

Porovnání CAE aplikací pro analýzu vstřikovacího procesu

Bc. Tomáš Skála

Diplomová práce
2009



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

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. Dále je zde zadání parametrů pro vstřikování v obou programech podle skutečných procesních podmínek a následné porovnání hotových analýz.

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. Further there is a setting of the injection parameters in both programs according to the actual process conditions and the subsequent comparison of completed analyses.

Keywords: CAD, Mouldflow, Cadmould, polymers, injection moulding

Tímto bych chtěl na prvním místě poděkovat panu Ing. Štěpánu Šandovi za trpělivost, odborné rady, které mi věnoval a vedení při psaní diplomové práce. Dále chci poděkovat Ing. Marku Štasnému za odbornou pomoc s technologickými podmínkami výrobků a Ing. Ladislavu Bakovi. Panu Ing. Jiřímu Gabrielovi za rady a pomoc s programem Cadmould 3D – F, své přítelkyni Ing. Radce Gajdošíkové za oporu při psaní. Nadále firmě FOREZ s.r.o. za poskytnutí výrobků a rodičům za trpělivost při mém studiu.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně 20.5.2009

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 POLYMERY	10
1.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ	10
1.1.1 Termoplasty	11
1.1.2 Reaktoplasty	14
1.1.3 Elastomery	14
1.2 REOLOGIE POLYMERŮ	14
1.2.1 Viskózní modely	15
1.2.2 Smykový a elongační tok	18
1.2.3 Charakteristika vstřikování	21
2 VSTŘIKOVÁNÍ	23
2.1 PRINCIP VSTŘIKOVÁNÍ	23
2.1.1 Vstřikovací stroj	24
2.1.2 Uzavírací jednotka	24
2.1.3 Vstřikovací jednotka	26
3 CA – SYSTÉMY	29
3.1 ROZDĚLENÍ CAD SYSTÉMŮ	29
3.2 VYSVĚTLENÍ CA – SYSTÉMŮ	30
3.3 CADMOULD 3D-F	31
3.4 MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT® (MPI®)	34
3.5 MOLDFLOW PLASTICS ADVISERS® (MPA) ®	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	41
5 METODY VÝPOČTU CADMOULD 3D-F A MPI®	42
5.1 CADMOULD 3D – F	42
5.2 MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT® (MPI®)	44
6 VÝROBKY PRO ANALÝZU	46
6.1 POPIS A ÚPRAVA VÝSTŘIKŮ	46
6.2 NASTAVENÍ ANALÝZY V PROGRAMU CADMOULD 3D –F	50
6.2.1 Krytka – nastavení analýzy	52
6.2.2 Redukce – nastavení analýzy	53
6.2.3 Světlomet – nastavení analýzy	54
6.3 NASTAVENÍ ANALÝZY V PROGRAMU MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT®	55
6.3.1 Krytka – nastavení analýzy	56
6.3.2 Redukce – nastavení analýzy	57
6.3.3 Světlomet – nastavení analýzy	58

7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	60
7.1.1	Vyhodnocení analýz – Krytka	60
7.1.2	Vyhodnocení analýz – Redukce	63
7.1.3	Vyhodnocení analýz – Světloomet	66
7.1.4	Porovnání CALDMOULD 3D – F a Moldflow Plastics Insight®	67
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK	74
	SEZNAM PŘÍLOH	75

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 tak z reaktoplastů a nakonec kaučuky.

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 navrhnou dutinu formy, nasimulují jak v ní daný materiál teče a pokud dutina nevyhovuje tak se pouze změní datový model. Dříve konstruktér navrhl formu, ta se vyrobila a buďto fungovala nebo ne tzv. „pokus omyl“.

V dnešní době existuje spousta konstrukčních programů, které konstruktéra zastupují při práci. Tyto systémy jsou označovány souhrnně zkratkou CAD (Computer Aided Design). 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.

Diplomová práce je zaměřena na porovnání CAE aplikací pro analýzu vstřikovacího procesu. 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 POLYMERY

Polymery mají všestranné rozšíření výroby, 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 roztočnou 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 omezena teplotou a tvarovou neformovatelností. [3]

Polymery za běžných podmínek jsou tvrdé a houževnaté nebo křehké. Slovo polymer pochází z řečtiny a znamená slovo mnoho (poly) částice (mer). Polymery 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 [g·mol⁻¹]. [1], [5]

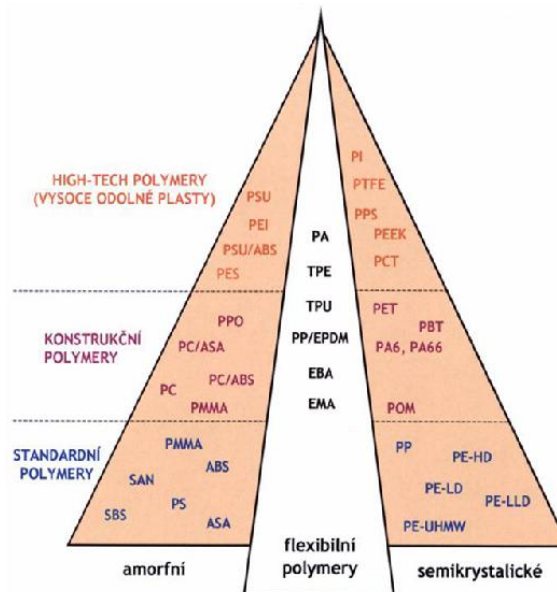
1.1 Rozdělení plastů

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

Plasty pro široké použití - polyolefiny (PE, PP), polystyrény (PS).

Plasty pro inženýrské aplikace - polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylen (POM), polymethylmetakrylát (PMMA), termopolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice.

Plasty pro špičkové aplikace - polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylen (PTFE), polyimidy (PI).



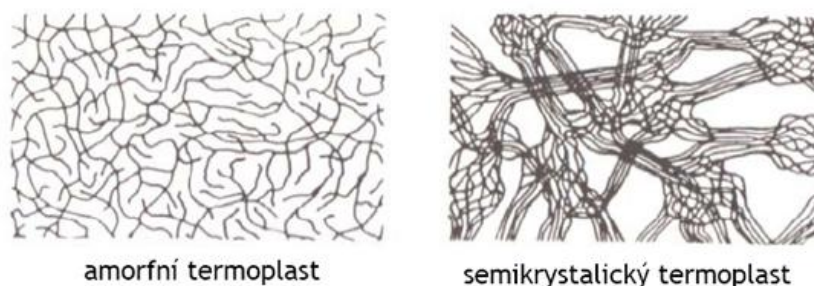
Obr. 1 Aplikace polymerů

Plasty se dále dělí podle chování při zpracování na termoplasty, reaktoplasty a elastomery (kaučuky), které taky patří do polymerních materiálů.

1.1.1 Termoplasty

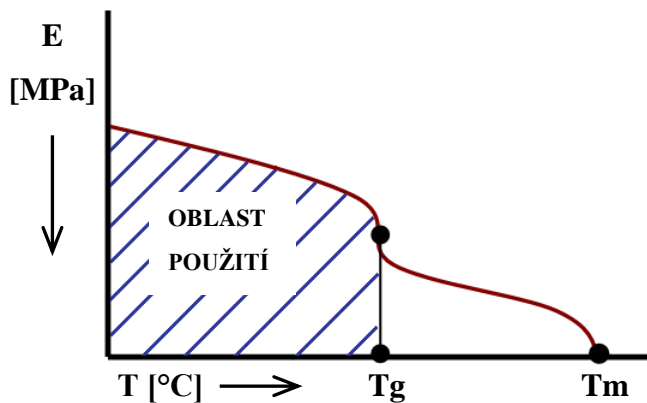
Termoplasty jsou polymery, které lze teplem většinou opakovaně tavit a ochlazením převést zpět do pevného stavu. Tváření je možné opakovat. Při zahřívání termoplastů probíhají pouze změny fyzikální ne chemické, tzn. chemická struktura se nemění. Makromolekuly jsou buď lineární, nebo rozvětvené, a vytvářejí 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 uspořádána a tvoří krystalické útvary). [5]



Obr. 2 amorfni a semikrystalický termoplast

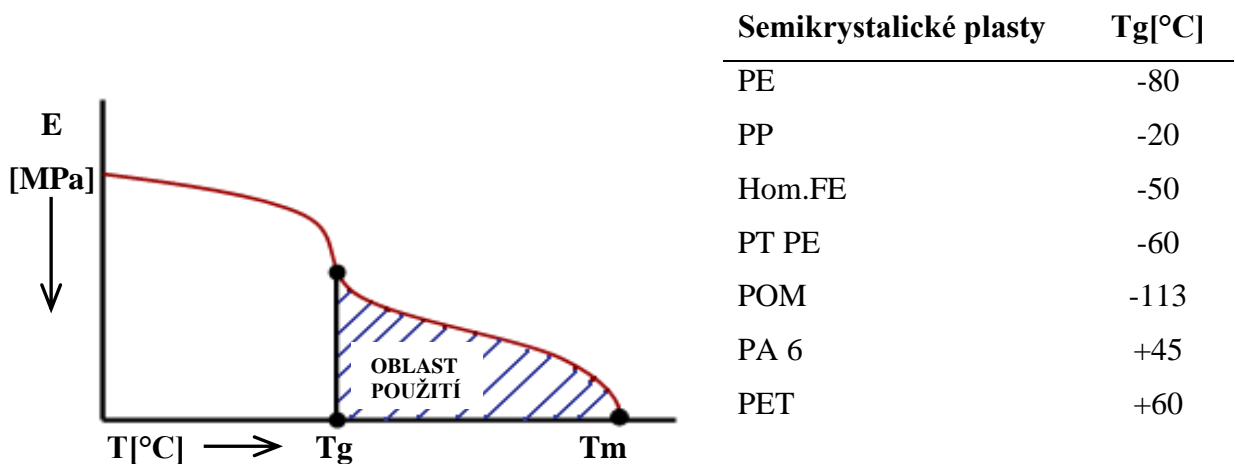
Využitelnost výrobků z amorfních plastů je v oblasti pod teplotou skelného přechodu (T_g). Polymer je v tomto stavu pevný. Zvyšováním teploty nad T_g postupně slábnou kohezní síly mezi molekulami a plast přechází do plastické oblasti až do viskózního stavu, kdy se zpracovává. Se zvyšováním narůstá i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



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

Obr. 3 Oblast využití u amorfních plastů

U semikrystalických plastů jsou části makromolekul vázány pevněji v lamelách a ve sferolitech krystalické fáze. Zvyšováním teploty se nejprve uvolní část makromolekul z amorfní oblasti, potom i ostatní. To je doprovázeno značným objemovým nárůstem. Použití plastu je potom v oblasti na T_g , protože mají výhodnou kombinaci pevnosti a houževnatosti nad touto teplotou. [2]



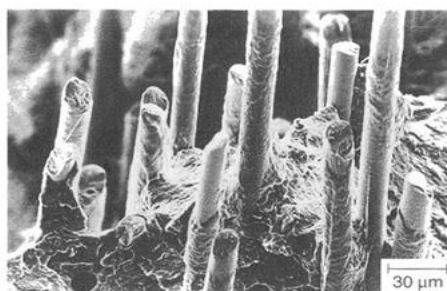
Semikrystalické plasty	T_g [°C]
PE	-80
PP	-20
Hom.FE	-50
PT PE	-60
POM	-113
PA 6	+45
PET	+60

Obr. 4 Oblast využití u semikrystalických plastů

Základní vlastnosti polymerů se mohou i vlivem nejrůznějších přísad a tím splnit požadavek volby vhodného plastu. Plniva zlepšují buď mechanické vlastnosti materiálu, nebo chemickou odolnost či tvarovou stálost při zvýšené teplotě, jiné prostě jen hmotu zlevňují. Rozeznáváme *vyztužující* (skleněná, uhlíková, kovová, 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 přidávají se většinou z důvodu snížení ceny materiálu (moučka z břidlice, kaolinu, křídly). [9]



kovové piliny



skelná vlákna

Obr. 5 Vyztužující plniva

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 skleněné nebo kovové kuličky, které zvyšují rozměrovou stabilitu a odolnost proti rázům.

Jak další přísady se používají: [1], [3], [9]

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. (0,5 ÷ 2 %)

Retardéry hoření – působí samozhášivě, zpomalují proces hoření plastů nebo vůbec nedovolí zapálení plastu.

1.1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty se působením tepla stávají nízkomolekulární sloučeniny (krátké řetězce monomerů vzniklé přerušením polyreakce v určité fázi výroby polymeru) jsou po omezenou dobu plastické. Polyreakce pokračuje dalším ohřevem a jejím výsledkem je prostorově zesíťovaná amorfní (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]

1.1.3 Elastomery

Elastomery patří do skupiny kaučuků, jsou to 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],[9]

U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj. [1],[9]

1.2 Reologie polymerů

Reakce polymerních kapalin, jako jsou taveniny a roztoky, na působení napětí může za určitých podmínek připomínat chování tuhého tělesa, mimo nelineární závislost napětí na smykové rychlosti. Reologie je věda o tuku a deformace látek (taveniny). 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“. Zda se látka (tavenina) chová jako tuhá hmota nebo kapalina určuje *Debořino číslo*. [7]

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

θ – doba pozorování

λ – relaxsační čas materiálu

Relaxační čas je doba, za kterou při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého proběhne 63% všech napěťových změn. Relaxační charakteristiky, které charakterizují paměť taveniny jsou ovlivněny velikostí a pružností polymerních řetězců. [7]

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

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

$De = \text{velim malé} = \text{systém se chová jako kapalina}$

$De = \text{velmi velké} = \text{systém se chová jako pevná látka}$

Pokud doba pozorování bude:

$\lim_{\theta \rightarrow \infty} De = 0 \rightarrow De = 0$ i pro sklo, a systém se chová jako tekutina a má viskózní chování.

Příklad: Ledovec je pevná látka, ale pokud ho budeme pozorovat dostatečně dlouho (několik let), tak se ukáže že se pohnul.

$\lim_{\theta \rightarrow 0} De = \infty \rightarrow De = \infty$ i pro vodu, a systém se chová jako pevná látka a má elastické chování.

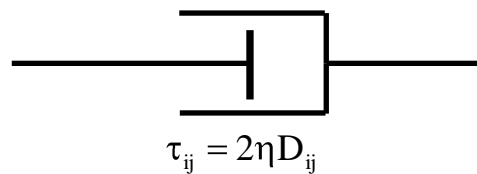
Příklad: Pokud vypadneme z rychle jedoucího člunu, tak se voda bude chovat jako pevná látka. Čím je akce kratší (velmi rychlá) tak se kapalina chová jako pevná látka.

Polymerní taveniny mají $\lambda = 10^{-2} - 10^2$ [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], [7]

1.2.1 Viskózní modely

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.6)



Obr. 6 Newtonův model

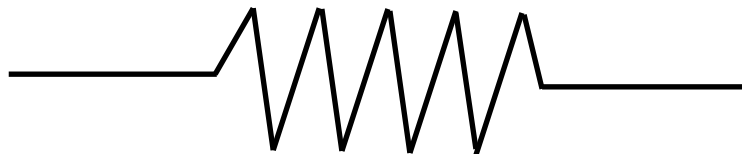
D_{ij} – tenzor rychlosti deformace [s] – charakterizuje typ toku (smykový, elongační, kombinace)

η - viskozita [Pa·s]

τ_{ij} – tenzor napětí [Pa]

Elastivké chování (Hookův model)

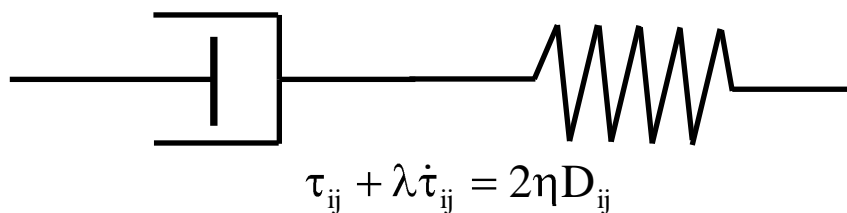
Nejjednodušší elastický model je Hookův model, který je mechanický analog s pružinou. Pružina se vrací po natáhnutí do původní polohy tzn. Elastické materiály mají paměť. Matematicky se jedná o Hookův zákon. (Obr. 7)



Obr. 7 Hookův model

Viskoelastické chování (Maxwellův model)

Je to kombinace prvních dvou modelů (pístu a pružiny). Tyto modely píst + pružina zapojeny sériově a popisuje viskoelastické chování. (Obr. 8)



Obr. 8 Maxwellův model

τ_{ij} – charakterizuje napěťový stav taveniny

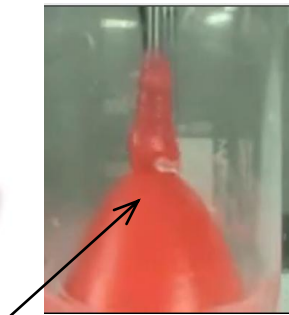
$\dot{\tau}_{ij}$ - kodeformační časová derivace tenzoru napětí [Pa]

λ – relaxační čas [s]

Normálová napětí

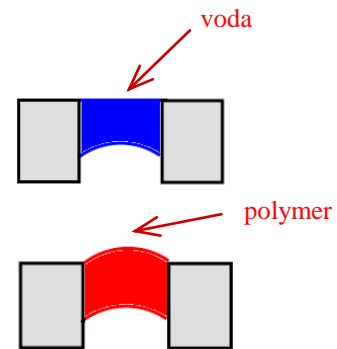
Dlouhé řetězce molekul mohou být znázorněny jako chování pryžových pružin nebo pásků. Při natahování jsou tyto pásky nebo pružiny natahovány kolem rotující hřídel a vykazují sílu kontrakce směrem k ose rotace jako zaškrcení což nutí kapalinu téci ve směru k ose. Toto stoupání se nazývá Weissenbergův efekt (Obr. 9a) a mají na něj vliv normálová napětí N_1 a normálová napětí N_2 způsobují tzv. Korýtkový jev – zakřivení volného povrchu (Obr. 9b).

