [4]

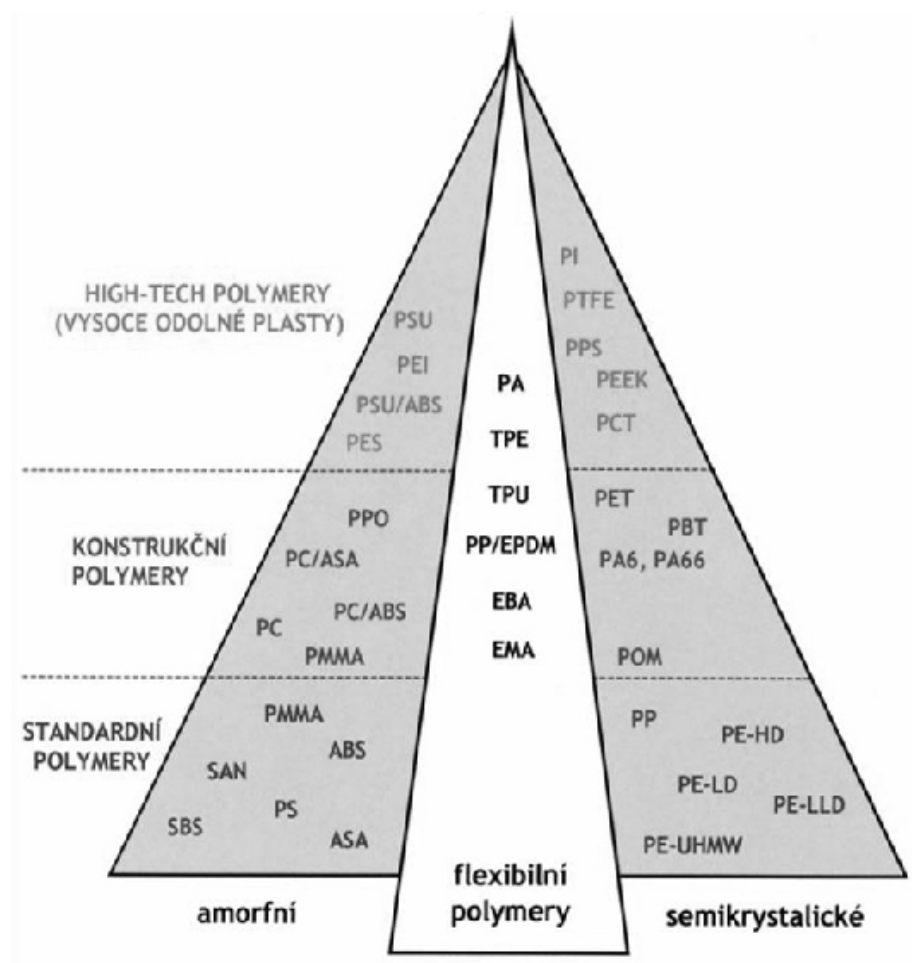
1.4 Polymery

Polymery mají všestranné použití při výrobě. Mohou nahrazovat klasické materiály jako jsou kovy, keramika, sklo, dřevo, aj., jednak mohou mít vlastnosti zcela odlišné od těchto surovin, takže umožňují úplně nové aplikace a nová řešení materiálových problémů. Řada polymerů se vyrábí z relativně levných a dostupných surovin, a může tedy nahradit drahé a nedostatkové materiály. Polymery lze snadno zpracovávat tvářením z taveniny nebo roztočku umožňující rychlou a levnou výrobu předmětů hromadné výroby. Plasty mají nízkou hustotu, často dobré elektroizolační vlastnosti a relativně vysokou odolnost proti korozi. Ovšem i u polymerů existují vedle výhod i některé nedostatky například použitelnost je například omezena teplotou. [3]

Polymery jsou za běžných podmínek tvrdé a houževnaté nebo křehké. Slovo polymer pochází z řečtiny a znamená slovo mnoho (poly) částice (mer). Polymer jsou chemické látky obsahující ve svých obrovských molekulách atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, ale i dusíku, chlóru a jiných prvků. Za vyšší teploty přechází do stavu kapalného, což umožňuje tvářet polymer do budoucího výrobku. Typickým znakem plastů je velikost molekul. Bez výjimky jsou tvořeny makromolekulami, jejichž relativní molekulová hmotnost je 10^3 až 10^7 . [1], [5]

Plasty lze klasifikovat podle různých hledisek. Můžeme je rozdělit podle aplikace, kde se používají [3] :

- Plasty pro široké použití - polyolefiny (PE, PP), polystyrény (PS).
- Plasty pro inženýrské aplikace - polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylén (POM), polymethylmetakrylát (PMMA), termopolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice.
- Plasty pro špičkové aplikace - polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI).



Obr. 7 Aplikace polymerů [10]

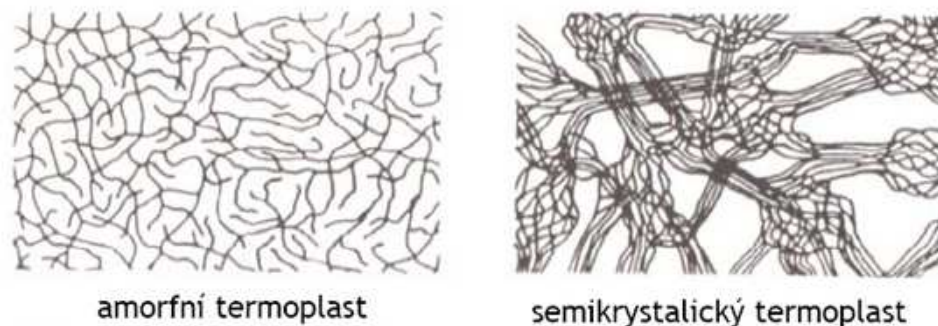
Polymery se dělí na plastomery, kam patří termoplasty a reaktoplasty, a elastomery, kam patří kaučuky. [3]

1.4.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery, které lze teplem většinou opakovaně tavit a ochlazením převést zpět do pevného stavu. Tváření je možné opakovat. Při zahřívání termoplastů pro-

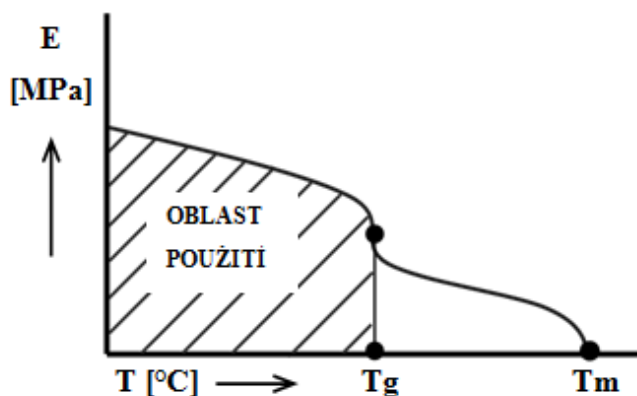
bíhají pouze změny fyzikální nikoliv chemické, tzn. chemická struktura nemění. Makromolekuly jsou buď lineární, nebo rozvětvené, a vytvářejí strukturu amorfni, nebo krystalickou. Termoplasty představují asi 80% všech používaných plastů. [5]

Termoplasty se z hlediska vnitřní struktury dělí na **amorfni** (jejichž řetězce jsou nepravidelně prostorově usprádané) a **semikrystalické** (tj. podstatná část řetězců je pravidelně a těsně usprádaná a tvoří krystalické útvary). [5]



Obr. 8 Amorfni a semikrystalický termoplast

Využitelnost výrobků z amorfni plastů je v oblasti pod teplotou skelného přechodu (T_g). Polymer je v tomto stavu pevný. Zvyšováním teploty nad T_g postupně slábnou kohezní síly mezi molekulami a plast přechází do plastické oblasti. To znamená, že se plast stává viskózním a v tomto stavu se zpracovává. Se zvyšováním narůstá i objem polymeru. [2]

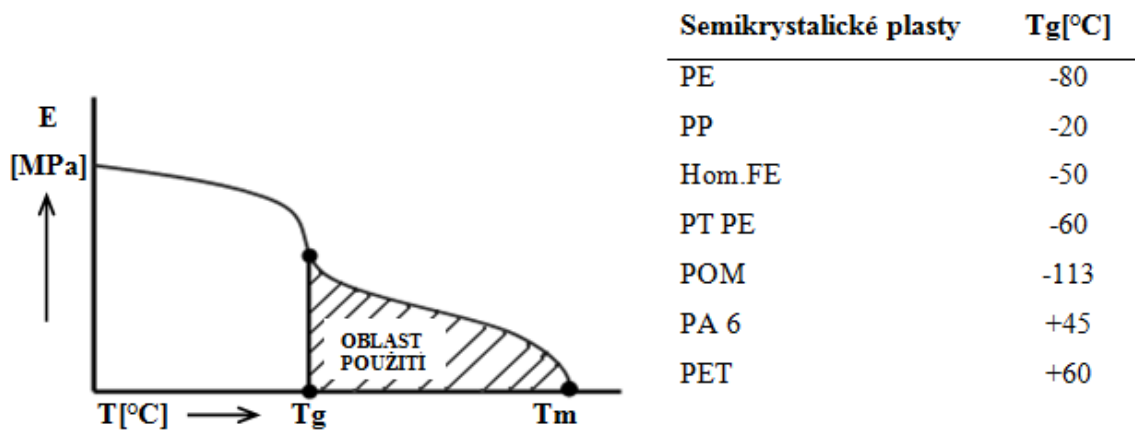


Amorfni plasty	T_g [°C]
PS	90-100
hPS	90
ABS	105-115
SAN	115
tr. PVC	85
PMMA	100
PC	144

Obr. 9 Oblast využití u amorfni plastů

U semikrystalických plastů jsou části makromolekul vázány pevněji v lamelách a ve sférolitech krystalické fáze. Zvyšováním teploty se nejprve uvolní část makromolekul z amorfni oblasti, potom i ostatní. To je doprovázeno značným objemovým nárůstem. Použití plastu

je potom v oblasti nad T_g , protože mají výhodnou kombinaci pevnosti a houževnatosti nad touto teplotou. [2]



Obr. 10 Oblast využití u semikrystalických plastů

Základní vlastnosti polymerů se mohou vlivem nejrůznějších přísad měnit a tím splnit požadavek volby vhodného plastu. Plniva zlepšují buď mechanické vlastnosti materiálu, nebo chemickou odolnost či tvarovou stálost při zvýšené teplotě, jiné jen hmotu zlevňují. Rozeznáváme vyztužující (skleněná, uhlíková, kovová vlákna, popř. textilní ústřížky do obsahu maximálně 50 %, neboť pro správnou funkci vyztužujícího plniva je důležité, aby bylo dokonale obaleno pojivem) a nevyztužující plniva ve formě prášku, které se většinou přidávají z důvodu snížení ceny materiálu (moučka z břidlice, kaolinu, křídly). [10]



kovové piliny



skleněná vlákna

Obr. 11 Vyztužující plniva [10]

Jiná plniva (např. grafit) zlepšují kluzné vlastnosti, práškové kovy zlepšují tepelnou vodivost. Přídavkem sazí (zejména u polyolefinů) se zvyšuje odolnost proti UV záření, atd. Obsah nevyztužujících plniv bývá až 70 %. Zvláštním typem plniva jsou skleněná nebo kovové kuličky, které zvyšují rozměrovou stabilitu a odolnost proti rázům. [10]

Jak další přísady se používají [1], [3], [10]:

- Stabilizátory – zlepšují např. odolnost proti vyšším teplotám při jejich zpracování, proti UV záření, stárnutí, atd.
- Barviva – slouží k obarvení polymeru (obsah do 10 %).
- Změkčovadla – zlepšují houževnatost, zpracovatelnost a ohebnost materiálu, ovšem na úkor mechanických vlastností.
- Nadouvadla – uvolňují při zpracování plyny a vytváří strukturu plastu se specifickými vlastnostmi (obsah 0,5 ÷ 2 %)
- Retardéry hoření – působí samozhášivě, zpomalují proces hoření plastů nebo vůbec nedovolí vznícení plastu.

1.4.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty se působením tepla stávají nízkomolekulárními sloučeninami (krátké řetězce monomerů vzniklé přerušением polyreakce v určité fázi výroby polymeru) jsou po omezenou dobu plastické. Polyreakce pokračuje dalším ohřevem a jejím výsledkem je prostorově zesíťovaná amorfnní (neuspořádaná) struktura molekul. Tento děj se nazývá vytvrzování a je nevratný (tj. po tomto se nedají reaktoplasty na dále tvarovat a zpracovávat). Vytvrzená hmota je netavitelná a nerozpustná. Jednotlivé úseky jsou hustě propojeny chemickými vazbami tak, že je možné celý výrobek považovat za jednu molekulu. [5]

1.4.3 Elastomery

Elastomery jsou vysoce elastické polymery, které lze za běžných podmínek, i při zatěžování malou silou, značně deformovat bez porušení. Tyto deformace mají vratný charakter. Při první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci tzv. vulkanizace – prostorové zesíťování struktury. [1],[10]

U elastomerů na bázi termoplastů (thermoelastomery) nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj. [1],[10]

2 REOLOGIE POLYMERŮ

Vědní obor reologie se zabývá deformací a tokem látek. Chování taveniny při jejím tečení a znalost reologických vlastností jsou důležité informace nejen pro zvolení vhodného materiálu do procesu, kontrolu požadovaných vlastností materiálu a kontrolu průběhu procesu, ale také pro navrhování strojních součástí jako jsou např. šneky, vstřikovací trysky, formy apod. k dosažení ekonomického a funkčního optima.[7]

V roce 1929 byla založena v USA Reologická společnost (Society of Rheology – S.O.R.) a přijala Herakleitovo heslo „PANTA REI“ (5. stol. Před n. l.), toto heslo znamená „Všechno teče“. Reakce polymerních kapalin, jako jsou taveniny a roztoky, na působení napětí, může za určitých podmínek připomínat chování tuhého tělesa. Toto chování se jmenuje viskoelastické chování. Zda se látka (tavenina) chová jako tuhá hmota nebo kapalina určuje Debořino číslo. [7]

2.1 Viskoelastické chování

Viskoelastické chování lze popsat pomocí Debořina čísla.

$$De = \frac{\lambda}{\theta} \quad (1)$$

θ – doba pozorování

λ – relaxační čas materiálu - doba, za kterou se při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého proběhne 63% všech napěťových změn.

$\lambda = 10^{-2}$ [s] pro vodu

$\lambda = 10^2$ [let] pro solid – pevná látka

Například typický polymer s $\lambda = 1$ s, kdy doba zpracování je velká ($\theta \rightarrow \infty$), tj. $De \rightarrow 0$, materiál se chová jako kapalina. Je-li doba zpracování krátká ($\theta \rightarrow 0$), tj. $De \rightarrow \infty$ a polymer se bude chovat jako tuhá látka. V mnoha postupech zpracování polymerů může průchod hlavou nebo formou trvat 0,1–1 s a $De = 1-10$ proto má chování charakter jak kapaliny (viskozita) tak tuhé látky (elasticita) a proto je nazýváno viskoelastické chování. Pro popis viskoelastického chování jsou vytvořeny modely, které tento děl popisují. [1]

Hookovská elasticita a Newtonský tok jsou dva mezní případy reologického chování. Polymery se k jednomu či druhému extrému mohou podle vnějších podmínek více nebo méně přiblížit. Obecně je však jejich odezva na působení vnějších sil kombinací elastických a viskózních projevů. Takové chování se nazývá viskoelastické. Reálné systémy vykazují komplikované viskoelastické vlastnosti. Pro jejich pochopení je výhodné uvážit nejprve jednoduché kombinace elasticity a toku a znázorňovat si takové kombinace pomocí reologických modelů. Základními prvky reologických modelů jsou kombinace základních modelů Hookova modelu, který charakterizuje elastické chování a Newtonova modelu, který znázorňuje viskózní chování. [7]

2.1.1 Viskózní chování (Newtonův model)

Nejjednodušší viskózní model je Newtonův model, který je mechanický analog s válcem, v němž je píst. Píst se nevrací po ukončení působení síly do původní polohy. Matematicky se jedná o Newtonův zákon. (Obr. 12)

$$\tau_{ij} = 2\eta D_{ij} \quad (2)$$



Obr. 12 Newtonův model

D_{ij} – tenzor rychlosti deformace [s] – charakterizuje typ toku (smykový, elongační, kombinace)

η - viskozita [Pa·s] - je míra odporu kapaliny proti aplikované smykové síle.

τ_{ij} – tenzor napětí [Pa] - indexy i, j určují hodnotu napětí v daném místě prostoru, které je určeno těmito indexy. V každém místě prostoru působí na element různé napětí (síly) v různých směrech. Pomocí tenzoru napětí je, možné určit napěťový stav elementu, tj. tažení při toku.

2.1.2 Elastické chování (Hookův model)

Nejjednodušší elastický model je Hookův model, který je mechanický analog s pružinou. Pružina se vrací po natáhnutí do původní polohy tzn. elastické materiály mají paměť. Matematicky se jedná o Hookův zákon. (Obr. 13)

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$



Obr. 13 Hookův model

η - viskozita [Pa·s] - je míra odporu kapaliny proti aplikované smykové síle.

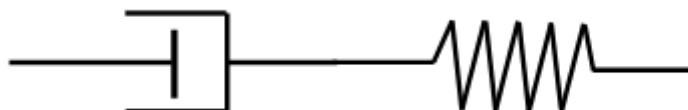
$\dot{\gamma}$ - rychlost smykové deformace [s⁻¹]- Je to podíl rozdílu rychlostí jednotlivých vrstev taveniny a vzdálenosti mezi nimi. Proto charakterizuje rychlost smýkání jednotlivých desek taveniny po sobě.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{y} \left[= \frac{1}{s} \right] \quad (4)$$

2.1.3 Viskoelastické chování (Maxwellův model)

Je to kombinace prvních dvou modelů (pístu a pružiny). Tyto modely píst + pružina zapojeny sériově a popisuje viskoelastické chování.

$$\tau_{ij} + \lambda \dot{\tau}_{ij} = 2\eta D_{ij} \quad (5)$$



Obr. 14 Maxwellův model

τ_{ij} - tenzor napětí [Pa] - indexy i, j určují hodnotu napětí v daném místě prostoru, které je určeno těmito indexy. V každém místě prostoru působí na element různé napětí (síly)

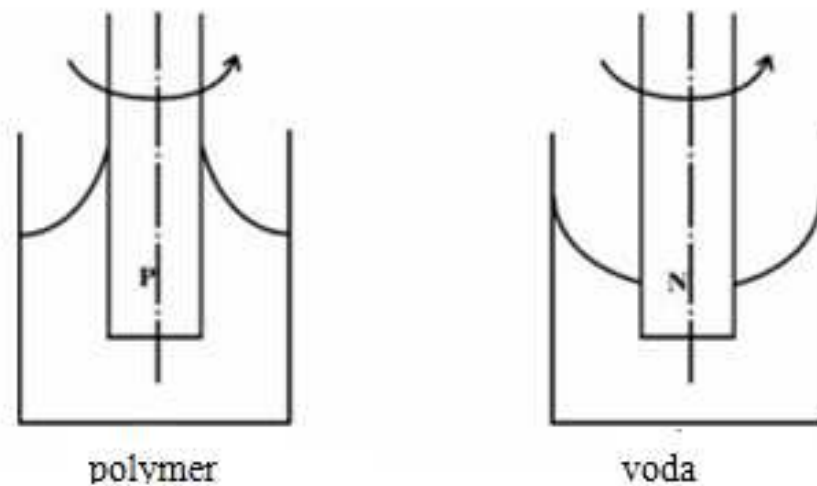
v různých směrech. A takto pomocí tenzoru napětí je možné určit napěťový stav elementu, tj. taveniny při toku (jak je namáhán a deformován).

$\dot{\tau}_{ij}$ - koformální časová derivace tenzoru napětí [Pa] - pohybuje s tekutinou a s ní se také deformuje. Je to derivace tenzoru napětí dle času.

λ – relaxační čas [s]

2.1.4 Normálová napětí

Normálová napětí charakterizují chování polymeru při namáhání. Toto chování je charakteristické díky výskytu dlouhých řetězců molekul. Dlouhé řetězce molekul mohou být znázorněny jako chování pryžových pružin nebo pásků. Při natahování jsou tyto pásky nebo pružiny natahovány kolem rotující hřídele a vykazují sílu kontrakce směrem k ose rotace jako zaškrcení což nutí kapalinu téci ve směru k ose. Toto stoupání se nazývá Weissenbergův efekt (Obr. 15) a mají na něj vliv normálová napětí N_1 a normálová napětí N_2 způsobují tzv. Korýtkový jev – zakřivení volného povrchu [7]



Obr. 15 Vliv normálových napětí - Weissenbergův efekt [1]

Stoupání po tyči může být použito pro měření rozdílu normálových napětí. Pomocí zařízení kužel deska se měří normálová síla N . Tímto může být ukázáno, že tato síla se vyvíjí ve štěrbině mezi kuželem a deskou vlivem rozdílu napětí.

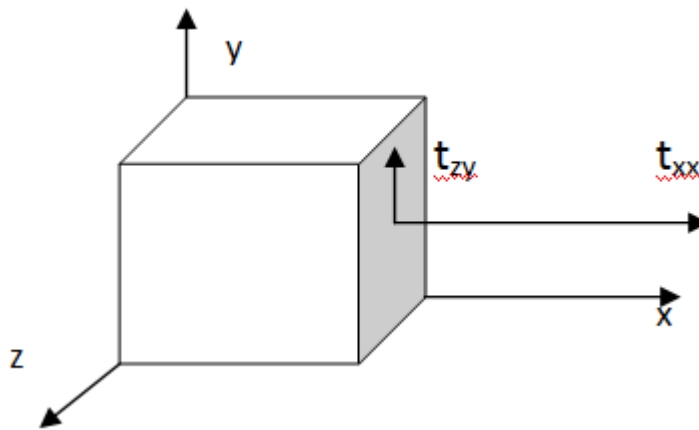
$$1. \text{ Rozdíl} \quad N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \tau_{xx} - p - (\tau_{yy} - p) = \tau_{xx} - \tau_{yy} \quad (6)$$

$$2. \text{ Rozdíl} \quad N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} = \tau_{yy} - p - (\tau_{zz} - p) = \tau_{yy} - \tau_{zz} \quad (7)$$

τ_{xx} , τ_{yy} – vnitřní smyková napětí [Pa] (Obr. 16) - toto už jsou normálová napětí, která jsou kolmá na plochu desky taveniny. Jestliže je jejich rozdíl nenulový, tak jsou označovány jako první a druhý rozdíl normálových napětí.

