

Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů

Use of optimization of injection molding process in plastic parts production

Bc. Martin Hudcovič

Diplomová práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

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

Téma práce: **Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Provedte analýzu vstřikovacího procesu**
- 3. Provedte optimalizaci vstřikovacího procesu**
- 4. Porovnejte a vyhodnoťte naměřené hodnoty**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

19. února 2008

Termín odevzdání diplomové práce:

23. května 2008

Ve Zlíně dne 29. ledna 2008


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací vstřikovacího procesu. Je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. V teoretické části jsou popsány plasty, jejich rozdělení, struktura a vlastnosti, dále je rozebráno vstřikování, popsány vstřikovací stroje, formy a výrobní cyklus. V praktické části je uvedena charakteristika programů použitých při této diplomové práci a to řídicí program Selogica a systém Moldflow Plastics Xpert. K optimalizaci vstřikovacího procesu byly zvoleny dvě formy, které pracovaly na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420 C 1000-350. Celý vstřikovací proces pro každou formu byl optimalizován pomocí programu Moldflow Plastics Xpert přes jednotlivá nastavení a hodnocení výrobků z hlediska kvality a vzniklých vad.

Klíčová slova: plasty, vstřikování, optimalizace, Moldflow Plastics Xpert

ABSTRACT

This Master thesis solves optimization of injection molding process. It is divided into theoretical and practical part. In the theoretical part there are described plastics, their division, structure and properties, further is defined injection molding, injection molding machines, molds and operation cycle.

In the practical part there is mentioned characteristic of programs which were used in this Master thesis. It is control program Selogica and system Moldflow Plastics Xpert. Two molds were used for optimization of injection molding process and these molds worked on the injection molding machine Arburg Allrounder 420 C 1000-350. The whole injection molding process for each mold was optimized by means of system Moldflow Plastics Xpert through particular settings and classification of quality and detected defects of each plastic part.

Keywords: plastics, injection molding, optimization, Moldflow Plastics Xpert

Poděkování

Děkuji panu ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení při psaní této diplomové práce a panu ing. Vladimíru Šumberovi a panu ing. Jiřímu Šálkovi za technickou pomoc při realizaci praktické části diplomové práce.

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

Ve Zlíně dne 23. 5. 2008

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERY	11
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A STRUKTURA POLYMERŮ	11
1.2 VÝROBA SYNTETICKÝCH POLYMERŮ.....	13
1.3 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	14
1.3.1 Rozdělení podle chemické struktury	14
1.3.2 Rozdělení podle ČSN.....	15
1.3.3 Termoplasty	16
1.3.4 Reaktoplasty	18
1.3.5 Elastomery.....	18
1.3.6 Rozdělení podle postavení na trhu	19
1.3.7 Rozdělení podle nejvhodnějšího použití.....	20
1.4 ZPRACOVATELNOST POLYMERŮ	21
1.5 PŘÍSADY DO POLYMERŮ	21
2 VLASTNOSTI A CHOVÁNÍ POLYMERŮ	23
2.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	23
2.2 MOLÁRNÍ HMOTNOST A VLASTNOSTI POLYMERŮ	24
2.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	25
2.4 TERMOMECHANICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ.....	26
2.5 REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ	28
2.6 TOK TAVENINY VE FORMĚ	30
2.7 ZPRACOVATELSKÁ OBLAST PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ (MOLDING AREA DIAGRAM)	31
2.8 TLAK, TEPLOTA A MĚRNÝ OBJEM V PRŮBĚHU VSTŘIKOVÁNÍ.....	32
3 VSTŘIKOVÁNÍ	34
3.1 ZPŮSOBY VSTŘIKOVÁNÍ.....	34
3.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	37
3.2.1 Rozdělení vstřikovacích strojů.....	37
3.2.2 Uzavírací jednotka	38
3.2.3 Plastikační jednotka	40
3.2.4 Řídící jednotka	41
3.2.5 Výběr vstřikovacího stroje	41
3.2.6 Arburg Allrounder 420 C	42
3.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	43
3.3.1 Postup při konstrukci formy	45

3.4	VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	45
3.5	VLIVY NA JAKOST PLASTOVÝCH SOUČÁSTÍ.....	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	47
4	ŘÍDÍCÍ SYSTÉM SELOGICA.....	48
5	MOLDFLOW PLASTICS XPERT 4.2.....	51
5.1	NASTAVENÍ PROCESU (PROCESS SETUP).....	52
5.1.1	Optimalizace rychlostní fáze.....	56
5.1.2	Postupy použité při optimalizaci rychlostní fáze.....	60
5.1.3	Optimalizace tlakové fáze.....	63
5.1.4	Postupy použité při optimalizaci tlakové fáze.....	64
5.2	OPTIMALIZACE PROCESU (PROCESS OPTIMIZATION).....	68
5.2.1	Obecná definice DOE (Design of experiments).....	68
5.2.2	Průběh optimalizace procesu.....	68
5.2.3	Zpracovatelské okno.....	69
5.3	KONTROLA PROCESU (PROCESS CONTROL).....	72
6	STANOVENÍ HMOTNOSTNÍHO (MFR) INDEXU TOKU TAVENINY TERMOPLASTŮ NA VÝTLAČNÉM PLASTOMETRU.....	74
6.1	HMOTNOSTNÍ INDEX TOKU TAVENINY VSTŘIKOVANÉHO PP.....	75
6.2	HMOTNOSTNÍ INDEX TOKU TAVENINY VSTŘIKOVANÉHO PC+ABS.....	76
7	VSTŘIKOVANÉ DÍLY.....	77
7.1	TĚLESO MKO.....	77
7.2	ÚHELNÍK UPEVŇOVACÍ.....	78
8	PROCESNÍ PARAMETRY ZJIŠTĚNÉ Z ANALÝZY MPI.....	80
8.1	PARAMETRY PRO TĚLESO MKO.....	80
8.2	PARAMETRY PRO ÚHELNÍK.....	82
9	OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU TĚLESA MKO.....	84
9.1	AUTOMATICKÉ NASTAVENÍ.....	84
9.2	POLOAUTOMATICKÉ NASTAVENÍ.....	85
9.3	RUČNÍ NASTAVENÍ.....	85
9.4	NAHRÁNÍ DAT Z ANALÝZY MPI.....	86
10	OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU ÚHELNÍKU UPEVŇOVACÍHO.....	87

10.1	AUTOMATICKÉ NASTAVENÍ.....	87
10.2	POLOAUTOMATICKÉ NASTAVENÍ.....	88
10.3	RUČNÍ NASTAVENÍ	88
10.4	NAHRÁNÍ DAT Z ANALÝZY MPI	89
10.5	PŘÍKLAD OPTIMALIZACE PROCESU POMOCÍ NÁVRHU EXPERIMENTŮ (DOE)	90
11	VADY VÝROBKŮ ODSTRANĚNÉ BĚHEM OPTIMALIZACE	95
11.1	VADY TĚLESA MKO	95
11.2	VADY ÚHELNÍKU UPEVNŮVACÍHO.....	97
12	DISKUZE VÝSLEDKŮ	100
	ZÁVĚR	102
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	103
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	105
	SEZNAM OBRÁZKŮ	106
	SEZNAM TABULEK	109
	SEZNAM PŘÍLOH	110

ÚVOD

Vstřikování plastů patří mezi nejrozšířenější technologie výroby plastových dílů téměř pro všechna průmyslová odvětví. Svými výhodami plně automatizovaného procesu, vysoké reprodukovatelnosti, přímého převedení suroviny na konečný výrobek bez nutnosti dalších dokončovacích operací neustále roste význam a uplatnění vstřikování a nemalou měrou k tomu přispívá i rozvoj automobilového průmyslu, elektroniky, telekomunikační techniky a výroby domácích spotřebičů. Vstřikované plastové výrobky je tak dnes možno najít ve většině oborů lidské činnosti.