Voda při míchání
dělá vír



Polymer při míchání šplhá
po míchadle

a) Weissenbergův efekt



b) Korýtkový jev

Obr. 9 Vliv normálových napětí

1 a 2 rozdíl normálových napětí:

$$1. \text{ Rozdíl} \quad N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \tau_{xx} - p - \underbrace{(\tau_{yy} - p)}_{\tau_{yy}} = \tau_{xx} - \tau_{yy} \quad (2)$$

$$2. \text{ Rozdíl} \quad N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} = \tau_{yy} - p - \underbrace{(\tau_{zz} - p)}_{\tau_{zz}} = \tau_{yy} - \tau_{zz} \quad (3)$$

1.2.2 Smykový a elongační tok

A) Smykový tok

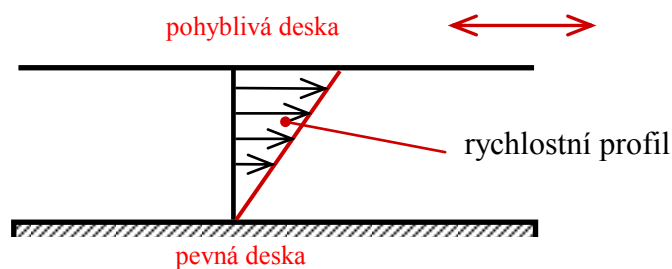
Smykový tok se charakterizuje přilehlými (sousedními) vrstvami které leží na sobě a pohybují se různou rychlost. Změna rychlosti je pouze v kolmém směru (Obr. 10). Rozlišujeme několik typů smykového toku *unášivý tok* (drag flow) a *tlakem řízený tok* (pressure driven flow)



Obr. 10 Smykový tok

Unášivý tok (drag flow)

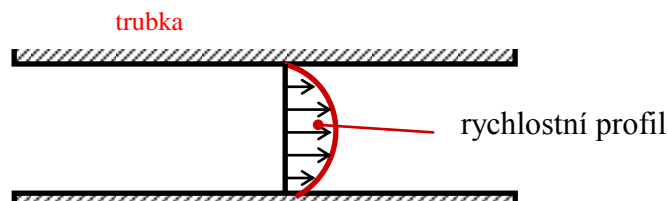
Unášivý tok je charakterizován dvěma deskami jednou pevnou a druhou pohyblivou. Pro transport materiálu, který je zapříčiněn pohybem horní desky není potřeba tlakového spádu.



Obr. 11 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. 12 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]

$$D = \eta \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

D – disipované teplo

η – smyková viskozita [Pa·s]

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

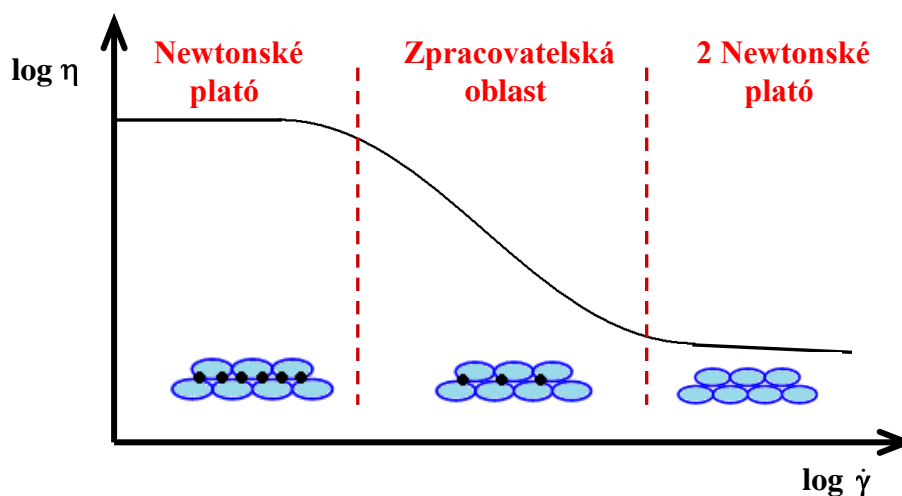
Smyková viskozita (η) – je míra odporu kapaliny proti aplikované smykové síle (je-li velká tím méně kapalina teče).

$$\eta = \frac{\tau_{XY}}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

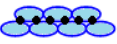
$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}]

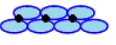
τ_{XY} – smykové napětí [Pa]

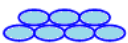
Výsledkem závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace je toková křivka, které je určena vzájemným poměrem rychlostí vytváření a rozpadu zapletenin.



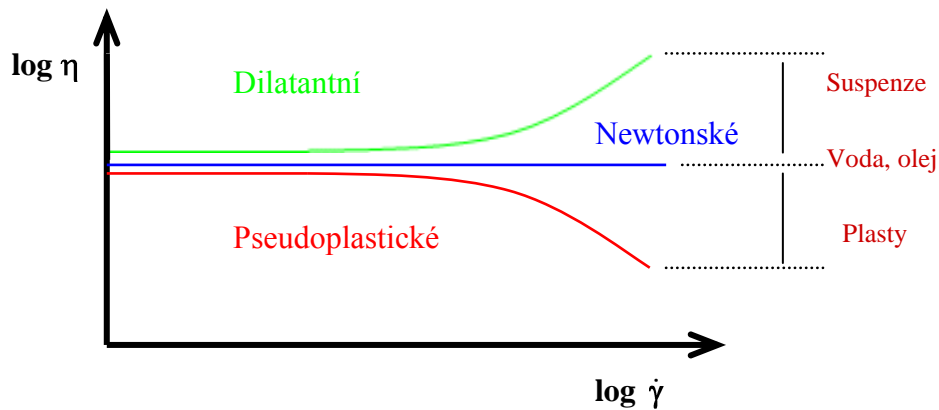
Obr. 13 Toková křivka

Newtonské plató  - v této oblasti je vznik a zánik zapletenin při pohybu horní desky stejný tzn. zniká rovnováha.

Zpracovatelská oblast  - rychlost rozpadu zapletenin je větší než rychlost vytváření zapletenin.

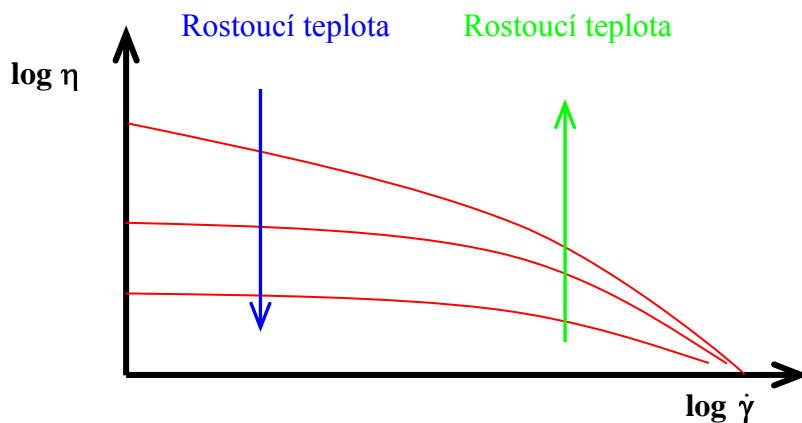
2 Newtonské plató  - při extrémní rychlosti smykové deformace se nestačí vytvářet zapleteniny.

Tokové křivky různých látek



Obr. 14 Tokové křivky různých látek

Závislost smykové viskozity na teplotě a tlaku



Obr. 15 Závislost η na teplotě a tlaku

B) 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. 16 Elongační tok

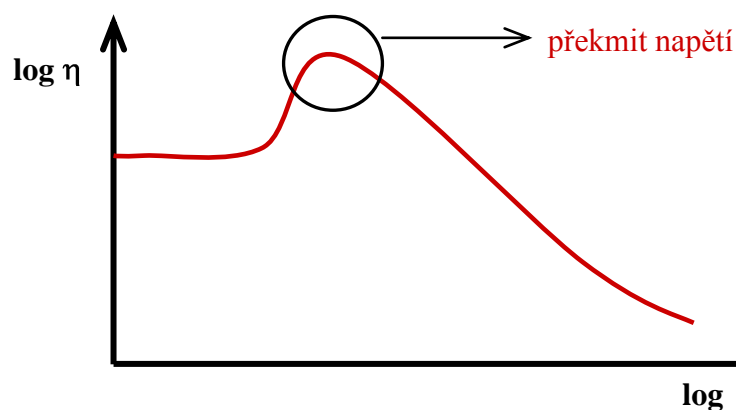
Elongační viskozita (η_E) – charakterizuje odpor vůči protahování.

$$\eta_E = \frac{\tau_{xx} - \tau_{yy}}{\dot{\epsilon}} \quad (6)$$

τ_{xx}, τ_{yy} – vnitřní smykové napětí [Pa]

$\dot{\epsilon}$ - rychlost elongační deformace [s^{-1}]

Závislost elongační viskozity na rychlosti elongační deformace

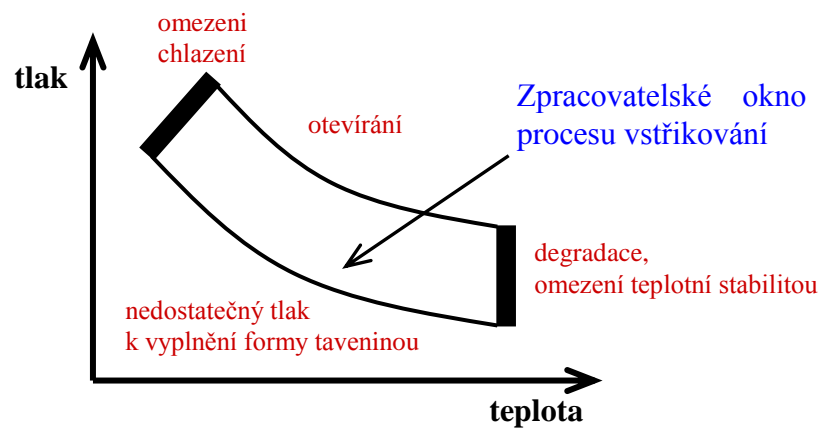


Obr. 17 elongační viskozita

Překmit napětí je způsoben ustalováním rovnováhy mezi zapleteninami.

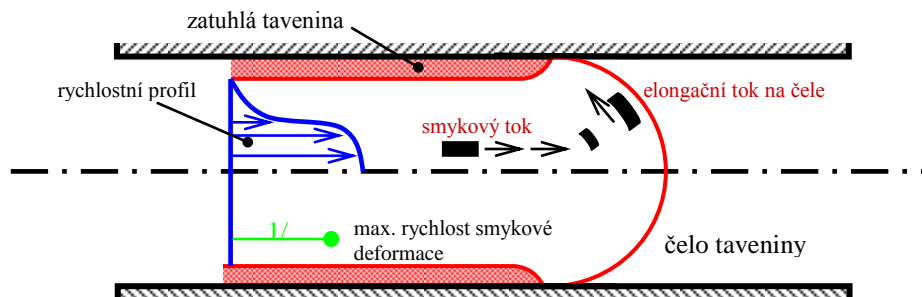
1.2.3 Charakteristika vstřikování

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



Obr. 18 MAD diagram

Tokový profil vstřikování je fontánový tok, je způsoben absencí skluzu mezi taveninou a stěnou.



Obr. 19 Fontánový tok

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 $1/3$).

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. Další faktor ovlivňující proces vstřikování je smyková viskozita (η), ta má vliv na čelo taveniny (Obr. 20)



Obr. 20 Vliv smykové viskozity na čelo tavenin

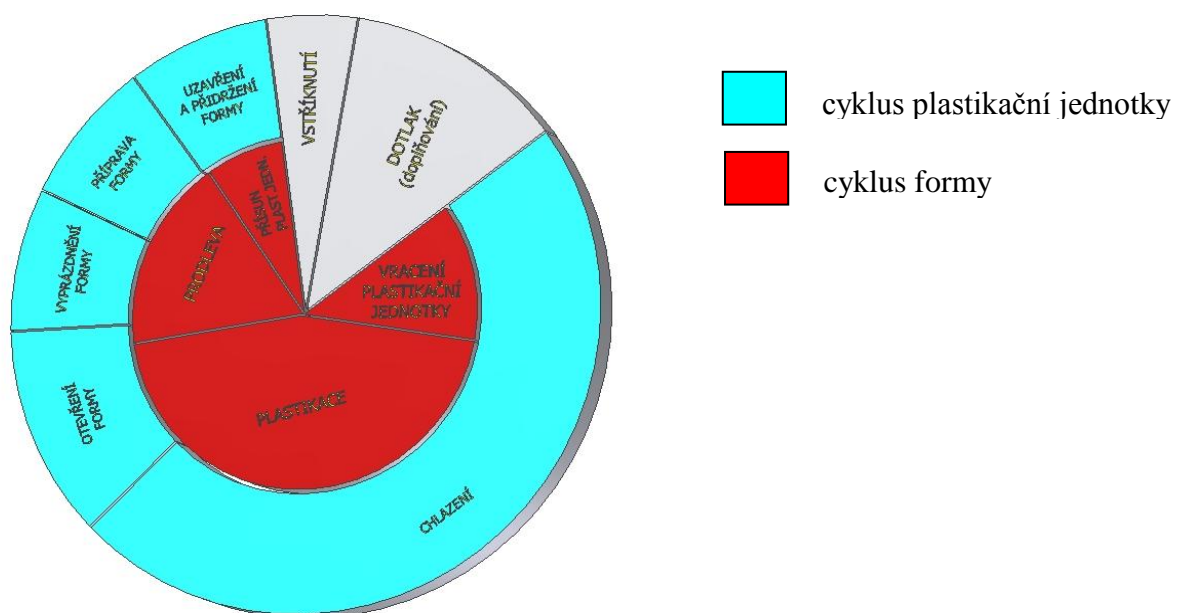
2 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikováním se zpracovávají plasty i kaučukové směsi. Technologie vstřikování umožňuje výrobu relativně složitých součástí například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu ve zdravotnictví atd. [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 tvářeni taveniny, ze které vznikne konečný výrobek. Tito činitelé určují vlastnosti a kvalitu konečného výrobku (výstřiku). [2]

2.1 Princip vstřikování

Vstřikování charakterizuje vstřikovací cyklus (Obr. 21), který se skládá z cyklu plastikační jednotky a cyklu formy.



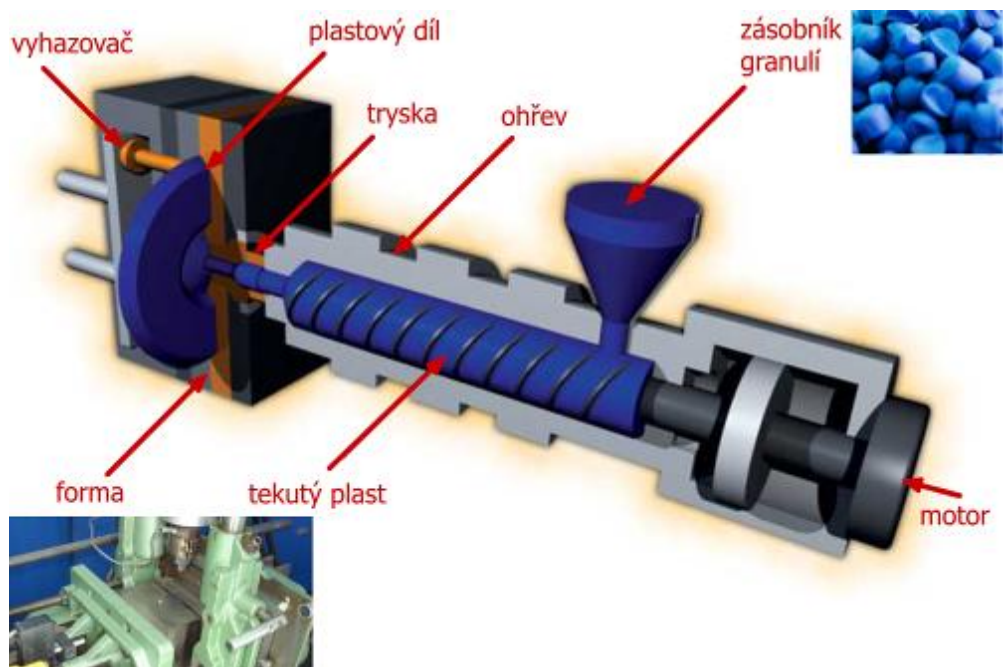
Obr. 21 Vstřikovací cyklus

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. Aby byl zachován správný tvar a rozměry výstřiku, což se děje ve fázi tzv. dotlak. Po zatuhnutí vtokové ho systému dochází k dalšímu tuhnutí ve formě. Ve vstřikovací jednotce mezitím probíhá příprava taveniny a celý cyklus se opakuje. [1].

2.1.1 Vstřikovací stroj

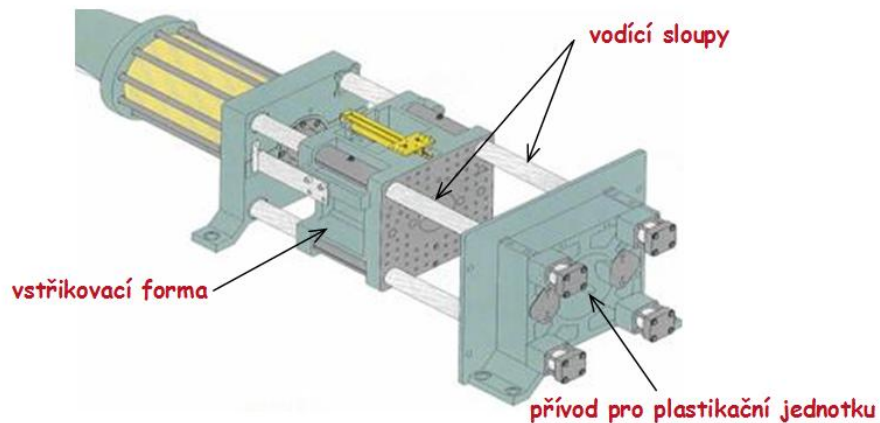
Celý vstřikovací cyklus realizují vstřikovací stroje, které musejí mít uzavírací jednotku ovládající formu (uzavírání, otvírání a vyhazování výstřiku) a vstřikovací jednotku kde se připravuje tavenina a její vstříknutí do formy. (Obr. 22)



Obr. 22 Vstřikovací stroj

2.1.2 Uzavírací jednotka

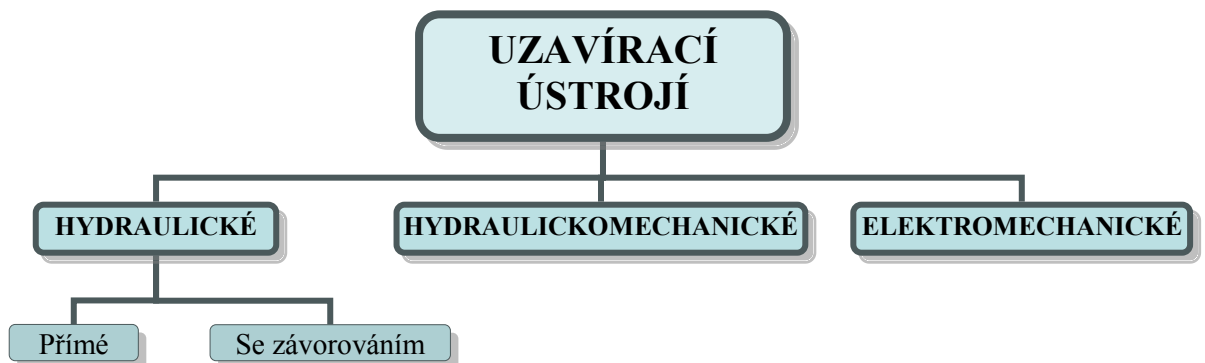
Hlavním cílem uzavírací jednotky je zaručit spolehlivé otevírání a uzavírání formy. Uzavírací síla uzavírací jednotky musí být větší než vstřikovací tlak jinak by došlo k otevření formy a následnému vytečení polymeru ven. Vstřikovací stroje mají nejčastěji sloupovou nosnou konstrukci. Menší stroje zpravidla mívají dvou sloupovou konstrukci, větší stroje čtyř sloupovou konstrukci. Vodicí nebo nosné sloupy (Obr. 23) spojují a zároveň slouží k vedení jeho pohyblivých částí.