1. index = směr kolmý na rovinu, ve které působí napětí

2. index = směr napětí



Obr. 16 Vnitřní smyková napětí

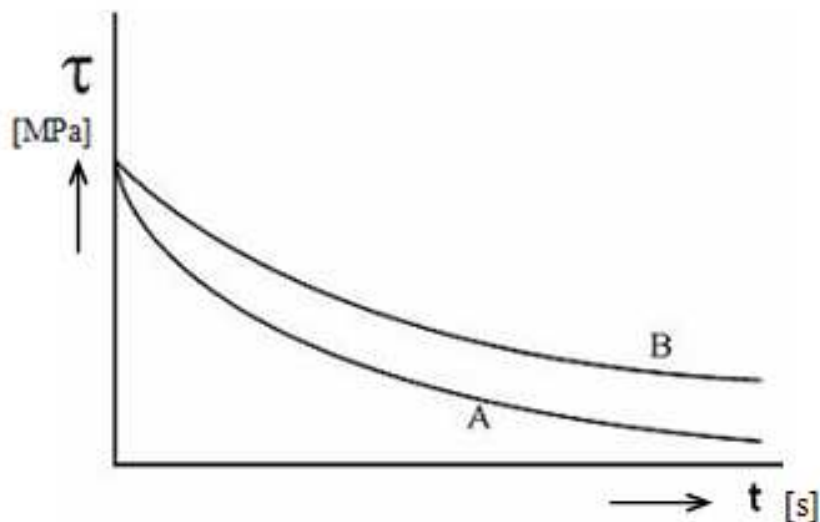
2.2 Časová závislost napětí

2.2.1 Relaxační čas

Relaxační čas je doba, za kterou při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého proběhne 63% všech napěťových změn. Fyzikální význam této veličiny může být lépe pochopen opět odvoláním se na mechanický analog. Pokud vyvodíme náhlé protažení, pružina bude okamžitě reagovat. Ovšem napětí se uvolní postupně (exponenciálně), jak se tlumič začne pohybovat a pohybuje se. Je-li dostatek času, napětí bude nakonec nulové. To platí pro polymerní taveninu namáhanou smykem ve viskozimetru. [1], [7]

Je-li rotace náhle zastavena, tj. $\dot{\gamma} = 0$, měřené napětí nebude okamžitě nulové, ale bude se uvolňovat exponenciálně. Polymer B má delší relaxační dobu než polymer A. Průběhy re-

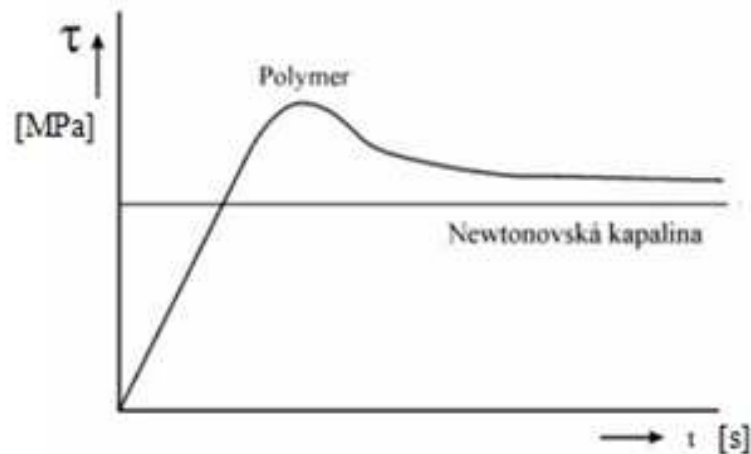
laxace napětí polymeru mohou tak být použity pro účely charakterizace (Obr. 17). Z toho vyplývá, že není dostačující charakterizovat polymery pouze jejich viskozitou, ale také pomocí jejich relaxačních dob. Má-li materiál dlouhé doby relaxace, je možné, že během zpracování ztuhne dříve, než napětí úplně relaxovalo. Takto můžeme vyrábět výrobky, které mají značné množství zamrzlých napětí. Tato napětí mohou být nakonec uvolněna a mohou vést k nežádoucím jevům smrštění a deformace nebo předčasnému vzniku trhlin nebo stárnutí. Relaxační charakteristiky jsou ovlivněny velikostí a pružností polymeru. Kapaliny s malými molekulami jako voda, mají velmi krátké relaxační doby, řádově 10^{-12} sekund podle teoretických odhadů, zatímco charakteristické doby relaxace polymeru jsou $10^{-2} - 10^2$ sekund. [1]



Obr. 17 Relaxace polymerů [1]

2.2.2 Překmit napětí

Při zahájení toku, např. ve viskozimetru kužel-deska, newtonské kapaliny dosáhnou úrovně vyvozeného napětí okamžitě, zatímco polymerní kapaliny vykazují jev překmitu. Překmit napětí je výsledek ustalování rovnováhy mezi zapleteninami polymerních řetězců při přechodu z jednoho ustáleného stavu do druhého ustáleného stavu. [1], [7] (Obr. 18)



Obr. 18 Překmit napětí [1]

2.3 Viskozita

2.3.1 Smyková viskozita

Smyková viskozita (η) je míra odporu kapaliny proti aplikované smykové síle (je-li velká tím méně kapalina teče). Viskozita tekutin jako voda nebo olej je ovlivňována teplotou, ale je konstantní s měnící se smykovou rychlostí. Tekutina, jejíž viskozita se nemění s měnící se smykovou rychlostí, se nazývá Newtonovská. Viskozita polymerních materiálů resp. její průběh je složitější. Při velmi nízké smykové rychlosti se polymerní materiál chová jako by byl Newtonovský. Se stoupající smykovou rychlostí se polymerní materiál stává ne-Newtonovským s exponenciální profilem, kde se snižující viskozitou stoupá smyková rychlost. Viskozita u dilatantních (Obr. 20) neNewtonovských tekutin stoupá se vzrůstající smykovou rychlostí. [1], [7]

Faktor ovlivňující proces vstřikování je smyková viskozita (η), ta má vliv na čelo taveniny (Obr. 19)



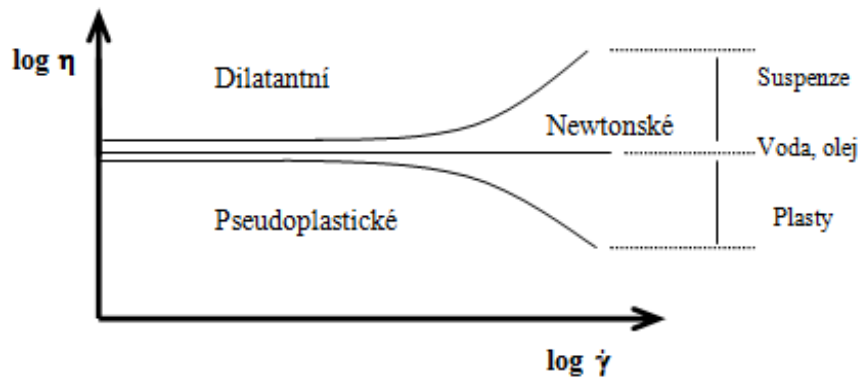
Obr. 19 Vliv smykové viskozity na čelo tavenin

Na proces vstřikování má velký vliv elongační viskozita (η_E). Velká elongační viskozita vstřikovací taveniny snižuje její zatékavost do dutiny formy. V dutině formy je elongační tok, čím je elongační viskozita větší tím je potřeba větší tlak na vyplnění dutiny. [7]

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}} \quad (8)$$

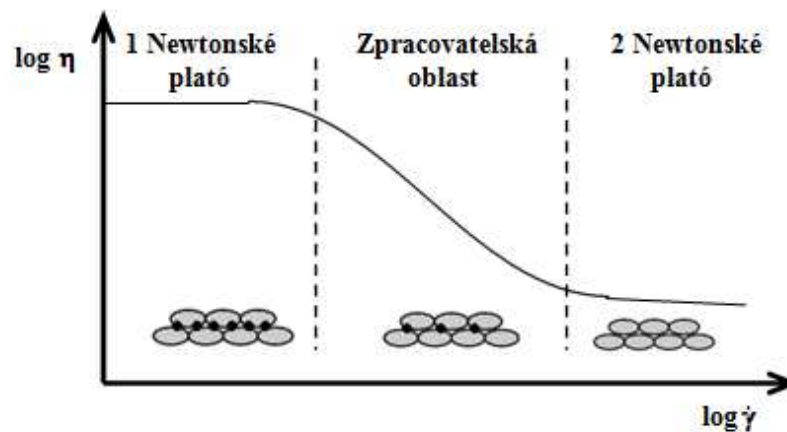
$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}] - Je to podíl rozdílu rychlostí jednotlivých vrstev taveniny a vzdálenosti mezi nimi. (viz. Vzorec 4)

τ_{xy} – smykové napětí [Pa] – (Obr. 16)



Obr. 20 Tokové křivky různých látek

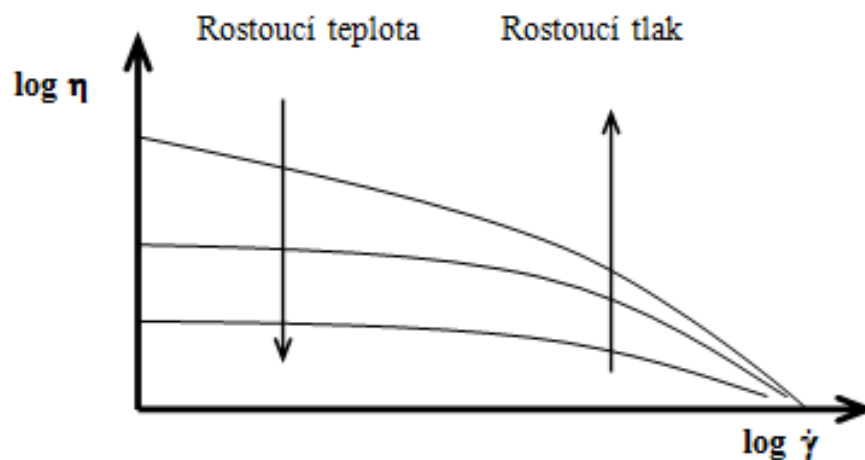
Výsledkem závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace je toková křivka (Obr. 21), které je určena vzájemným poměrem rychlostí vytváření a rozpadu zapletenin.



Obr. 21 Toková křivka

Toková křivka se skládá ze tří oblastí, které charakterizují stav vnitřní struktury taveniny. První částí je 1 Newtonské plató. V této oblasti je vznik a zánik zapletenin stejný tzn., vzniká rovnováha. Druhá oblast tokové křivky je zpracovatelská oblast, kde rychlost rozpadu zapletenin je větší než rychlost vytváření zapletenin. Poslední oblast je 2 Newtonské plató, kde při extrémní rychlosti smykové deformace se nestačí vytvářet zapleteniny. Proces vstřikování se pohybuje v druhé oblasti grafu (Zpracovatelské oblast). [7]

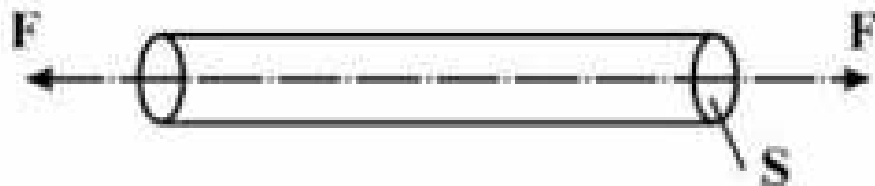
Obrázek 21 charakterizuje tokové křivky při působení teploty a tlaku. Při rostoucí teplotě viskozita klesá a při rostoucím tlaku se viskozita zvětšuje.



Obr. 22 Závislost η na teplotě a tlaku

2.3.2 Elongační viskozita

Uvažujme jednoosé protažení válce (Obr. 23) kapaliny. Samozřejmě, natahování sloupce jako je voda je obtížné zviditelnit. Ovšem roztavené polymery mají značnou pevnost taveniny a mohou být hodně natahovány, aniž by došlo k porušení. Ve skutečnosti tato vlastnost umožňuje výrobu syntetických vláken pro oděvy a jiné spotřební výrobky. Tato vlastnost polymerů je umožněna tzv. elongační viskozitou.[1]



Obr. 23 Jednoosé protažení válce

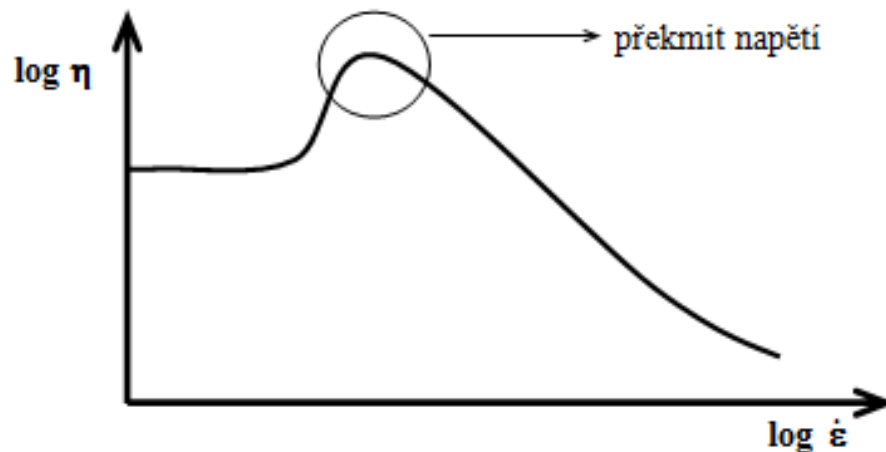
Elongační viskozita (η_E) charakterizuje odpor vůči protahování a je dána vztahem.

$$\eta_E = \frac{\tau_{xx} - \tau_{yy}}{\dot{\epsilon}} \quad (9)$$

τ_{xx}, τ_{yy} – vnitřní smyková napětí [Pa] – (Obr. 16)

$\dot{\epsilon}$ - rychlost elongační deformace [s⁻¹] – má stejný význam jako rychlost smykové deformace, nejedná se o smýkání, ale protahování.

Závislost elongační viskozity na rychlosti elongační deformace je na obrázku 23. Překmit napětí je způsoben dlouhými řetězci molekul. Tyto řetězce se musejí urovnat při napětí a tím vznikne překmit napětí.



Obr. 24 elongační viskozita

2.3.3 Viskozitní modely

Power – law model (Obr. 25) je nejjednodušší model, který popisuje tokové chování taveniny. Tokové vlastnosti jsou charakterizovány v podstatě přímkou **n-1** (tečna), která je zavedena pro zjednodušení výpočtu a je znázorněn vztahem (10) Směrnice **n-1**, kde **n** znamená index neNewtonského chování, které charakterizuje odklon přímky od Newtonského chování. [7]

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = m \alpha \dot{\gamma}^{n-1} \quad (10)$$

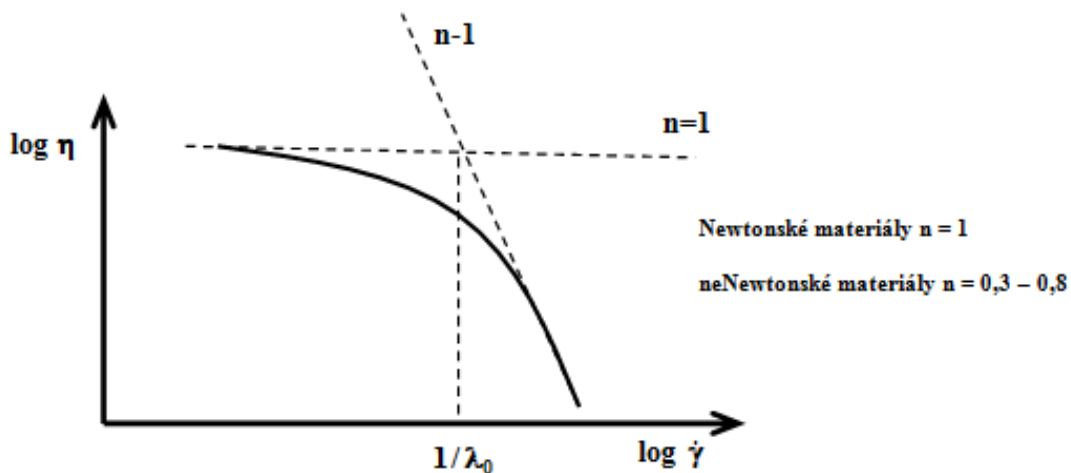
$n - 1$ – směrnice přímky - index neNewtonského chování, Power-law index [-]

- když je $n=1$, pak se jedná o newtonský material (viskozita je konstantní a nezávisí, tak na chování material)
- běžné hodnoty pro polymery mají hodnotu $n = 0,3$ až $0,8$

v mocninovém zákonu (Power law model) určuje sklon směrnice $n-1$.

m – index konzistence [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ kde $n = \text{konstanta}$] - čím je m větší tím je tavenina viskoznější (má větší viskozitu, je tuhší). V Mocninovém zákoně je to průnik osy y se směrnicí $n-1$. To znamená, že když se budeme blížit k newtonskému materiálu (n se bude blížit k 1), tak m bude mít nejmenší hodnotu.

α – obecná teplotní f-ce, udávající závislost viskozity na teplotě a rychlosti smykové viskozity



Obr. 25 Power – law model

Carreau – Yasuda model

Tento model obsahuje informaci o poloze přechodu Newtonské viskozity a viskozity pseudoplastické. [7]

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0 \alpha}{[1 + (\lambda_0 \alpha \dot{\gamma})^a]^{\frac{1-n}{a}}} \quad (11)$$

α – obecná teplotní f-ce, udávající závislost viskozity na teplotě a rychlosti smykové viskozity

a – charakterizuje oblast přechodu mezi Newtonskou a pseudoplastickou oblastí

n – index neNewtonského chování

Exponenciální model teplotní funkce

$$\alpha = e^{-b(T-T_0)} \quad (12)$$

b – teplotně citlivostní parametr [$^{\circ}\text{C}$] - vyjadřuje to, jak je materiál citlivý na změnu teploty což lze vidět na změně viskozity. Čím je větší, tím více mění své vlastnosti s teplotou. Změna je výrazná, protože se jedná o exponenciální chování, model. Obdobou je Arrheniův model.

T_0 – referenční teplota [$^{\circ}\text{C}$]

T – teplota aktuální [$^{\circ}\text{C}$]

Tento vztah platí v úzkém rozsahu teplot $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

Arrheniův model teplotní funkce

Model popisuje závislost ve větším teplotním pásmu ale nezahrnuje oblasti teplotních přechodů (tání, tečení, skelného přechodu). V těchto oblastech není přesný. [7]

$$\alpha = e^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (13)$$

E – aktivační energie [KJ/mol]

R – univerzální plynová konstanta – je fyzikální konstanta používaná ve stavové rovnici, kde uvádí do souvislosti různé stavové veličiny. Hodnota $R = 8,314 \text{ [JK}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{]}$

William – Lauden – Ferry model (WLF) teplotní funkce

Model nejlépe popisuje závislost teploty na viskozitě i v přechodových oblastech.[7]

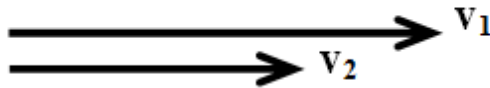
$$\alpha = 10 \left[\frac{C_1(T_0 - T_s)}{C_2 + T_0 - T_s} - \frac{C_1(T_0 - T_s)}{C_2 + T - T_s} \right] \quad (14)$$

Parametry C_1 , C_2 , T_s jsou tabelovány ve fyzikálních tabulkách.

T_0 – referenční teplota [$^{\circ}\text{C}$]

2.4 Čistý ustálený tok

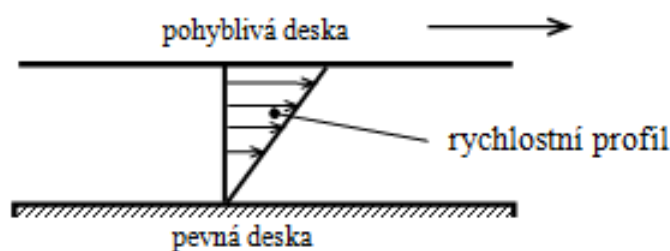
Smykový tok se charakterizuje přilehlými (sousedními) vrstvami které leží na sobě a pohybují se různou rychlostí. Změna rychlosti je pouze v kolmém směru (Obr. 26). Rozlišujeme několik typů smykového toku **unášivý tok** (drag flow) a **tlakem řízený tok** (pressure driven flow) [1], [7]



Obr. 26 Smykový tok

Unášivý tok (drag flow)

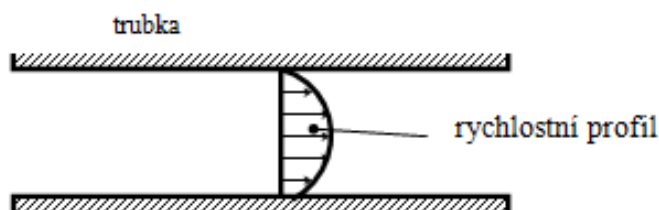
Unášivý tok je charakterizován dvěma deskami jednou pevnou a druhou pohyblivou. Pro transport materiálu, který je zapříčiněn pohybem horní desky není potřeba tlakového spádu.



Obr. 27 Unášivý tok

Tlakem řízený tok (pressure driven flow)

Tlakem řízený tok má parabolický rychlostí profil. Charakterizuje tok v trubce. Pro transport materiálu je potřeba tlakového spádu.



Obr. 28 tlakem řízený tok

Při smykovém toku se vytváří energie, která se přeměňuje na teplo. Tavenina je makromolekulární látka tvořená řetězci, které jsou složeny do makromolekulárních klubek, a bychom s klubky pohybovali, potřebujeme překonat zapleteniny (fyzikální interakce), při pohybu se klubka třou o sebe a vzniká disipace – přeměna mechanické energie na tepelnou energii. Čím rychleji pohybujeme řetězci tím je větší rychlost deformace a i disipované teplo. [7]

$$D = \eta \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (15)$$

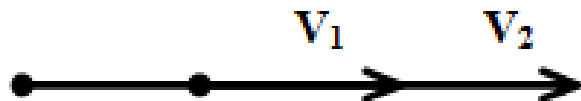
D – disipované teplo [$^{\circ}\text{C}$]

η – smyková viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}]

2.5 Čistý ustálený elongační tok

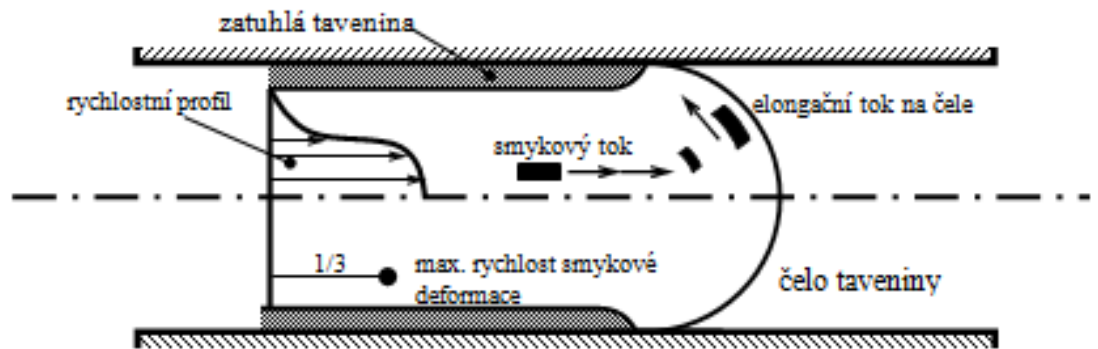
Elongační tok se charakterizuje přilehlými materiálovými částicemi s rozdílnými rychlostmi. Změna rychlosti částice je pouze ve směru jejího toku (ve smyku je nulová).