Jednotlivé technologie vstřikování umožňují vstřikovat jak termoplasty, tak i reaktoplasty a elastomery. To přispívá k variabilitě mechanických, chemických a fyzikálních vlastností, které jsou už tak velmi široké. Základní spotřebu plastů ve světě pokrývají standardní termoplasty, pro vstřikování má největší význam skupina konstrukčních plastů a na vrcholu spotřební pyramidy plastů je možno nalézt plasty speciální, které jsou svými jedinečnými vlastnostmi určeny do nejnáročnějších podmínek.

Pokud chceme dosahovat maximálních zisků výroby při minimálních nákladech, snížit počet neshodných kusů a stabilizovat vstřikovací proces za současného zvýšení kvality vyrobených dílů, je potřeba provést optimalizaci celého vstřikovacího procesu, analyzovat jednotlivé faktory ovlivňující vstřikovací proces, zjistit vzájemné ovlivňování mezi těmito faktory a z těchto zjištěných procesních podmínek optimálně nastavit vstřikovací proces tak, aby vyhovoval všem výše uvedeným požadavkům správné optimalizace a tak celkově přispěl ke vzájemné spokojenosti zákazníka i výrobce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery jsou makromolekulární látky, které jsou charakterizovány specifickými vlastnostmi příslušející molekulám s dlouhou řetězcovou strukturou. V této řetězcové struktuře se mnohonásobně opakuje jedna nebo více základních jednotek – merů. Surovinou pro výrobu polymerů jsou tedy monomery, látky o nízké molekulové hmotnosti a vhodné chemické struktuře.

Makromolekulární látky se podle původu výchozích látek rozdělují na přírodní a syntetické. V přírodě se makromolekulární látky nacházejí v obrovské rozmanitosti a to jak mezi sloučeninami anorganickými tak organickými. Z anorganických sem například patří SiO_2 , křemičitany, diamant, grafit, apod. Tendence tvořit makromolekuly vzájemnou vazbou jednodušších molekul se projevuje zvláště významně u sloučenin organických díky výjimečné schopnosti uhlíku vytvářet řetězcové struktury skládající se z velkého počtu atomů vzájemně vázaných chemickými vazbami. Z přírodních organických polymerů je možno zmínit např. celulózu, škrob, bílkoviny, nukleové kyseliny nebo přírodní kaučuk. [1]

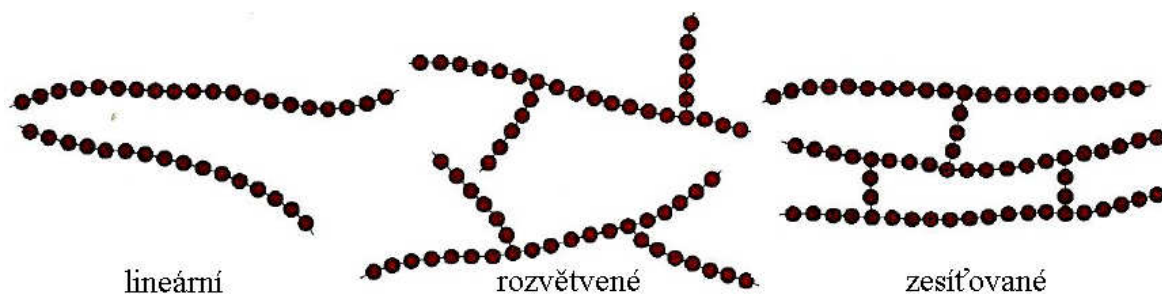
Syntetické makromolekulární látky vznikají polyreakcemi z nízkomolekulárních sloučenin – monomerů, jak bude popsáno dále.

1.1 Základní pojmy a struktura polymerů

Polymery jsou tvořeny řetězcem makromolekul a každá tato makromolekula obsahuje několik stovek až tisíce atomů. Taková makromolekula vznikne tehdy, když jsou primárními kovalentními vazbami spojeny stejné nebo rozdílné základní jednotky. Tyto základní stavební jednotky, které se v řetězci opakují, nazýváme mery. Mer v kombinaci s dalšími tvoří základní část struktury polymeru.

Počet merů v celém řetězci se označuje jako polymerační stupeň (P) a charakterizuje délku řetězce podobně jako relativní molekulová hmotnost M_r , mezi nimiž platí při chemické shodnosti merů jednoduchý vztah $P=M_r/M_0$, kde M_0 je molekulová hmotnost meru. Mer je v úzkém vztahu s monomerem a nemusí představovat nejjednodušší chemickou opakující se jednotku (strukturní jednotku). Např. u polyethylenu je mer $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ a strukturní jednotka $-\text{CH}_2-$. Mezi strukturou meru a monomeru je rozdíl, mer má buď méně atomů nebo jinak uspořádané vazby.

Jednotlivé molekuly polymeru mohou být lineární, rozvětvené nebo zesíťované.



Obr. 1. Polymerní řetězce.

Pokud se řetězce polymeru skládají z více druhů merů, pak mluvíme o kopolymeru.

Podle uspořádání různých druhů merů v řetězci se kopolymery rozdělují na:

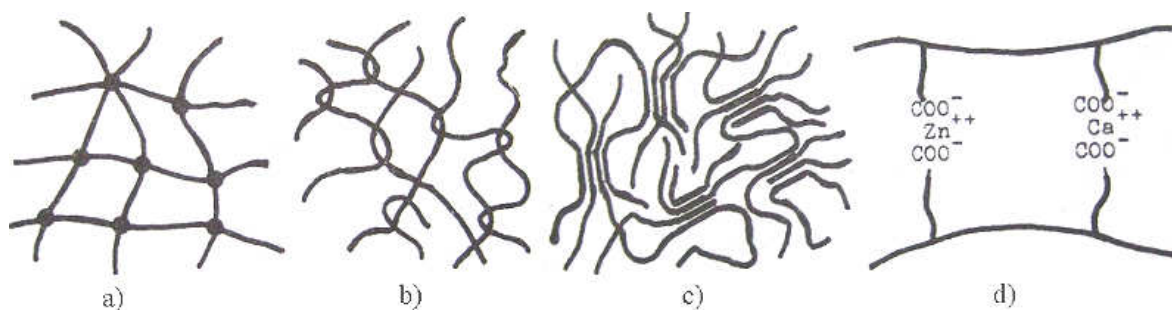
- kopolymer statický – A – B – A – B – B – B – A – A – B – A – B – B – A –
 - kopolymer alternující – A – B – A – B – A – B – A – B – A – B – A – B – A –
 - kopolymer sledový – A – A – A – A – B – B – B – B – A – A – A – A – B –
 - kopolymer roubovaný – A – A – A – Y – A – A – A – Y – A – A – A – Y – A –
- | | | |
|---|---|---|
| | | |
| B | B | B |
| | | |
| B | B | B |
| | | |

Struktura polymeru určuje nejen mechanické chování materiálu, ale i fyzikální a chemické vlastnosti. Tyto užité vlastnosti polymerů však nejsou ovlivňovány jen chemickou strukturou, ale také nadmolekulární fázovou strukturou, tj. vzájemným uspořádáním řetězců makromolekul v daném polymerním materiálu.

Struktura polymeru je velmi komplexní pojem zahrnující řadu faktorů. Základní chemická strukturální jednotka makromolekuly může být nepolární či polární s různým stupněm polarizace, záleží na přítomnosti a uspořádání nenasycených vazeb, na druhu, umístění a stínících efektech substituentů, prostorových (sferických) vlivech ovlivňujících pohyblivost segmentů makromolekuly apod. Na hlavním řetězci se často vyskytují rozvětvení – pak je důležitý jejich počet, pravidelnost rozmístění a délka postranních řetězců. U různých typů kopolymerů, chemicky modifikovaných polymerů nebo polymerních směsí hraje významnou roli i jejich chemická nehomogenita. Polymerní řetězce mohou být zesíťovány příčnými vazbami vedoucími ke trojrozměrným strukturám (např. vulkanizované kaučuky); zde je opět vý-

znamným faktorem stupeň zesíťování polymerních řetězců, délka spojovacích článků a pravidelnost vzniklé prostorové sítě. Zesíťované polymery jsou nerozpustné a vznikají buď přímo při polymeraci nebo dodatečným zesíťováním lineárních či rozvětvených makromolekul. Zesíťování polymerních řetězců může být provedeno několika způsoby:

- a) síťování primárními vazbami,
- b) fyzikálním zauzlením řetězců,
- c) krystality,
- d) elektrostatickým přitahováním iontových párů.