Obr. 23 Uzavírací jednotka

Otevření a bezpečné uzavření formy zajišťuje uzavírací ústrojí. Požadovaná uzavírací síla je závislá na velikosti stroje, na velikosti plochy průřezu výstříku v dělicí rovině a na velikosti vstříkovacího tlaku.

Podle druhu pohonu lze rozdělit uzavírací jednotku na hydraulickou, hydraulickomechanickou, elektromechanickou. (Obr. 24) [4]



Obr. 24 Rozdělení uzavíracích jednotek

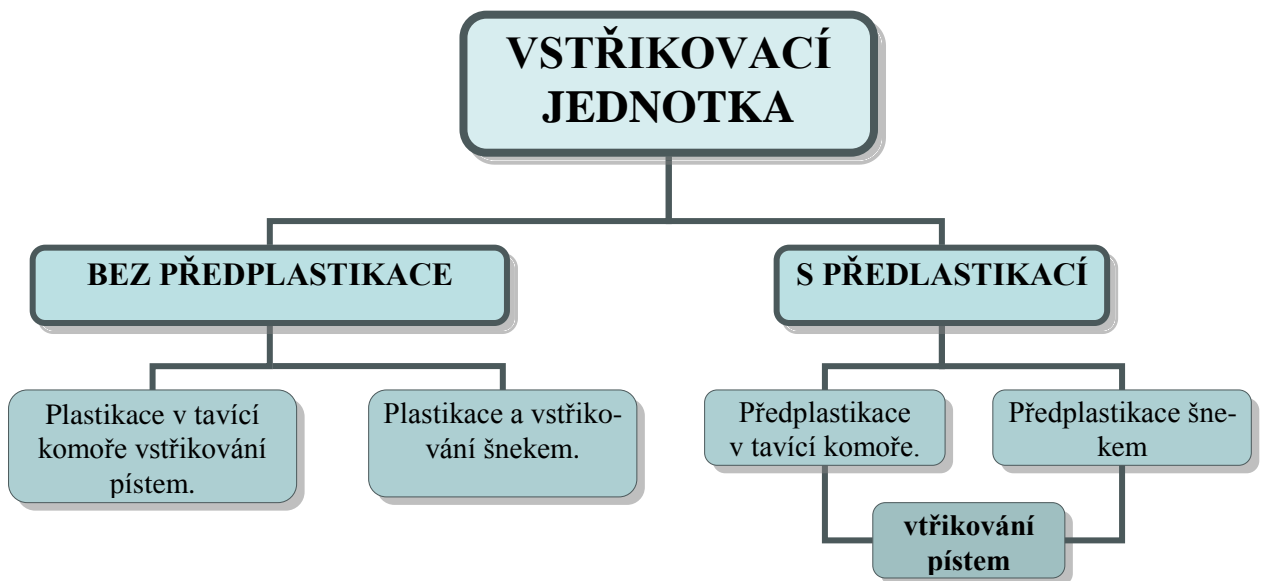
Vstříkovací jednotka však určuje dobu chodu naprázdno pohonného systému vstříkovacího stroje, což vlastně představuje neproduktivní časy. Proto je nutné nastavovat co nejmenší nutné rozevření formy a současně co největší rychlost pohybu stírací desky. Porovnání vlastností uzavíracích jednotek je v tabulce 1. (Tab. 1)

Tab. 1 Vlastnosti uzavíracích jednotek

Uzavírací jednotka	Množství hydraul.kap.	Regulace zdvihu uzav. jednotky	Regulace rychlosti upín. desky
Hydraulickomechanická	malé	obtížná	dána pákovým mechanismem
Hydraulická	velké	snadná	snadná
Hydraulická se závorováním	malé	snadná	snadná

2.1.3 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. 25)

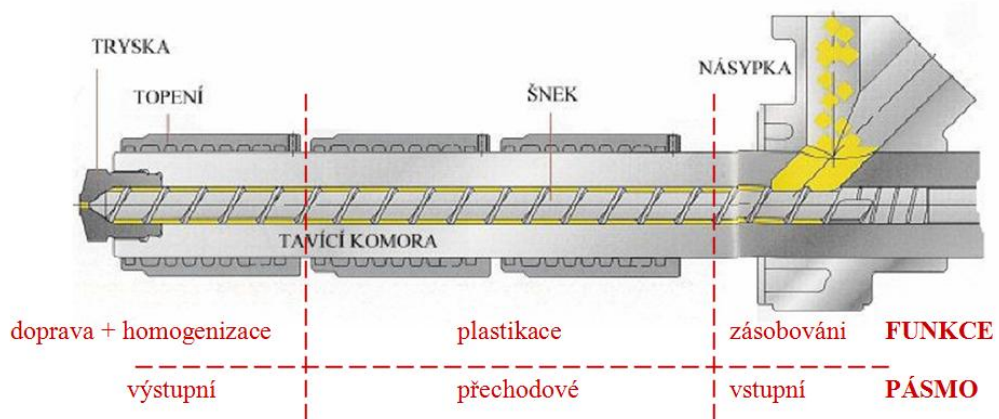


Obr. 25 Vstříkovací jednotky

Ve vstříkovací jednotce bez předplastikace se 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 vstříkovacím pístem do dutiny formy.

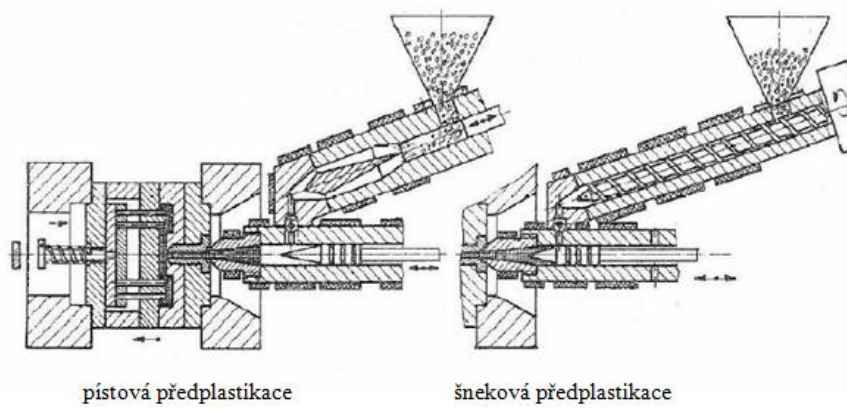
Teplo potřebné na ohřátí materiálu se dodává pomocí topných pásů, které jsou kolem tavicí komory. [4]

Dnes se nepoužívají, byly postupně vytlačeny šnekovými stroji (Obr. 26). Při šnekové plastikaci se šnek otáčí a v hrdle násypky nabírá granulovaný plast, který stlačuje a dopravuje jej do vytápěných částí tavicí komory, kde materiál taje a jako tavenina se hromadí před čelem šneku a 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 vstřikuje 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.



Obr. 26 Šnekový stroj

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 zaručeno v obou případech vstřikovacím pístem. [4]



Obr. 27 Vstřikovací jednotka s předplastikací

3 CA – SYSTÉMY

V dnešní době zaujímá výpočetní technika v konstrukčním procesu, simulování a technických výpočtech a nakonec řízení CNC technologií nezpochybnitelné místo při výrobě a konstrukci. Dříve tyto technologie nebyli k dispozici nebo hodně málo a mohlo si je dovolit jenom málo firem. Konstruktér nebo technolog všechno dělal ručně a měl jeden pokus. Už s příchodem prvního PC (Personal Computer – Osobní počítač) bylo prvotní ho nasadit do výrobního procesu. Jedná se o celkové nasazení výpočetní techniky. Obecně se tyto aplikace nazývají CA (Computer Aided – Počítačová podpora) technologie. Celosvětový rozvoj a působnost těchto systémů je úměrný jejich důležité roli ve výrobním procesu. Práci inženýrů a techniků ve strojírenských firmách si dnes prakticky nelze představit bez použití CAD/CAE/CAM systémů. Na rychlost a kvalitu vývoje, konstrukce nebo technologickou přípravu výroby jsou kladeny velmi náročné požadavky. Vyhovět těmto požadavkům a obstát v tvrdé konkurenci na trhu není jednoduché. Kvalitní CAD/CAM systém je v dnešní době jednou ze zásadních podmínek pro kvalitní a efektivní funkci konstrukce a technologickou přípravu výroby.

3.1 Rozdělení CAD systémů

CAD Systémy se dělí do tří kategorií :

1. kategorie je *nižší CAD – 2D*
2. kategorie je *střední CAD – 2D a 3D*
3. kategorie je *vyšší CAD – 3D konstrukce s přímou návazností na CAE a CAM systémy*

Nižší CAD

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.

Střední CAD

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

Vyšší CAD

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.

3.2 Vysvětlení CA – systémů

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

CAD (Computer Aided Design) – Počítačem podporovaný návrh (konstrukce) – konstrukce výrobků pomocí počítače a její snadná editace, tvorba celé výkresové dokumentace. Na trhu je CAD softwarů celá škála druhů a kvalit. 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.

Vlastnosti a možnosti CAD softwaru:

- 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

CAE (Computer Aided Engineering) – Počítačem podporované inženýrství (automaticované inženýrství). Software, 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.

CAM (Computer Aided Manufacturing) – Počítačem podporovaná výroba. Zkratka označující programy, které řídí nebo automatizují výrobu součástí například obrábění po-

mocí CNC stroji, ovládání robotů atd. Nejdůležitějším faktorem je univerzálnost a podpora výrobních zařízení.

PDM (Produkt Data Manegment) – Elektronické správa dat o výrobku, veškerá data obsahující soubory týkající se výrobku.

CAPP (Computer Aided Process Planig) – Další zkratky CA systémů Počítačem podporovaná technologická příprava výroby výrobku.

Další zkratky CA systémů:

zkratka	popis	zkratka	popis
CA	Computer Aided	CAMP	Computer Aided Management Production
CAA	Computer Aided Assembly	CAO	Computer Aided Organisation
CAD	Computer Aided Design	CAP	Computer Aided Programming
CADD	Computer Aided Design and Drafting	CAP	Computer Aided Planning
CAEA	Computer Aided Engineering Analysis	CAPE	Computer Aided Production Engineering
CAI	Computer Aided Inovation	CAPP	Computer Aided Process Planning
CAI	Computer Aided Inspection	CAQ	Computer Aided Quality
CAIS	Computer Aided Information System	CA-R	Computer Automatic-Robots
CAL	Computer Aided Logistic	CASE	Computer Aided Software Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing	CAT	Computer Aided Testing
		CIM	Computer Integrated Manufacturing

Obr. 28 Zkratky CA sytémů

3.3 Cadmould 3D-F

Software CADMOULD 3D-F je CAE Software, který analyzuje proces vstřikování plastů. Pro analýzu je potřebný 3D CAD model plastového dílu ve formátu STL. CADMOULD 3D-F připraví zcela automaticky, rychle a přesně 3D výpočtový model, založený na vlastní patentované metodě 3D-F = Fachwerkmodel. Uvedené řešení umožní přesné rozlišení měnicích 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 cho-

vání tavenin plastů. 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. [10]

CADMOULD 3D-F RAPID

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

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.

CADMOULD 3D-F PACK

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

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).
- Cadmould 3D-F FIBER počítá spolu s Cadmould 3D-F FILL a Cadmould 3D-F PACK.

CADMOULD 3D-F COOL

- Analýza teplot na povrchu tvarových dutin a analýza temperačního systému.
- Optimalizovaný temperační systém • menší deformace • zkrácení doby vstřikovacího cyklu.

CADMOULD 3D-F WARP

- Analýza smrštění a deformace, měření vzdáleností dvou bodů na povrchu dílu po smrštění a deformaci (počítačová „šuplera“), měření odchylek od rovinnosti, přímosti, kruhovitosti a naklonění stěn.
- Precizní dílce, větší znalosti, lepší obchodní předpoklady.

CADMOULD 3D-F RUBBER

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

CADMOULD 3D-F THERMOSETS

- Simulace plnění dílů z reaktoplastů: výpočet plnění, tlaku, napětí, teplot, stupně zesíťování, indexu Scorch atd.
- Výpočtový modul je vystavěn obdobně jako CADMOULD 3D-F RUBBER.

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.
- Nižší přídržná síla • méně studených spojů • modifikace směru vláken v souvislosti s deformací dílu.

CADMOULD 3D-F INJECTION COMPRESSION

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

- Nižší přídržná síla • podstatně nižší napětí materiálu ve tvarové dutině • vhodná technologie pro in-mould decoration, in-mould labeling a soft touch.

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.
- Uživatel může snadno počítat více variant řešení (různé technologické varianty, různé tloušťky stěn) = skutečná optimalizace.[10]

3.4 Moldflow Plastics Insight® (MPI®)

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

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.

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

Se 7800 materiály představuje MPI světově nejrozsáhlejší specializovanou databanku materiálů termoplastů a termoseťů pro CAE analýzy. Dále jsou k dispozici detailní informace o chladicích médiích, materiálech pro výrobu nástrojů a možnostech hlavních značek a modelů vstřikovacích strojů.

Podpora geometrie

Moldflow Plastics Insight poskytuje všechny tři metody řešení analýzy modelu. MPI umožní přímo analyzovat tradiční modely se střednicovou plochou konečných prvků. Trojrozměrné tenkostěnné modely lze analyzovat pomocí solveru MPI/Fusion a trojrozměrné silnostěnné modely pomocí solveru MPI/3D. [11]

Jednotlivé moduly

MPI/Synergy je pre- a postprocesor, který podporuje všechny moduly MPI. 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.

Simulace toku materiálu

MPI/Flow simuluje fázi plnění a dotlaku vstřikovacího procesu termoplastů s cílem předpovědět chování toku taveniny, a tím vlastní vyrobitelnost dílu. Pomocí MPI/Flow lze optimalizovat umístění vtoku, vyvážit systém kanálů, vyhodnotit procesní podmínky a tím vytvořit stabilní procesní okno. Potencionální vady dílu lze rozpoznat a opravit již předem. Rovněž lze simulovat inovační procesy jako jsou zástřiky dílů a 2K-vstřikování. Kromě toho lze 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. Pomocí dalších alternativních modulů MPI/Flow lze simulovat komplexnější procesy vstřikování termoplastů.

MPI/Gas simuluje proces vstřikování s asistencí plynu, při kterém je plyn, zpravidla chemicky inertní dusík, vstříknut do taveniny polymeru. Plyn tlačí polymer dutinou formy, aby se nástroj zcela zaplnil a aby se vytvořila síť dutých kanálů ve všech částech dílu. Výsledky získané pomocí MPI/Gas pomáhají určit pozici místa vstřiku plynu a polymeru, kolik plastu vstříknout před vstříknutím plynu a optimální velikost a umístění kanálů pro plyn.

MPI/Co-Injection simuluje sekvenční vstřikovací proces, při kterém se nejdříve vstříkne materiál vnější plochy a poté následuje další materiál tvořící jádro dílu. Lze pozorovat posun materiálů v dutině i jak se mění dynamický poměr mezi materiálem na povrchu a v jádře v průběhu plnění. Výsledky umožní optimalizovat kombinaci obou materiálů a zároveň maximalizovat poměr nákladů vůči užitku pro daný výrobek.

MPI/Injection Compression simuluje procesy, při kterých probíhá vstříknutí polymeru a stlačení formy simultánně nebo sekvenčně a umožňuje naprogramovat kompresní fázi před, po nebo během průběhu vstřikování. Výsledky umožňují rozsáhlé zhodnocení potencionálních materiálů, konstrukce dílu a nástroje a procesních podmínek.

MPI/MuCell simuluje mikrocelulární proces vstřikování pěny (MuCell®), při kterém se smíchá superkritické médium jako je oxid uhličitý nebo dusík s taveninou polymeru a vstříkne do nástroje, aby se vytvořily díly s mikrocelulární pěnou. Pomocí MPI/MuCell lze porovnat a zhodnotit vyrobiteľnost a možné výhody tohoto procesu s obvyklými postupy. Kromě toho umožňují různé výsledky analýzy optimalizaci konstrukci dílu a procesních podmínek.

Simulace pro optimalizaci vstřikovacího procesu

MPI/Design-of-Experiments umožňuje 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. Program automaticky sestaví zkušební plán a výsledky podrobí statistické analýze s cílem optimalizovat zpracovatelské parametry a tím i vyráběný díl. Výsledek zahrnuje základní kvalitativní indikátory jako je objem smrštění, vstřikovací tlak, uzavírací síla a teplota čela taveniny a rovněž ukazatele času plnění, tlaku a teploty.

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.