Obr. 29 Elongační tok

2.6 Fontánový tok

Tento způsob toku materiálu kanálem je přirovnáván k rozvíjejícímu se koberci. Materiál tekoucí středem kanálu je neustále tlačěn k jeho obvodu, kde tuhne a nový materiál tekoucí za ním proteče dál mezi ztuhlými vrstvami dopředu. Jakmile se dostane na samotnou špičku toku, je rovněž zatlačen ke stěně, kde ztuhne. Pohyb taveniny na špičce toku se podobá tryskání vody ve fontáně, proto se tomuto toku říká fontánový tok. Fontánový tok, je způsoben absencí skluzu mezi taveninou a stěnou. Rychlostní profil při fontánovém toku má charakter zvonu, mění se zde konkávní oblouk na konvexní. Rychlost smykové deformace je největší v 1/3 od stěny k ose (struktura vláken je jiná u stěny a jiná v 1/3). [7]

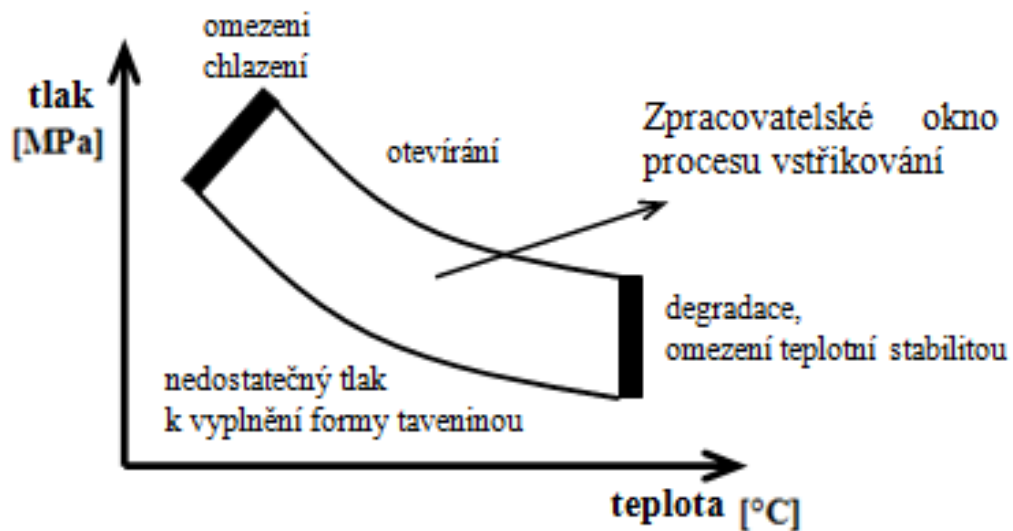


Obr. 30 Fontánový tok

2.7 Vstřikovací proces

2.7.1 MAD – Moulding Area Diagram

Vstřikování se dá charakterizovat diagramem MAD (Moulding Area diagram), (Obr. 31). Pro daný tlak se mění teplota a sleduje se, zda jde materiál vstřikovat, nebo jestli výrobek vypadá dobře.



Obr. 31 MAD diagram

2.7.2 Vady a chyby výrobku

Problémem, který může výrazně ovlivnit kvalitu výstřiku je styk dvou proudů taveniny, např. v důsledku obtoku překážky ve dráze toku. V místě spojení dvou proudů taveniny vzniká studený spoj známý pod pojmem „weld line“, který má za následek zhoršení me-

chanických vlastností. Problém se obvykle řeší vhodným uspořádáním vtoku nebo jejich umístěním tak, aby studený spoj vznikl v místě ovlivňující funkci budoucího výrobku co nejméně, (v místě nejmenšího mechanického namáhání). [7], [1]

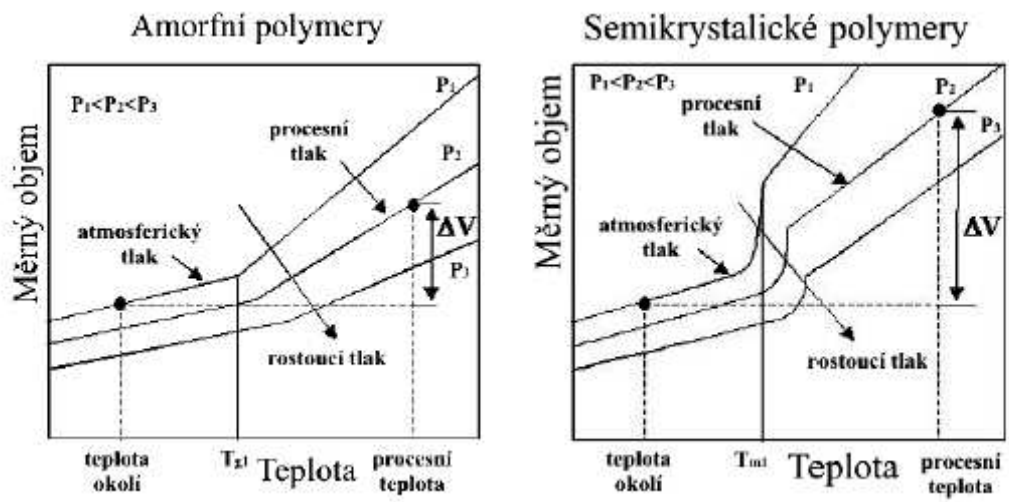
Pokud tavenina vykazuje nedostatečné narůstání k vytvoření kontaktu se stěnou formy, dojde jevu zvanému „jetting“ – tryskový tok (Obr. 32. Je typickým jevem pro vysoce plněné materiály, protože mají sníženou elasticitu taveniny a tedy vykazují menší narůstání. Výsledkem je nekvalitní povrch a vytvoření několikanásobného počtu studených spojů vede ke snížení mechanických vlastností. [7], [1]



Obr. 32 Jev „jetting“.

2.7.3 pvT diagramy

pvT diagramy popisují změnu měrného objemu s teplotou a tlakem. Obrázek (Obr. 33) popisuje měrný objem v jako funkci teploty T pro dva typy polymerů. Pro amorfní polymer je strmost křivky vyšší nad teplotou skelného přechodu T_g . Větší smrštění nastává nad teplotou T_g . U semikrystalických polymerů nastává skok v měrném objemu v bodu tání T_m . Tento velký pokles měrného objemu představuje daleko větší smrštění než u polymerů amorfních. U semikrystalických polymerů nastává ještě další změna strmosti křivky měrného objemu a to pod bodem tání. Měrný objem je také ovlivněn tlakem; rozdílné tlakové podmínky způsobují posuv křivky T - v . Křivka měrného objemu klesá dolů s rostoucím tlakem. Horní křivka je závislostí při atmosférickém tlaku. Teplota skelného přechodu s rostoucím tlakem mírně roste. pvT diagramy pro plněné polymery vykazují snížení měrného objemu než u neplněných materiálů. Plnivo zvyšuje hustotu. Plnivo také posouvají křivky T - v dolů a snižují strmost. Toto vyrovnání křivky T - v má za následek snížení celkového smrštění součásti. Nicméně pokud jsou použita vlákna jako plnivo, výsledné vlastnosti jsou nepříznivé vzhledem ke zvětšení anizotropie. [9]

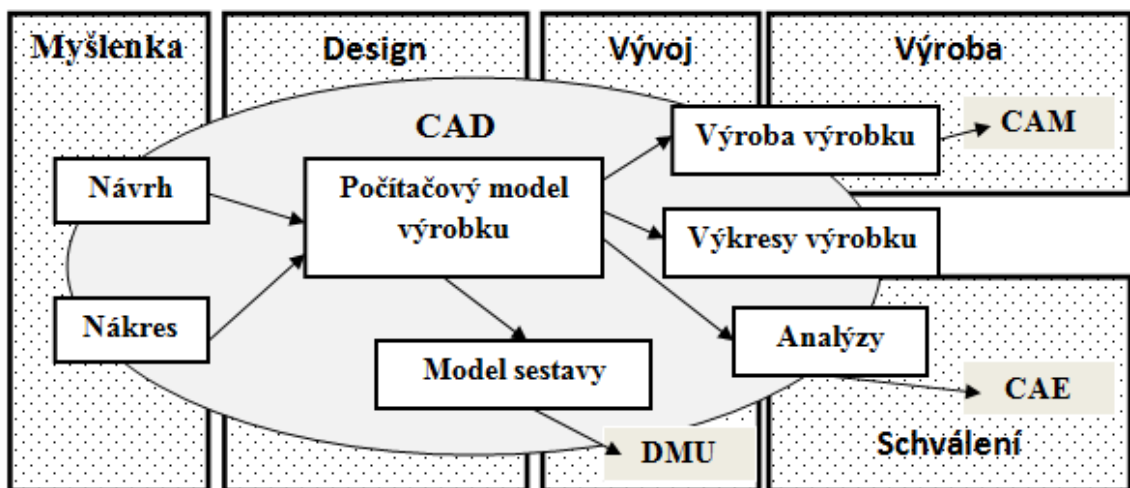


Obr. 33 pV diagramy

3 CAx SYSTÉMY

Výpočetní technika v dnešní době zaujímá nezpochybnitelné místo v konstrukčním procesu, simulování, technických výpočtech, výrobě a také řízení CNC technologií. Dříve tyto technologie byly k dispozici jen zřídka a mohlo si je dovolit jen několik málo firem. Konstrukteur nebo technolog všechno dělal ručně a měl pouze jeden pokus. Už s příchodem prvního PC (Personal Computer – Osobní počítač) bylo prvotní nasadit ho do výrobního procesu. Obecně se tyto podpůrné aplikace nazývají CA (Computer Aided – Počítačová podpora) technologie. Celosvětový rozvoj a působnost těchto systémů je úměrný jejich důležité roli ve výrobním procesu. [8]

CAx technologie patří do velké skupiny PLM (Product Lifecycle Management), (Obr. 34). PLM je soubor systémů určených ke správě celého životního cyklu výrobku, od prvotní myšlenky přes návrh, výrobu, prodej, komunikaci se zákazníky a subdodavateli, inovace atd. V rámci PLM se nacházejí čtyři hlavní oblasti Product and Portfolio Management (PPM), Product Design (CAx), Manufacturing Process Management (MPM) a Product Data Management (PDM). Uvedené oblasti se navzájem prolínají. [14]



Obr. 34 PLM cyklus

CAx zahrnuje mnoho oblastí, ve kterých je pro řešení úloh souvisejících s výrobním procesem (tvorba modelu, analýzy, vizualizace, kontrola kvality, plánování výroby atd.) využito výpočetní techniky. Mezi CAx lze zařadit např. CAD (Computer Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAQ (Computer Aided Quality). [14]

3.1 Vysvětlení CAx systémů

CA systémy mají několik skupin, které se označují zkratkami, ty nejpoužívanější jsou CAD, CAE, CAM, pak jsou další jako například PDM, CAPP.

3.1.1 CAD (Computer Aided Design)

CAD – počítačem podporovaná konstrukce. CAD programy umožňují konstrukci výrobků pomocí počítače a jejich snadnou editaci včetně tvorby celé výkresové dokumentace. Na trhu se nachází celá škála CAD softwarů. Kvalitní CAD software by měl disponovat aplikacemi, které uživatel použije a bude mít převod dat do standardních formátů. Bude mít možnost rozšíření o různé moduly na určité aplikace. Mezi CAD software patří např. CATIA, INVENTOR nebo UNIGRAPHIX. [6], [8]

Vlastnosti a možnosti CAD softwaru: [6], [8]

- modelování dílů a sestav plošně a objemově
- import a export dat do standardních formátů (např. stp., igs., atd.)
- vytváření výkresové dokumentace
- provázání mezi výkresovou dokumentací a modelem

CAD Systémy se dělí do tří kategorií:

1. kategorie je nižší CAD – 2D

Mezi CAD systémy nižší třídy je možno zařadit systémy které vytvářejí dvojrozměrné objekty a umožňují tvorbu složité výkresové dokumentace. Většinou tyto systémy umožňují vytvářet jednoduché trojrozměrné konstrukce pomocí drátového modelování. [8]

2. kategorie je střední CAD – 2D a 3D

CAD systémy střední třídy obsahují trojrozměrné modelovací nástroje včetně nástrojů pro vizualizaci. Tyto systémy jsou charakteristické svou otevřeností, která umožňuje vytvářet speciální programy (nastavby). [8]

3. kategorie je vyšší CAD – 3D konstrukce s přímou návazností na CAE a CAM systémy

Vyšší CAD systémy jsou systémy plně trojrozměrné, které vyžadují pro vytvoření výkresové dokumentace nejprve vytvoření trojrozměrného modelu, který je parametricky provázán.

Tyto systémy mají přímou návaznost na CAE a CAM programy. Mezi vyšší CAD programy patří na našem trhu Autodesk INVENTOR, CATIA a další. [8]

3.1.2 CAM (Computer Aided Manufacturing)

CAM - Počítačem podporovaná výroba. Skupina programů, které řídí nebo automatizují výrobu součástí například obrábění pomocí CNC stroji, ovládání robotů atd. Nejdůležitějším faktorem je univerzálnost a podpora výrobních zařízení. [8]

3.1.3 CAE (Computer Aided Engineering)

CAE - Počítačem podporované inženýrství (automatizované inženýrství). Softwary, které se používají na technické výpočty, kontroly (tlaku, napětí, zatěžující síly atd.) a různé simulace (analýza vstřikování plastů, zobrazení deformace atd.). Programy zabývající se těmito výpočty jsou přímo implementovány v CAD programu nebo jsou jako samostatný software. Příkladem implementovaného CAE programu je například CATIE, která má modul na pevnostní výpočty a samostatný program je například CADMOULD nebo MOLDFLOW, tyto programy jsou zaměřeny na analýzy vstřikování plastů. [6], [8]

Pojem CAE byl použit v minulosti k popisu výpočetní techniky ve strojírenství. Bylo to v souvislosti s Dr. Jason Lemon, který založil SDCR (Structural Dynamics Research Corporation). Tato firma se specializovala na MCAE (Mechanical Computer Aided Engineering) a zabývala se strukturální dynamikou (tzn. jak díly vibrují). Na podporu poradenství v oboru firma vyvinula software pro simulaci a analýzu vibrací. [8]

V 70 letech se SRDC stala známou použitím metody FEM (Finite Element Method – Metoda Konečných Prvků), v 80 a 90 letech se stala jednou z vedoucích společností na modelování a analýzu produktů. Toto dále vedlo k zaměření na uplatnění CAE aplikací na počátku vývoje výsledného produktu. [8]

CAE oblasti [8]:

- Napěťové analýzy pomocí metody konečných prvků.
- Tepelné analýzy a analýzy tekutin analýzy (Computational Fluid Dynamics - CFD).
- Kinematika a mechanické simulace a mechanické simulace.
- Analýza nástrojů pro simulaci procesu jako je lití, lisování, tváření

- Optimalizace pro výrobek nebo proces.

Princip CAE se dá rozdělit na tři fáze [8]:

- Pre-processing - definuje model a ekologické faktory, které mají být použity k analýze.
- Analysis solver – výpočet analýzy, obvykle s využitím vysoce výkonných počítačů.
- Post-processing – zpracování výsledků obvykle s využitím vizualizačních nástrojů.

3.2 CAE Programy na podporu vstřikování

3.2.1 Cadmould 3D – F

Software CADMOULD 3D-F je CAE Software, který umožňuje analyzovat proces vstřikování polymerů. Pro analýzu je potřebný 3D CAD model dílu ve formátu STL. CADMOULD 3D-F připraví zcela automaticky, rychle a přesně 3D výpočtový model, založený na vlastní patentované metodě 3D-F nazývané Fachwerkmodel. Uvedené řešení umožní přesné rozlišení měnících se materiálových veličin (teplot, smykových rychlostí atd.) po tloušťce stěn (i těch nejslabších), což je nutným předpokladem pro přesný výpočet komplexních proudových stavů v různých místech konstrukce. Výpočty u všech modulů CADMOULD 3D-F jsou teplotně závislé, respektující stlačitelnost tavenin a zohledňující strukturně-viskózní chování tavenin. Výpočtová přesnost softwaru CADMOULD 3D-F je velmi vysoká, přitom výpočty probíhají rychle, což je základním předpokladem pro možnost provádění variantních výpočtů, tedy skutečnou optimalizaci (DOE). Software CADMOULD 3D-F se vyznačuje jednoduchým pracovním prostředím, které vyžaduje běžný systém Windows XP/Vista. Vhodným hardwarem je MultiCore 64bit PC-System.

Software Cadmould 3D – F je tvořen různými výpočtovými moduly, které se dají vzájemně kombinovat. [11]

CADMOULD 3D-F RAPID

- Analýza průběhu plnění vstřikovací formy.
- Design dílce, poloha a počet vtoků, poloha studených spojů, vstřikovací tlak a doba chlazení. [11]

CADMOULD 3D-F FILL

- Analýza plnění tvarové dutiny vstřikovací formy včetně analýzy kompletního vtokového systému, analýza vícenásobných a sdružených forem.
- Dimenzování a vybalancování vtokových kanálů, průběh plnění, poloha studených spojů a míst uzavírání vzduchu, vstřikovací tlak a doba chlazení, přídržná síla, optimalizační výpočty. [11]

CADMOULD 3D-F PACK

- Analýza dotlakové fáze vstřikovacího cyklu.
- Velikost a doba dotlaku, doba cyklu, přídržná síla. [11]

CADMOULD 3D-F FIBER

- Doplnkový modul pro simultánní výpočet orientace plniva s krátkým i dlouhým vláknem (orientace vláken v různých vzdálenostech od povrchu dílu, směr průměrné orientace). [11]

CADMOULD 3D-F COOL

- Analýza teplot na povrchu tvarových dutin a analýza temperačního systému.
- Optimalizace temperačního systému. [11]

CADMOULD 3D-F WARP

- Analýza smrštění a deformace, měření vzdáleností dvou bodů na povrchu dílu po smrštění a deformaci měření odchylek od rovinnosti, přímosti, kruhovitosti a naklonění stěn. [11]

CADMOULD 3D-F RUBBER

- Analýza zpracování pryžových směsí a LSR.
- Průběh plnění, doba navulkanizace (Scorch), doba, rychlost a stupeň vulkanizace, analýza dovulkanizace, lokální výsledky. [11]

CADMOULD 3D-F THERMOSETS

- Simulace plnění dílů z reaktoplastů: výpočet plnění, tlaku, napětí, teplot, stupně zesíťování, indexu Scorch atd. [11]

CADMOULD 3D-F CASCADIC INJECTION

- Doplnující modul pro CADMOULD 3D-F FILL. Počítá sekvenční (kaskádové) vstřikování.
- Analyzuje časové nastavení a plnění horkých trysek s jehlovým uzávěrem v závislosti na jejich poloze. [11]

CADMOULD 3D-F INJECTION COMPRESSION

- Doplnující modul pro analýzu procesu vstřikování do pootevřené formy.
- Rozšiřuje využití programů CADMOULD 3D-F FILL a CADMOULD 3D-F WARP EXPERT.
- Umožňuje nastavení pohybu tvárníku, síly a rychlosti. [11]

CADMOULD 3D-F BATCH I

Operátor pro řízení výpočtů zadaných úloh, který umožňuje využití hardware a software např. během noci nebo víkendu, provádění hromadných výpočtů. [11]

3.2.2 Moldflow Plastics Insight® (MPI®)

Moldflow Plastics Insight® (MPI®) je komplexní software s nástroji pro simulaci, analýzu, optimalizaci a kontrolu při konstrukci polymerních výrobků a nástrojů. Přes jeho velký rozsah zůstává MPI snadno ovladatelný a nabízí devatenáct specializovaných modulů, pomocí kterých lze simulovat devět výrobních postupů [12].

Výhody predikativní analýzy

Problémy, které se zjistí teprve při zahájení výroby, způsobují velké náklady a prodlevy. Aby se těmto situacím zabránilo, musí se vzájemně propojené vlivy geometrie dílu, volby materiálu, konstrukce nástroje a procesní podmínky vyrobiteľnosti dílu posuzovat najednou. Simulační analýza vstřikovacího procesu umožňuje hodnotit vzájemné působení těchto proměnných a optimalizovat je již ve fázi vývoje, ještě před zahájením výroby. V tomto okamžiku totiž představují změny pouze minimální náklady a nabízí vysoký potenciál. Tyto výhody platí i pro software Cadmould, který byl popsán v předchozí kapitole [12].

Funkce analýzy MPI simulují plnění, dotlak a chlazení u vstřikování termoplastů, termoseťů a materiálů s plnivý. Kromě toho lze předpovědět následné efekty, např. deformaci dílu. MPI může dále simulovat tok materiálu a vytvrzování v reaktivním vstřikovacím procesu.

Se 7800 materiály, které se mohou doplňovat podle potřeb zákazníka představuje MPI světově nejrozsáhlejší specializovanou databanku materiálů termoplastů a termosetů pro CAE analýzy. Dále jsou k dispozici detailní informace o chladicích médiích, materiálech pro výrobu nástrojů a možnostech hlavních značek a modelů vstřikovacích strojů [12].

Podpora geometrie

Moldflow Plastics Insight poskytuje tři metody řešení analýzy modelu. MPI umožní přímo analyzovat tradiční modely se střednicovou plochou konečných prvků. Trojrozměrné tenkostěnné modely lze analyzovat pomocí solveru MPI/Dual Domain a trojrozměrné silnostěnné modely pomocí solveru MPI/ Solid 3D. [12]

Jednotlivé moduly

MPI/Synergy

- Integruje výkonné pracovní a produktivní nástroje se všemi potřebnými funkcemi pro modelování, zasílání, editaci sítě, validaci modelu, „job“ nastavení a kontrolu, vizualizaci výsledků a vystavení zprávy v jednoduchém, snadno ovladatelném programu. [12]

Simulace toku materiálu

MPI/Flow

- Simuluje fázi plnění a dotlaku vstřikovacího procesu termoplastů s cílem předpovědět chování toku taveniny, a tím vlastní vyrobitelnost dílu.
- Optimalizace umístění vtoku, vyvážení systému kanálů, vyhodnocení procesních podmínek. Rovněž umožňuje simulovat inovační procesy jako jsou zástřiky dílů a 2K-vstřikování.
- Analyzovat vliv nerovnoměrného rozdělení teploty v nástroji, určit optimální pořadí sekvenčního vstřikování, porovnat průběh toku u systému studených nebo horkých kanálů a analyzovat Dynamic Feed aplikace. [12]

MPI/Gas

- Simuluje proces vstřikování s asistencí plynu, při kterém je plyn, zpravidla chemicky inertní dusík, vstříknut do taveniny polymeru.
- Určení pozice místa vstřiku plynu a polymeru, kolik plastu vstříknout před vstříknutím plynu a optimální velikost a umístění kanálů pro plyn. [12]

MPI/Co-Injection

- Simuluje sekvenční vstřikovací proces, při kterém se nejdříve vstříkne materiál vnější plochy a poté následuje další materiál tvořící jádro dílu.
- Optimalizace kombinace obou materiálů a zároveň maximalizovat poměr nákladů vůči užitku pro daný výrobek. [12]

MPI/Injection Compression

- Simuluje procesy, při kterých probíhá vstříknutí polymeru a stlačení formy simultánně.
- Umožňuje naprogramovat kompresní fázi před, po nebo během průběhu vstřikování. [12]

MPI/MuCell

- Simulace mikrocelulárního procesu vstřikování pěny (MuCell®).
- Optimalizace konstrukce dílu a procesních podmínek. [12]

Simulace pro optimalizaci vstřikovacího procesu**MPI/Design-of-Experiments**

- Vytvoření a provedení automatizovaného zkušebního plánu, při kterém se obměňují uživatelem vybrané parametry jako teplota nástroje a taveniny, čas vstřikování, dotlak, čas dotlaku a tloušťka stěny. [12]

MPI/Optim

- Provádí výpočty s ohledem na specifický vstřikovací stroj. Při tom se zohledňuje skutečný čas reakce stroje, maximální vstřikovací rychlost a počet kroků, které lze na řízení naprogramovat pro rychlost a tlak.