Obr. 2. Způsoby zesíťování polymerních řetězců. [2]

Velikost mezimolekulárních sil hraje taktéž důležitou roli ve výsledných vlastnostech polymeru. Pokud jsou tyto síly malé, makromolekuly polymerů tvoří relativně ohybné a pružné řetězce. Po protáhnutí má materiál zřetelnou tendenci vrátit se do původní rovnovážné polohy, což je typická vlastnost pro elastomery. Jakmile je soudržná energie vysoká, polymer vyniká velkou odolností proti deformacím, má vysokou pevnost. [2]

1.2 Výroba syntetických polymerů

Syntetické polymery lze připravovat pomocí speciálních reakcí, které přeměňují molekuly monomeru ve vysokomolekulární polymer. Tyto reakce se souhrnně nazývají polyreakce a jsou jich schopné pouze sloučeniny, které mají v molekule minimálně dvě funkční místa. Funkčním místem může být např. alkoholová skupina $-OH$, karboxylová skupina organických kyselin $-COOH$, dvojná vazba mezi atomy uhlíku $C=C$ apod. Polyreakce se dělí podle reakčního mechanismu, kterým probíhají:

- polykondenzace – dochází k mnohonásobně se opakující kondenzaci výchozích monomerů. Při polykondenzacích jsou odštěpovány malé molekuly - nízkomoleku-

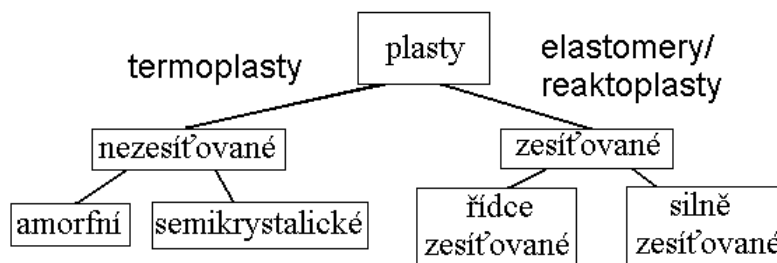
lární zplodiny, proto mají polykondenzáty jiné složení než látky, ze kterých byly připraveny;

- polymerace – je podmíněna přítomností nenasycených vazeb, všechny polymerace probíhají řetězovým mechanismem, jsou tedy výsledkem několika elementárních reakčních dějů – iniciace, růst (propagace), končení (terminace) a velmi často přenos (transfer);
- polyadice – je podobná polykondenzaci s tím rozdílem, že se při těchto reakcích neuvolňují malé molekuly.

1.3 Rozdělení polymerů

1.3.1 Rozdělení podle chemické struktury

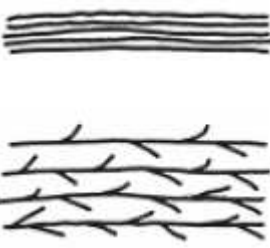
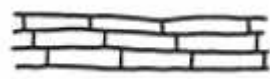

Polymery mohou být rozděleny podle několika kritérií. Obecně výchozí hrubé rozdělení lze provést podle chemické struktury polymerů. Toto výchozí rozdělení je podle zesíťovaných a nezesíťovaných materiálů (Obr. 3).



Obr. 3. Rozdělení polymerů. [3]

Termoplasty nemají své lineární a rozvětvené řetězce zesíťovány, elastomery jsou slabě zesíťované a reaktoplasty silně zesíťované materiály. Mezi těmito typy však existuje mnoho přechodných typů s různým typem větvení nebo zesíťování.

Tab. 1. Schematické znázornění uspořádání dlouhých makromolekulárních řetězců v různých polymerech a jejich vlastnosti. [3]

CHARAKTERISTIKA POLYMERU	VLASTNOSTI POLYMERU
<p>TERMOPLASTY</p>  <p>lineární makromol. řetězce</p> <p>rozvětvené makromol. řetězce</p>	<p>tavitelný</p> <p>rozpustný v rozpouštědlech</p> <p>při pokojové teplotě houževnatý nebo křehký</p>
<p>ELASTOMERY</p>  <p>řídce zesíťovaný</p>	<p>netavitelný</p> <p>botnající v rozpouštědlech</p> <p>nerozpustný v rozpouštědlech</p> <p>při pokojové teplotě elastický a měkký</p>
<p>TERMOSETY</p>  <p>hustě zesíťovaný</p>	<p>netavitelný</p> <p>nebotnající</p> <p>nerozpustný</p> <p>při pokojové teplotě tvrdý a křehký</p>

Výraz plast se obvykle používá pro všechny polymery, které nejsou elastomery nebo vlákny. V technologickém významu se pak plastem rozumí i směs obsahující jeden nebo více polymerů spolu s plnivý, změkčovadly, mazivy, barvivy, atd. [4]

1.3.2 Rozdělení podle ČSN

Česká názvoslovná norma z roku 1976 rozděluje polymery na tvrdé a pevné plasty a měkké elastické kaučuky. Toto rozlišení je ovšem vázáno na pokojovou teplotu, resp. na rozdíl mezi teplotou skelného přechodu určitého materiálu a pokojovou teplotou:

- elastomery – kaučuky se vyznačují tím, že jejich deformace je vratná (obnovují svůj původní tvar a rozměry, které měly před deformací malým napětím),

- plastomery – plasty jsou polymery, jejichž deformace je nevratná (zůstávají deformovány i když deformující napětí přestane působit).

Názvoslovná norma též rozlišuje dvě velké skupiny plastů: termoplasty a reaktoplasty. [4]

1.3.3 Termoplasty

Termoplasty jsou složeny z jednotlivých makromolekul, které jsou vzájemně poutány jen fyzikálními vazbami (molekuly jsou k sobě přitahovány mezimolekulárními silami). Proto při zvýšené teplotě postupně měknou a přecházejí do taveniny, při následném ochlazení tvrdnou a mohou být několikrát opětovně použity, jedná se tedy o materiály tvárné teplem.

Během vstřikovacího procesu za působení tlaku a teploty dojde v termoplastech k uvolnění mezimolekulárních sil, molekuly se volně pohybují a mění své vzájemné pozice, nastává tečení termoplastu. Během fáze dotlaku a chlazení jsou molekuly ochlazovány ve svých nových lokacích. Mezimolekulární vazby jsou znovu obnoveny, tentokrát však v novém tvaru výstřiku.

Termoplasty jsou ideální pro opětovné použití právě díky jejich schopnosti přetvoření vazeb mnohokrát za sebou. Nevýhodou je chemická rozpustnost těchto materiálů.

Termoplasty se mohou dělit také podle toho, jestli jsou amorfní nebo semikrystalické:

- amorfní termoplasty mají náhodnou nepravidelnou molekulární strukturu. Protože amorfní termoplasty neobsahují žádné krystaly, které zabraňují průchodu světla, jsou většinou transparentní (pokud ovšem neobsahují plniva nebo jiné materiály, které nepropouští světlo);
- semikrystalické termoplasty obsahují místa pravidelné struktury, kde jsou makromolekuly formovány v krystaly. V závislosti na chemické struktuře polymerů, geometrické stavbě řetězců a termodynamických podmínkách krystalizace může krystalický polymer dosáhnout většího či menšího stupně krystalického uspořádání (stupně krystalinity), který je rozhodující pro mechanické a jiné vlastnosti.