Simulace chlazení

MPI/Cool nabízí možnost modelovat chladicí okruh nástroje, jeho rozložení kolem dílu a vypočítat jeho výkonnost. Pomocí MPI/Cool-Simulation lze optimalizovat design 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.

Simulace strukturální integrity

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

MPI/Warp předpovídá smrštění a deformaci v plastových dílech na základě procesních zbytkových pnutí. Rovněž lze předpovědět posun jádra na základě nerovnoměrného rozložení tlaku. MPI/Warp pomáhá pochopit příčiny deformace, ukazuje příslušná místa a umožňuje optimalizovat design, materiál a procesní parametry a zabránit deformaci dílu ještě předtím, než se díl začne vyrábět.

MPI/Fiber může na základě chování toku ve vyztužených materiálech vypočítat orientaci vláken a z toho plynoucí pevnost kompozitu plastu a vláken. Je důležité chápat a řídit orientaci vláken u vyztužených plastů, aby bylo možné zredukovat rozdílné hodnoty smrštění dílu a tímto způsobem minimalizovat deformaci dílu nebo ji zcela vyloučit.

MPI/Shrink předpovídá smrštění polymeru na základě zpracovatelských vlivů a dat o kvalitě materiálu. Tím je k dispozici předpověď lineárního smrštění nezávisle na deformaci. Protože při chlazení plastových dílů vzniká smrštění, musí se toto smrštění započítat co nejpřesněji do konstrukce nástroje, aby se dodržely kritické tolerance výrobku.

MPI/Stress předpovídá chování plastových dílů po procesu vstřikování, pokud je díl zatížen různými externími vlivy. Výpočet zhodnocuje vlivy chování toku materiálu při vstřikování a z toho vyplývající mechanické vlastnosti týkající se pevnosti dílu.

Simulace reaktivního vstřikování

MPI/Reactive Molding simuluje tok a vytvrzování termosetů v procesech jako je reaktivní vstřikování termosetů a eleastomerů, strukturální reaktivní vstřikování (SRIM) a vstřikování kaučuků (RTM). Z výsledku lze posoudit vyrobiteľnost, minimalizovat čas cyklu a optimalizovat procesní podmínky. [11]

3.5 MOLDFLOW PLASTICS ADVISERS® (MPA) ®

Moldflow Plastics Advisers® (MPA®) je snadno ovladatelný simulační software, který umožňuje designérům dílů a forem optimalizovat design během nejranější fáze vývoje nového dílu. [11]

Moldflow Part Advise™ - rychle prověří vyrobiteľnost každého designu plastového dílu

Moldflow Mold Adviser™ - optimalizuje design systému kanálů a návrh dutiny formy před zásahem do ocele

Moldflow Part Adviser™ [11]

- vyhodnotí výrobní proveditelnost každého designu
- vyhodnotí nejvhodnější plastový materiál
- optimalizuje tloušťku stěny dílu s cílem jednotného plnění, minimálního času cyklu a nejnižších nákladů
- identifikuje a eliminuje kosmetické vady jako jsou propadliny, studené spoje a uzavřený vzduch
- vizualizace orientace plastu s cílem maximalizovat pevnost dílu, obzvlášť v blízkosti studených spojů
- poskytuje praktické rady pro zlepšení designu dílu
- určí nejlepší umístění vtoku pro daný design dílu

Moldflow Mold Adviser™ [11]

- řeší otázky designu a analýz všech typů systémů horkých a studených kanálů
- automaticky stanoví rozměry kanálů pro vyvážení toku ve sdružených formách
- určí nejlepší umístění vtoku a optimální počet vtoků
- předpoví čas cyklu, uzavírací sílu a objem výstřiku
- zhodnotí výrobní proveditelnost návrhu designu dílu
- poskytne detailní odhad nákladů na díl
- poskytne informace pro designéry dílu, tvůrce forem a výrobní inženýry pomocí automatických informačních nástrojů

Rozšířené moduly MPA**MPA/3D**

Technologie analýzy MPA/3D rozšiřuje schopnost MPA předvést reálnou, trojrozměrnou simulaci na silnostěnných dílech stejně jako na dílech s extrémně kolísavou tloušťkou stěny. [11]

Moldflow Performance Adviser

Performance Adviser nabízí možnost simulovat fázi dotlaku v procesu vstřikování jak u Part Adviseru tak u Mold Adviseru. Použití Moldflow Performance Adviser znamená minimalizovat nežádoucí smrštění dílu a vyhodnotit, zda se díl bude deformovat za přijatelnou hranici.[11]

Moldflow Cooling Circuit Adviser

Cooling Circuit Adviser rozšiřuje možnosti Moldflow Plastics Adviseru pro simulaci fáze chlazení procesu vstřikování, čímž mohou uživatelé optimalizovat design formy pro jednotné chlazení a minimalizovat cyklus chlazení. [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Byly určeny tyto cíle diplomové práce:

- 1) Vypracovat literární rešerši na dané téma
- 2) Vytvořit analýzy v porovnávaných CAE aplikacích
- 3) Vyhodnotit zjištěné výsledky analýz a provést porovnání
- 4) Specifikujte 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. V této kapitole se nachází základní body reologie a základní závislosti polymerních tavenin. Posledním bodem teoretické části je rozdělení CAD systémů a jejich popis a vlastnosti. Tato kapitola je ještě zaměřena na CAE aplikace CADMOULD 3D – F a Moldflow Plastics Insight® (MPI®).

V první kapitole v praktické části je popis 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 ještě procesní podmínky za jakých byly výrobky vstřikovány a nastavení analýz ve srovnávacích CAE aplikacích.

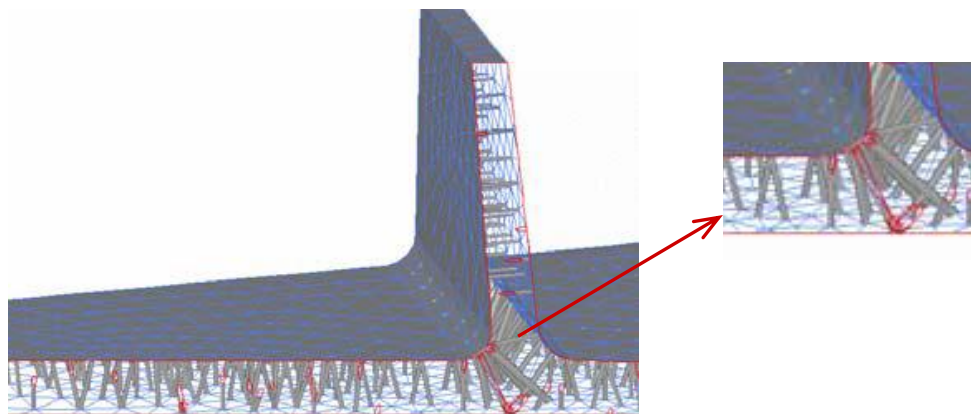
Poslední část je zaměřena na vyhodnocení analýz v porovnávaných CAE aplikacích. Dále je zde měření deformace výrobku a porovnání s analýzou.

5 METODY VÝPOČTU CADMOULD 3D-F A MPI®

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

5.1 Cadmould 3D – F

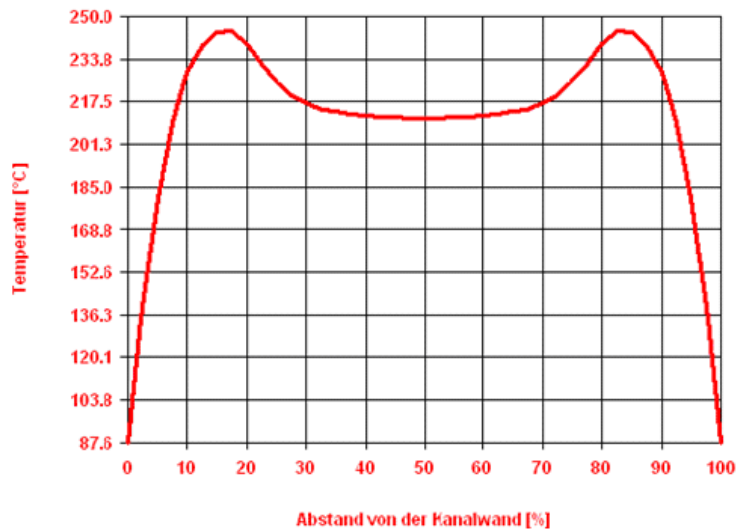
Firma Simcon vyvinula patentovaný 3D příhradový model (3D-F = Fachwerkmodel). 3D-F model konečných prvků je speciálně přizpůsoben pro simulace vstřikování plastových dílců. Spojuje výhody obou klasických metod (Střednicový model a Objemový model). 3D-F metoda využívá k popisu geometrie STL jako vstupní 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. 29).



Obr. 29 3D – Příhradový model

Uvedené řešení umožní přesné rozlišení měnících se teplot smykových rychlostí atd. po tloušťce stěny (Obr. 30), 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 3DF, rozdělen po tloušťce stěn ve všech oblastech na 25 interpolačních uzlů.



Obr. 30 Přesný výpočet Cadmould 3D-F

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.

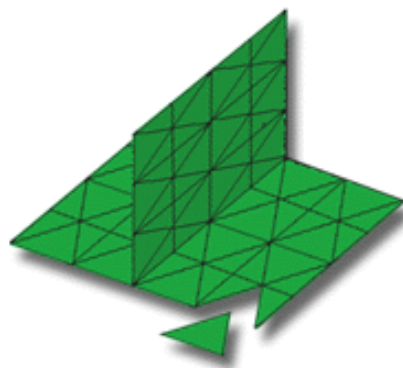
5.2 Moldflow Plastics Insight® (MPI®)

Program MPI pracuje na principu FEM (Metoda konečných prvků). 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. Historie FEM se datuje od roku 1906, kdy šlo o pokus nahradit těleso soustavou elastických prutů. Vlastnosti prutů byly voleny tak, aby posunutí v uzlech prutů odpovídalo posunutí v odpovídajících bodech tělesa. Tento model postupně přešel v dnes již dobře známé metody analýzy struktur. FEM byla poprvé popsána Courantem v roce 1941, nebyla však akceptována pro neexistenci prostředků řešení rozsáhlých soustav lineárních rovnic. V roce 1953 byla rovnice tuhosti poprvé popsána v maticovém tvaru, to umožnilo její řešení na počítači. [12]

Základním principem FEM je diskretizace (rozdělení) tělesa na malé části (prvky), které jsou matematicky snadno popsatelné. Po zadání okrajových podmínek se úloha převede na řešení soustavy lineárních rovnic a provede se výpočet takto vzniklé soustavy, která může obsahovat miliony rovnic. [11]

Midplane mesh (Střednicová plocha)

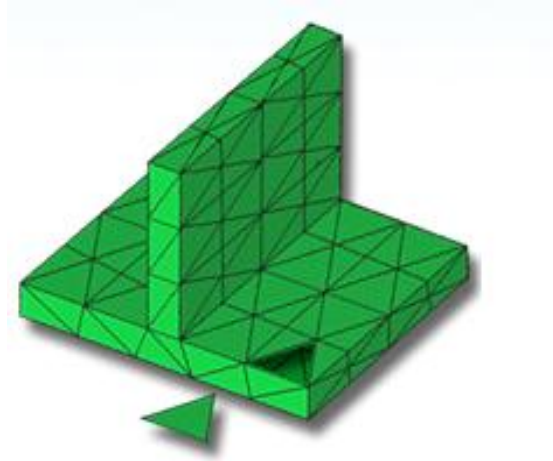
Síť střednicové plochy představuje trojrozměrný model jako dvojrozměrný, s rovnými plochami, kterému se přidělí hodnota tloušťky. Konvenční tenkostěnné vstřikované díly lze nejlépe znázornit pomocí sítě střednicové plochy. Pro zvýšení produktivity při tvorbě a analýze těchto modelů lze pomocí modulu MPI/Midplane Generator vytvořit automaticky síť střednicové plochy a stanovit požadovanou tloušťku, čímž jsou zaručeny přesné výsledky výpočtu. [11]



Obr. 31 Střednicová plocha


Dual domain mesh (Fusion)

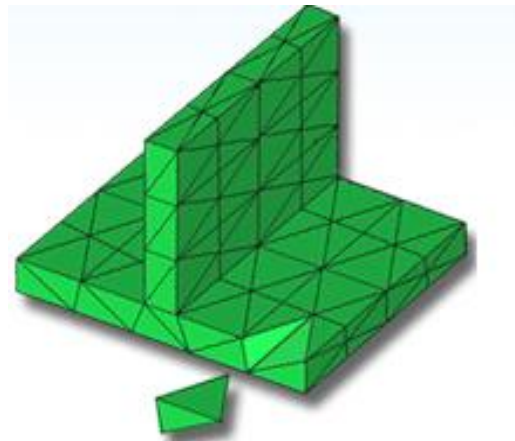
Fusion mesh je založena na patentované technologii Moldflow Dual Domain™. Ta znázorní trojrozměrný díl s trojúhelníkovými prvky na povrchu CAD modelu v běžném STL nebo IGES formátu. Tak lze trojrozměrné tenkostěnné CAD modely přímo analyzovat. Bez jakýchkoliv dalších úprav modelu lze poté analyzovat další varianty designu a provést hloubkové analýzy. [11]



Obr. 32 Dual domain mesh

3D mesh

3D mesh síťuje model podobně jako síť Dual domain, ale místo plošných trojúhelníků je model tvořen tetrahedrálními elementy . Díky osvědčené technice zasít'ovaných trojrozměrných modelů pomocí tetrahedrálních konečných prvků lze s programy MPI/3D provádět trojrozměrné simulace na dílech, které neodpovídají kritériím pro konvenční tenkostěnné konstrukce. [11]



Obr. 33 3D mesh

6 VÝROBKY PRO ANALÝZU

Firma Forez s.r.o. půjčila tři výrobky s polymerního materiálu na analýzy v programech Moldflow Plastics Insight® a Cadmould 3D – F.

Společnost FOREZ s.r.o. 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 Popis a úprava výstřiků

Výrobky se analyzovaly v programech CADMOULD 3D – F a Moldflow Plastics Insight®. První výrobek je krytka s plněného materiálu, druhý výrobek je redukce se semikrystalického materiálu a nakonec třetí výrobek je světlomet z amorfního materiálu.

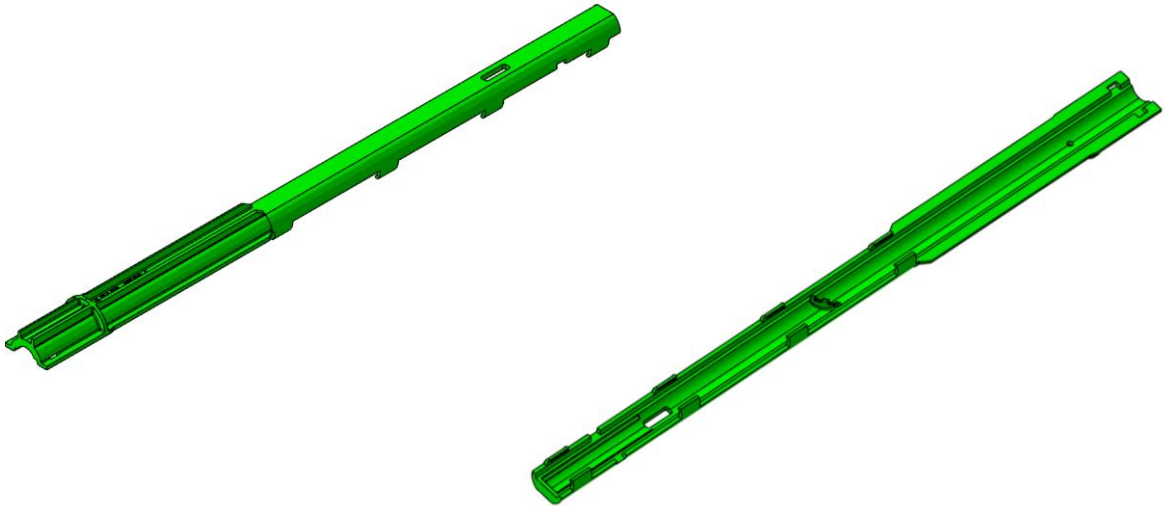
Výrobky se musely pro použití v programu Moldflow Plastics Insight® upravit (

Obr. 34). Tato úprava spočívala s odstraněním 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 nemusely upravovat a použily se rovnou ve formátu stl.

Obr. 34 Upravené výrobky

Krytka

Výstřik (Obr. 35) je z plněného materiálu PA 6.6 GF 30 (Polyamid 6.6 plněný s 30% skelnými vlákny). Procesní podmínky za jakých byl výrobek vstřikován je v (Tab 2).



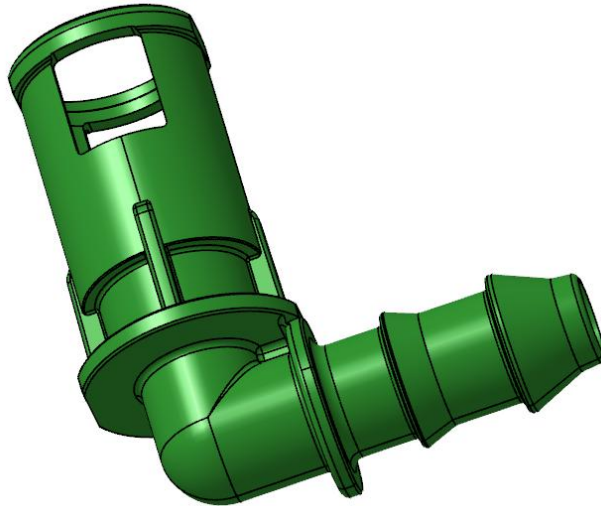
Obr. 35 Krytka

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]			

Redukce

Redukce je ze semikrystalického materiálu POM (Polyoxymethylen). Procesní podmínky za jakých byl výrobek vstříkován je v (Tab. 3).