- Cílem výpočtu je jednotný průběh rychlosti čela toku a teplotních profilů přes trysky stroje, vtokový systém a dutiny nástroje. [12]

Simulace chlazení

MPI/Cool

- Možnost modelovat chladicí okruh nástroje, jeho rozložení kolem dílu a vypočítat jeho výkonnost.
- Optimalizace designu formy a chladicího okruhu tak, aby se dosáhlo jednotného chlazení dílu, minimalizoval čas cyklu, eliminovala deformace kvůli chlazení a celkově snížily náklady na výrobu dílu. [12]

Simulace strukturální integrity

MPI obsahuje širokou paletu simulačních modulů, které byly vyvinuty speciálně pro předpovídání pevnosti vstřikovaných dílů. [12]

MPI/Warp

- Předpoklad výskytu smrštění a deformace v dílech na základě procesních zbytkových pnutí. Určit příčiny deformace a ukazuje příslušná místa a umožňuje optimalizovat design, materiál a procesní parametry a zabránit deformaci dílu ještě předtím, než se díl začne vyrábět. [12]

MPI/Fiber

- Výpočet orientace vláken a z toho plynoucí pevnost kompozitu plastu a vláken. [12]

MPI/Shrink

- Předpoklad výskytu smrštění polymeru na základě zpracovatelských vlivů a dat o kvalitě materiálu. [12]

MPI/Stress

- Předpoklad chování plastových dílů po procesu vstřikování, pokud je díl zatížen různými externími vlivy.
- Výpočet vlivu chování toku materiálu při vstřikování a z toho vyplývající mechanické vlastnosti týkající se pevnosti dílu. [12]

Simulace reaktivního vstřikování

MPI/Reactive Molding

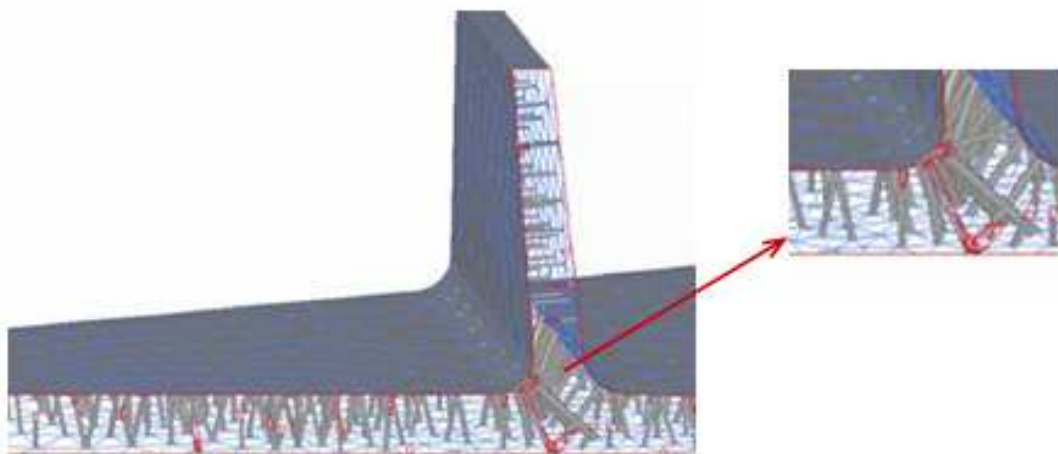
- Simulace toku a vytvrzování termosetů v procesech jako je reaktivní vstřikování termosetů a elastomerů, strukturální reaktivní vstřikování (SRIM) a vstřikování kaučuků (RTM).
- Posouzení výrobitelnosti, minimalizovat čas cyklu a optimalizovat procesních podmínek. [12]

4 METODY VÝPOČTU CADMOULD 3D-F A MPI®

Metody výpočtu analýzy jsou pro oba programy rozdílné, každý počítá podle jiné metody charakterizování modelu.[12]

4.1 Cadmould 3D – F

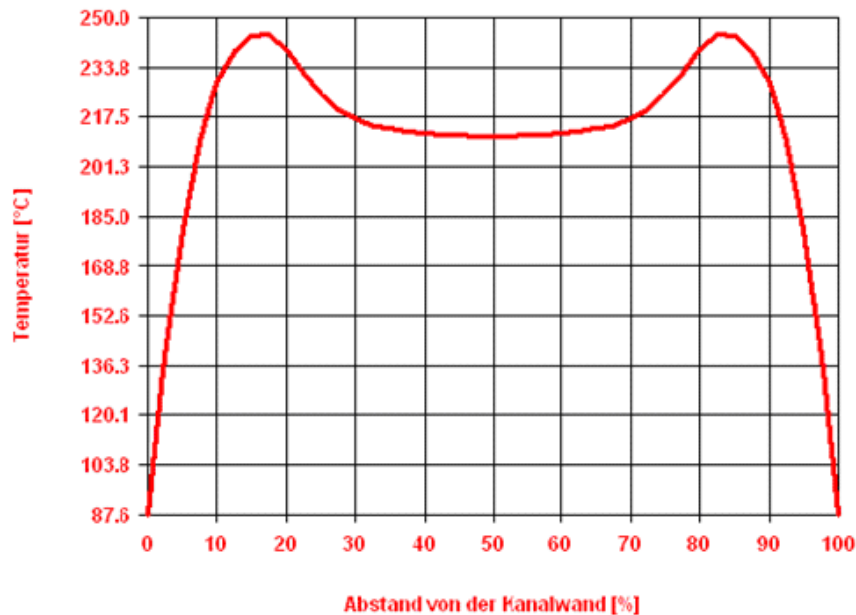
Firma Simcon vyvinula patentovaný 3D příhradový model (3D-F = Fachwerkmodel). 3D-F model konečných prvků je speciálně přizpůsoben pro simulace vstřikování plastových dílců. Spojuje výhody obou klasických metod (Střednicový model a Objemový model). 3D-F metoda využívá k popisu geometrie STL jako vstupní formát, který byl vyvinut pro technologii Rapid Prototyping (stereolitografie). STL formát je automaticky připravován systémy CAD. Objem dílce daný STL modelem je následně vyplněn mnoha „trubičkami“, pomocí nichž je identifikován tok materiálu a pomocí nichž jsou také přenášeny mechanické síly, např. pro výpočet smrštění a deformace. Tak vznikne 3D model, který zahrnuje všechny 3 prostorové směry x, y a z (Obr. 35). [11]



Obr. 35 3D - Příhradový model [11]

Uvedené řešení umožní přesné rozlišení měnících se teplot smykových rychlostí atd. po tloušťce stěny (Obr. 36), což je nutným předpokladem pro přesný výpočet měnících se komplexních proudových stavů v různých místech konstrukce. Jsou tak vypočítány průběhy např. tlaků a rychlostí a od nich odvozených přídržných sil a orientace vláken. Tyto faktory, spolu s přesnými tepelnými výpočty jsou předpokladem pro spolehlivé stanovení smrštění a deformace dílce. Aby bylo dosaženo nutného vysokého rozlišení, je dílec, zpra-

covaný pomocí CADMOULD 3D-F, rozdělen po tloušťce stěn ve všech oblastech na 25 interpolačních uzlů. [11]



Obr. 36 Přesný výpočet Cadmould 3D-F [11]

Výhody modelu Cadmould 3D - F

- Je dosaženo vysokého rozlišení po tloušťce stěn v oblastech velkých změn např. teplot a smykových rychlostí.
- Objemné části dílce a oblasti se skokovými změnami tloušťky stěn budou správně zohledněny a vyhodnoceny.
- Model konečných prvků umožňuje provádět jednoduché změny geometrie za účelem optimalizace, např. vytvářet tokové dráhy nebo měnit tloušťku stěn, a to nezávisle na CAD.
- Zobrazení geometrie odpovídá realitě.
- Je možné převést zoptimalizovanou geometrii (kompenzace smrštění a deformace) zpět do CAD systému.
- Krátký výpočtový čas.
- Přesné výsledky.

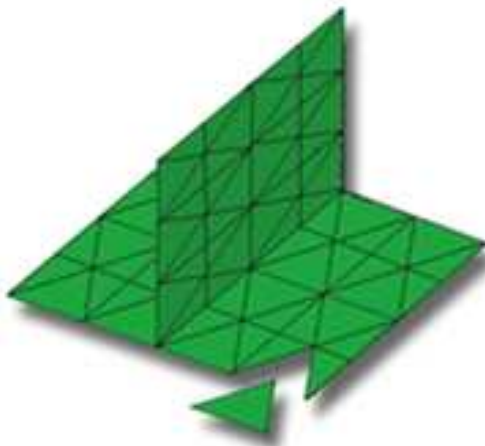
4.2 Moldflow Plastics Insight (MPI)

Program MPI pracuje na principu FEM. Metoda konečných prvků (Finite Element Method - FEM) je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Zpravidla je možné řešit touto metodou problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. FEM řeší problémy soustavou lineárních rovnic, jejichž konstrukce a řešení lze efektivně provádět za použití výpočetní techniky.

Základním principem FEM je diskretizace (rozdělení) tělesa na malé části (prvky), které jsou matematicky snadno popsitelné. Po zadání okrajových podmínek se úloha převede na řešení soustavy lineárních rovnic a provede se výpočet takto vzniklé soustavy, která může obsahovat miliony rovnic.

Midplane mesh (Střednicová plocha)

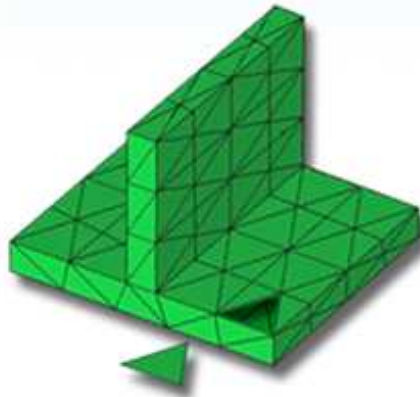
Síť střednicové plochy představuje trojrozměrný model jako dvojrozměrný, s rovnými plochami, kterému se přidělí hodnota tloušťky. Konvenční tenkostěnné vstříkované díly lze nejlépe znázornit pomocí sítě střednicové plochy. Pro zvýšení produktivity při tvorbě a analýze těchto modelů lze pomocí modulu MPI/Midplane Generator vytvořit automaticky síť střednicové plochy a stanovit požadovanou tloušťku, čímž jsou zaručeny přesné výsledky výpočtu. [12]



Obr. 37 Střednicová plocha [12]

Dual domain (Fusion) mesh

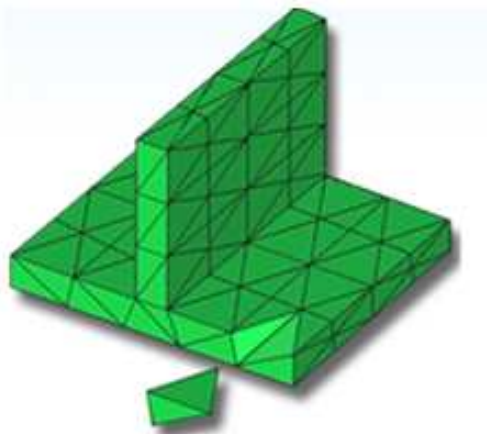
Fusion mesh je založena na patentované technologii Moldflow Dual Domain™. Ta znázorní trojrozměrný díl s trojúhelníkovými prvky na povrchu CAD modelu v běžném STL nebo IGES formátu. Tak lze trojrozměrné tenkostěnné CAD modely přímo analyzovat. Bez jakýchkoliv dalších úprav modelu lze poté analyzovat další varianty designu a provést hloubkové analýzy. [12]



Obr. 38 Dual domain mesh [12]

Solid 3D mesh

Solid 3D mesh síťuje model podobně jako síť Dual domain, ale místo plošných trojúhelníků je model tvořen tetrahedrálními elementy. Díky osvědčené technice zasítování trojrozměrných modelů pomocí tetrahedrálních konečných prvků lze s programy MPI/3D provádět trojrozměrné simulace na dílech, které neodpovídají kritériím pro konvenční tenkostěnné konstrukce. [12]



Obr. 39 Solid 3D mesh [12]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Byly určeny tyto cíle diplomové práce:

- 1) Vypracovat literární rešerši na dané téma
- 2) Vytvořit analýzy v porovnávaných CAE aplikací
- 3) Vyhodnotit zjištěné výsledky analýz a provést porovnání
- 4) Specifikovat klady a zápory porovnávaných CAE aplikací

V teoretické části diplomové práce se jedná a přiblížení procesu vstřikování polymerních materiálů. Všechny kapitoly této části jsou zaměřeny na tuto problematiku. Dalším bodem je popis a rozdělení jednotlivých polymerních materiálů. Dále je zde popsána reologie materiálu. Tato kapitola popisuje základní body reologie a základní závislosti polymerních tavenin. Poslední bod teoretické části je rozdělení CAD systémů, jejich popis a vlastnosti. Tato kapitola je zaměřena na CAE aplikace CADMOULD 3D – F a Moldflow Plastics Insight (MPI).

První kapitola v praktické části popisuje metody výpočtů CAE aplikací Moldflow Plastics Insight (MPI) a CADMOULD 3D – F.

Druhá kapitola praktické části popisuje srovnávané výrobky, které budou použity v CAE aplikacích a její následnou úpravu pro analýzy. Nachází se zde také procesní podmínky, za jakých byly výrobky vstřikovány a nastavení analýz ve srovnávacích CAE aplikacích.

Poslední část je zaměřena na vyhodnocení analýz porovnávaných CAE aplikací. Dále je zde měření deformace výrobku a porovnání s analýzou.

6 OKRAJOVÉ PODMÍNKY ANALÝZ

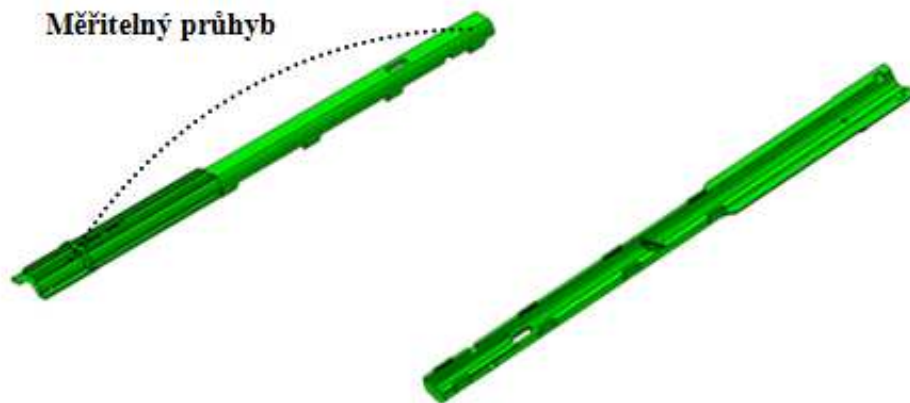
Výrobky a jejich formy, které jsou analyzovány v diplomové práci, byly vyrobeny firmou FOREZ s.r.o., která, byla založena v roce 1996. Dnes je se svými 192 zaměstnanci nástrojárnou střední velikosti, počtem konstrukčních kapacit však konkuruje největším nástrojárnám v České republice. Firma získala certifikát řízení jakosti ČSN EN ISO 9001:2001, a tím i možnost uspokojit nejnáročnější zákazníky. Je velmi dobře technologicky vybavena (mj. několik špičkových CNC a HSC CNC fréz, nejmodernější elektroerosivní drátové řezačky AGIE CUT nebo elektroerosivní hloubící stroje AGIE).

6.1 Výrobky

Firma Forez s.r.o. zapůjčila tři výrobky s polymerního materiálu na analýzy v programech Moldflow Plastics Insight a Cadmould 3D – F. První výrobek je krytka z plněného (semikrystalického) materiálu, druhý výrobek je redukce ze semikrystalického materiálu a nakonec třetí výrobek je světlomet z amorfního materiálu. Výrobky se musely pro použití v programu Moldflow Plastics Insight upravit. Tato úprava spočívala v odstranění rádiusů menších jak 1 mm. Rádiusy se upravovaly v programu CATIA V5 a následně se převedly do formátu stl. a stp. Pro program CADMOULD 3D – F se výrobky neupravovaly, byly použity ve formátu stl.

6.1.1 Krytka

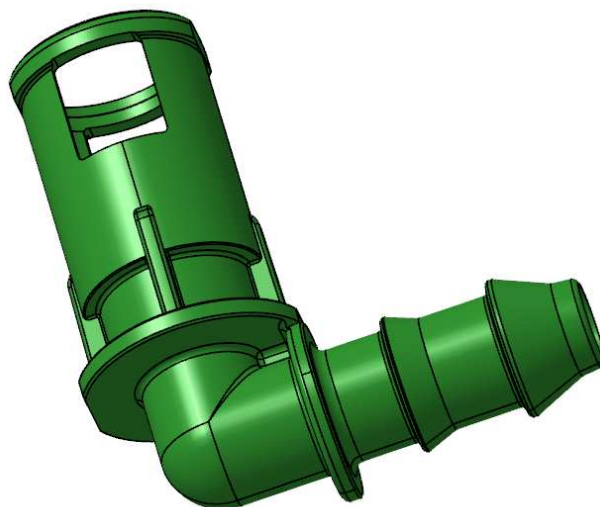
Výstřik (Obr. 40) je z plněného materiálu PA 6.6 GF 30 (Polyamid 6.6 plněný s 30% skelnými vlákny). Rozměry výstřiku se nacházejí na výkrese (příloha P VIII). Krytka je součástí dílu, který slouží jako konektor. Tento konektor se skládá ze dvou částí, v první části jsou zastříknuté kontakty a druhou část tvoří již zmíněná krytka. Konektor je vyráběn ve dvou velikostech (kratší a delší). Výrobek, který se použil při analýze je delší varianta. Rám formy pro obě délkové varianty je stejný, mění se pouze vnitřní vložky. Forma pro zadaný výrobek je jednonásobná, která je chlazená kanály. Chladící médium je voda. Výrobek je vstřikován pomocí studené trysky a rozvodného kanálu. Výrobek se po vystříknutí uskladnil na 24 hodin. Po uplynutí 24 hodin se výrobek měřil na průhyb a zkoušel se do zástavby celého konektoru. Průhyb se měřil na 3D sondě.



Obr. 40 Krytka

6.1.2 Redukce

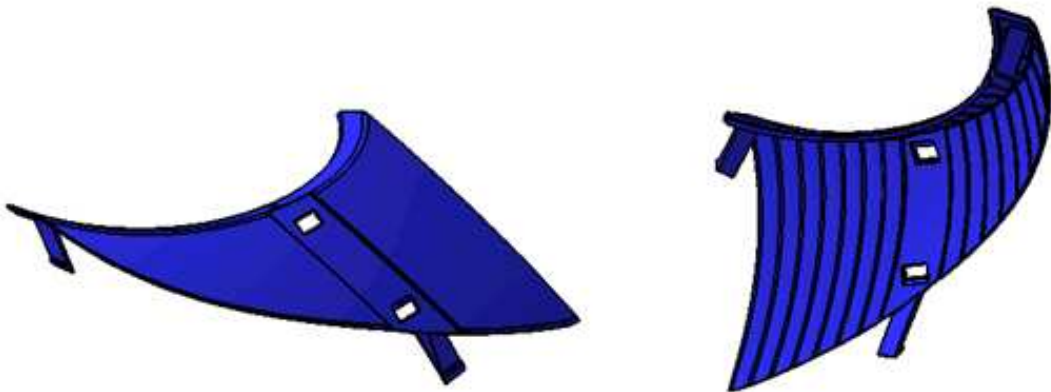
Redukce je ze semikrystalického materiálu POM (Polyoxymethylen). Výrobek (Obr. 41) slouží jako náustek na hadice pro vedení kapaliny. Forma pro analyzovaný výrobek je čtyřnásobná a vnitřní dutiny jsou chlazeny pomocí přepážek. V těchto místech byl snížen průtok chladicího média, kvůli průtoku malým průměrem otvoru pro přepážku. Zbytek formy je chlazen pomocí chladících kanálů. Chladicí médium je voda. Výrobek se vstříkoval pomocí horké trysky do studeného rozvodného kanálu. Výstřik po vypadnutí z formy byl na 24 hodin uložen a následně se změnila deformace redukce. Deformace se měřila na 3D sondě.



Obr. 41 Redukce

6.1.3 Světlozet

Světlozet je vstříknut z amorfního materiálu PC (Polycarbonát), a je jednou ze součástí celého světlozetu. Výrobek slouží jako kryt světla v části světlozetu. Forma pro výrobek je 1+1(tzn. díl je levý a pravý). Vstřikování je pomocí horké trysky a studeného rozvodného kanálu. Světlozet po vypadnutí s formy se na 24 hodin uskladnil a po uplynutí této doby se zkušel nasadit do zástavby světlozetu. Deformace se na tomto díle neměřila, kontrolovala se pouze kvalita vstříknutí a funkčnost v zástavbě.



Obr. 42 Světlozet

6.2 Procesní podmínky

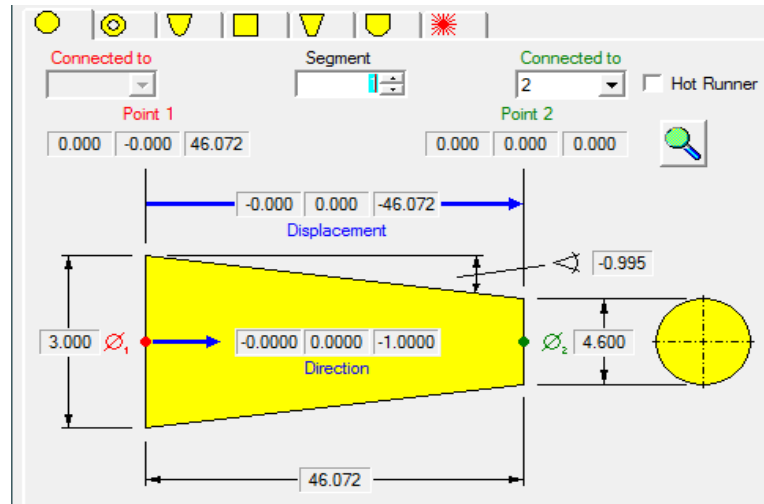
Nastavení procesních podmínek se ve srovnávaných programech podstatně lišilo. Tato kapitola je zaměřena na ukázkou obecného nastavení procesních podmínek v obou programech a následném nastavení procesních podmínek u jednotlivých výrobků. Procesní podmínky jsou dané podle seřizovacích dat z firmy FOREZ s.r.o. Procesní podmínky se nastavily přesně podle seřizovacích listů a dále se nekorigovaly. Podle těchto podmínek se výrobky vstříkují.

6.2.1 Nastavení analýzy v programu CADMOULD

Do programu Cadmould se vloží zadaný výrobek ve formátu stl., tento formát už má předvolenou hustotu sítě (počet elementů). Tato síť popisuje, jak moc přesně kopíruje zadaný výrobek, čím lepší formát stl. tím kvalitnější síť a tím bude kvalitnější analýza. Pokud se vyžaduje opravdu kvalitní síť, nebo je chybná struktura formátu stl., jsou na její opravu

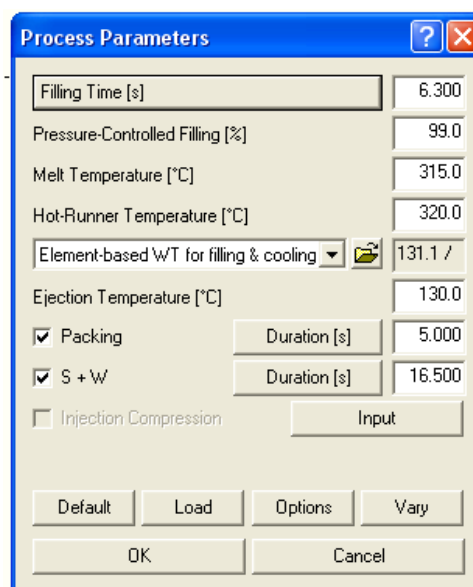
programy, které opravují tyto formáty stl. (např. DeskArtes 3Data Expert Series). Program Cadmould umožňuje nastavení hustoty sítě.

Po upravení hustoty sítě se určí a nastaví rozměry vtokové soustavy. Tvar vtoku (Obr. 43) může mít různý tvar, který už záleží na designu konstruktéra.