Lineární polymery se sklonem k samovolné krystalizaci jsou vláknotvorné, filmotvorné s velkou pevností a houževnatostí, přičemž se vzrůstajícím stupněm krystalinity stoupá jejich modul pružnosti, klesá sklon k tečení a snižuje se houževnatost. Polymery

s trojrozměrnou strukturou nevytvářejí krystalickou strukturu vůbec pro jejich tuhou prostorovou síť zabraňující volnému pohybu jednotlivých segmentů makromolekul.

Při krystalizaci polymerů obvykle dochází k tvorbě sférolitů, které v závislosti na molekulární struktuře řetězců a na krystalizačních podmínkách dosahují různé velikosti od 0,001 do několika mm. Sférolity jsou komplexní anizotropní polykrystalické útvary složené z lamelárních, páskových nebo fibrilárních krystalů. Bývají navzájem odděleny většími či menšími oblastmi méně uspořádaného nebo amorfního polymeru. Protože makromolekuly jsou různě zapleteny, nemůže dojít ke kompletní krystalizaci. Některé termoplasty krystalizují rychle, jiné pomalu a tak je nadmolekulární struktura ovlivněna rychlostí ochlazování během tvarovacího procesu. Proto tok taveniny a teplota ve výstřiku ovlivňují nadmolekulární strukturu výrobku, což se výrazně odrazí v jeho konečných vlastnostech. Rovnoměrnost a velikost sférolitů ovlivňuje významným způsobem užitkové vlastnosti polymerů, např. houževnatost, odolnost proti opotřebení, kluzné vlastnosti, rozměrovou stálost apod.

Tab. 2. Vlastnosti amorfních a semikrystalických polymerů. [5]

Plast Vlastnost	Amorfní	Semikrystalický
Tání	Pozvolné	Ostrý bod tání
Optické vlastnosti	Obvykle transparentní	Obvykle neprůhledný a matný
Mechanické vlastnosti	Dobré	Velmi dobré
Hustota	Nižší	Vyšší
Pevnost a modul pružnosti v tahu	Nižší	Vyšší
Tažnost	Vyšší	Nižší
Odolnost proti tečení (creep)	Malá	Velká
Smrštění	Nižší	Vyšší
Rozměrová stabilita	Velká	Malá
Maximální teplotní použití	Nižší	Vyšší
Odolnost proti únavě materiálu	Malá	Velká
Chemická odolnost	Nižší	Vyšší
Schopnost spojování lepidly nebo rozpouštědly	Snadná (vysoká povrchová energie)	Obtížná (nízká povrch. energie)

1.3.4 Reaktoplasty

Makromolekuly reaktoplastů, na rozdíl od termoplastů, jsou propojeny do husté souvislé sítě, takže s růstem teploty se nemohou roztavit a obvykle ještě zvyšují svoji tuhost a tvrdost (proto se jim také dříve říkalo termosety). Při dostatečně vysoké teplotě pak reaktoplasty degradují nebo dokonce i hoří.

Během vstřikovacího procesu reaktoplasty nejprve teplem měknou, účinkem tlaku pak vyplňují prostor formy a dostávají její tvar. Důsledkem probíhajících chemických reakcí, kdy dochází k zesíťování molekulárních řetězců, je reaktoplast vytvrzován a přechází v tuhý netavitelný výrobek. Reaktoplasty jsou tedy teplem tvrditelné.

1.3.5 Elastomery

Elastomery jsou takové polymery, u nichž převažuje viskoelastické chování ve značném rozsahu teplot. Mezimolekulární síly a zábrany volné rotace jsou tak nízké, že i při pokojové teplotě je rotace kolem primárních vazeb prakticky volná a řetězce mohou zaujímat statisticky nejpravděpodobnější sbalenou konformaci. Při protahování jsou schopné velkých deformací (500 – 1000%), přičemž modul je velmi nízký ($\sim 10^1$ MPa). Je zřejmé, že polymer musí být amorfní s vysoce ohebnými řetězci a mít nízkou hodnotu T_g . Aby elastická deformace byla rychle vratná, je nutné řídké zesíťování polymerních řetězců. Původně nízký modul musí při vysokých deformacích vzrůst, jinak by elastomery neměly mechanickou pevnost. Toto zaručuje zesíťování, krystalizace při vysokých protaženích a eventuálně přítomnost aktivních plniv. Podle nejznámějšího elastomeru, přírodního kaučuku, se elastomery často nazývají souborným názvem kaučuky. Přírodní kaučuk (cis-1,4-polyisopren) se získává z latexu kaučukovníku *Hevea Brasiliensis*.

Pro elastomery je společná schopnost vulkanizace, tj. řídkého, případně i hustého síťování řetězců. Tím se docílí především zamezení viskózního toku, protože zesíťované makromolekuly jsou chemickými příčnými vazbami fixovány na stejném místě v polymerní hmotě a nemohou měnit těžiště. To vede k rozměrové stabilitě výrobku ve značném rozsahu teplot (teoreticky je výrobek jediná obří molekula).

Existuje velké množství druhů kaučuků, mezi nejznámější je možno zařadit: přírodní kaučuk, polybutadienový kaučuk, butadien-styrenový kaučuk, nitrilové kaučuky, izoprenový

kaučuk, chloroprenový kaučuk, butylkaučuk, ethylenpropylenový kaučuk, silikonový kaučuk, polysulfidový kaučuk, polyuretanové kaučuky, fluorkaučuky a další.

Mechanické vlastnosti jako jsou pevnost v tahu a tažnost se u nevulkanizovaných kaučuků silně mění s teplotou, zatímco u vulkanizovaných kaučuků jsou tyto změny podstatně menší.

Vulkanizací se převede směs kaučuku s přísadami na pryž. V měkké pryži připadá na jeden spojovací můstek na 100 – 200 monomerních jednotek. Tento zásah do struktury se navenek projeví těmito znaky:

- kaučuk se převede ze stavu převážně plastického do stavu převážně elastického,
- nevulkanizovaný kaučuk je rozpustný v některých rozpouštědlech, vulkanizovaný jen botná,
- vulkanizací se kaučuk stává méně citlivý ke změnám teploty, zachovává si ohebnost a tuhost ve značném teplotním rozsahu.

Pro vulkanizované kaučuky, u nichž je zesíťování provedeno jen velmi řídkce, jsou charakteristické tyto vlastnosti: velká elasticita, schopnost zadržet značné množství energie, odolnost proti opakovaným deformacím, houževnatost a dobrá odolnost proti opotřebení, relativně malá propustnost pro vodu a plyny, značná chemická odolnost, dobré elektroizolační vlastnosti, malá závislost vlastností na teplotě.

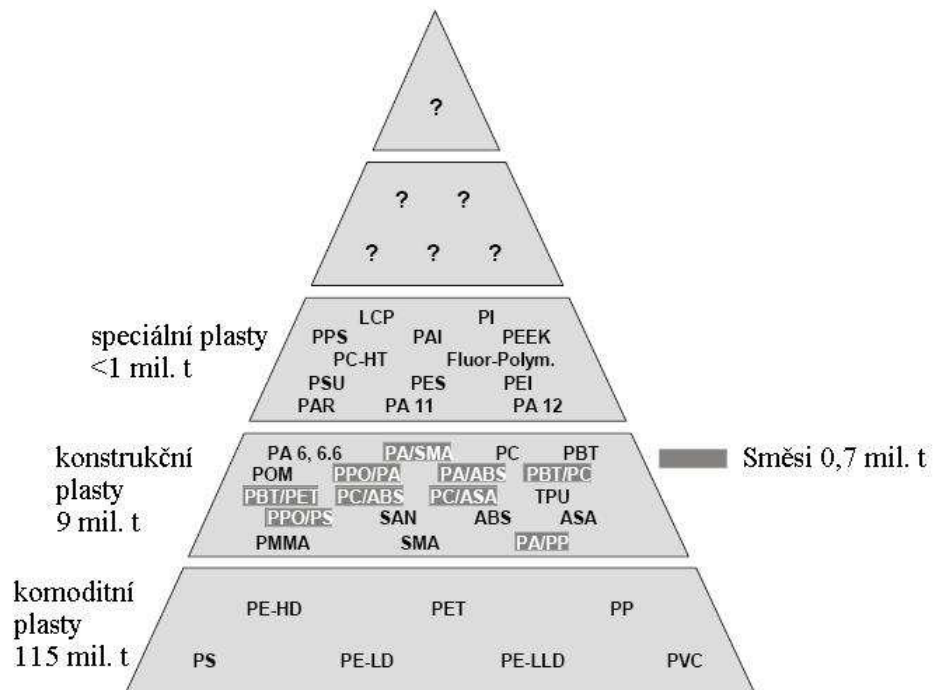
Vlastnosti vulkanizátů je možno měnit složením kaučukové směsi ve velmi širokém rozsahu. Mezi nejdůležitějšími přísadami hrají hlavní roli tzv. aktivní plniva. Při jejich přidávku do kaučukové směsi se výrazně zlepší pevnost v tahu, strukturální pevnost, odolnost proti opotřebení a další vlastnosti. Vulkanizuje se nejčastěji sírou (u běžných kaučuků) a přidává se jí 1-3% na kaučuk. Přidá-li se 30-35% na kaučuk, získávají se produkty velmi hustě zesíťované, podobně jako termosety, jimž jsou svými vlastnostmi blízké. Nazývají se tvrdá pryž. Jsou to tvrdé neelastické hmoty, které se při překročení meze pevnosti tříští. Dají se zpracovávat obráběním. Vulkanizuje se zpravidla až po vytvoření výrobku.