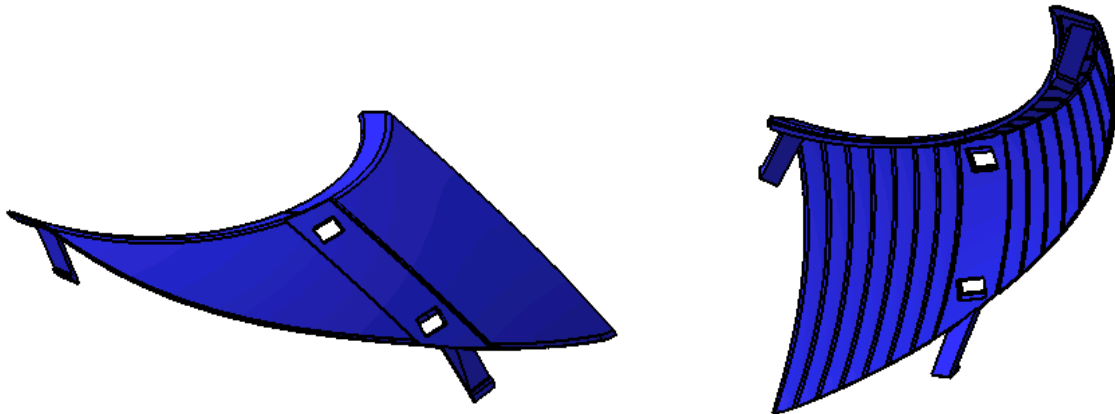
Obr. 36 Redukce

Tab. 3 Vstříkovací 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 vstříkování	195	[°C]
Typ materiálu	POM		Teplota horké trysky	200	
Barva	Šedá				
Vstříkovací podmínky			Časy		
Dotlak	600	[bar]	Čas vstříku	0,55	[s]
Start dotlaku	830	[bar]	Čas dotlaku	7	[s]
	10	[mm]	Čas Chlazení	7	[s]
Vstříkovací rychlost	39,8	[mm/s]	Čas cyklu	23,6	[s]
Dávka	23,7	[mm]			

Světlozet

Světlozet je vstříknut ze amorfního materiálu PC (Polycarbonát). Procesní podmínky za jakých byl výrobek vstříkován je v (Tab. 4).



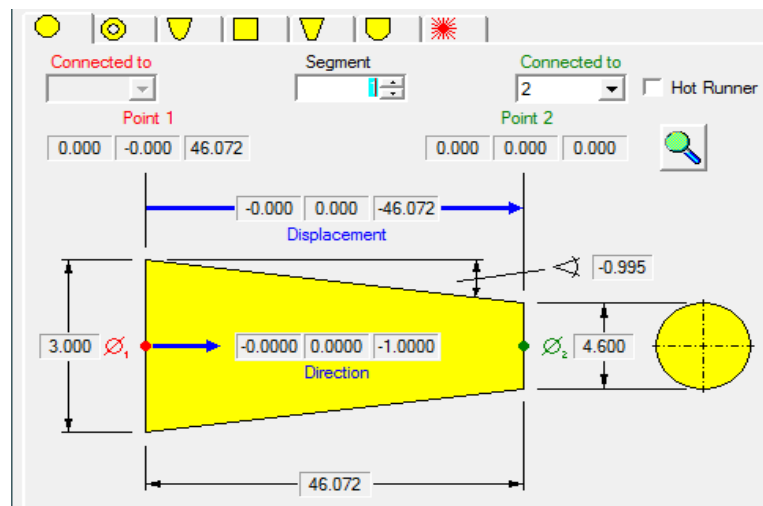
Obr. 37 Světlozet

Tab. 4 Vstřikovací data světlozetu

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]			

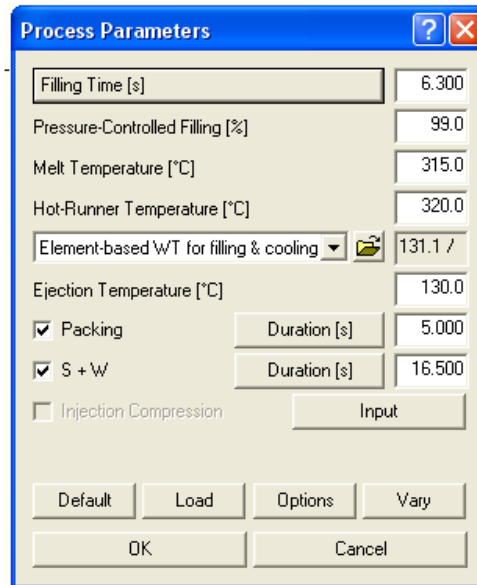
6.2 Nastavení analýzy v programu CADMOULD 3D –F

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. 38) může mít různý tvar, který už záleží na designu konstruktéra.



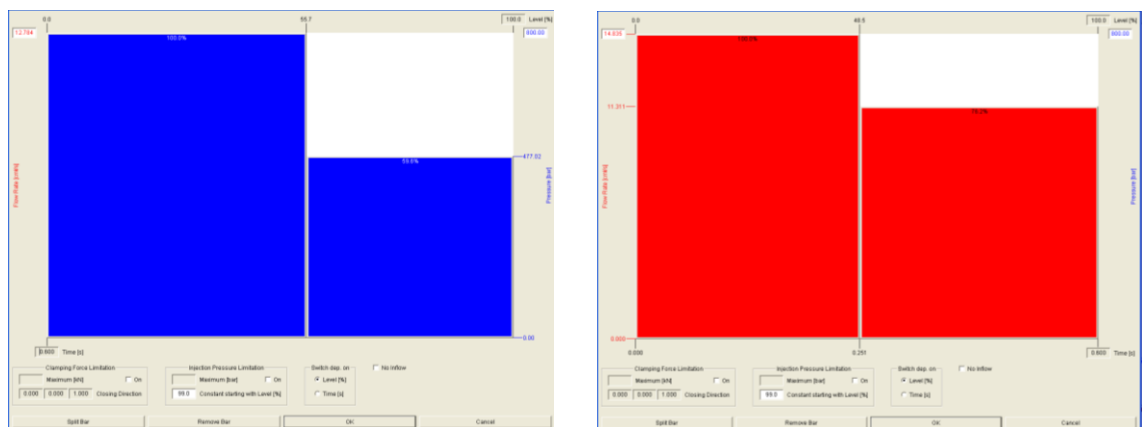
Obr. 38 Tvary vtoků v Cadmouldu

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. 39).



Obr. 39 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. 40).



závislost tlaku na čase

závislost objemového na čase

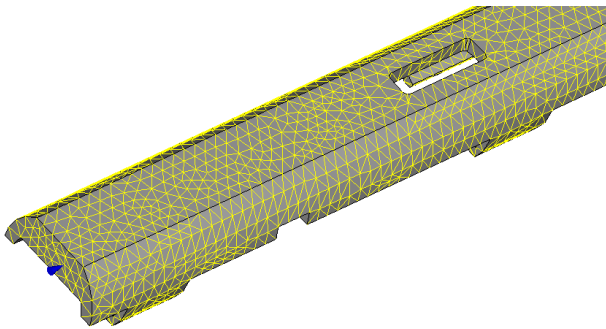
Obr. 40 Nastavení toku taveniny

V kolonce Pressure Controlled Filling se nechává zadaná hodnota, dále v kolonce Melt Temperatur (teplota taveniny) se zadá teplota taveni pokud je horký vtok v další kolonce se zadá teplota horkého vtoku (Hot-Runner Temperature). Zadá se vyhazovací 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 stejně jako vtokový systém, a nastaví se průtok a teplota chladicího média. Nakonec se nastaví délka elementů, materiál formy, chladicí médium a počet cyklů simulace.

6.2.1 Krytka – nastavení analýzy

Krytka se vložila do programu ve formátu stl. a nastavila se síť modelu, protože původní model měl hrubou síť.

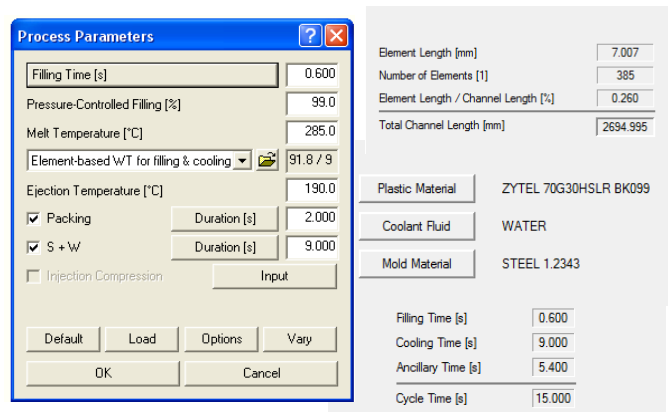


Relative Element Size 0.5 [%]

Wall Thickness 0.3

Obr. 41 Nastavení sítě - Krytka

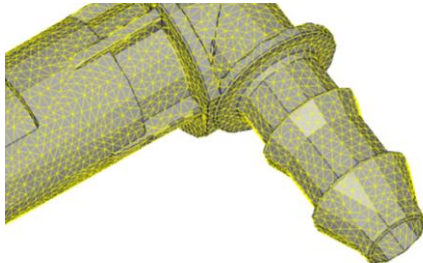
Vytvořil se vtokový systém pomocí trajektorií a zadal se kruhový průřez. Původní vtokový systém byl elipsoidního tvaru, proto se musel přepočítat na kruhový. Nastavili se procesní podmínky podle zadaných výrobních parametrů a nakonec se vytvořil temperanční systém. Celé zobrazení formy, vtoku a temperančního systému v analýze se nachází v příloze 1



Obr. 42 Parametry analýzy – Krytka

6.2.2 Redukce – nastavení analýzy

Redukce se také vložila do programu ve formátu stl. a také se musela upravit síť modelu.



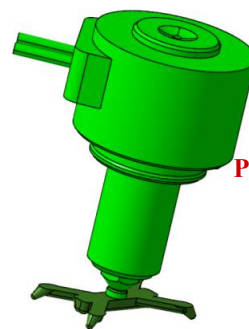
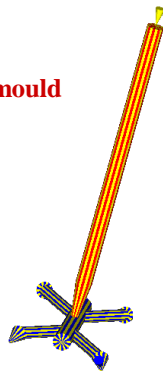
Relative Element Size 1.15 [%]

Wall Thickness 0.25

Obr. 43 Nastavení sítě - Redukce

Vtokový systém se vytvořil též pomocí trajektorií, ale musel přepočítat na vhodný tvar, protože tvar vtoku ve se nedal vmodelovat. Vtokový systém má tvar lichoběžníku, ale CADMOULD zobrazuje jenom kruhový tvar (jde jenom o grafické znázornění). Červená část vtoku znázorňuje horkou trysku (Obr. 44).

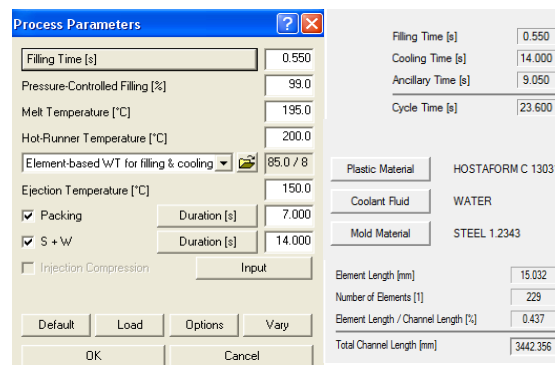
Vtok v programu Cadmould



Původní vtok

Obr. 44 Vtok – Cadmould

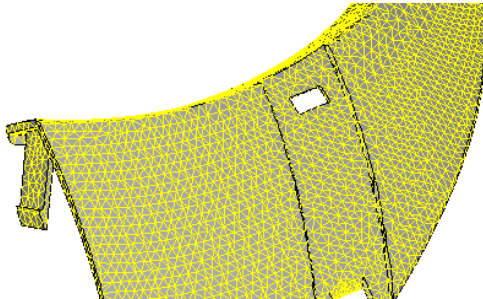
Nastavili se procesní podmínky podle vstřikovacích dat a vložil se temperanční systém, ve kterém se nastavila teplota a průtok chladicího média a typ média. Celá forma v analýze se nachází v příloze 2.



Obr. 45 Parametry analýzy -Redukce

6.2.3 Světlo met – nastavení analýzy

Světlo met se do programu vložil stejně jako v předchozích analýzách a také se mu upravila síť.

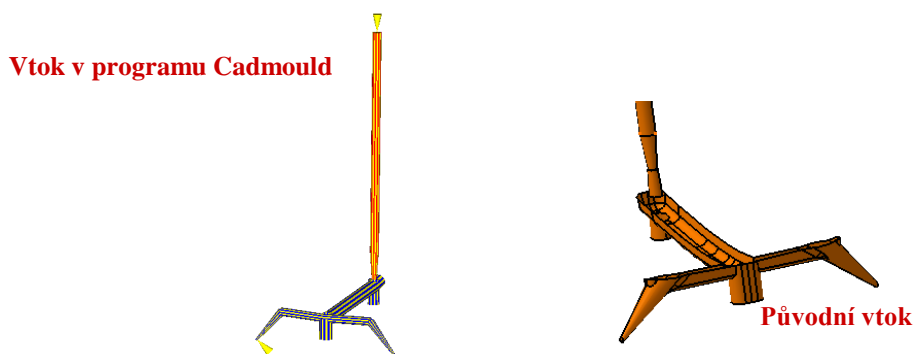


Relative Element Size 0.8 [%]

Wall Thickness 0.3

Obr. 46 Nastavení sítě - Světlo met

Vtokový systém se také musel upravit do vhodného tvaru (Obr 46). Po vložení a nastavení chladicích kanálů a následné nastavení procesních podmínek se pustili zadané analýzy. Zobrazení celé formy se nachází v příloze 3.



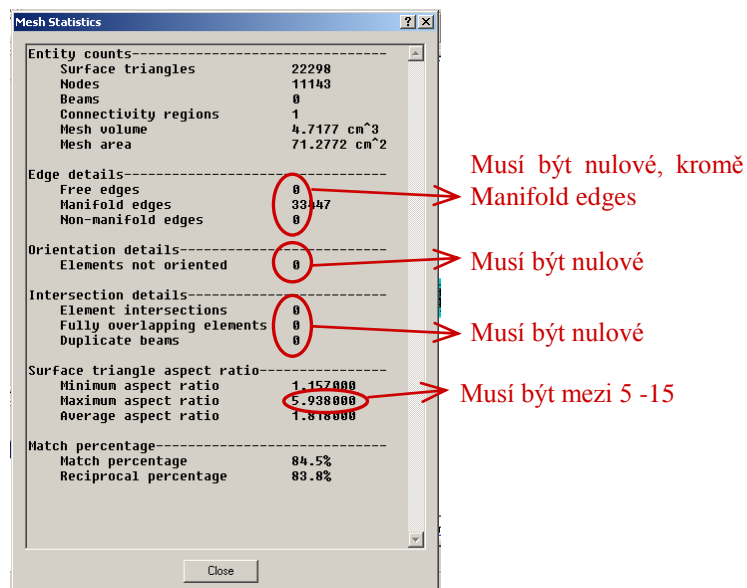
Obr. 47 Úprava vtoku – světlo met

Process Parameters		Filling Time [s]		6.300	
Filling Time [s]	6.300	Cooling Time [s]	16.500		
Pressure-Controlled Filling [%]	99.0	Ancillary Time [s]	10.200		
Melt Temperature [°C]	315.0	Cycle Time [s]	33.000		
Hot-Runner Temperature [°C]	320.0				
Element-based WT for filling & cooling	131.1 /				
Ejection Temperature [°C]	130.0	Plastic Material	MAKROLON AL 2647		
<input checked="" type="checkbox"/> Packing	Duration [s] 5.000	Coolant Fluid	WATER		
<input checked="" type="checkbox"/> S + W	Duration [s] 16.500	Mold Material	STEEL 1.1730		
<input type="checkbox"/> Injection Compression	Input	Element Length [mm]	20.000		
Default Load Options Vary		Number of Elements [1]	511		
OK Cancel		Element Length / Channel Length [%]	0.196		
		Total Channel Length [mm]	10225.725		

Obr. 48 Parametry analýzy – Světlo met

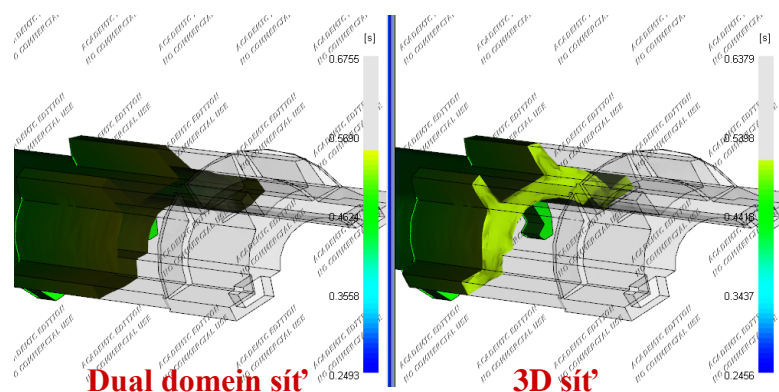
6.3 Nastavení analýzy v programu Moldflow Plastics Insight®

Program MPI může používat dva typy datových formátů pro analýzy. 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 vysířování. Pak se výrobek vysířuje a následně vytvořená síť se upraví pomocí příkazů na opravu sítě. Takto upravená síť musí splňovat určité parametry. (Obr. 49)



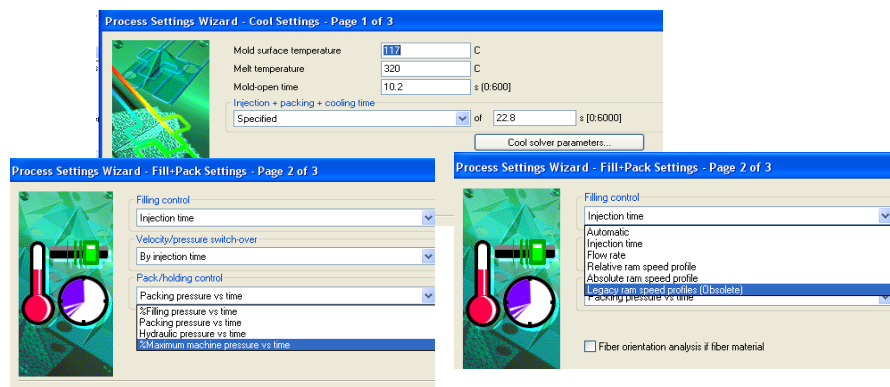
Obr. 49 Mesh Statistic

Po kontrole kvality sítě se nastaví typ sítě (Dual domein Mesh, 3D Mesh), po nastavení sítě se z databáze materiálů vybere zadaný materiál. Rozdíl mezi Dual domein sítí a 3D sítí je na Obr. 49.