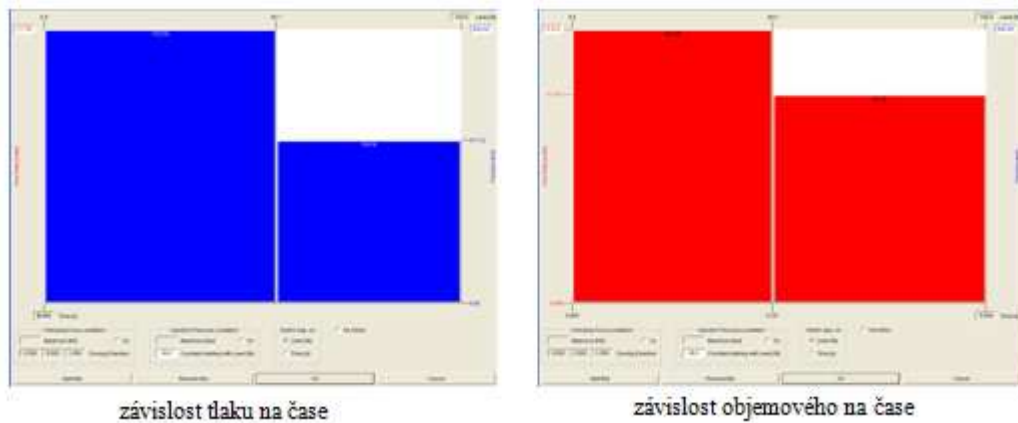
Obr. 43 Tvary vtoků v Cadmouldu

Vtok se tvoří buď přímo pomocí příkazů a zadávání rozměrů, nebo se použijí tzv. trajektorie. Tyto trajektorie jsou ve formátu igs., které se vloží do programu, a ty se následně editují. Tyto trajektorie se dají vytvořit v jakémkoli konstrukčním programu a uloží se do formátu igs. Po vytvoření vtokové soustavy se nastaví materiál a procesní podmínky (Obr. 44).



Obr. 44 Procesní podmínky

Procesní podmínky mají různý způsob nastavení, v kolonce Filling time (čas plnění) se zadá jenom hodnota, nebo se tato kolonka rozklikne a může se nastavit závislost velikosti tlaku na čase, nebo druhý způsob objemový průtok na čase (Obr. 45).



Obr. 45 Nastavení toku taveniny

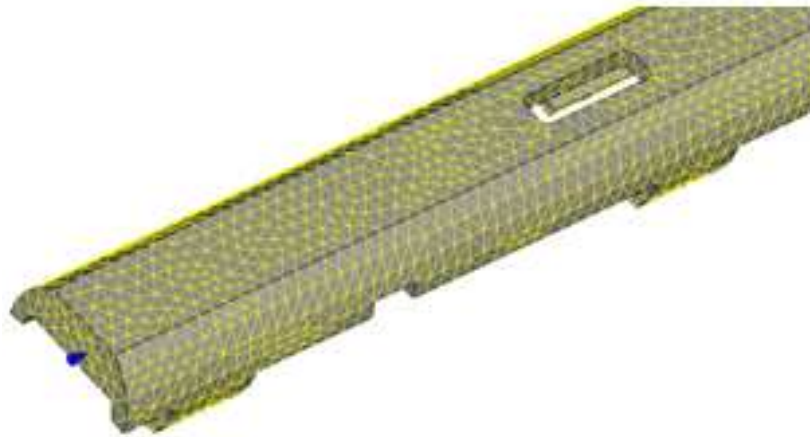
V kolonce Pressure Controlled Filling (Tlakem řízené plnění) se nechává zadaná hodnota, dále v kolonce Melt Temperature (teplota taveniny) se zadá teplota tavení a pokud je horký vtok tak v další kolonce se zadá teplota horkého vtoku (Hot-Runner Temperature). Zadá se vyhadzovací teplota (Ejection Temperature), dále se nastaví čas dotlaku a profil dotlaku. Nakonec se nastaví hodnota S+W (čas dotlaku + čas chlazení). Jako poslední část se vloží temperanční systém, který se dělá obdobně jako vtokový systém, a nastaví se průtok a teplota chladicího média. Nakonec se nastaví délka elementů, materiál formy, chladící médium a počet cyklů simulace.

6.2.2 Krytka

Krytka se vložila do programu ve formátu stl. a nastavila kritéria modelu. Nastavení sítě spočívalo v zadání velikosti elementu v procentech. Tyto nastavené hodnoty upraví síť modelu. Nastaví velikost elementů a charakter, kterým se znázorňuje charakter tělesa. Tloušťka stěny se nastavuje od minimální hodnoty po maximální hodnotu.

Tab. 1 Nastavení sítě pro krytku

Relative Element Size (Relativní velikost elementu)	1.15 [%]
Wall Thickness (Tloušťka stěny)	0.25 - ∞



Obr. 46 Nastavení sítě – Krytka

Vytvořil se vtokový systém pomocí trajektorií, které se udělali v programu Unigraphics. V programu Cadmould se zadal kruhový průřez vtokového kanálu. Původní vtokový systém byl elipsovitého tvaru, proto se musel přepočítat na kruhový. Nastavily se procesní podmínky podle zadaných výrobních parametrů a nakonec vytvořil temperanční systém. Procesní podmínky se jsou v (tab.2), kompletní seřizovací data jsou v příloze P XI. Celé zobrazení formy, vtoku a temperančního systému v analýze se nachází v příloze P II.

Parameter	Value	Description
Filling Time [s]	0.600	Čas plnění
Pressure-Controlled Filling [%]	99.0	
Melt Temperature [°C]	205.0	
Element-based WT for filling & cooling	91.8 / 9	
Ejection Temperature [°C]	190.0	
Packing Duration [s]	2.000	
S + W Duration [s]	9.000	Čas chlazení
Element Length [mm]	7.307	Délka elementů
Number of Elements [1]	385	Počet elementů
Element Length / Channel Length [%]	8.260	
Total Channel Length [mm]	2624.956	
Plastic Material	ZYTEL 7003DHSUR BK099	Materiál výrobku
Coolant Fluid	WATER	Chladicí médium
Mold Material	STEEL 1.2343	Materiál formy
Filling Time [s]	0.600	Čas plnění
Cooling Time [s]	9.000	Čas chlazení
Analysis Time [s]	5.400	
Cycle Time [s]	15.000	Čas cyklu

Obr. 47 Parametry analýzy – Krytka

Tab. 2 Vstřikovací data krytky

Stroj			Teploty		
Typ stroje	KM - 50		Teplota pravá strana formy	80	[°C]
Průměr šneku	25	[mm]	Teplota levá strana formy	80	[°C]
Materiál	Zytel 70 G30 HSLR BK99		Teplota vstřikování	285	[°C]
Typ materiálu	PA 6.6				
Barva	černá				
Vstřikovací podmínky			Časy		
Dotlak	800	[bar]	Čas vstřiku	0.6	[s]
Start dotlaku	1140	[bar]	Čas dotlaku	2	[s]
	13	[mm]	Čas Chlazení	7	[s]
Vstřikovací rychlost	60	[mm/s]	Čas cyklu	15	[s]
Dávka	31	[mm]			

6.2.3 Redukce

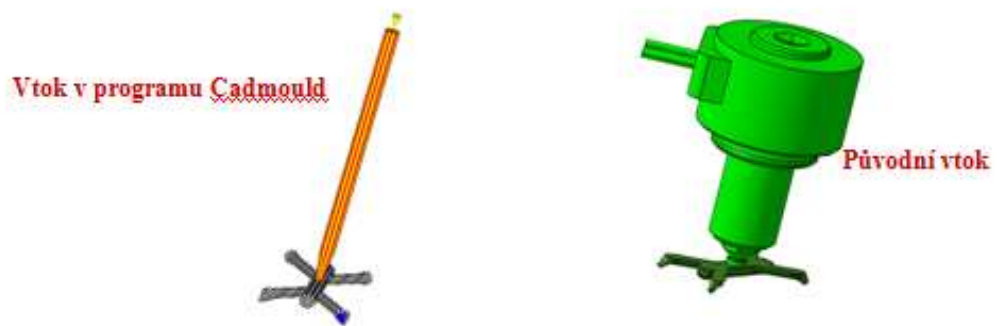


Obr. 48 Redukce

Redukce se také vložila do programu ve formátu stl. a také se musela upravit síť modelu. Vtokový systém se vytvořil též pomocí trajektorií, ale musel být přepočítán na vhodný tvar, protože tvar vtoku se nedal vymodelovat. Vtokový systém má tvar lichoběžníku, ale CADMOULD zobrazuje jenom kruhový tvar (jde jenom o grafické znázornění). Červená část vtoku znázorňuje horkou trysku (Obr. 49).

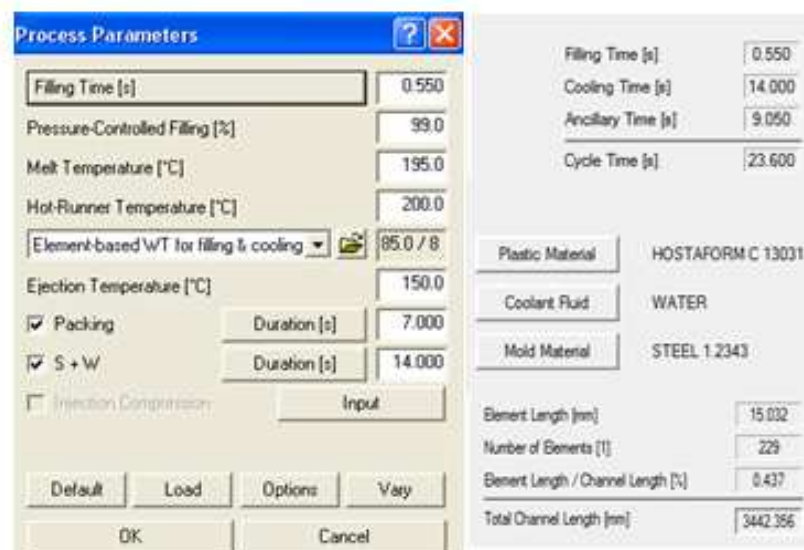
Tab. 3 Nastavení sítě pro redukci

Relative Element Size (Relativní velikost elementu)	0.5 [%]
Wall Thickness (Tloušťka stěny)	0.3 - ∞



Obr. 49 Vtok – Cadmould

Nastavily se procesní podmínky podle vstřikovacích dat a vložil se temperanční systém, ve kterém se nastavila teplota a průtok chladícího média a typ média. Celá forma, která je v analýze se nachází v P III.



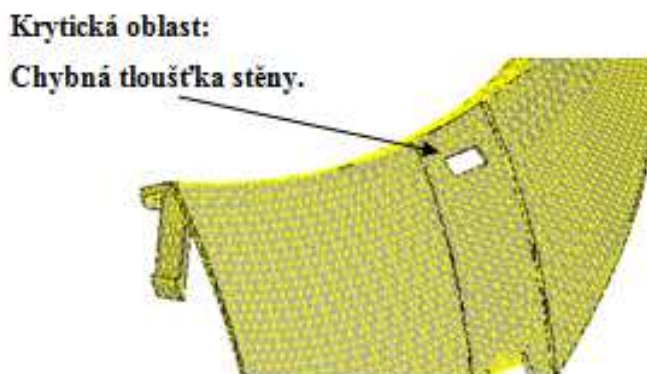
Obr. 50 Parametry analýzy – Redukce

Tab. 4 Vstřikovací data redukce

Stroj			Teploty		
Typ stroje	KM – 80		Teplota pravá strana formy	80	[°C]
Průměr šneku	40	[mm]	Teplota levá strana formy	80	[°C]
Materiál	HOSTAFORM C13031		Teplota vstřikování	195	[°C]
Typ materiálu	POM		Teplota horké trysky	200	
Barva	Šedá				
Vstřikovací podmínky			Časy		
Dotlak	600	[bar]	Čas vstřiku	0,55	[s]
Start dotlaku	830	[bar]	Čas dotlaku	7	[s]
	10	[mm]	Čas Chlazení	7	[s]
Vstřikovací rychlost	39,8	[mm/s]	Čas cyklu	23,6	[s]
Dávka	23,7	[mm]			

6.2.4 Světlomet

Světlomet (Obr. 51) se do programu vložil a upravil stejně jako u předchozích modelů. U tohoto modelu se v části u okýnka vyskytla chyba v tloušťce stěny. Model se mohl upravit v CAD programu Unigraphics, ale neupravoval se, protože tato úprava se zdála být složitá. Program Cadmould umožňuje, označit lokální oblast a v ní vybrat elementy popisující plochu modelu. Těmto vybraným elementům zadá už odpovídající tloušťka stěny modelu. Tím odpadá přemodelování výrobků a usnadňuje to práci s modelem.



Obr. 51 Světlomet

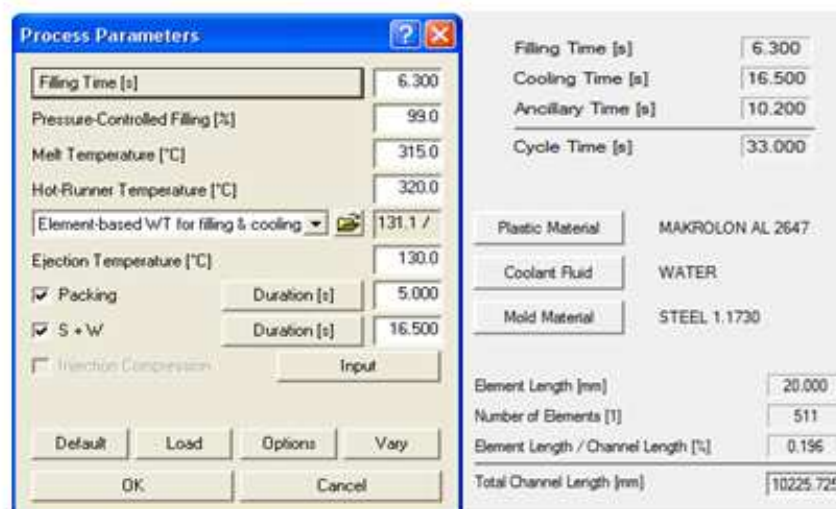
Tab. 5 Nastavení sítě světlometu

Relative Element Size (Relativní velikost elementu)	0.8 [%]
Wall Thickness (Tloušťka stěny)	0.3 - ∞

Vtokový systém se také musel upravit do vhodného tvaru (Obr. 52) Po vložení a nastavení chladících kanálů a následného nastavení procesních podmínek, se pustily zadané analýzy. Zobrazení celé formy se nachází v příloze P IV.



Obr. 52 Úprava vtoku – světlomet



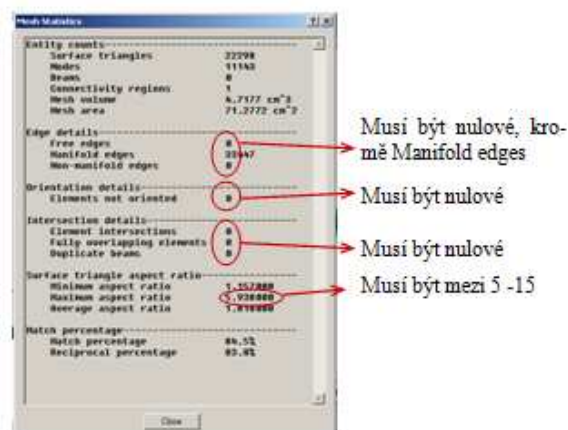
Obr. 53 Parametry analýzy – Světlomet

Tab. 6 Vstřikovací data světlometu

Stroj			Teploty		
Typ stroje	KM – 200		Teplota pravá strana formy	80	[°C]
Průměr šneku	45	[mm]	Teplota levá strana formy	80	[°C]
Materiál	MAKROLON AL2647		Teplota vstřikování	195	[°C]
Typ materiálu	PC		Teplota horké trysky	200	
Barva	Průhledný				
Vstřikovací podmínky			Časy		
Dotlak	1200; 1000	[bar]	Čas vstřiku	6.3	[s]
Start dotlaku	1980	[bar]	Čas dotlaku	4,1	[s]
	7.8	[mm]	Čas Chlazení	11.5	[s]
Vstřikovací rychlost	33; 5.5	[mm/s]	Čas cyklu	33	[s]
Dávka	60	[mm]			

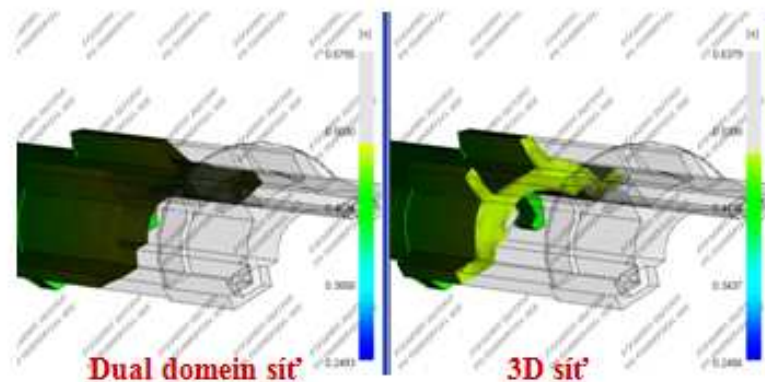
6.2.5 Nastavení analýzy v programu Moldflow Plastics Insight

Program MPI může používat pro analýzy dva typy datových formátů. Jsou to datové formáty stl., který používá standardně a formát stp. Formát stp. se pro analýzu používá stejně jako stl. Spustí se program MPI a importuje se formát stp. Otevře se tabulka, kde se nastaví typ sítě a pomocí MDL konvertoru se převede výrobek na plochy, které se dají použít na vysítování. Poté se výrobek vysítuje, následně vytvořená síť se upraví pomocí příkazů na opravu sítě. Takto upravená síť musí splňovat určité parametry. (Obr. 54)



Obr. 54 Statistika sítě

Po kontrole kvality sítě se nastaví typ sítě (Dual domain Mesh, Solid 3D Mesh), po nastavení sítě se z databáze materiálů vybere zadaný materiál. Rozdíl mezi Dual domain sítí a 3D sítí je na (Obr. 55).



Obr. 55 Dual domain a 3D síť

Dále se pokračuje tím, že se vytvoří vtokový a temperanční systém, ten se tvoří pomocí trajektorií. Tyto trajektorie se dělají pomocí přímek v MPI nebo v konstrukčním programu (např. CATIA V5R18, AutoCad atd.) a ty se následně vloží do studie, ve formátu igs. Pak se těmito přímkám zadají vlastnosti jako například horký rozvod, studený rozvod nebo chladicí kanál. Nakonec se nastaví procesní podmínky. Mold surface temperature (teplota formy), Melt temperature (teplota taveniny) Mold_open time (čas po který je forma otevřená) a dále součet časů Injection + Packing + Cooling time (čas vstřiku + čas dotlaku + čas chlazení).



Obr. 56 Procesní podmínky - MPI

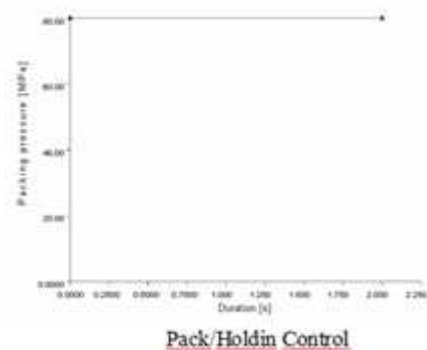
Program MPI má rozmanitější konfiguraci procesních podmínek například položka Filling Control (Vstřikování) se může nastavit za pomoci např. Injection Time (vstřikovací čas), nebo nastavit rychlostní profil šneku v závislosti na rychlosti a pozici šneku. Dotlak se mů-

že také nastavit několika způsoby. Výrobky byly nejdříve zbaveny rádiusů a byly uloženy jako stl. a stp. Z těchto typů se dělaly, analýzy Gate Location a analýzy Cool + Flow + Warp + Pack u dvou druhů sítě, Dual Domain a Solid 3D.

6.2.6 Krytka

Po importování do MPI byla vytvořena síť Dual Domain a následně byla upravena pomocí nástrojů na úpravu sítě, která je součástí programu. Z výsledku statistiky sítě vyplývá, že soubory stp mají lepší síť. Po úpravě sítě Dual Domain se z ní vytvořila 3D síť. Po vytvoření sítě byla vložena vtoková soustava a chladicí kanály. Z důvodu nevhodného vtoku, který byl, elipsovitého tvaru byla přepočítána plocha a vytvořil se kruhový vtok. Byl vložen počátek vtoku taveniny a byly nastaveny parametry chladicího média. Nakonec byly nastaveny procesní podmínky podle seřizovacích dat vstřikovaného výrobku. Proces plnění se řídil podle Injection Time (vstřikovacího času).

Procesní podmínky		
Mold Surface Temperature	82	[°C]
Melt Temperature	285	[°C]
Mold – Open Time	5.4	[s]
Injection + Packing + Cooling Time	9.6	[s]
Filling Control by Injection Time	0.6	[s]
Velocity/Pressure Switch-over by Injection Time	0.6	[s]
Chladicí médium		
Coolant	Water	
Flow Rate	10	[l/s]
Temperature	80	[°C]

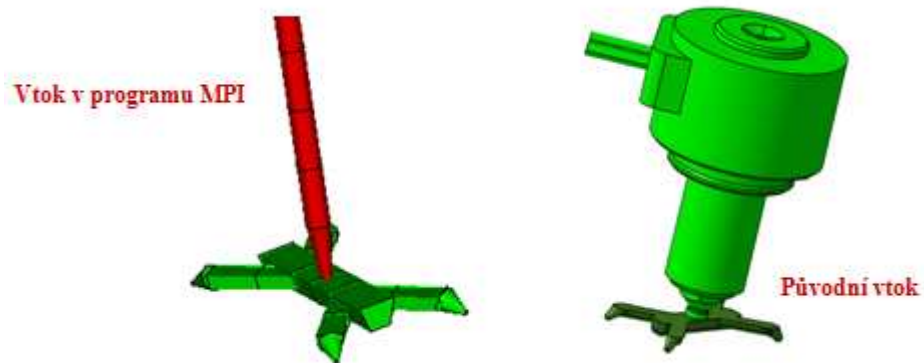


Obr. 57 Procesní podmínky – Krytka

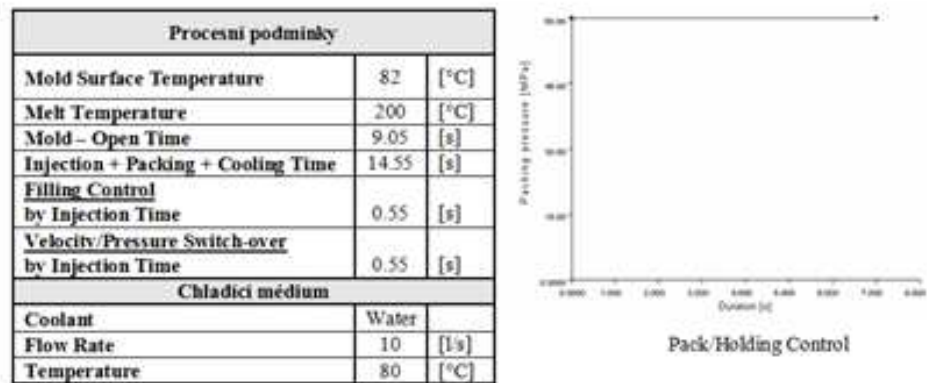
6.2.7 Redukce

U výrobku redukce byly také vytvořeny dva typy sítě (Dual Domain a 3D). Tato síť byla upravena a následně byl výrobek zrcadlen na čtyři dutiny. Opět síť ze souborů. stp má lepší vlastnosti. Takto upravená síť se přesíťovala na 3D síť.

Vtoková soustava byla vložena pomocí vytvořených trajektorií. Plocha vtoku musela být z původního tvaru přepočítána na lichoběžníkový tvar. Po vtokové soustavě byly vloženy chladicí kanály a oběma systémům byly zadány vlastnosti. Nakonec byly zadány procesní podmínky a analýzy.