1.3.6 Rozdělení podle postavení na trhu

Ještě jiná možnost klasifikace polymerních materiálů vychází z jejich postavení na trhu. Podle toho se rozlišují tři velké třídy polymerů:

- tzv. komoditní plasty představují největší objem výroby i spotřeby, ale současně jsou ze všech polymerů nejlevnější. Do této třídy patří v podstatě jen čtyři základní skupiny polymerů a sice polyethyleny, izotaktický polypropylen včetně svých modifikací a kopolymerů, polystyren a polyvinylchlorid;
- konstrukční plasty jsou proti komoditním zřetelně dražší, ale nabízejí mnohem lepší užité vlastnosti a často také zřetelně vyšší teplotní odolnost. Do této třídy patří polyamidy, kopolymery ABS, polyethyltereftalát (PET) a různé kompozity a směsi;
- speciální polymery nabízejí unikátní užité vlastnosti, ale jsou velmi drahé. Sem patří polysulfony, polyimidy, polyether-ether-keton (PEEK), kapalně krystalické polymery a materiály pro lékařské aplikace. [4]

Tyto tři velké třídy polymerních materiálů lze sestavit do schematické pyramidy (Obr. 4).



Obr. 4. Světová spotřeba termoplastů (cca 125 mil. t / 1998). [3]

1.3.7 Rozdělení podle nevhodnějšího použití

Rozdělení plastů podle nevhodnějšího použití je následující:

- plasty používané na výrobu běžných spotřebních předmětů různé tuhosti včetně konstrukčních dílů, mohou mít různou strukturu – krystalické, amorfnní, lineární i zesíťované polymery;
- elastomerní kaučuky k výrobě vysoce elastických předmětů v teplotním rozsahu -80 až +140°C. Kaučukovité látky v nevulkanizovaném stavu mají zpravidla lineární nebo mírně rozvětvenou a značně nepravidelnou strukturu, která je právě příčinou toho, že elastická deformace těchto látek je možná ve velké teplotní oblasti;
- materiály vláknotvorné, které mají přísně lineární strukturu, bývají krystalické, mají velkou pevnost a v orientovaném stavu mají vysokou anizotropii vlastností;
- polymery pro výrobu nátěrových hmot, jde o přechod mezi kaučuky a plastomery;
- polymery pro speciální účely. [1]

1.4 Zpracovatelnost polymerů

Zpracovatelnost polymerů je především ovlivněna:

- polymerními přísadami,
- šarží polymeru,
- navlhavostí polymeru,
- molekulární homogenitou, která je určena distribuční křivkou,
- nadmolekulární homogenitou (pravidelnost krystalické struktury ve výstřiku).

1.5 Přísady do polymerů

Polymery jsou zřídka používány samotně, ale za účelem zlepšení vlastností se do nich přidávají různé přísady. Pojem přísady zahrnuje látky, které jsou dispergovány v polymerní matrici a ovlivňují fyzikální strukturu polymeru (obzvláště jeho morfologii) a tím i jeho chování při zpracovatelském procesu a výsledné vlastnosti výrobků (viz Tab. 3). O účinku, resp. účinnosti jednotlivých přísad rozhoduje kromě jejich vlastností a poměrného zastoupení v polymerní směsi především stupeň jejich rozptýlení. Přísady se rozdělují podle svého účinku na základní vlastnosti polymerů na:

- přísady modifikující fyzikální vlastnosti polymerů (změkčovadla, maziva a separační činidla, vysokomolekulární modifikátory, plniva, výztuže a vazebné prostředky, pigmenty a optické zjasňovací látky, nadouvadla, antistatika a síťovací prostředky),
- přísady mající ochranný účinek vůči degradačním procesům (stabilizátory termooxidace, tj. antioxidanty, tepelné stabilizátory, světelné stabilizátory, zhášedla a biocidní látky). [6]

Tab. 3. Možnosti zlepšení vlastností polymerů přísadami. [7]

Požadovaná vlastnost	Potřebná přísada
<i>Při zpracování</i>	
optimální a konstantní viskozita taveniny (výkon, používání nižších teplot)	maziva, stabilizátory, změkčovadla
odolnost proti degradaci při teplotě zpracování	tepelné stabilizátory, antioxidanty
dobré a ekonomické vmíchání přísad do polymerů	změkčovadla, dispergační činidla
zabránění nalepování polymeru na stěny forem (ulehčení vybírání)	maziva, separační činidla
zabránění obroušení zařízení	maziva
dobrá manipulace s výrobky (další zpracování)	kluzná a protikluzná činidla, antiblokovací činidla
<i>Při používání</i>	
optické a povrchové vlastnosti (vzhled, lesk, barva, průhlednost, hladkost, malá špinivost, elektrická vodivost)	plniva, barviva, nukleační činidla, změkčovadla, antistatika, stabilizátory, antiblokovací činidla, optické zjasňovače
mechanické vlastnosti (tvrdost, pevnost v tahu a ohybu, modul pružnosti, odolnost proti únavě, tvarová a rozměrová stálost, odolnost proti otěru, rázová houževnatost)	plniva a výztuže, změkčovadla, síťovací a vytvrzovací činidla (často se tyto vlastnosti modifikují vhodnými polymery)
odolnost proti degradaci (tepelné, světelné, biochemické a chemické)	antioxidanty, světelné stabilizátory, pigmenty, vhodná plniva, biocidy
regulovaná degradace (urychlená degradace)	stabilizátory, degradační činidla
odolnost proti hoření a tvorbě dýmu	retardéry hoření, anorganické plniva
nižší hmotnost a nižší cena	nadouvadla a plniva