Obr. 50 Dual domein 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, jako formát igs. Pak se těmto 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. 51 Procesní podmínky - MPI

Program MPI má rozmanitější konfiguraci procesních podmínek například položka Filling Control se může nastavit za pomoci např. Injection Time, nebo nastavit rychlostní profil šneku v závislosti na rychlosti a pozici šneku. Dotlak se může také nastavit několika způsoby. Výrobky se nejdříve zbavili rádiusů a uložili se jako stl. a stp.. Z těchto typů se dělaly analýzy Gate Location a analýzy Cool + Flow + Warp + Pack u dvou druhů sítě, Domain a 3D.

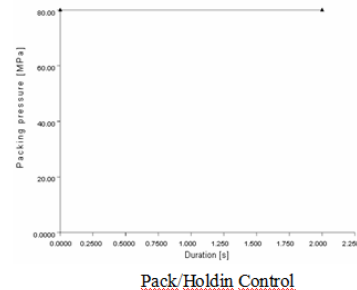
6.3.1 Krytka – nastavení analýzy

Po importování do MPI se vytvořila síť Dual Domain a následně se upravila. Z výsledku Mesh statistik vyplývá, že soubory stp mají lepší síť. Po úpravě sítě Dual Domain se z ní vytvořila 3D síť. Po vytvoření sítě se vložila vtoková

soustava a chladicí kanály. Z důvodu nevhodného vtoku, který byl elipsovitého tvaru se přepočítala plocha a vytvořil se kruhový vtok. Vložil se počátek vtoku taveniny a nastavili se parametry chladicího média. Nakonec se nastavili procesní podmínky podle seřizovacích

dat vstříkovaného výrobku. Proces plnění se řídil podle Injection Time (vstříkovacího času). Obrázek celé formy je v příloze 4.

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]

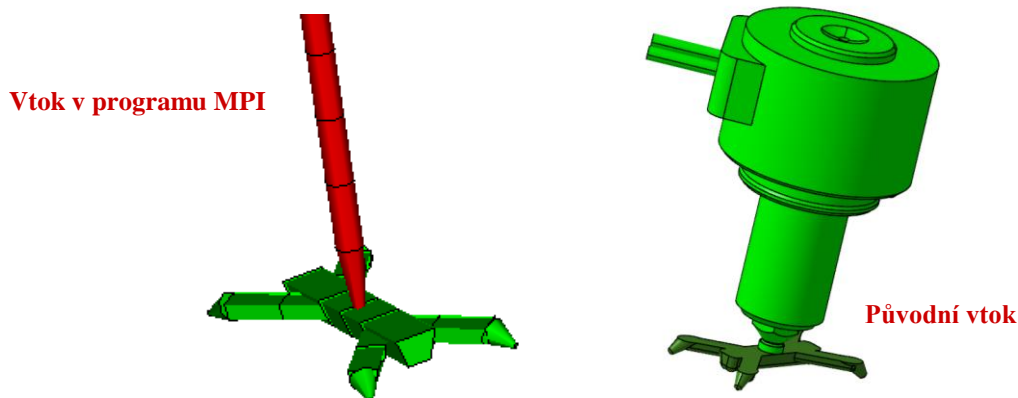


Obr. 52 Procesní podmínky – Krytka

6.3.2 Redukce – nastavení analýzy

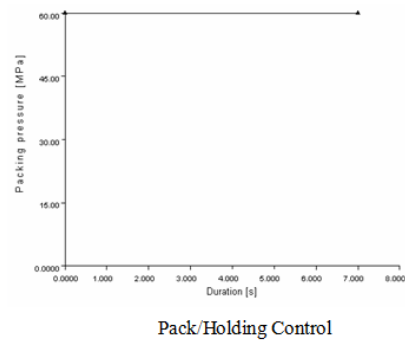
U výrobku redukce se také dělaly dva typy sítě (Dual Domain a 3D). Tato síť se upravila a následně se potom výrobek zrcadli na čtyři dutiny. Opět síť ze souboru .stp má lepší vlastnosti. Takto upravená síť se přesíťovala na 3D síť.

Vtoková soustava se vložila pomocí vytvořených trajektorií. Plocha vtoku se musela z původního tvaru přepočítat na lichoběžníkový tvar. Po vtokové soustavě se vložily chladicí kanály a zadali se vlastnosti vtokového a chladicího systému. Nakonec se zadali procesní podmínky a analýzy. Celé zobrazení formy se nachází v příloze 5.



Obr. 53 Vtoková sestava – Redukce

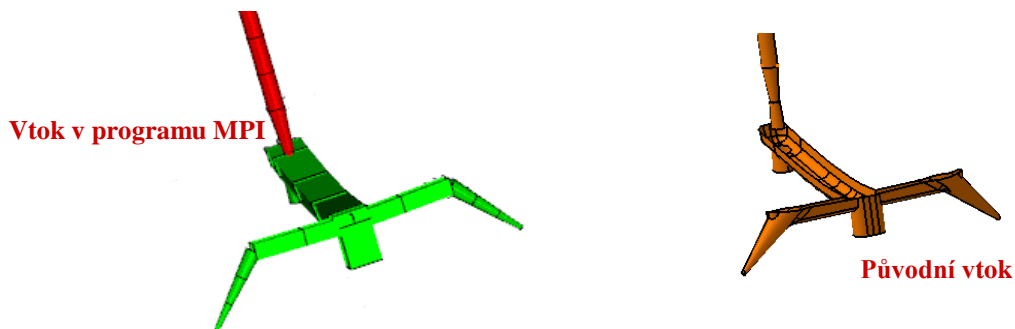
Procesní podmínky		
Mold Surface Temperature	82	[°C]
Melt Temperature	200	[°C]
Mold – Open Time	9.05	[s]
Injection + Packing + Cooling Time	14.55	[s]
<u>Filling Control</u> by Injection Time	0.55	[s]
<u>Velocity/Pressure Switch-over</u> by Injection Time	0.55	[s]
Chladicí médium		
Coolant	Water	
Flow Rate	10	[l/s]
Temperature	80	[°C]



Obr. 54 Procesní podmínky – Redukce

6.3.3 Světlo met – nastavení analýzy

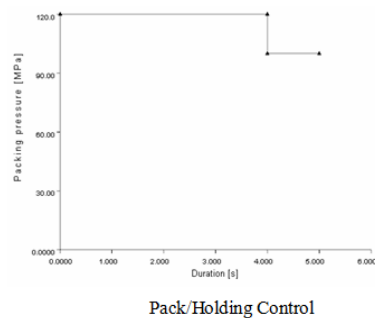
Světlo met se vloží stejně jako u předchozích analýz a opět se potvrdilo, že soubor .stp má kvalitnější síť. Opět se musel upravit vtokový systém na vhodnější tvar.



Obr. 55 Vtokový systém – Světlo met

Nakonec se opět nastavili procesní podmínky vstřikování. Zobrazení celé formy je v příloze 6.

Procesní podmínky		
Mold Surface Temperature	117	[°C]
Melt Temperature	329	[°C]
Mold – Open Time	10.2	[s]
Injection + Packing + Cooling Time	22.8	[s]
<u>Filling Control</u> by Injection Time	6.3	[s]
<u>Velocity/Pressure Switch-over</u> by Injection Time	6.3	[s]
Chladicí médium		
Coolant	Water	
Flow Rate	10	[l/s]
Temperature	115	[°C]



Obr. 56 Procesní podmínky – Světlo met

Ve všech analýzách v programu MPI se zadávali typy vstřikovacích strojů, protože v databázi tyto stroje nebyly, museli se vytvořit. Firma FOREZ používá vstřikovací stroje Krauss Maffei.

Pro výrobek Krytka byl použit vstřikovací stroj:

KM_50		
Injection Unit		
Max. Machine Injection Stroke	95	[mm]
Max. Machine Injection Rate	63	[cm ³ /s]
Machine Screw Diameter	25	[mm]
Hydraulic Unit		
Max. Machine pressure	250	[MPa]
Clamping Unit		
Max. Machine Clamp Force	50	[t]

Pro výrobek Redukce byl použit vstřikovací stroj:

KM_80		
Injection Unit		
Max. Machine Injection Stroke	169	[mm]
Max. Machine Injection Rate	131	[cm ³ /s]
Machine Screw Diameter	40	[mm]
Hydraulic Unit		
Max. Machine pressure	186	[MPa]
Clamping Unit		
Max. Machine Clamp Force	80	[t]

Pro výrobek Světlo met byl použit vstřikovací stroj:

KM_200CX		
Injection Unit		
Max. Machine Injection Stroke	200	[mm]
Max. Machine Injection Rate	194	[cm ³ /s]
Machine Screw Diameter	45	[mm]
Hydraulic Unit		
Max. Machine pressure	233.6	[MPa]
Clamping Unit		
Max. Machine Clamp Force	200	[t]

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

U spočítaných analýz se kontrolovaly zadané hodnoty, které byly na simulovány, např. hmotnost výstřiků jestli odpovídají naměřeným hmotnostem ze seřizovacích dat. Nakonec se porovnají deformace výrobku se skutečnou deformací. Analýzy ještě můžou zobrazit např. možné místo výskytu studených spojů nebo vzduchových bublin a další parametry, které konstruktér potřebuje na výrobu formy.

Výsledky se vzájemně porovnávají z Moldflow Plastics Insight a Cadmould 3D – F. Jak poslední výsledek je měření deformace mezi výsledkem analýz a skutečnou deformací na výstřiku.

V programu Moldflow Plastics Insight bylo zahrnuto do výsledků porovnání mezi dvěma typy sítí Dual Domain a 3D. Porovnávala se též kvalita sítí pomocí Mesh Statistick.

7.1.1 Vyhodnocení analýz – Krytka

Porovnání kvality sítě u formátů .stp a .stl v programu MPI je vidět na obrázku 56.

Dual domein			
Entity counts		Entity counts	
Surface triangles	19194	Surface triangles	22818
Nodes	9762	Nodes	11573
Beams	167	Beams	167
Connectivity regions	4	Connectivity regions	4
Mesh volume	4.6997 cm ³	Mesh volume	4.7186 cm ³
Runner volume	2.954 cm ³	Runner volume	2.9551 cm ³
Mesh area	5184.39 cm ²	Mesh area	5184.54 cm ²
Edge details		Edge details	
Free edges	0	Free edges	0
Manifold edges	28791	Manifold edges	34227
Non-manifold edges	0	Non-manifold edges	0
Orientation details		Orientation details	
Elements not oriented	0	Elements not oriented	0
Intersection details		Intersection details	
Element intersections	34	Element intersections	33
Fully overlapping elements	0	Fully overlapping elements	0
Duplicate beams	0	Duplicate beams	0
Surface triangle aspect ratio		Surface triangle aspect ratio	
Minimum aspect ratio	1.159000	Minimum aspect ratio	1.157000
Maximum aspect ratio	9.924000	Maximum aspect ratio	6.397000
Average aspect ratio	2.083000	Average aspect ratio	1.812000
Match percentage		Match percentage	
Match percentage	81.8%	Match percentage	84.5%
Reciprocal percentage	76.5%	Reciprocal percentage	83.8%
.stl soubor		.stp soubor	
3D			
Nodes:		Nodes:	
Number:	38481	Number:	44555
Elements:		Elements:	
Tetras:		Tetras:	
Number:	209516	Number:	242411
Volume(%):	61.40	Volume(%):	61.49
Aspect ratio:		Aspect ratio:	
Max	49.6	Max	45.4
Average	5.36	Average	5.04
Min	1.04	Min	1.09
Beams:		Beams:	
Number:	167	Number:	167
Volume(%):	38.60	Volume(%):	38.51
.stl soubor		.stp soubor	

Obr. 57 Mesh statistic – Krytka

V tabulce 5. jsou zobrazeny a porovnány hodnoty kvality sítě. U sítě 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%). Tabulka 5. ukazuje, že soubory typu stp mají lepší síť.

Tab. 5 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

Hmotnost výstřiku

Hmotnosti výstřiku jsou v tabulce 6. a ukazují hodnotu, kterou vypočítala analýza a hodnotu ze seřizovacího listu výstřiku.

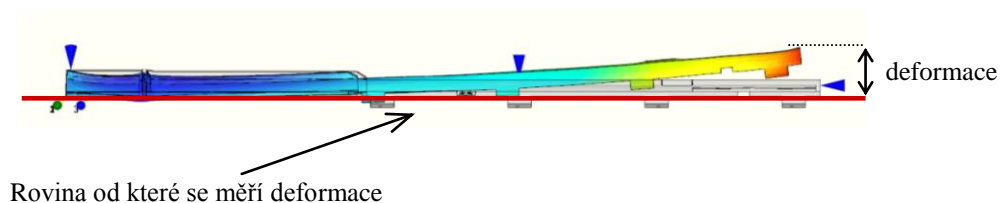
Tab. 6 Hmotnost výstřiku – Krytka

	MPI		Cadmould
	Dual domain	3D	
	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]
Soubor .stp	5,969	5,900	6,045
Soubor .stl	5,908	6,030	
Skutečná	6.1		

Ke skutečné hmotnosti výrobku se nejvíce blíží analýza s Cadmouldu a pak z MPI 3D sítě.

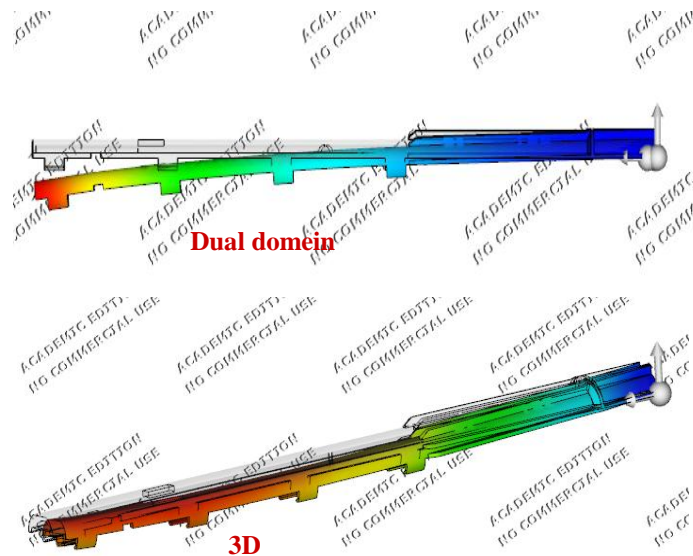
Deformace

Deformace se měřila od spodní části výstřiku (obr. 56). Programech MPI a Cadmould se vytvořila rovina od které se měřili deformace.



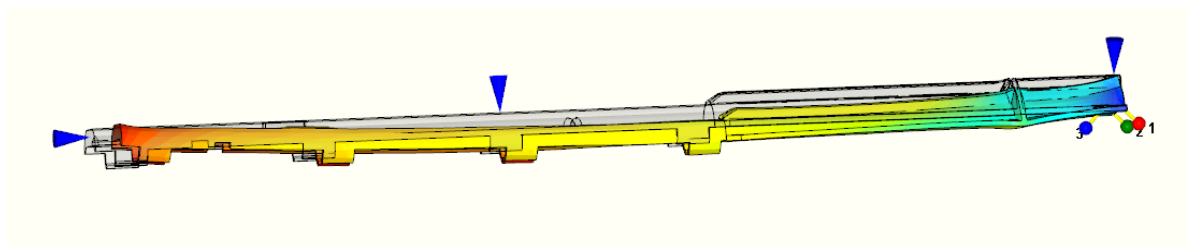
Obr. 58 Rovina deformace – Krytka

Deformace spočítané v MPI znázorňuje (obr.57) . Deformace u sítě Dual domain se prohýbá na opačnou stranu než by měla, tato chyba je zapříčiněna nejspíše daným typem sítě a hodnota také neodpovídá. U 3D sítě je deformace znázorněna správně.



Obr. 59 Průběh deformace v MPI – Krytka

Průběh deformace v programu Cadmoul je na (obr. 58).



Obr. 60 Průběh deformace v Cadmould – Krytka

Tab. 7 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. 7. V tabulce jsou zobrazeny pouze hodnoty z 3D sítě, protože síť Dual domein ukazovala chybnou deformaci. Tyto hodnoty se srovnávaly s naměřenými hodnotami, které byly získány na měřicí sondě ve firmě FOREZ a jsou zobrazeny v Tab. 8.

Tab. 8 Naměřené hodnoty deformací – Krytka

n	Naměřená deformace [mm]
1	0,453
2	0,420
3	0,445
4	0,421
5	0,390
6	0,453
7	0,389
8	0,489
9	0,476
10	0,496
Aritmetický průměr	0,443
Směrodatná odchylka	0,036
Směrodatná chyba měření	0,011

Výsledky v (Tab. 9) ukazují rozdíl jednotlivých analýz od naměřené hodnoty.

Tab. 9 Konečné deformace – Krytka

Naměřená hodnota	MPI .stl	MPI. stp	Cadmould
0,443	0,910	0,915	0,861
1	2.05	2.07	1,94

7.1.2 Vyhodnocení analýz – Redukce

U této analýzy se také hodnotila kvalita sítě (Tab. 10). Lepší kvalitu sítě měl opět formát .stp.

Tab. 10 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 jsou v (Tab. 11) a ukazují hodnotu, kterou vypočítala analýza s hodnotou seřizovacího listu výstřiku. Hodnoty v tabulce jsou pro hmotnost jednoho výstřiku.

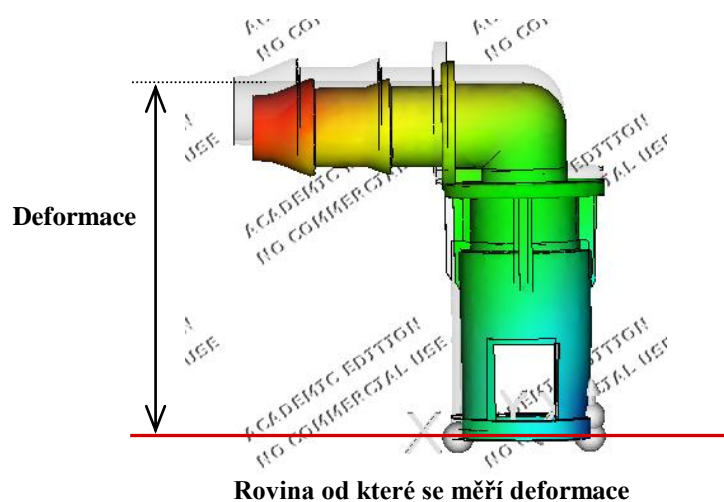
Tab. 11 Hmotnost výstřiku – Krytka

	MPI		Cadmould
	Dual domain	3D	
	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]	Hmotnost [g]
Soubor .stp	4,209	-	4,771
Soubor .stl	4,231	4.653	
Skutečná	5,925		

Nejblíže se naměřené hmotnosti blíží hodnota s programu Cadmould a pak hodnota s MPI 3D sítí.