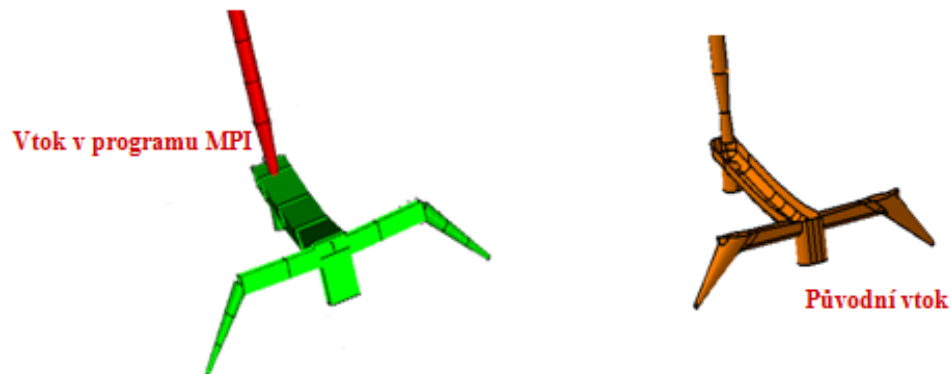
Obr. 58 Vtoková sestava – Redukce



Obr. 59 Procesní podmínky – Redukce

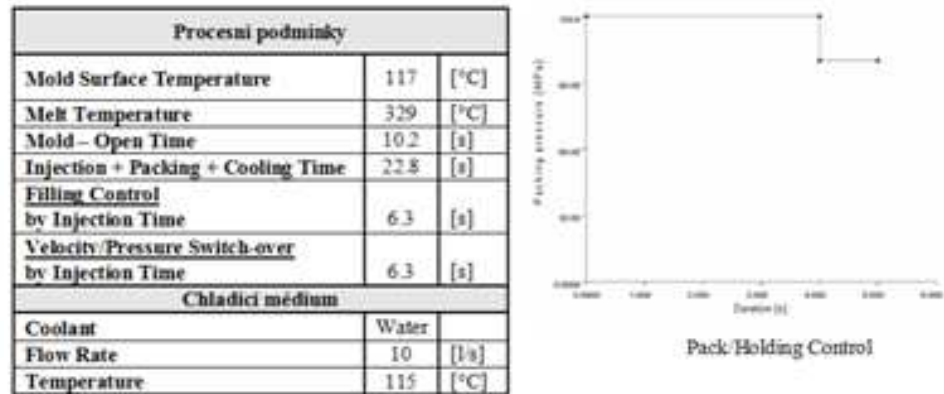
6.2.8 Světlomet

Světlomet byl vložen stejně jako u předchozích analýz a opět se potvrdilo, že soubor stp má kvalitnější síť. Opět se musel upravit vtokový systém na vhodnější tvar.



Obr. 60 Vtokový systém – Světlomet

Nakonec byly opět nastaveny procesní podmínky vstřikování. Zobrazení celé formy je v P VII.



Obr. 61 Procesní podmínky – Světlomet

6.3 Vstřikovací stroje

Firma FOREZ používá vstřikovací stroje Krauss Maffei. Ve všech analýzách v programu MPI byly zadávány typy vstřikovacích strojů. Protože v databázi nebyly potřebné typy strojů, museli být vytvořeny. V programu Cadmould se nastavují parametry vstřikovacího stroje. Charakteristiky vstřikovacích strojů pro všechny analyzované výrobky jsou zobrazeny v následujících tabulkách. Kompletní katalogové listy zadaných vstřikovacích strojů se nachází na CD s diplomovou prací.

Pro nastavení procesních podmínek jsou použity stejné hodnoty ze, seřizovacích listů, které jsou v tabulkách 7, 8, 9. Kompletní seřizovací listy jsou zobrazeny v přílohách P XI, P XII, P XIII.

Pro výrobek Krytka byl použit vstříkovací stroj:

Tab. 7 Vstříkovací stroj krytka

KM_50		
Vstříkovací jednotka		
Max. zdvih stroje	95	[mm]
Max. vstříkovací objem stroje	63	[cm ³ /s]
Max. průměr šneku stroje	25	[mm]
Hydraulická jednotka		
Max. tlak stroje	250	[MPa]
Uzavírací jednotka		
Max. uzavírací síla stroje	50	[t]

Pro výrobek Redukce byl použit vstříkovací stroj:

Tab. 8 Vstříkovací stroj redukce

KM_58		
Vstříkovací jednotka		
Max. zdvih stroje	169	[mm]
Max. vstříkovací objem stroje	131	[cm ³ /s]
Max. průměr šneku stroje	40	[mm]
Hydraulická jednotka		
Max. tlak stroje	186	[MPa]
Uzavírací jednotka		
Max. uzavírací síla stroje	80	[t]

Pro výrobek Světlomet byl použit vstříkovací stroj:

Tab. 9 Vstříkovací stroj světlomet

KM_200CX		
Vstříkovací jednotka		
Max. zdvih stroje	200	[mm]
Max. vstříkovací objem stroje	194	[cm ³ /s]
Max. průměr šneku stroje	45	[mm]
Hydraulická jednotka		
Max. tlak stroje	233.6	[MPa]
Uzavírací jednotka		
Max. uzavírací síla stroje	200	[t]

6.4 Použitá počítačová sestava

Všechny analýzy byly provedeny na školních počítačích, které mají v celé učebně stejnou konfiguraci.

Konfigurace PC

Název operačního systému:	System Microsoft Windows XP Professional
Verze:	5.1.2600 Service Pack 3 Sestavení 2600
Výrobce operačního systému:	Microsoft Corporation
Název systému:	B109-24
Výrobce systému:	FUJITSU SIEMENS
Model systému:	CELSIUS M460
Typ systému:	PC založené na procesoru X86
Procesor:	x86 Family 6 Model 15 Stepping 11 GenuineIntel 2400 Mhz
Celková fyzická paměť:	2 048,00 MB
Volná fyzická paměť:	1,44 GB
Celková virtuální paměť:	2,00 GB
Volná virtuální paměť:	1,96 GB
Prostor stránkovacího souboru:	3,85 GB

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vybrané výsledky, které jsou, popsány níže v kapitole, se vzájemně porovnávaly v programech Moldflow Plastics Insight a Cadmould 3D - F. Výsledky se porovnávaly u všech třech výstřiků.

U spočítaných analýz se vyhodnocovaly nasimulované hodnoty, které byly nastaveny podle seřizovacích dat. Mezi první výsledky patří hmotnost výstřiku, která byla porovnávána z vypočtené analýzy se skutečnou hmotností výstřiku, která se nachází na seřizovacích listech. Dalším výsledkem je deformace výstřiku, která byla odečtena s vypočtených analýz a porovnávala se skutečnou deformací na výrobcích. Deformace na výrobcích se měřila pomocí 3D sondy. Tyto výsledky byly vybrány, protože se porovnávaly se skutečnými hodnotami, které firma FOREZ s.r.o. měla k dispozici z vlastní výroby těchto dílů.

Další porovnání výsledků z analýz je pouze informativní. Tyto vlastnosti nešly porovnat se skutečností. Mezi tyto výsledky patří grafické znázornění času plnění, průběh teploty a další.

V programu Moldflow Plastics Insight bylo zahrnuto do výsledků porovnání mezi dvěma typy sítí Dual Domain asolid 3D. Kvalita sítí byla porovnána pomocí Statistiky sítě (Mesh Statistic).

Nakonec byly do výsledků zahrnuty problémy při výpočtech analýz. Některé analýzy se nespočítaly z důvodu velkého množství elementů, které způsobily nedostatek paměti počítače. Všechny analýzy byly provedeny na stejných počítačích se stejnou konfigurací (tato konfigurace se nachází v kapitole 7.4).

7.1 Krytka

Hmotnost výstřiku

Hmotnosti výstřiku jsou v tabulce 10 a ukazují hodnotu, kterou vypočítala analýza a hodnotu ze seřizovacího listu výstřiku. U MPI byla porovnána hmotnost výstřiku z různých typů sítí a rozdílných typů souborů.

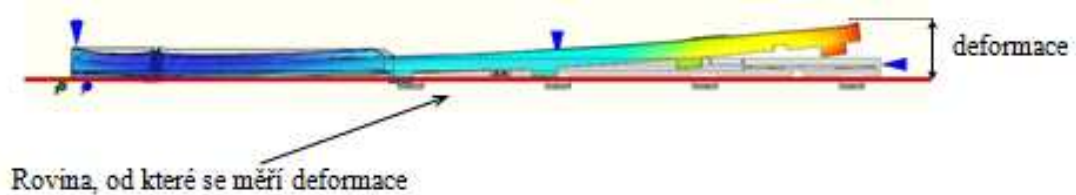
Tab. 10 Hmotnost výstřiku - krytka

	MPI		Cadmould
	Dual domein	3D	
	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]
Soubor stp	5,97	5,90	6,05
Soubor stl	5,91	6,03	
Skutečná	6.10		

Největší rozdíl byl u souboru stp v MPI, který činil 0.2 [g] a nejmenší rozdíl byl v Cadmould, který činil 0,05 [g]. Z těchto hodnot vyplývá, že ke skutečné hmotnosti výrobku se nejvíce blíží analýza z Cadmouldu a pak z MPI soubor. stl 3D síť.

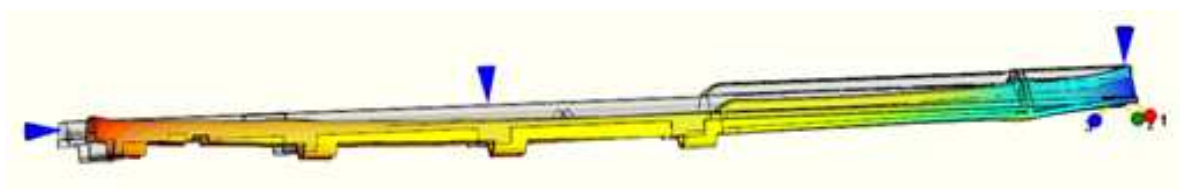
Deformace

Deformace byla měřena od spodní části výstřiku (Obr. 62). V programech MPI a Cadmould byla vytvořena rovina od které, byly měřeny deformace. Tato odměřovací rovina byla použita i pro 3D měření na 3D sodně ve formě FOREZ s.r.o., kde byla krytka položena na měřící přípravek.

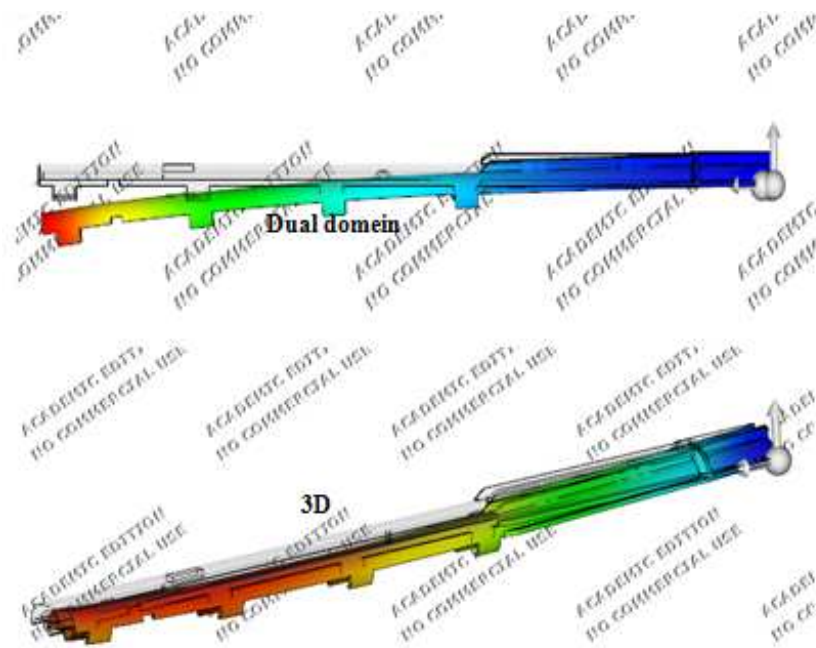


Obr. 62 Rovina deformace – Krytka

Deformace spočítané v MPI u síť Dual domain se prohýbá na opačnou stranu než by měla, tato chyba je zapříčiněna nejspíše daným typem sítě a hodnoty deformací také neodpovídají. U solid 3D sítě a v Cadmould je deformace znázorněna správně.



Obr. 63 Průběh deformace v Cadmould – Krytka



Obr. 64 Průběh deformace v MPI – Krytka

Tab. 11 Hodnoty deformace - Krytka

	MPI 3D	Cadmould
	Deformace [mm]	Deformace [mm]
Soubor stp	0,915	0,861
Soubor stl	0,910	

Hodnoty deformací z analýz se nacházejí v Tab. 11. V tabulce jsou zobrazeny pouze hodnoty z 3D sítě, protože síť Dual domain ukazovala chybnou deformaci. Tato hodnota deformace se nevyhodnocovala. Tyto hodnoty se srovnávaly s hodnotami naměřenými a 3D sondou (Tab. 12).

Tab. 12 Naměřené hodnoty deformací – Krytka

n	Naměřená deformace [mm]
1	0,45
2	0,42
3	0,44
4	0,42
5	0,39
6	0,45
7	0,38
8	0,48
9	0,47
10	0,49
Aritmetický průměr	0,44
Směrodatná odchylka	0,03
Směrodatná chyba měření	0,01

Výsledky v (Tab. 13) ukazují rozdíl jednotlivých analýz od naměřené hodnoty.

Tab. 13 Konečné deformace – Krytka

Naměřená hodnota	MPI stl	MPI stp	Cadmould
0,44	0,91	0,91	0,86
1	2.05	2.07	1,94

V tabulce 14. jsou zobrazeny a porovnány hodnoty kvality sítě. V síti Dual Domain čím jsou hodnoty Match a Reciprocal větší, tak je síť kvalitnější. U 3D sítě pokud je Max. Aspekt ratio menší tím je síť kvalitnější (tato hodnota nesmí, přesáhnou 50%). Z tabulky 14 je patrné, že soubory typu stp mají lepší síť.

Tab. 14 Porovnání Mesh statistics – Krytka

	Dual Domain		3D
	Match percentage [%]	Reciprocal percentage [%]	Max. Aspekt ratio
Soubor. stl	81.8	76.5	49.6
Soubor. stp	84.5	83.0	45.4
Rozdíl	2.7	6.5	4.2

7.2 Redukce

U této analýzy také byla hodnocena kvalita sítě (Tab. 15). Lepší kvalitu sítě měl opět formát stp.

Tab. 15 Porovnání Mesh statistics – Redukce

	Dual Domain		3D
	Match percentage [%]	Reciprocal percentage [%]	Max. Aspekt ratio
Soubor stl	85,3	80,2	50
Soubor stp	87,7	85,7	-
Rozdíl	2,4	5,5	-

Hmotnost výstřiku

Hmotnosti výstřiku (Tab. 16) ukazují hodnotu, kterou vypočítala analýza a hodnotu ze seřizovacího listu výstřiku. Hodnoty v tabulce jsou pro hmotnost jednoho výstřiku.

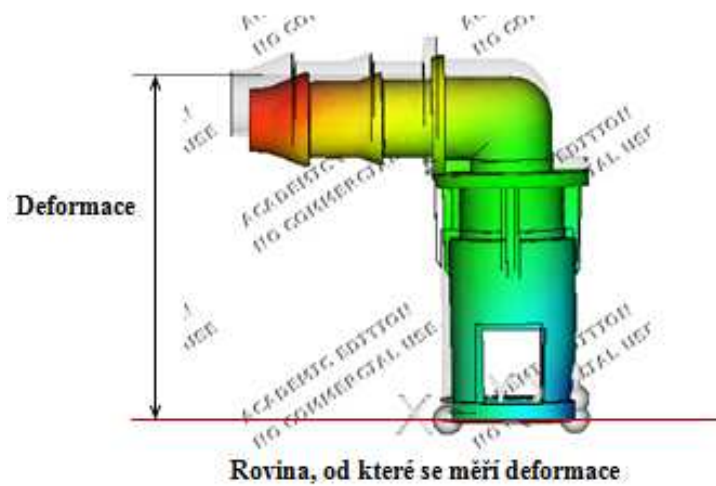
Tab. 16 Hmotnost výstřiku – Redukce

	MPI		Cadmould
	Dual domein	3D	
	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]
Soubor .stp	4,20	-	4,77
Soubor .stl	4,23	4,65	
Skutečná		5,92	

Nejblíže se naměřené hmotnosti blíží hodnota z programu Cadmould a pak hodnota z MPI solid 3D síť.

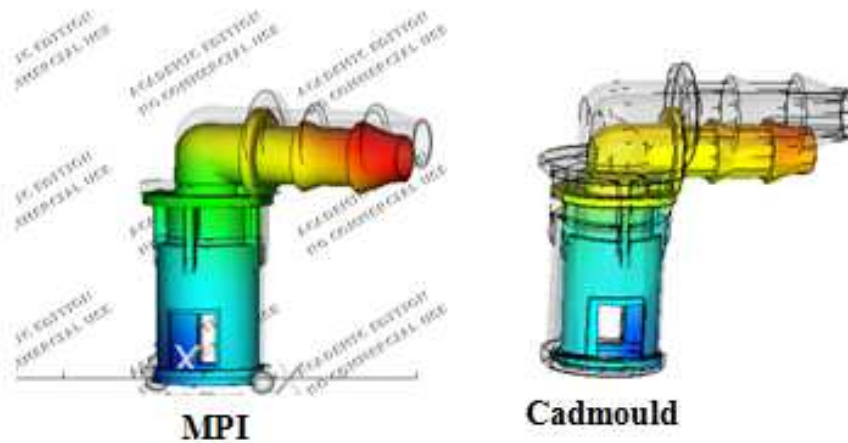
Deformace

Deformace byla měřena od spodní části výstřiku (Obr. 65). V programech MPI a Cadmould byla vytvořena rovina od které, byly měřeny deformace. Tato rovina opět byla použita při měření na 3D sondě, výrobek byl položen na rovnou plochu s čepem. Čep sloužil k zafixování polohy při měření.



Obr. 65 Rovina deformace – Redukce

Průběh deformace se neliší, a u všech analýz byl stejný (Obr. 66). Hodnoty deformací s analýz se nacházejí v Tab. 17.



Obr. 66 Průběh deformace v MPI a Cadmould

Tab. 17 Hodnoty deformace - Redukce

	MPI Dual Domein	MPI 3D	Cadmould
	Deformace [mm]	Deformace [mm]	Deformace [mm]
Soubor stp	0,64	0,73	0,85
Soubor stl	0,64		

Hodnoty zjištěné z analýz byly porovnávány s naměřenými hodnotami a 3D sondou (Tab. 18).

Tab. 18 Naměřené hodnoty deformací - Redukce

n	Naměřená deformace [mm]
1	0,77
2	0,58
3	0,61
4	0,56
5	0,79
6	0,73
7	0,75
8	0,75
9	0,79
10	0,80
Aritmetický průměr	0,72
Směrodatná odchylka	0,08
Směrodatná chyba měření	0,02

Tab. 19 Konečné deformace – Redukce

Naměřená hodnota	MPI stl Dual domein	MPI Stp Dual domein	MPI 3D	Cadmould
0,72	0,64	0,64	0,73	0,85
1	0,88	0,88	1,01	1,18

Výsledky (Tab. 19) ukazují rozdíl jednotlivých analýz od naměřené hodnoty. Hodnota u MPI 3D sítě má téměř stejnou hodnotu deformace jako naměřená hodnota.

Analýza se 3D sítí v souboru stp se nedokončila, protože obsahovala mnoho elementů (více než 700 000). Analýza byla při výpočtu ukončena z nedostatku operační paměti počítače. Tato analýza nebyla zařazena do vyhodnocení výsledků. Případným řešením výpočtu analýzy by bylo snížit počet elementů. Snížením počtu elementů se zhorší kvalita sítě a výsledky nemusí být správné, nebo se může pro zlepšení kvality sítě použít CAD doktor, který je součástí MPI jako přídatný modul.

7.3 Světlo met

U světlo metu byla také sledována kvalita sítě, které je zobrazena v (Tab. 20). Nejlepší kvalita sítě byla opět u souboru stp.

Tab. 20 Tab. 21 Porovnání Mesh statistics – Světlomet

	Dual Domain		3D
	Match percentage [%]	Reciprocal percentage [%]	Max. Aspekt ratio
Soubor. stl	93,0	90,6	49,5
Soubor. stp	94,3	93,3	-
Rozdíl	1,3	2,7	-

Další výsledky v programu CADMOULD nejsou, protože při zadání procesních podmínek se plnění zatavilo na 98 % a analýza se přerušila z důvodu dlouhého vstřikovacího času. Tento vstřikovací čas způsobil zamrznutí vtoku. Tento defekt nastal i v programu MPI. Program MPI sice dopočítal analýzu typu sítě Dual domain, ale takto spočítaná analýza není vhodná pro porovnání. U typu sítě 3D se analýza nedopočítaly, protože obsahovala velké množství elementů a nestačila paměť počítače. Pro výpočet analýzy je zapotřebí snížit množství elementů.

Procesní podmínky byly zadávány podle skutečných dat vstřikování. Světlomet je podle nich vstřikován. Tento dlouhý čas vstřikování je z důvodu vzhledu výrobku. Pro spočítání analýz bych doporučil zkrácení vstřikovacího času na 4.5 sekundy.

8 POROVNÁNÍ POUŽÍTÝCH ROZMĚRŮ

Tato kapitola popisuje klady a zápory obou programů. Nedostatky nebo klady programů jsou popisovány z vlastní zkušenosti, jak se s programy pracovalo při vypracovávání analýz. Tato kapitola je jen můj osobní názor na programy Cadmould 3D – F a Moldflow Plastics Insight.

8.1 Práce s Moldflow Plastics Insight

Program MPI už na první pohled vypadá uživatelsky těžší než Cadmould. MPI dokáže pracovat s dvěma datovými formáty stl. a stp. . Formáty stl se vkládají přímo a formáty stp se musejí vložit přes MDL konvertor. Takto převedené soubory mají lepší kvalitu sítě. Po vložení se musí výrobek vysítovat a následně se musí síť pomocí příkazů opravit. Tato operace zabere někdy až moc času.

Vtokové a temperanční systémy (trajektorie) se většinou vkládají pomocí formátů igs. Těmto trajektoriím se přiřazují tzv. vlastnosti, tím se rozliší vtok od chladících kanálů. Následně se musí vysítovat a upravit (může to trvat až několik minut) Při nastavování procesních podmínek je MPI kap 6.3. rozmanitější než Cadmould.

Klady

- + výborná nápověda
- + množství druhů nastavení procesních podmínek
- + dobrá databáze polymerů
- + přehledné zobrazení analýz

Zápory

- Dlouhá úprava sítě výrobků
- Dlouhá úprava vtoků a chladících kanálů

8.2 Práce s CADMOULD 3D – F

CADMOULD 3D - F pracuje pouze s formáty stl, které se vkládají přímo do programu. Úprava sítě výrobku v programu je jednoduchá zadají se dvě hodnoty a síť je upravená.

Tato operace zabere pouze několik málo minut. Přepočítání sítě je delší tím, čím je síť kvalitnější.