2 VLASTNOSTI A CHOVÁNÍ POLYMERŮ

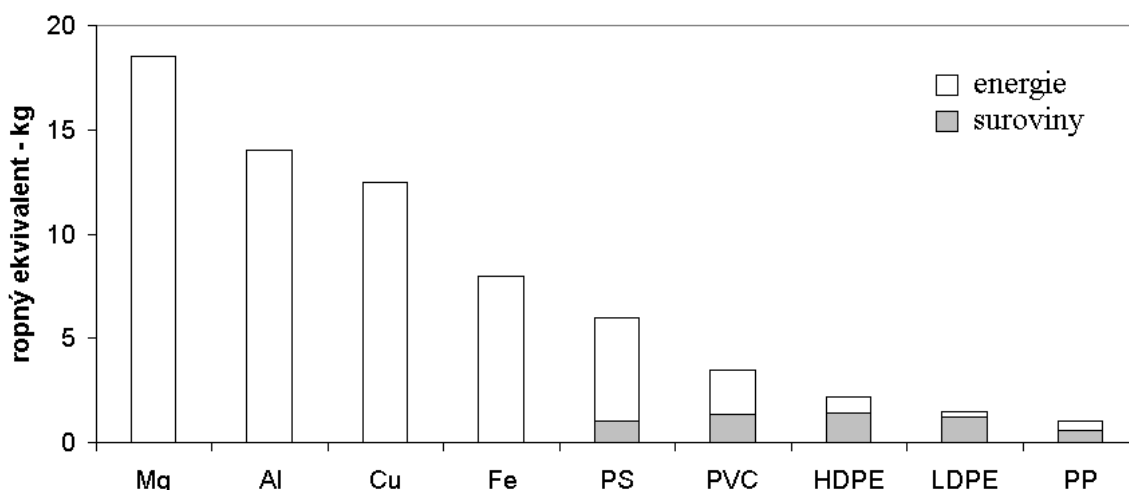
2.1 Základní vlastnosti

Velká hospodářská významnost plastů je úzce spjata s jejich vlastnostmi. Základní vlastností plastů je jejich rozmanitost. Jednotlivé vlastnosti můžou být široce měněny a kombinovány takovým způsobem, že dosáhnou různorodosti, která je nevídaná u jiných skupin materiálů.

Typické vlastnosti jsou:

- rozmezí hustoty ($0,8 - 2,2 \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) – plasty s takovou hustotou jsou lehčí než kovové nebo keramické materiály. Spolu s jejich poměrně vysokou mechanickou pevností z nich dělá tato vlastnost jedny z nejžádanějších lehkých materiálů;
- široký rozsah mechanických vlastností – mechanické vlastnosti mají velké rozpětí. Pevnost v tahu a Youngův modul pružnosti dosahují rozličných hodnot, ale všeobecně jsou mnohem menší než u kovů. Výjimkou jsou sklolamináty, které dosahují podobných hodnot jako klasický lehký materiál – hliník;
- jednoduché zpracovatelské vlastnosti – plasty jsou velmi jednoduchý materiál ke zpracování. Zpracovatelské teploty jsou pod 400°C s odpovídající nízkou spotřebou energie. Zpracovatelské operace mohou být snadno automatizovány (obzvláště vstřikovací proces), což vede k vysoké produkci. Významná je také volnost v navrhování forem, která umožňuje výrobu komplikovaných dílů bez drahých a časově náročných dokončovacích operací;
- schopnost změny vlastností přísadami – mechanické a fyzikální chování plastů se dá jednoduše ovlivňovat přidanými přísadami;
- nízká tepelná a elektrická vodivost – protože plasty mají až 300krát menší tepelnou vodivost než kovy, patří mezi významné tepelně-izolační materiály. Nicméně nevýhodou se tu stává nezbytnost dlouhých chladicích časů při vstřikování. Nízká elektrická vodivost dělá z těchto materiálů dobré elektrické izolanty. Elektricky vodivé plasty se mohou vyrábět s přísadou (např. sazí);
- transparentnost – některé plasty jsou také průhledné, proto jsou ideální na výrobu kontaktních čoček, kompaktních disků apod. Jsou mnohem snadněji zpracovatelnější než sklo, ale přitom mají srovnatelné optické vlastnosti a lepší houževnatost;

- dobrá chemická odolnost – plasty nejsou tak náchylné ke korozi jako kovy. Jsou odolné vůči velkému množství chemických sloučenin, už jen tato vlastnost je tak rozšířila na trhu. Pro příklad je možno zmínit plasty odolné palivům v automobilových dílech nebo domácí prostředky a plasty pro balení jídla a kosmetiky. Nicméně plasty jsou rozpustné v organických rozpouštědlech, proto při každé plánované aplikaci plastu a daného kontaktního média musí být vše řádně zváženo;
- recyklovatelnost – plasty se dají znovu použít. Můžou být recyklovány mnoha metodami;
- nízká spotřeba energie při výrobě surovin – výroba surovin pro plasty vyžaduje velmi málo energie. Obr. 5 ukazuje relativní spotřebu energie na výrobu různých kovů ve srovnání s některými plasty. Je evidentní, že většina plastů spotřebuje méně než 25% energie, kterou spotřebují klasické kovové materiály. [8]

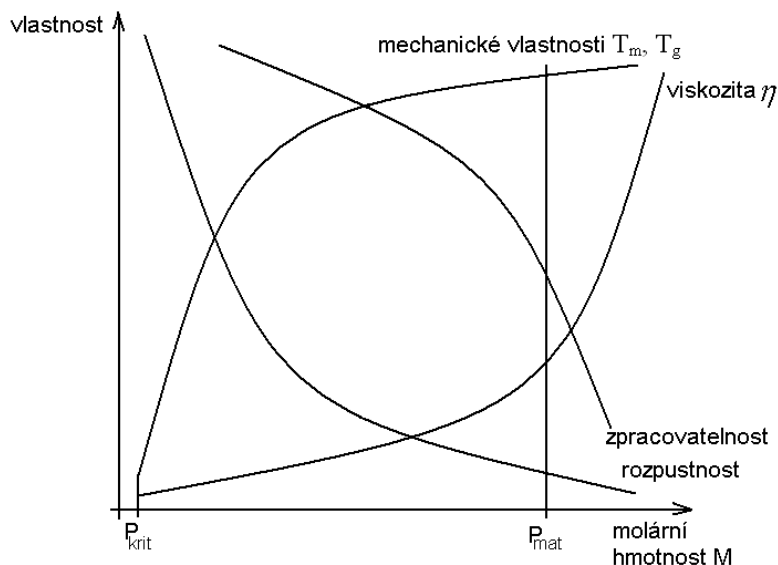


Obr. 5. Energetická spotřeba pro výrobu různých druhů materiálu. [5]

Plasty se staly surovinovou základnou téměř pro všechna průmyslová odvětví. V některých oblastech jsou díky svým specifickým vlastnostem nenahraditelné. Mezi nejdůležitější oblasti patří např. automobilový a letecký průmysl, elektrotechnika, zdravotnictví apod.

2.2 Molární hmotnost a vlastnosti polymerů

Celá řada fyzikálních a mechanických vlastností polymerů výrazně závisí na molární hmotnosti (Obr. 6).



Obr. 6. Závislost některých vlastností polymerů na P . [2]

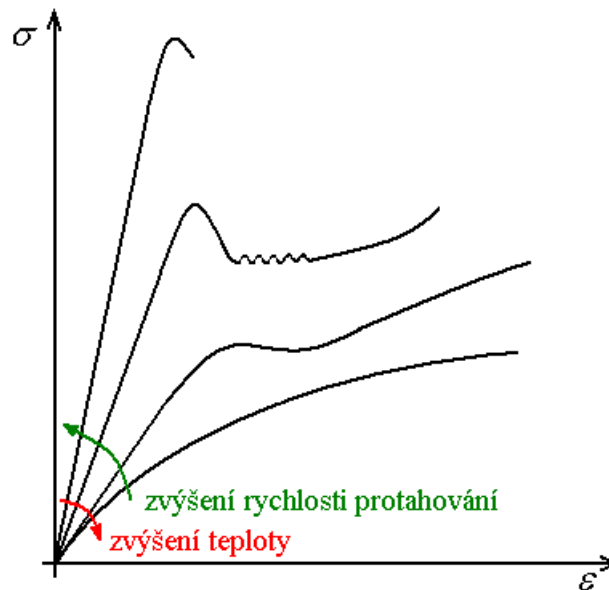
Tak např. některé užité mechanické a termické vlastnosti polymerů začínají až od určité hodnoty polymeračního stupně P , která je pro různé polymery rozdílná a pak se s rostoucím P zlepšují jen zvolna. Naproti tomu tokové vlastnosti se prudce zhoršují s rostoucím polymeračním stupněm. Proto mají v praxi používané polymery polymerační stupeň P takový, který představuje kompromis mezi dobrými mechanickými vlastnostmi a snadnou zpracovatelností. [9]

2.3 Mechanické vlastnosti polymerů

Mechanické vlastnosti polymerů závisí ve velkém rozsahu na krystalinitě, teplotách T_g a T_m , na stupni větvení a zesíťování. Základní mechanické veličiny polymerů jsou zjišťovány z tahové zkoušky závislosti napětí na deformaci:

- Youngův modul pružnosti E (pro běžné typy plastů řádově 1 GPa),
- pevnost v tahu (řádově 20MPa),
- tažnost,
- deformace: – elastická – dokonale vratná deformace,
 - viskoelastická – časově závislá vratná deformace,
 - plastická – časově nezávislá, dokonale nevratná deformace.