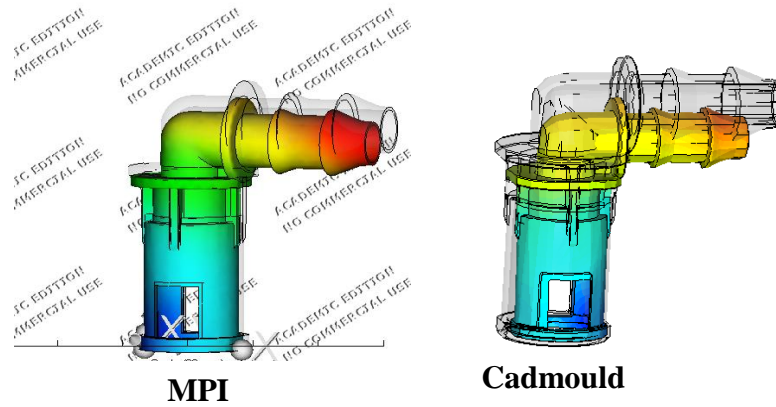
Deformace

Deformace se měřila od spodní části výstřiku (obr. 59). Programech MPI a Cadmould se vytvořila rovina od které se měřili deformace.



Obr. 61 Rovina deformace - Redukce

Průběh deformace se nelišil, a u všech analýz byl stejný (Obr.60). Hodnoty deformací s analýz se nacházejí v Tab. 12.



Obr. 62 Průběh deformace v MPI a Cadmould

Tab. 12 Hodnoty deformace - Redukce

	MPI Dual Domein	MPI 3D	Cadmould
	Deformace [mm]	Deformace [mm]	Deformace [mm]
Soubor .stp	0,641	0,733	0,858
Soubor .stl	0,641		

Hodnoty zjištěné z analýz se porovnávali s naměřenými hodnotami (Tab.13).

Tab. 13 Naměřené hodnoty deformací - Redukce

n	Naměřená deformace [mm]
1	0,776
2	0,589
3	0,613
4	0,569
5	0,790
6	0,736
7	0,751
8	0,757
9	0,791
10	0,801
Aritmetický průměr	0,723
Směrodatná odchylka	0,086
Směrodatná chyba měření	0,027

Tab. 14 Konečné deformace – Redukce

Naměřená hodnota	MPI .stl Dual domein	MPI. Stp Dual domein	MPI 3D	Cadmould
0,723	0,641	0,641	0,733	0,858
1	0,887	0,887	1,014	1,187

Výsledky v (Tab. 14) ukazují rozdíl jednotlivých analýz od naměřené hodnoty. Hodnota u MPI 3D sítě má téměř stejnou hodnotu deformace jako naměřená.

Analýza se 3D sítí v souboru .stp se nedokončila, protože obsahovala mnoho elementů (přes 700 000). Analýza byla při počítání ukončena z nedostatku operační paměti počítače. Tato analýza nebyla zařazena do vyhodnocení výsledků. Řešením výpočtu analýzy by bylo zlepšit kvalitu sítě, tím by se zmenšil počet elementů. Zlepšit kvalita sítě by šla pomocí CAD doktoru, který je součástí MPI jako přídatný modul.

7.1.3 Vyhodnocení analýz – Světlomet

U světlometu se také sledovala kvalita sítě, které je zobrazena v (Tab. 15). Tady se má nejlepší síť souboru typu .stp

Tab. 15 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 zatažilo 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 domein, ale takto spočítaná analýza není vhodná pro porovnání. U typu sítě 3D se analýza nedopočítal, 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. Světlo met se podle nich vstřikuje. Tento dlouhý čas vstřikování je kvůli vzhledu výrobku. Pro spočítání analýz bych doporučil zkrácení vstřikovacího času na 4.5 [s].

7.1.4 Porovnání CALDMOULD 3D – F a Moldflow Plastics Insight®

Tato kapitola má popsat klady a zápory obou programů. Nedostatky nebo klady programů budu popisovat z vlastní zkušenosti, jak se mě s programy pracovalo při vypracovávání analýz. Tato kapitola bude jen můj osobní názor na programy Cadmould 3D – F a Moldflow Plastics Insight.

CADMOULD 3D – F

S programem CADMOULD 3D – F se dobře pracovalo, na první pohled vypadá složitě, ale za chvíli se osvojí základní kroky jak s ním pracovat. CADMOULD pracuje pouze s formáty .stl, které se vkládají přímo bez nějakých úprav technologických rádiusů. Úprava sítě výrobku v programu je jednoduchá zadají se dvě hodnoty a síť je upravená.

Tvorba temperančního a vtokového systému je v programu také jednoduchá. Problém nastává pokud vloží trajektorie igs. jako vtokový systém program nabídne automaticky kruhový průřez. Tyto průřezy nejdou editovat musí se smazat a udělat nové se správným průřezem. Další nevýhodou je trochu omezené nastavení procesních podmínek, jak bylo popsáno v kap. 6.2. Při vkládání temperančního systému přes trajektorie igs je dobré pokud jsou správně udělány automaticky se vloží přepážky, které pak stačí pouze editovat na správný průměr. Vkládání materiálu je jednoduché stačí ho vložit z databáze, ale vstřikovací stroj se nenastavuje. Do nastavení procesních podmínek je trochu složitější, bez konzultace bych je správně nenastavil.

Klady

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

Zápory

- při vložení .igs trajektorií jako vtok, nelze editovat

- po spuštění analýzy, někdy nejde poznat jestli pracuje nebo ne
- omezené nastavení procesních podmínek
- nepřehledné výsledky analýz

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 se většinou vkládají pomocí igs trajektoriemi. Těmto trajektoriím se přiřazují tzv.vlastnosti, tím se rozliší vtok od chladících kanálů. Následně se musí vysítovat a upravit (můžete 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
- + „Job Manažer“

Zápory

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

ZÁVĚR

V diplomové práci bylo mým úkolem udělat a porovnat analýzy vstřikování plastů už na hotových výrobcích. Analýzy byly dělány v programech CADMOULD 3D –F a Moldflow plastics Insight. Výrobky byly darovány firmou FOREZ s.r.o.

Práce byla rozdělena do dvou částí teoretickou a praktickou část. Teoretická část pojednává o základním rozdělení polymerů a jejich zpracování. Je zde popsán proces vstřikování, vstřikovací cyklus a popis vstřikovacího stroje. Dále Teoretické část pojednává o reologii polymerů a jejich tokové vlastnosti. Nakonec se zdw 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] *TechnologieII*[online]. [cit. 2009 – 02 – 20]. Dostupný z WWW: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [10] *Cadmould* [online]. [cit. 2009 – 05 – 14]. Dostupný z WWW: <http://www.cadmould.cz/index.php?akce=1>
- [11] *Moldflow* [online]. [cit. 2009 – 05 – 14]. Dostupný z WWW: <http://www.smartplast.cz/software.php>
- [12] *Metoda konečných prvků – 1. panel* [online]. [cit. 2009 – 05 – 14]. Dostupný z WWW: http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf

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 Aplikace polymerů.....	11
Obr. 2 amorfní a semikrystalický termoplast.....	11
Obr. 3 Oblast využití u amorfních plastů.....	12
Obr. 4 Oblast využití u semikrystalických plastů	12
Obr. 5 Vyztužující plniva.....	13
Obr. 6 Newtonův model.....	16
Obr. 7 Hookův model	16
Obr. 8 Maxwellův model.....	16
Obr. 9 Vliv normálových napětí	17
Obr. 10 Smykový tok.....	18
Obr. 11 Unášivý tok.....	18
Obr. 12 tlakem řízený tok	18
Obr. 13 Toková křivka.....	19
Obr. 14 Tokové křivky různých látek	20
Obr. 15 Závislost η na teplotě a tlaku.....	20
Obr. 16 Elongační tok.....	21
Obr. 17 elongační viskozita	21
Obr. 18 MAD diagram.....	22
Obr. 19 Fontánový tok.....	22
Obr. 20 Vliv smykové viskozity na čelo tavenin	22
Obr. 21 Vstřikovací cyklus	23
Obr. 22 Vstřikovací stroj	24
Obr. 23 Uzavírací jednotka.....	25
Obr. 24 Rozdělení uzavíracích jednotek.....	25
Obr. 25 Vstřikovací jednotky.....	26
Obr. 26 Šnekový stroj	27
Obr. 27 Vstřikovací jednotka s předplastikací.....	28
Obr. 28 Zkratky CA systémů.....	31
Obr. 29 3D – Příhradový model.....	42
Obr. 30 Přesný výpočet Cadmould 3D-F.....	43
Obr. 31 Střednicová plocha.....	44

Obr. 32 Dual domain mesh	45
Obr. 33 3D mesh	45
Obr. 34 Upravené výrobky.....	46
Obr. 35 Krytka	47
Obr. 36 Redukce	48
Obr. 37 Světloomet	49
Obr. 38 Tvary vtoků v Cadmouldu	50
Obr. 39 Procesní podmínky	51
Obr. 40 Nastavení toku taveniny.....	51
Obr. 41 Nastavení sítě - Krytka	52
Obr. 42 Parametry analýzy – Krytka.....	52
Obr. 43 Nastavení sítě - Redukce	53
Obr. 44 Vtok – Cadmould.....	53
Obr. 45 Parametry analýzy -Redukce	53
Obr. 46 Nastavení sítě - Světloomet	54
Obr. 47 Úprava vtoku – světloomet.....	54
Obr. 48 Parametry analýzy – Světloomet.....	54
Obr. 49 Mesh Statistic	55
Obr. 50 Dual domein a 3D síť	55
Obr. 51 Procesní podmínky - MPI.....	56
Obr. 52 Procesní podmínky – Krytka	57
Obr. 53 Vtoková sestava – Redukce	57
Obr. 54 Procesní podmínky – Redukce	58
Obr. 55 Vtokový systém – Světloomet	58
Obr. 56 Procesní podmínky – Světloomet	58
Obr. 57 Mesh statistic – Krytka	60
Obr. 58 Rovina deformace – Krytka.....	61
Obr. 59 Průběh deformace v MPI – Krytka	62
Obr. 60 Průběh deformace v Cadmould – Krytka	62
Obr. 61 Rovina deformace - Redukce.....	64
Obr. 62 Průběh deformace v MPI a Cadmould.....	65

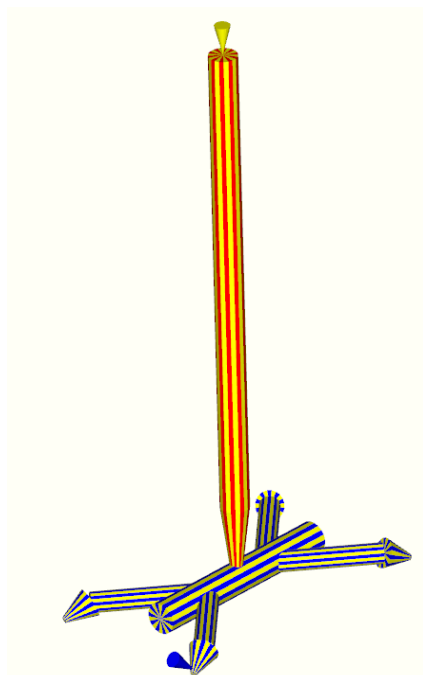
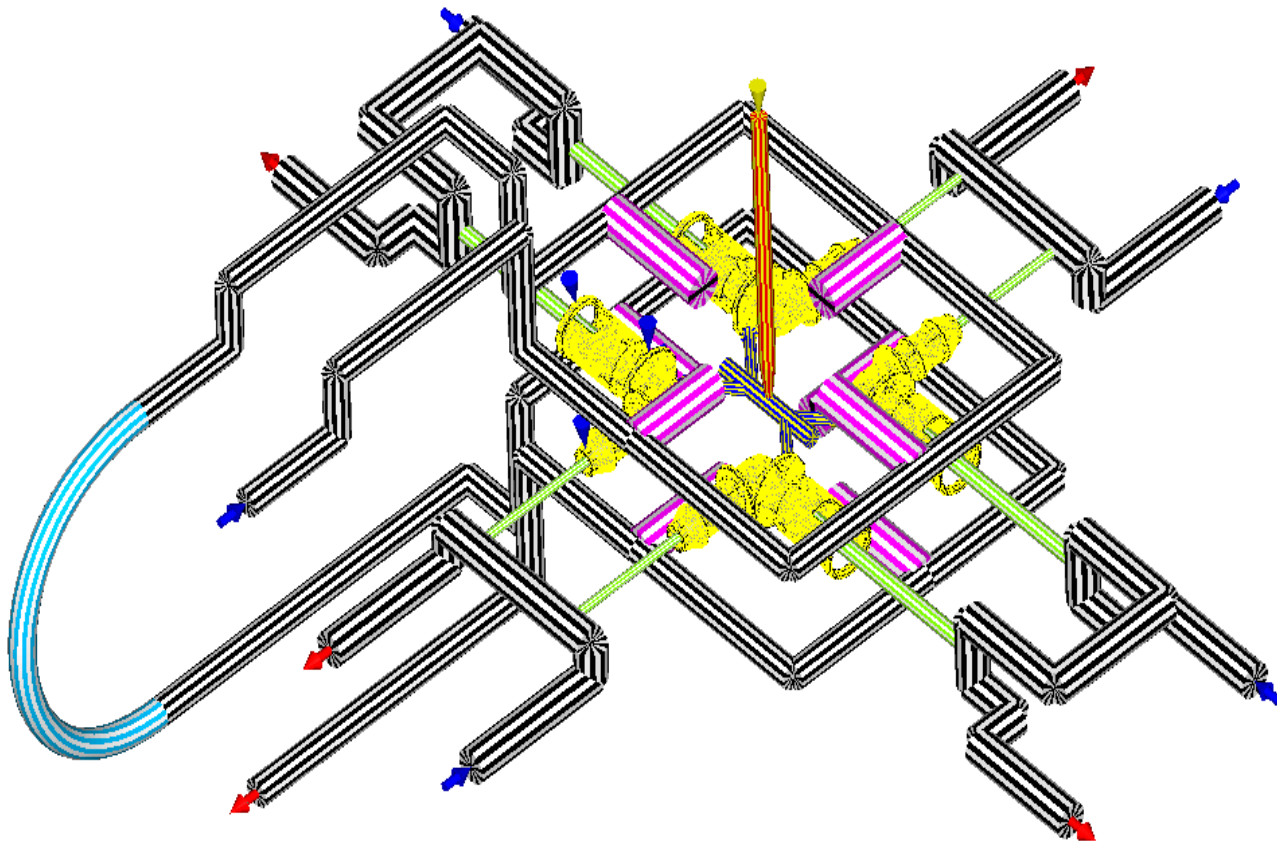
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Vlastnosti uzavíracích jednotek</i>	26
<i>Tab. 2 Vstřikovací data krytky</i>	47
<i>Tab. 3 Vstřikovací data redukce</i>	48
<i>Tab. 4 Vstřikovací data světlometu</i>	49
<i>Tab. 5 Porovnání Mesh statistics – Krytka</i>	61
<i>Tab. 6 Hmotnost výstřiku – Krytka</i>	61
<i>Tab. 7 Hodnoty deformace - Krytka</i>	62
<i>Tab. 8 Naměřené hodnoty deformací – Krytka</i>	63
<i>Tab. 9 Konečné deformace – Krytka</i>	63
<i>Tab. 10 Porovnání Mesh statistics – Redukce</i>	63
<i>Tab. 11 Hmotnost výstřiku – Krytka</i>	64
<i>Tab. 12 Hodnoty deformace - Redukce</i>	65
<i>Tab. 13 Naměřené hodnoty deformací - Redukce</i>	65
<i>Tab. 14 Konečné deformace – Redukce</i>	66
<i>Tab. 15 Porovnání Mesh statistics – Světlomet</i>	66