Tvorba temperačního a vtokového systému je v programu taktéž jednoduchá. Problém nastává pokud jsou vloženy trajektorie igs jako vtokový systém, program nabídne automaticky kruhový průřez. Tyto průřezy nejdou editovat musí se smazat a udělat nové se vhodným průřezem. Další nevýhodou je trochu omezené nastavení procesních podmínek, jak bylo popsáno v kap. 6.2. Při vkládání temperačního systému přes trajektorie igs je, snadné pokud je dobře udělán. Pokud jsou dobře udělány igs trajektorie a ve formě se vyskytují přepážky, automaticky se vloží přepážky, které pak stačí pouze editovat na správný průměr. Vkládání materiálu je jednoduché stačí ho vložit z databáze. V programu se nenastavuje vstřikovací stroj se nenastavuje

Klady

- + rychlá úprava sítě
- + vkládání výrobků bez úprav
- + rychlá tvorba vtokových a temperačních kanálů
- + uživatelsky jednodušší

Zápory

- při vložení igs trajektorií jako vtok, nelze editovat
- po spuštění analýzy, nejde poznat, zda program pracuje nebo ne
- omezené nastavení procesních podmínek
- nepřehledné výsledky analýz

8.3 Výhody a nevýhody

Výhody a nevýhody obou programů jsou částečně popsány v předchozí kapitole, kde jsou také popsány klady a zápory. Tabulka 24 charakterizuje způsoby a rozdíly příprav výrobků, vtoků, chlazení atd. V tabulce je stručně popsáno nastavení a příprava výrobků pro programy.

Tab. 22 Přípravy analýzy

	Cadmoul 3D - F	Moldflow Plastics Insight
Příprava výrobku	Výrobek se nemusí upravovat tzn. odstranění technologických rádiusů (max. 1mm). Používané soubory. Stl Jednoduché upravení sítě.	Výrobek se musí upravit tzn. odstranit tech. Rádus (max 1mm). Používané soubory. Stl, Stp Složité upravení sítě pomocí příkazů na tuto opravu.
Příprava vtoku Příprava chlazení	Vtok se vkládá pomocí Igs souborů a následná editace. Editace je velice jednoduchá.	Vtok se vkládá pomocí Igs souboru a neho následná editace. Editace je složitá a provádí se pomocí příkazů na tuto úpravu.
Příprava procesních podmínek	Procesní podmínky se nastavují v obou programech podobně. Menší možnost charakterizovat proces vstřikování.	Procesní podmínky se nastavují v obou programech podobně.
Nastavení materiálu	Pro nastavení materiálu byla použita databáze materiálů v programu.	Pro nastavení materiálu byla použita databáze materiálů v programu.
Nastavení stroje	Charakteristiky stroje se nenastavují.	Pro nastavení vstřikovacího stroje je možné použít databázi programu, ale v tomto případě se musela databáze strojů vytvořit.

ZÁVĚR

V diplomové práci bylo mým úkolem vytvořit a porovnat analýzy vstřikování plastů na slučných výrobcích. Analýzy byly provedeny v programech CADMOULD 3D –F a Moldflow plastics Insight. Výrobky byly poskytnuty firmou FOREZ s.r.o.

Práce byla rozdělena do dvou částí teoretickou a praktickou část. Teoretická část pojednává o základním rozdělní polymerů a jejich zpracování. Je zde popsán proces vstřikování, vstřikovací cyklus a popis vstřikovacího stroje. Dále teoretická část pojednává o reologii polymerů a jejich tokových vlastnostech. Nakonec se zde nachází rozdělení CAD systému a jejich popis, a popis programů CADMOULD 3D – F a Moldflow Plastics Insight.

Praktická část pojedná o popisu výrobků a jejich úpravě pro vložení do programů. Dále popisuje principy výpočtů analýz v programech. Je zde popsáno jak, se jednotlivé analýzy nastavovaly v jednotlivých programech.

Závěrečné zhodnocení a rozbor výsledků se nachází v kapitole diskuze výsledků.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇAS, Miroslav., VLČEK Jiří. Aplikovaná reologie. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001. 144 s. ISBN 80-7318-09-1
- [2] BOBČÍK, Ladislav., a kol. Formy pro vstřikování plastů 1. díl: Vstřikování termoplastů. 2. vyd. Brno: Uniplast Brno. 1999. 134 s.
- [3] MLEZIVA, Josef., ŠŇUPÁREK, Jaromír. Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. 544 s. ISBN 80-85920-72-7
- [4] MAŇAS, Miroslav., HELŠTÝN, Josef. Výrobní stroje a zařízení: Gumárenské a plastikářské stroje II. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1990. 199 s. ISBN 80-214-0213-X
- [5] ŘASA, Jaroslav., a kol. Strojírenská technologie IV. 1. vyd. Praha 6: Scientia, 2003. ISBN 80-7183-284-7
- [6] FUH, J. Y. H., et al. Computer-aided mold design and manufacture. New York: Marcel Dekker, 2004. 372 s. ISBN 0-8247-5314-3
- [7] MORRISON, Faith A. Understanding Rheology. New York : Oxford University Press, 2001. 545 s. ISBN 0-19-514166-0.
- [8] DĚDÁK , Pavel. *Tvorba elektronických podkladů pro výuku programu CATIA*. Fakulta Technologická Univerzity Tomáše Bati Zlín, 2007. 73 s. Bakalářská práce.
- [9] ODEHNAL, Petr. *Nehomogenity ve vstřikovaných dílech*. Fakulta Technologická Univerzity Tomáše Bati Zlín, 2005. 120 s. Diplomová práce.
- [10] *TechnologieII*[online].[cit. 2009 – 02 – 20]. Dostupný z WWW :http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [11] *Cadmould* [online]. [cit. 2009 – 05 – 14]. Dostupný z WWW: <http://www.cadmould.cz/index.php?akce=1>
- [12] *Moldflow* [online]. [cit. 2009 – 05 – 14]. Dostupný z WWW: <http://www.smartplast.cz/software.php>
- [13] *Metoda konečných prvků – 1. panel* [online]. [cit. 2009 – 05 – 14]. Dostupný z WWW: http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf

- [14] *CAX technologie* [online]. [cit. 2009 – 08 – 01]. Dostupný z WWW:
<http://www.designtech.cz/c/from.act?0&CAX>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CA	Computer Aided
CAA	Computer Aided Assembly
CAD	Computer Aided Design
CADD	Computer Aided Design and Drafting
CAEA	Computer Aided Engineering Analysis
CAI	Computer Aided Inovation
CAI	Computer Aided Inspection
CAIS	Computer Aided Information System
CAL	Computer Aided Logistic
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAMP	Computer Aided Management Production
CAO	Computer Aided Organisation
CAP	Computer Aided Programming
CAP	Computer Aided Planning
CAPE	Computer Aided Production Engineering
CAPP	Computer Aided Process Planning
CAQ	Computer Aided Quality
CA-R	Computer Automatic-Robots
CASE	Computer Aided Software Engineering
CAT	Computer Aided Testing
CIM	Computer Integrated Manufacturing
FEM	Finite Element Method
MPI	Moldflow Plastics Insight
MPA	Moldflow Plastics Advisers

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vstřikovací cyklus [10].....	12
Obr. 2 Vstřikovací stroj [10].....	12
Obr. 3 Vstřikovací jednotky.....	13
Obr. 4 Šneková plastikační jednotka	14
Obr. 5 Vstřikovací jednotka s předplastikací.....	14
Obr. 6 Rozdělení uzavíracích jednotek.....	15
Obr. 7 Aplikace polymerů [10].....	17
Obr. 8 Amorfni a semikrystalický termoplast.....	18
Obr. 9 Oblast využití u amorfniích plastů.....	18
Obr. 10 Oblast využití u semikrystalických plastů	19
Obr. 11 Vyztužující plniva [10].....	19
Obr. 12 Newtonův model.....	22
Obr. 13 Hookův model	23
Obr. 14 Maxwellův model	23
Obr. 15 Vliv normálových napět - Weissenbergův efekt [1].....	24
Obr. 16 Vnitřní smyková napětí.....	25
Obr. 17 Relaxace polymerů [1].....	26
Obr. 18 Překmit napětí [1]	27
Obr. 19 Vliv smykové viskozity na čelo tavenin	27
Obr. 20 Tokové křivky různých látek	28
Obr. 21 Toková křivka.....	28
Obr. 22 Závislost η na teplotě a tlaku.....	29
Obr. 23 Jednoosé protažení válce	29
Obr. 24 elongační viskozita	30
Obr. 25 Power – law model	31
Obr. 26 Smykový tok	33
Obr. 27 Unášivý tok.....	33
Obr. 28 tlakem řízený tok	33
Obr. 29 Elongační tok	34
Obr. 30 Fontánový tok	35
Obr. 31 MAD diagram.....	35

Obr. 32 Jev „jetting“.....	36
Obr. 33 pvT diagramy.....	37
Obr. 34 PLM cyklus.....	38
Obr. 35 3D - Příhradový model [11].....	48
Obr. 36 Přesný výpočet Cadmould 3D-F [11].....	49
Obr. 37 Střednicová plocha [12].....	50
Obr. 38 Dual domain mesh [12].....	51
Obr. 39 Solid 3D mesh [12].....	51
Obr. 40 Krytka.....	55
Obr. 41 Redukce.....	55
Obr. 42 Světlomet.....	56
Obr. 43 Tvary vtoků v Cadmouldu.....	57
Obr. 44 Procesní podmínky.....	57
Obr. 45 Nastavení toku taveniny.....	58
Obr. 46 Nastavení sítě – Krytka.....	59
Obr. 47 Parametry analýzy – Krytka.....	59
Obr. 48 Redukce.....	60
Obr. 49 Vtok – Cadmould.....	61
Obr. 50 Parametry analýzy – Redukce.....	61
Obr. 51 Světlomet.....	62
Obr. 52 Úprava vtoku – světlomet.....	63
Obr. 53 Parametry analýzy – Světlomet.....	63
Obr. 54 Statistika sítě.....	64
Obr. 55 Dual domain a 3D síť.....	65
Obr. 56 Procesní podmínky - MPI.....	65
Obr. 57 Procesní podmínky – Krytka.....	66
Obr. 58 Vtoková sestava – Redukce.....	67
Obr. 59 Procesní podmínky – Redukce.....	67
Obr. 60 Vtokový systém – Světlomet.....	67
Obr. 61 Procesní podmínky – Světlomet.....	68
Obr. 62 Rovina deformace – Krytka.....	72
Obr. 63 Průběh deformace v Cadmould – Krytka.....	72
Obr. 64 Průběh deformace v MPI – Krytka.....	73

Obr. 65 Rovina deformace – Redukce.....	76
Obr. 66 Průběh deformace v MPI a Cadmould.....	76

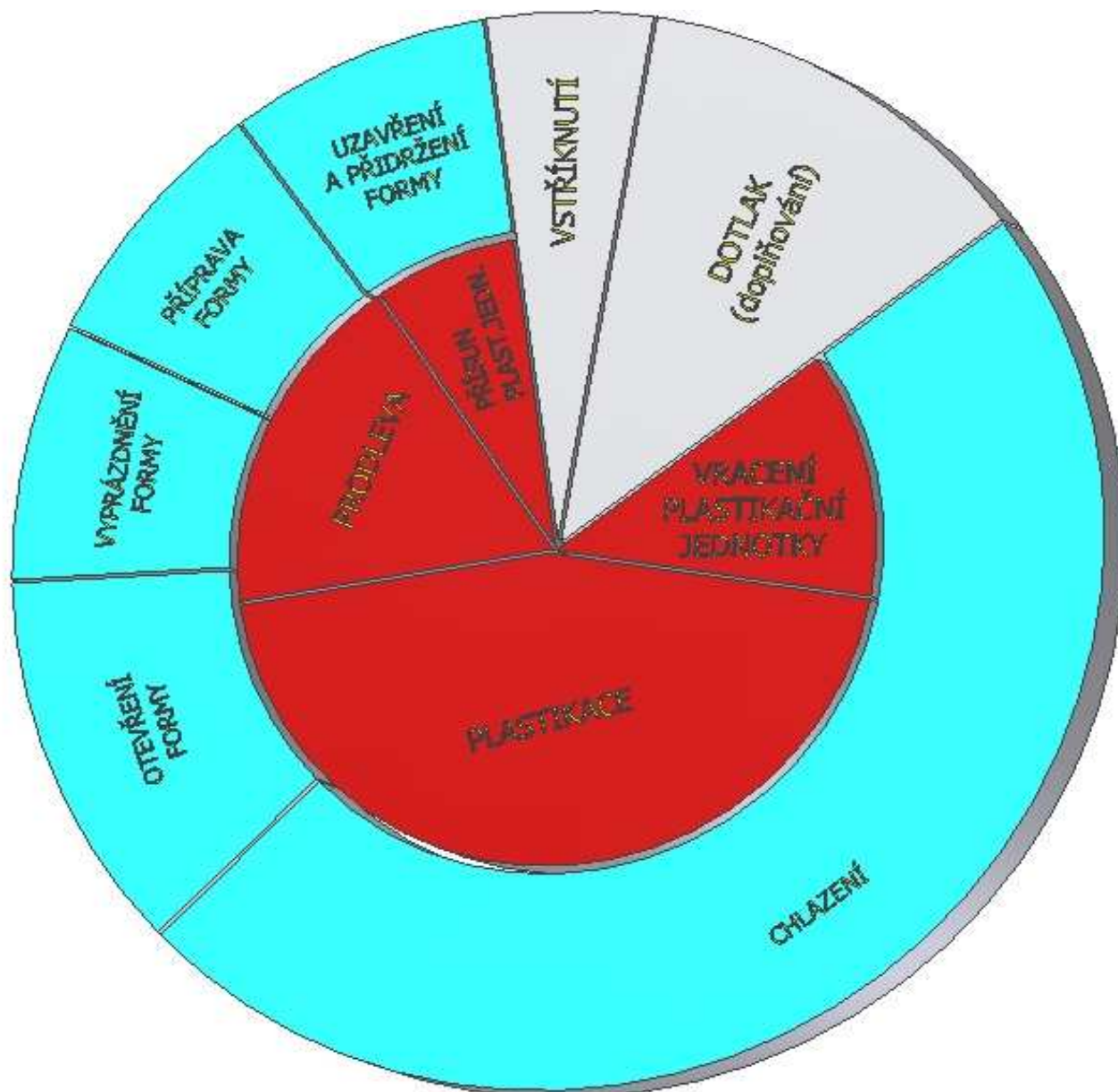
SEZNAM TABULEK



Tab. 1 Nastavení sítě pro krytku	58
Tab. 2 Vstřikovací data krytky	60
Tab. 3 Nastavení sítě pro redukci	61
Tab. 4 Vstřikovací data redukce	62
Tab. 5 Nastavení sítě světlometu	63
Tab. 6 Vstřikovací data světlometu	64
Tab. 7 Vstřikovací stroj krytky	69
Tab. 8 Vstřikovací stroj redukce	69
Tab. 9 Vstřikovací stroj světlomet	69
Tab. 10 Hmotnost výstřiku - krytky	72
Tab. 11 Hodnoty deformace - Krytky	73
Tab. 12 Naměřené hodnoty deformací – Krytky	74
Tab. 13 Konečné deformace – Krytky	74
Tab. 14 Porovnání Mesh statistics – Krytky	74
Tab. 15 Porovnání Mesh statistics – Redukce	75
Tab. 16 Hmotnost výstřiku – Redukce	75
Tab. 17 Hodnoty deformace - Redukce	76
Tab. 18 Naměřené hodnoty deformací - Redukce	77
Tab. 19 Konečné deformace – Redukce	77
Tab. 20 Tab. 21 Porovnání Mesh statistics – Světlomet	78
Tab. 22 Přípravy analýzy	81

SEZNAM PŘÍLOH

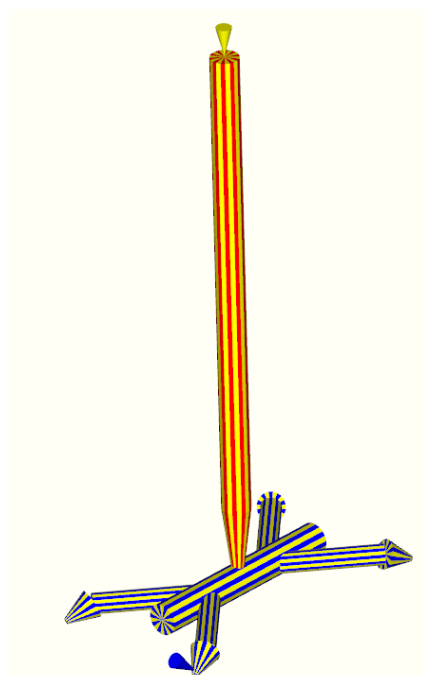
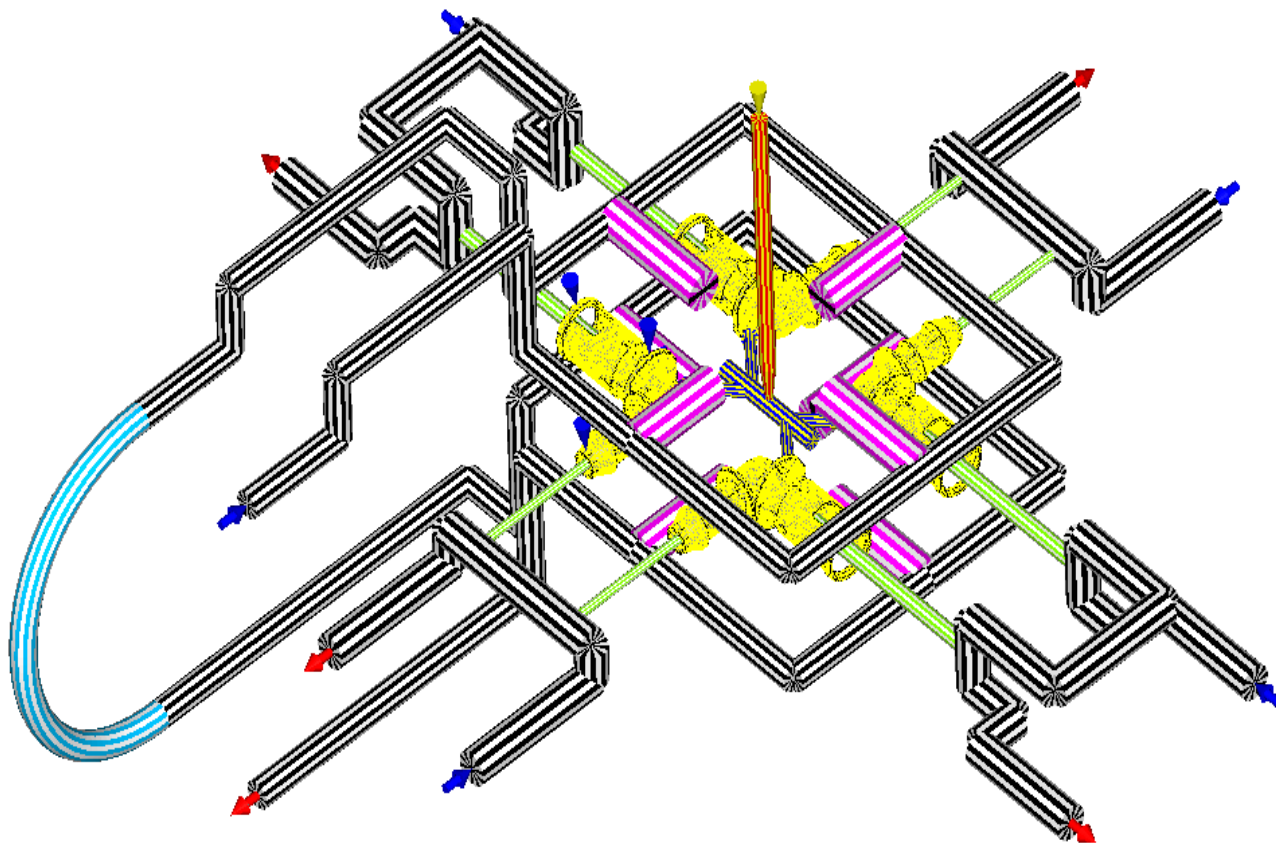
- P I .** Vstřikovací cyklus
- P II .** Cadmould – Sestava Krytka
- P III.** Cadmould – Sestava Redukce
- P IV.** Cadmould – Sestava Světlomet
- P V.** MPI – Sestava krytka
- P VI.** MPI – Sestava Redukce
- P VII.** MPI – Sestava Světlomet
- P VIII.** Výkres Krytky
- P IX.** Výkres Redukce
- P X** Výkres Světlometu
- P XI.** Seřizovací data – Krytka
- P XII.** Seřizovací data – Redukce
- P XIII.** Seřizovací data – Světlomet
- P XIV .** CD obsahující: Elektronickou verzi Diplomové práce ve formátu doc a pdf

PŘÍLOHA P I: DIAGRAM VSTŘIKOVACÍHO CYKLU



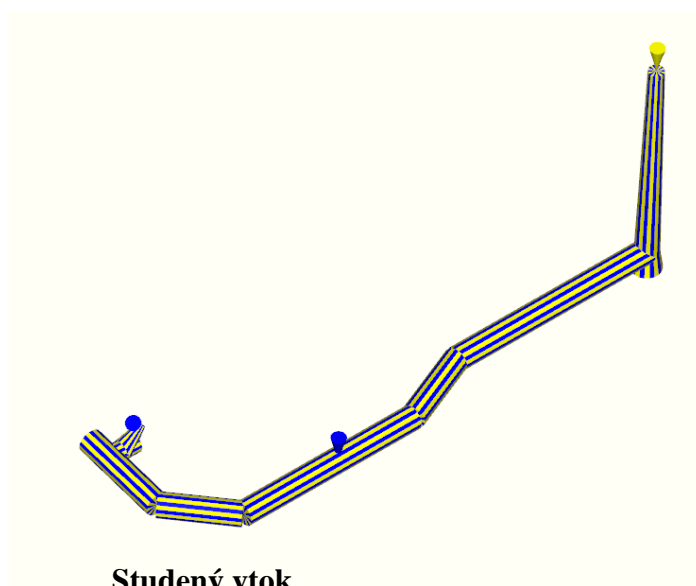
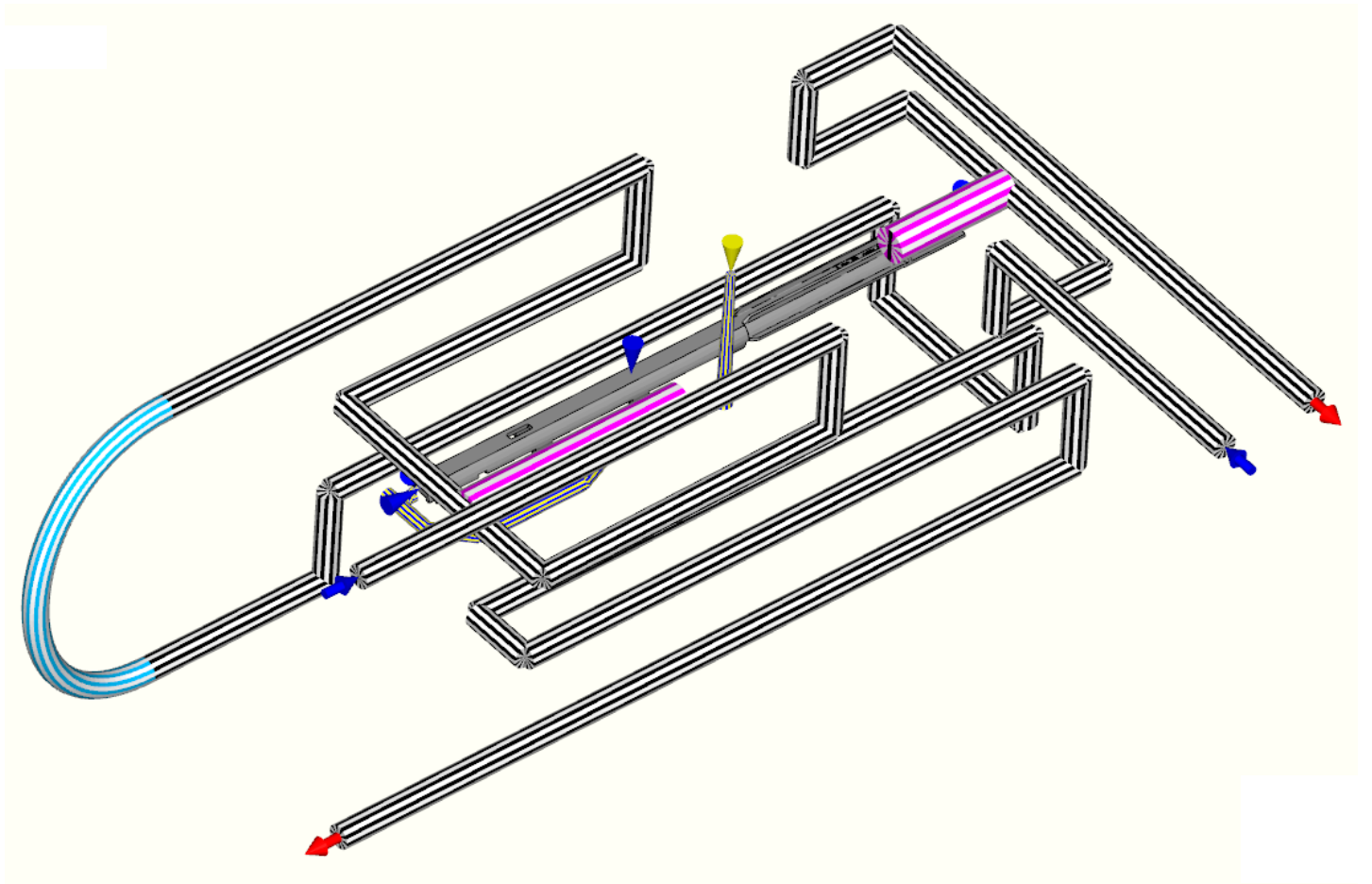
-  cyklus plastikační jednotky
-  cyklus formy