Na průběh tahové zkoušky má vliv kromě tvaru a rozměru zkušebního tělesa také rychlost protahování a teplota (Obr. 7). Polymery je nutno také zkoušet z hlediska jejich dlouhodobých vlastností, protože plasty zatížené konstantním napětím mají po určité době sklon k tečení materiálu (tzv. creep), kdy deformace roste s časem. Pro konstruování s plasty je potom potřeba znát nejen výše uvedené veličiny, ale také modul v ohybu, pevnost v tlaku, rázovou houževnatost aj. [3]

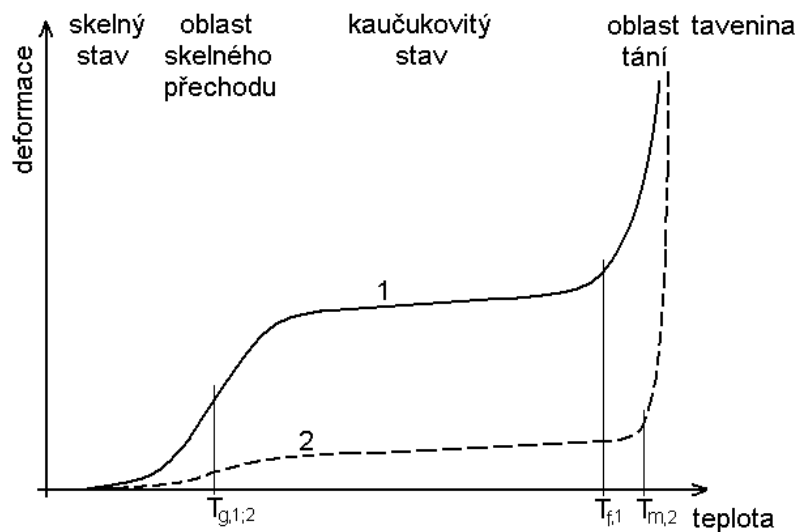


Obr. 7. Deformační křivka. [10]

2.4 Termomechanické chování polymerů

Polymery jsou charakterizovány mnoha termomechanickými fázovými stavy a přeměnami. Každý polymer má určité teplotní intervaly, ve kterých vykazuje zřetelně odlišné mechanické vlastnosti. Diagram závislosti deformace na teplotě – termomechanická křivka (Obr. 8) znázorňuje pět oblastí viskoelastivity:

- skelný stav,
- oblast skelného přechodu,
- kaučukovitý stav,
- oblast tání,
- tavenina.



Obr. 8. Termomechanická křivka amorfního (1) a semikrystalického (2) polymeru. [11]

Z hlediska chování za různých teplot lze amorfní polymer charakterizovat teplotou skelného přechodu T_g a teplotou tečení T_f (tyto teploty nemají ostrý přechod), semikrystalický polymer pak teplotou T_g a teplotou tání T_m . Teplota T_g vymezuje skelný stav polymeru, v této oblasti skelného přechodu nastává poměrně náhlá změna mechanických, optických a tepelných vlastností. Polymer je v této oblasti tvrdý a křehký, chová se jako organické sklo. Využití amorfních polymerů spadá právě do této skelné oblasti. Mezi teplotou T_g a T_m (T_f) se polymer nachází v kačukovitém (viskoelastickém) stavu, tato teplotní oblast je charakteristická při využívání semikrystalických polymerů v praxi. Za teplotami T_m (T_f) pak polymer přechází v taveninu.

Tab. 4. Charakteristické teploty vybraných polymerů. [3]

Polymer	T_g [°C]	T_m [°C]	Zpracovatelské teploty
HDPE	-100	135	160 – 240
LDPE	-100	110	160 – 240
PP	-15	165	180 – 240
PVC	80	240	170 – 200
PS	100	-	180 – 240
Kaučuk	-70	35	90 – 110
PET	70	265	275 – 290
PA6	40	220	230 – 260

2.5 Reologické chování polymerů

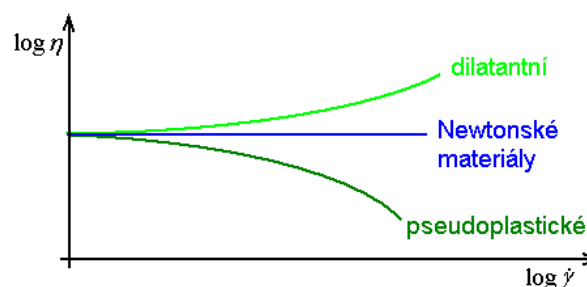
Vědní obor reologie se zabývá deformací a tokem látek. Chování taveniny při jejím tečení a znalost reologických vlastností jsou důležité informace nejen pro zvolení vhodného materiálu do procesu, kontrolu požadovaných vlastností materiálu a kontrolu průběhu procesu, ale také pro navrhování strojních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

Reologické chování polymerní taveniny je viskoelastické. Znamená to, že polymerní tavenina se chová viskózně (jako kapalina), ale také elasticky (jako tuhá látka). Pro popis viskoelastického chování polymerní taveniny slouží Maxwellův model, jedná se o mechanický model sériového zapojení pružiny a pístu, který dobře popisuje některé charakteristické veličiny viskoelastického chování. Ve většině případů však dominují u polymerních tavenin viskózní vlastnosti.

Tyto viskózní vlastnosti jsou charakterizovány viskozitou, což je míra odporu taveniny proti tečení. Prakticky se viskozita měří rotačními nebo kapilárními viskozimetry. Při toku taveniny do dutiny formy během vstřikování se tavenina lepí na přilehlý povrch a dochází tak ke smykovému toku (jednotlivé vrstvy taveniny se po sobě smýkají). Mezi základní charakteristiky smykového toku patří smyková viskozita η , rychlost smykové deformace $\dot{\gamma}$, normálové napětí σ a smykové napětí $\tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma}$.

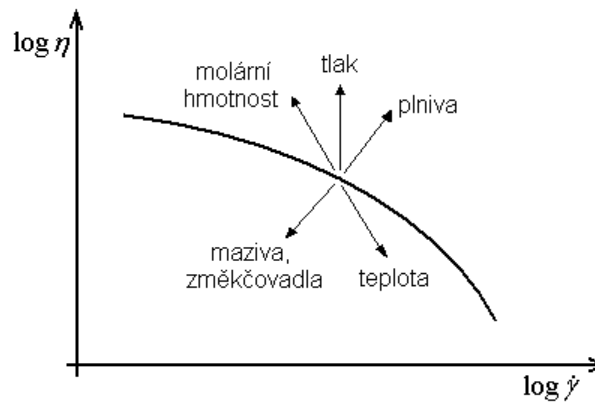
Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace popisuje toková křivka (Obr. 9), podle jejíhož tvaru se materiály rozdělují do tří základních skupin:

- dilatantní – viskozita roste s rychlostí smykové deformace (vysoce plněné materiály),
- Newtonské – viskozita zůstává konstantní (např. voda),
- pseudoplastické – viskozita klesá s rychlostí smykové deformace (většina plastů).



Obr. 9. Tokové křivky různých materiálů.