SEZNAM PŘÍLOH

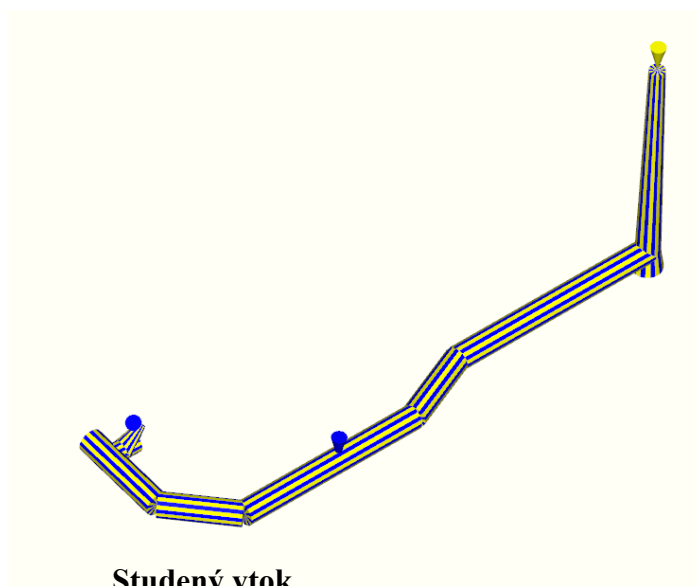
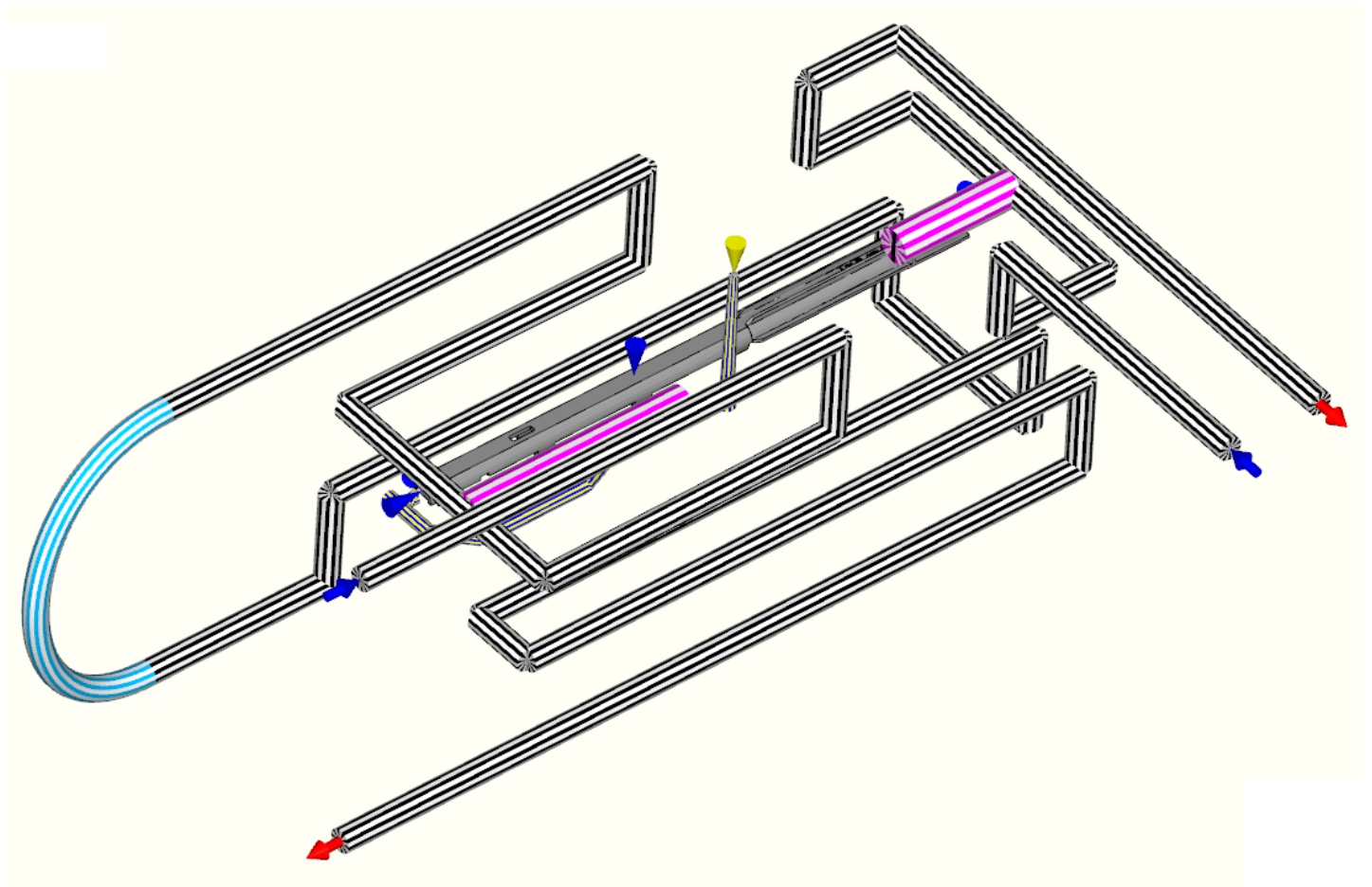
- P I.** Cadmould – Sestava Krytka
- P II.** Cadmould – Sestava Redukce
- P III.** Cadmould – Sestava Světlomet
- P IV.** MPI – Sestava krytka
- P V.** MPI – Sestava Redukce
- P VI.** MPI – Sestava Světlomet
- P VII.** CD obsahující: Elektronickou verzi Diplomové práce ve formátu doc a pdf

PŘÍLOHA P II: CADMOULD – SESTAVA REDUKCE



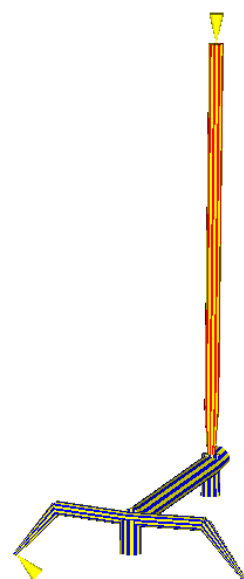
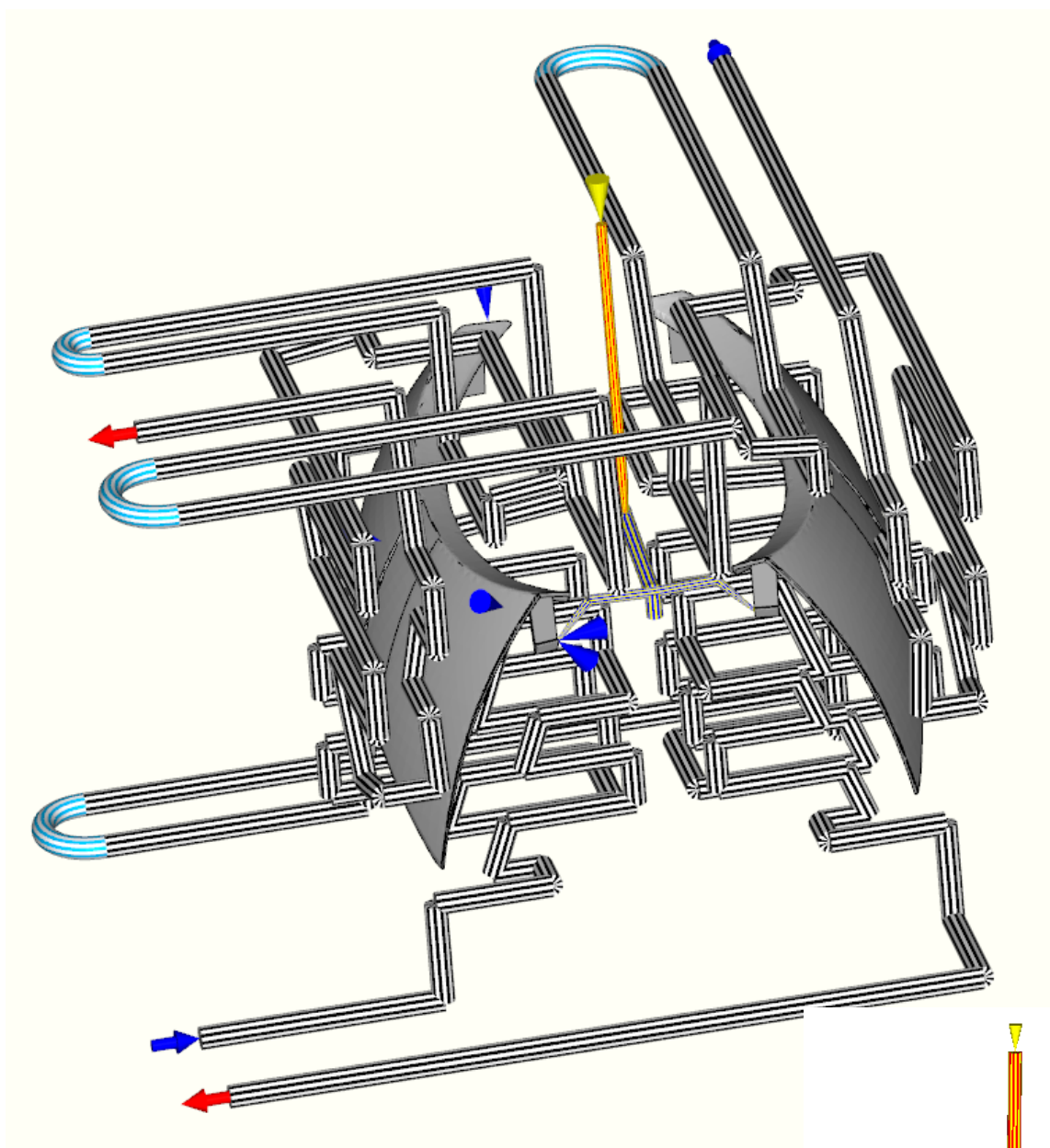
Kombinace studeného vtoku a horké trysky

PŘÍLOHA P I: CADMOULD – SESTAVA KRYTKA



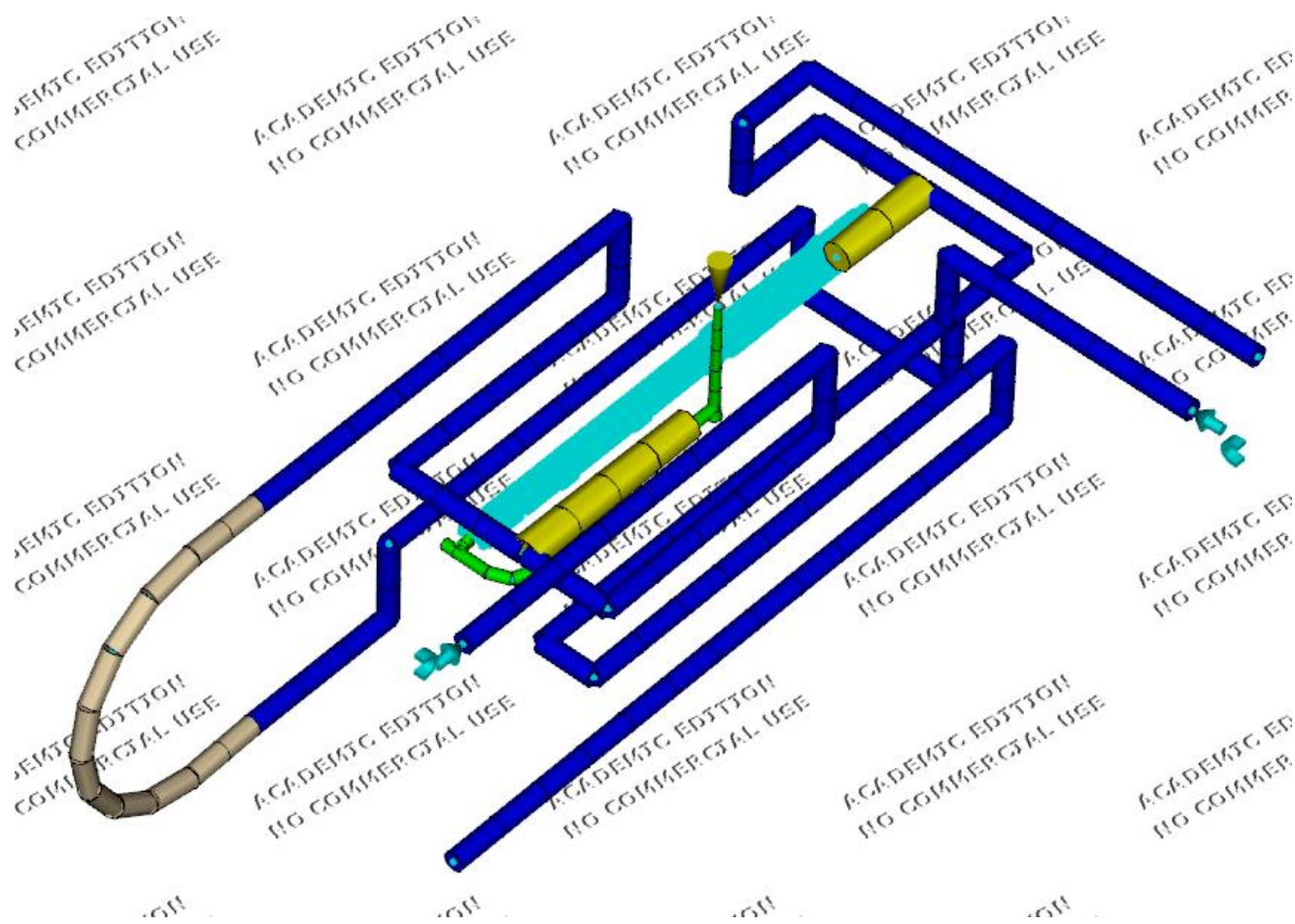
Studený vtok

PŘÍLOHA P III: CADMOULD – SESTAVA SVĚTLOMET

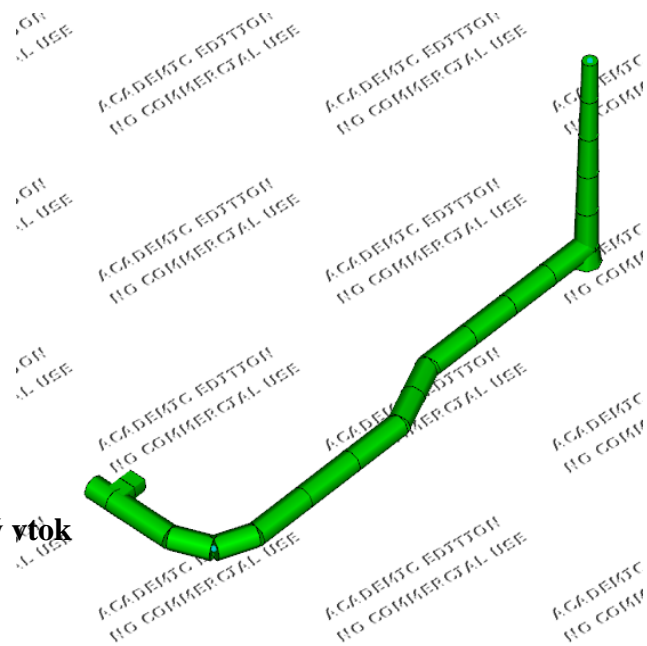


Kombinace studeného vtoku a horké trysky

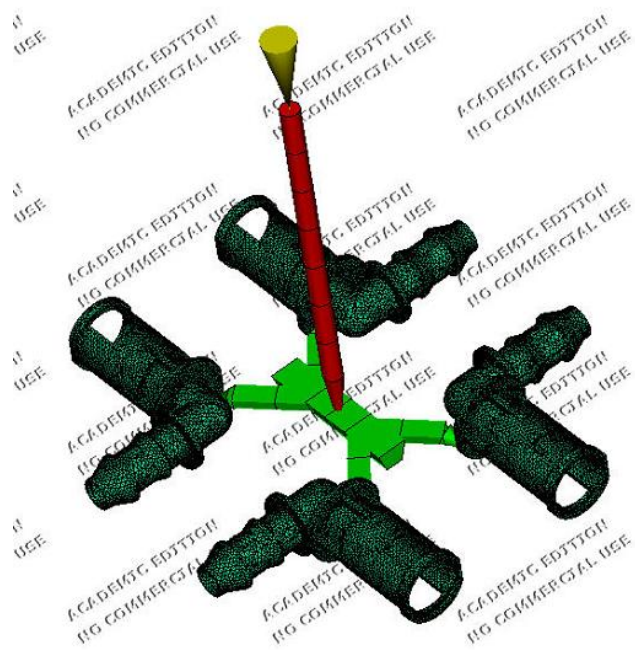
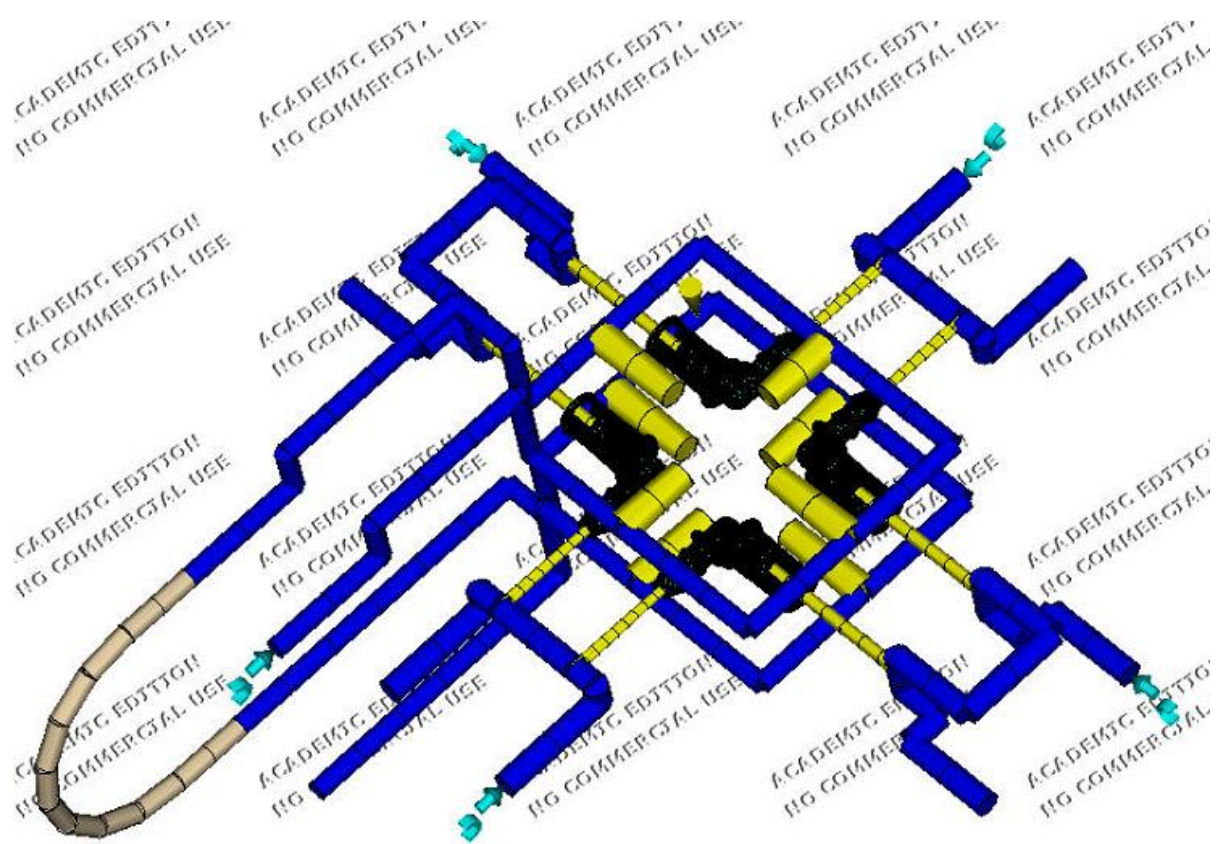
PŘÍLOHA P IV: MPI – SESTAVA KRYTKA



Studený vtok



PŘÍLOHA P V: MPI – SESTAVA REDUKCE



Kombinace studeného vtoku a horké trysky

PŘÍLOHA P VI: MPI – SESTAVA SVĚTLOMET



Kombinace studeného vtoku a horké trysky