PŘÍLOHA P III: CADMOULD – SESTAVA REDUKCE



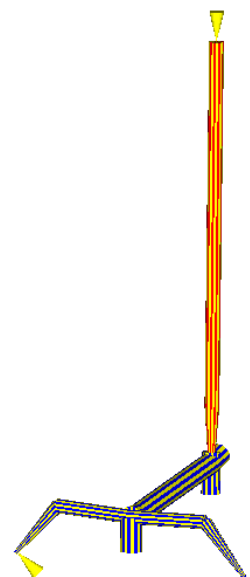
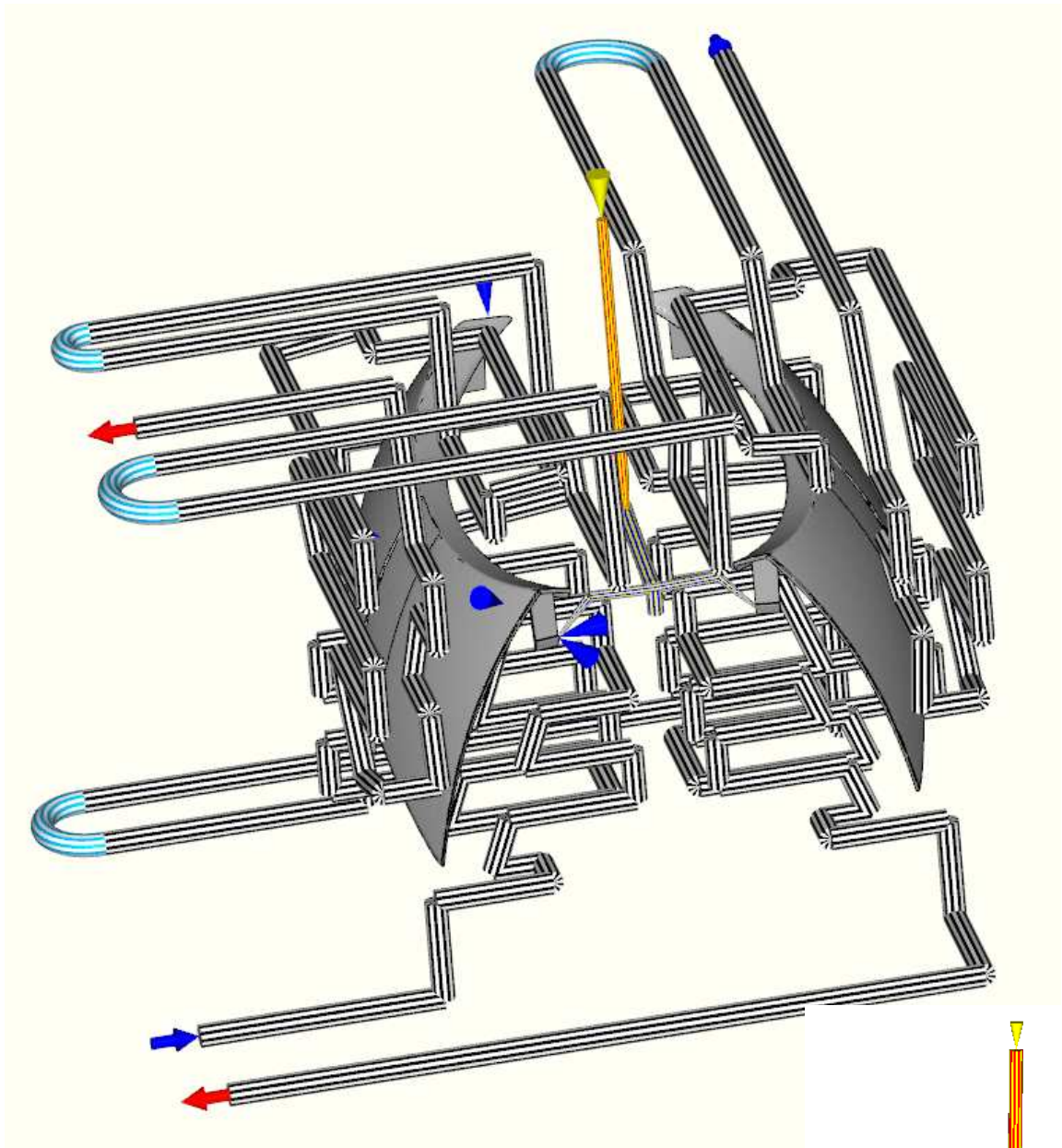
Kombinace studeného vtoku a horké trysky

PŘÍLOHA P II: CADMOULD – SESTAVA KRYTKA



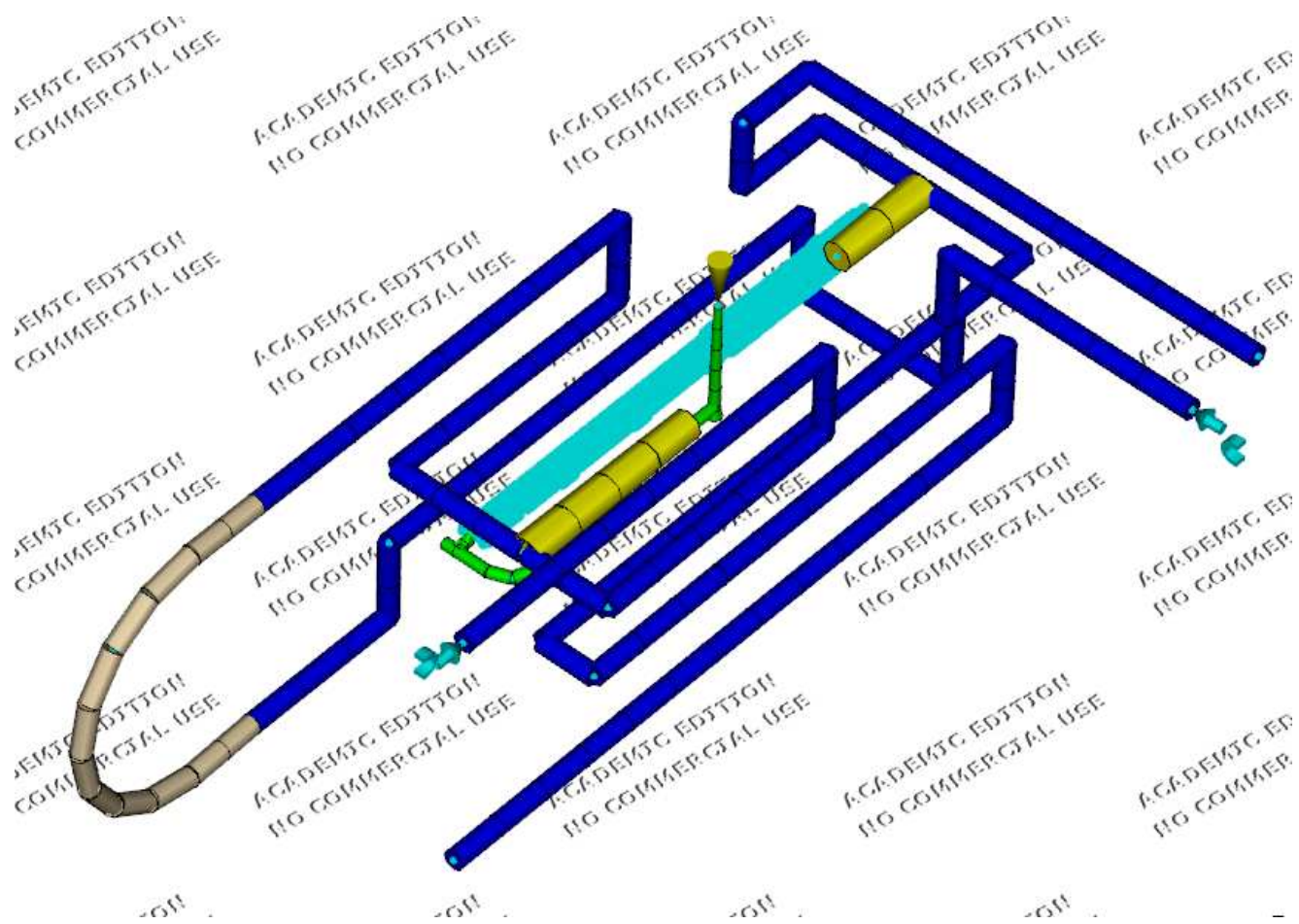
Studený vtok

PŘÍLOHA P IV: CADMOULD – SESTAVA SVĚTLOMET

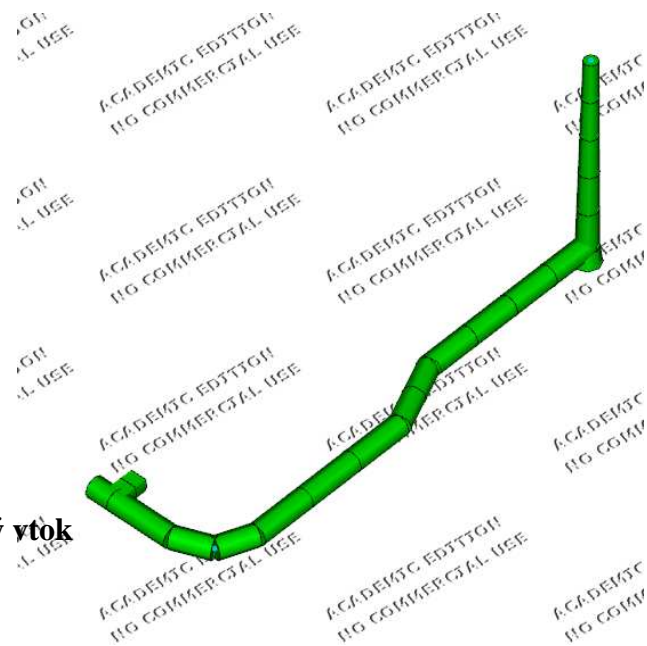


Kombinace studeného vtoku a horké trysky

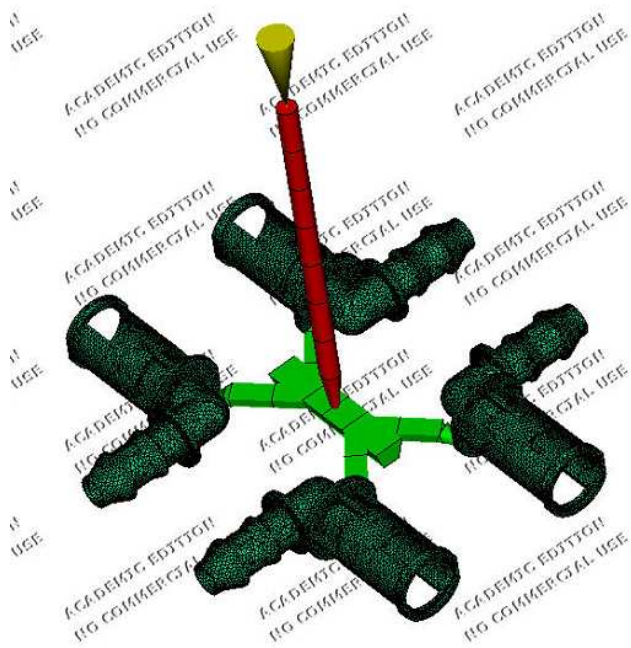
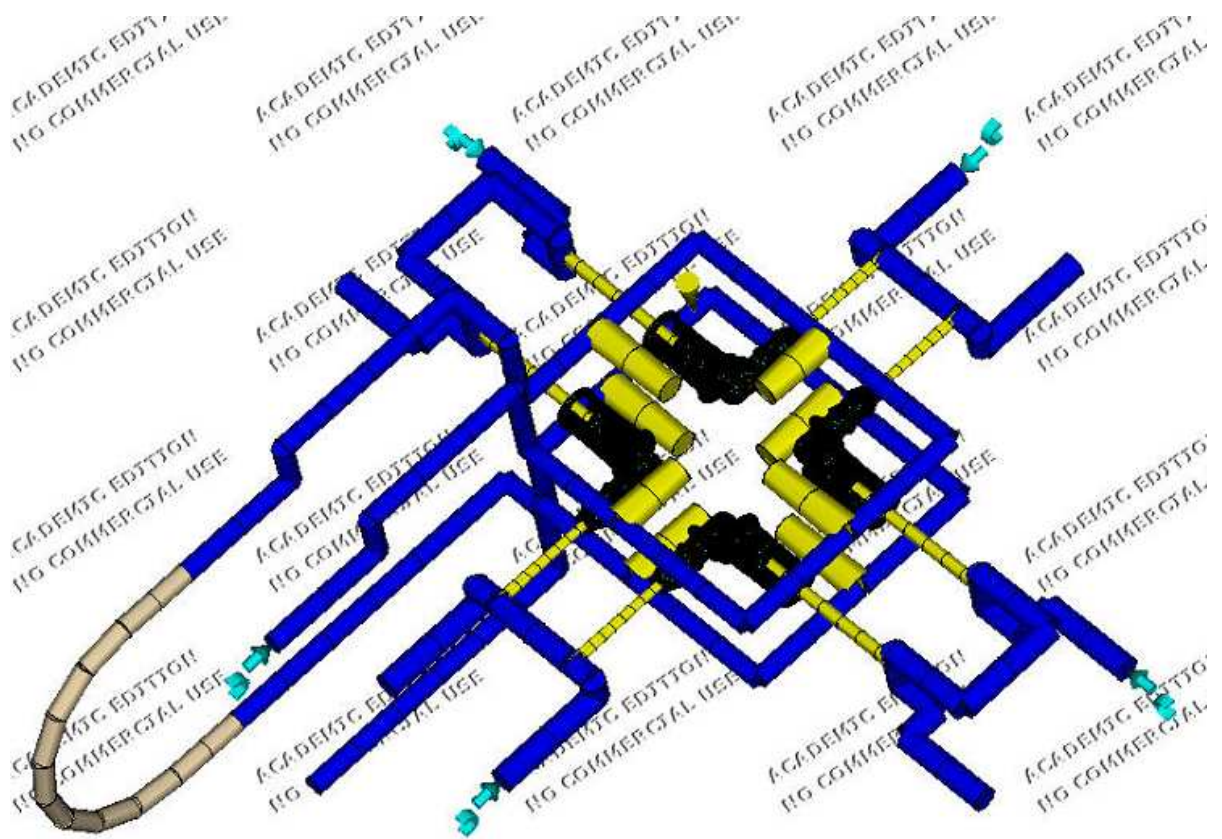
PŘÍLOHA P V: MPI – SESTAVA KRYTKA



Studený vtok

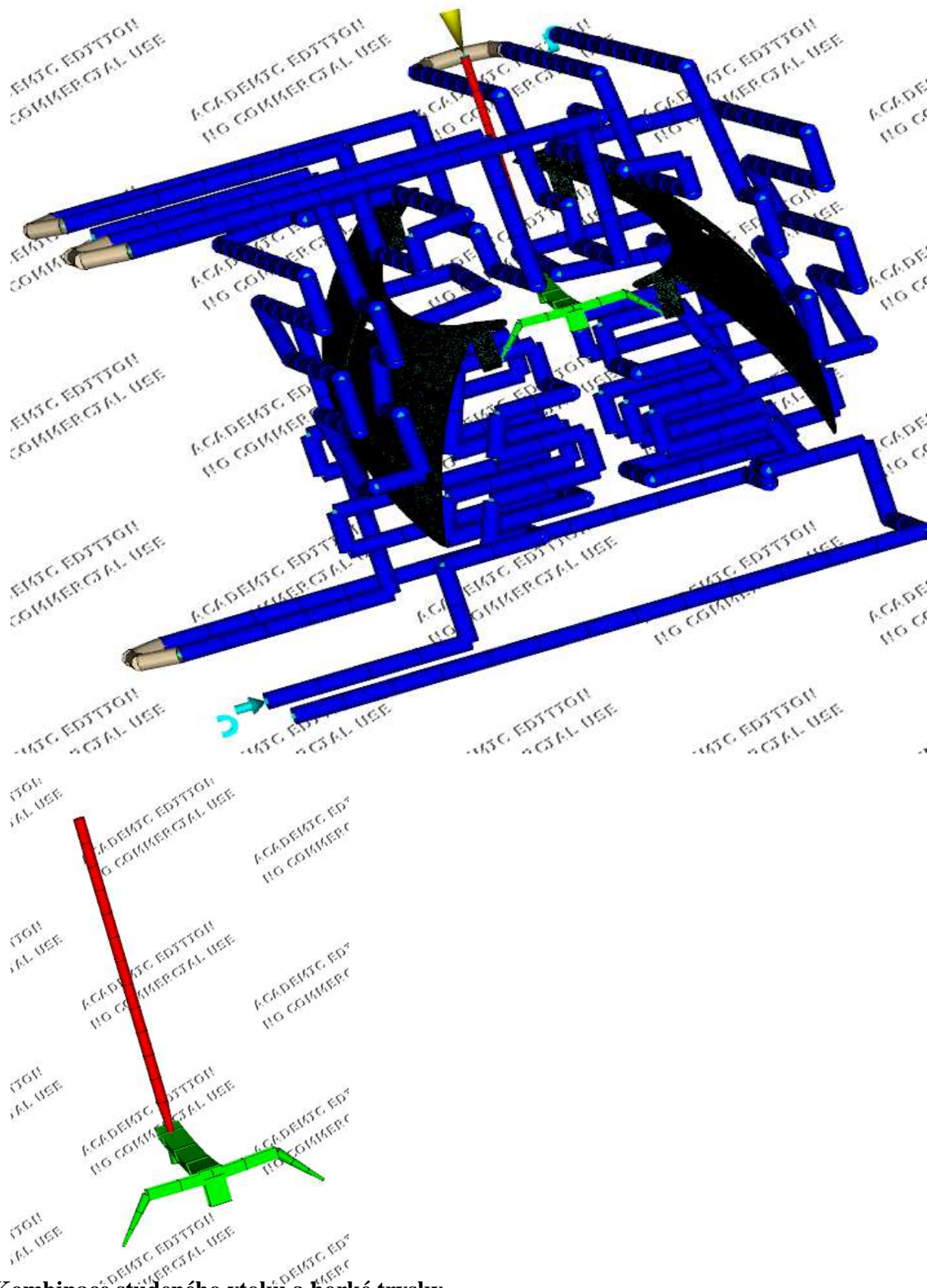


PŘÍLOHA P VI: MPI – SESTAVA REDUKCE



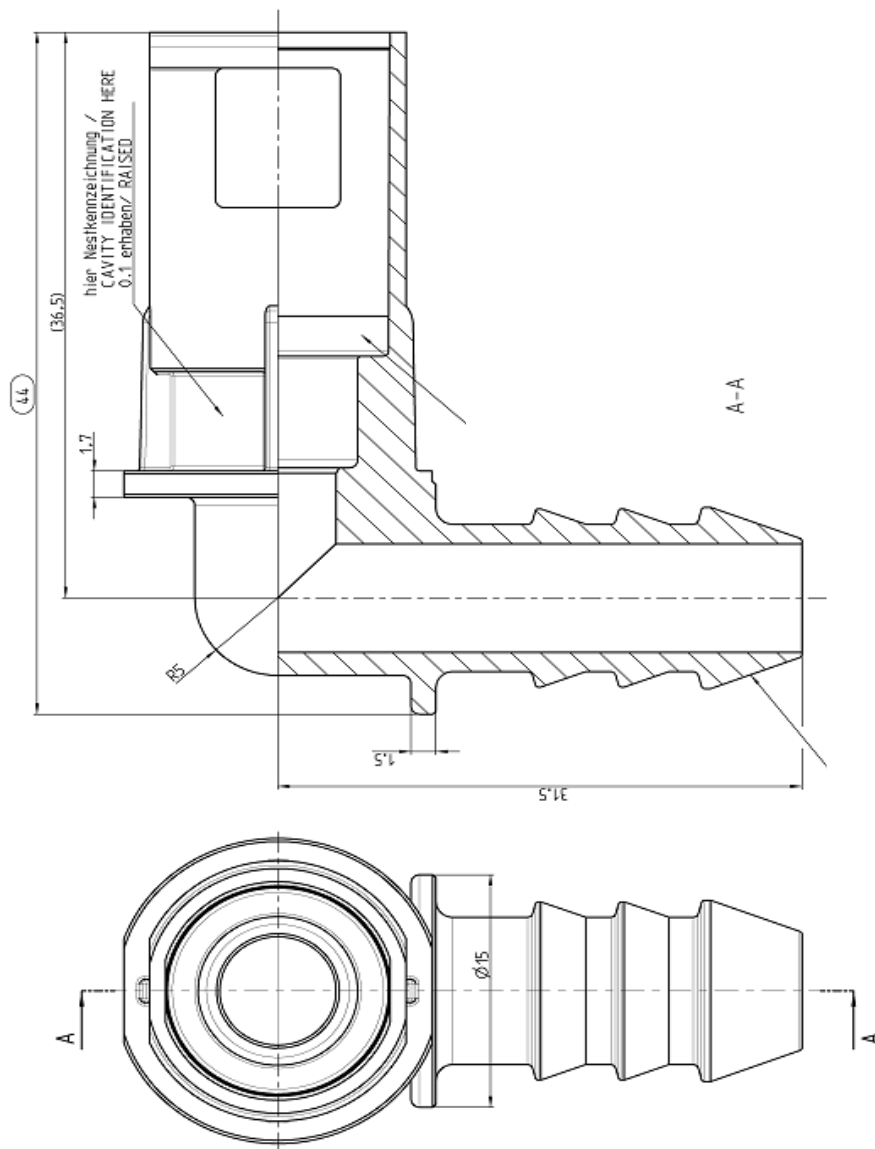
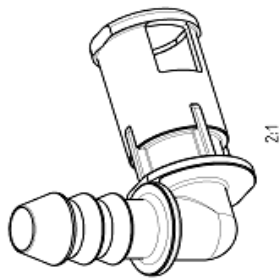
Kombinace studeného vtoku a horké trysky

PŘÍLOHA P VII: MPI – SESTAVA SVĚTLOMET



Kombinace studeného vtoku a horké trysky

PŘÍLOHA P IX: VÝKRES – REDUKCE



PŘÍLOHA P X: VÝKRES – SVĚTLOMET