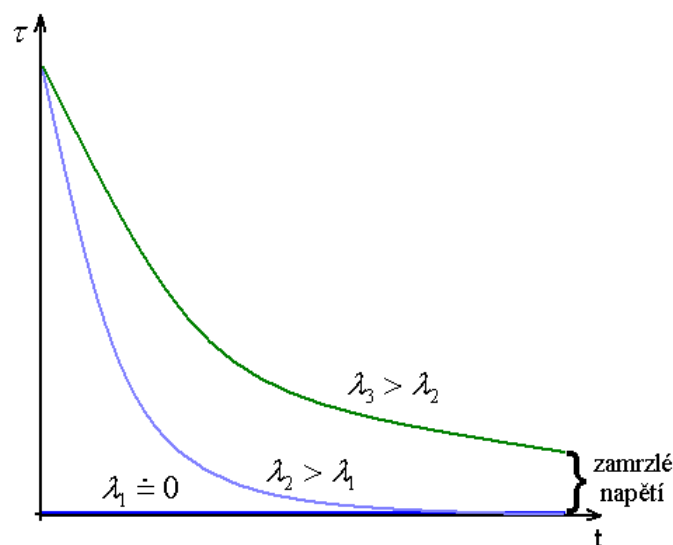
Na dalším obrázku (Obr. 10) je pak znázorněn vliv různých parametrů na tokové vlastnosti polymeru.



Obr. 10. Toková křivka v závislosti na různých parametrech. [5]

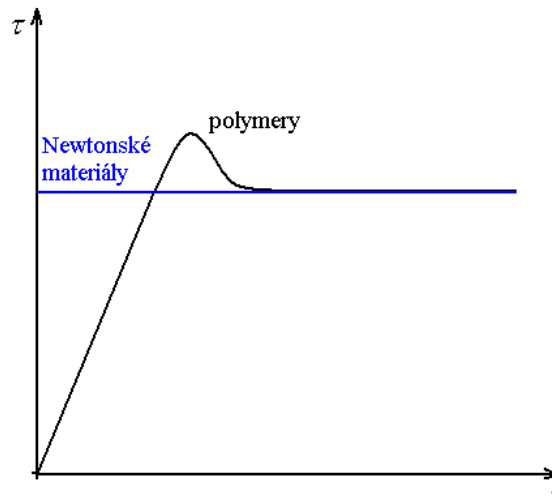
Pro další reologickou charakterizaci polymerů je obvykle potřeba znát elongační viskozitu (odpor taveniny proti protahování), skluz na stěně, rozdíl normálových napětí, relaxační čas, překmit napětí a další.

Má-li materiál dlouhé doby relaxace λ , je možné, že během zpracování ztuhne dříve, než napětí úplně zrelaxovalo (Obr. 11). Tato zamrzlá napětí mohou být nakonec uvolněna a mohou vést k jevům smrštění a (nežádoucí) deformaci nebo předčasnému vzniku trhlin a stárnutí.



Obr. 11. Relaxace napětí.

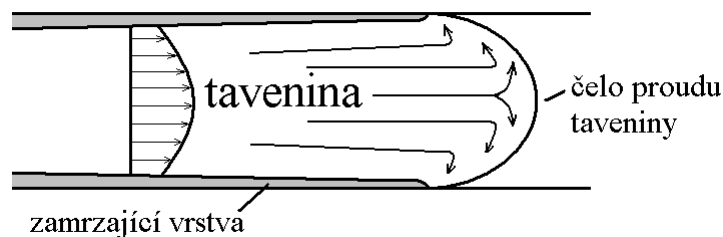
Překmit napětí je třeba znát kdykoliv se jedná o diskontinuální proces. Jak je patrné z obrázku (Obr. 12), při zahájení toku dosáhnou Newtonské materiály úrovně vyvozeného napětí okamžitě, zatímco polymerní kapaliny vykazují překmit napětí, který je výsledkem ustalování rovnováhy mezi zapleteninami polymerních řetězců.



Obr. 12. Překmit napětí.

2.6 Tok taveniny ve formě

Při zaplňování dutiny formy nenastává skluz taveniny po stěně, ale dochází k „valení“ taveniny. Tento laminární tok je také označován jako fontánový tok (Obr. 13).



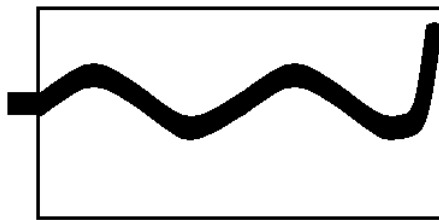
Obr. 13. Zaplňování dutiny formy taveninou. [3]

Tavenina uprostřed kanálu nejprve zpomalí jakmile dosáhne čela proudu taveniny a následně se začne pohybovat kolmo ke stěně vtokového kanálu. Tato stěna je chladná a tak je za postupujícím čelem proudu taveniny formována zamrzající vrstva. Jednotlivé částice taveniny jsou natahovány jak se postupně pohybují ze středu taveninového proudu ke stěně kanálu (elongační tok).

Biaxiální orientace (způsobená kombinací smykového a elongačního toku) při fontánovém toku vede ke vzniku anizotropních vlastností. Tato orientace je velmi žádaná u polymerů plněných skleněnými vlákny.

Problémem, který může výrazně ovlivnit kvalitu výstřiku je styk dvou proudů taveniny, např. v důsledku obtoku překážky ve dráze toku. V místě spojení dvou proudů taveniny vzniká studený spoj známý pod pojmem „weld line“, který má za následek zhoršení mechanických vlastností. Problém se obvykle řeší vhodným uspořádáním vtoků nebo jejich umístěním tak, aby studený spoj vznikl v místě ovlivňující funkci budoucího výrobku co nejméně (v místě nejmenšího mechanického namáhání). [3]

Pokud tavenina vykazuje nedostatečné narůstání k vytvoření kontaktu se stěnou formy, dojde k jevu zvanému „jetting“ – tryskový tok (Obr. 14). Je typickým jevem pro vysoce plněné materiály, protože mají sníženou elasticitu taveniny a tedy vykazují menší narůstání. Výsledkem je nekvalitní povrch a vytvoření několikanásobného počtu studených spojů vede ke snížení mechanických vlastností.



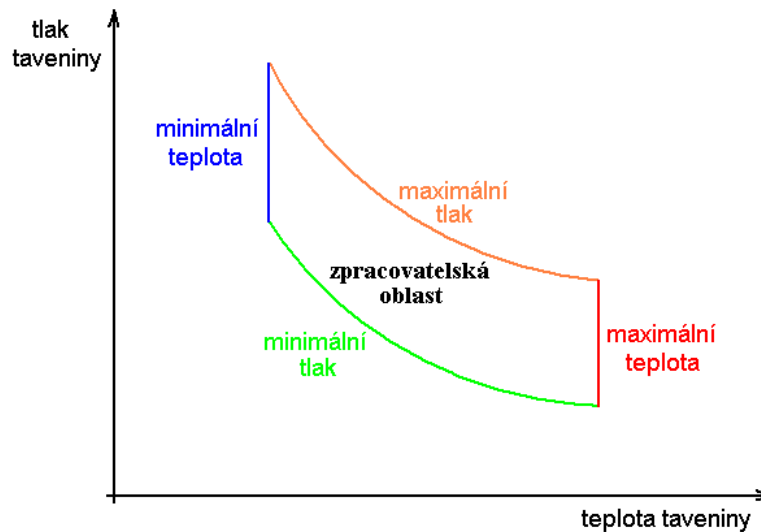
Obr. 14. Jev „jetting“.

2.7 Zpracovatelská oblast procesu vstřikování (Molding Area Diagram)

Tento diagram znázorněný na obrázku (Obr. 15) vymezuje oblast zpracovatelských podmínek vstřikovacího procesu z hlediska dvou faktorů:

- teploty taveniny: – pokud je teplota příliš nízká, dojde k rychlému zatuhnutí taveniny a nedostatečnému vyplnění dutiny formy,
– naopak při vysoké teplotě může dojít k degradaci polymerního materiálu,

- tlaku taveniny: – při použití příliš vysokého tlaku by mohlo dojít k otevření formy,
– při malém tlaku je forma nedostatečně vyplněna taveninou, mohou se vyskytnout staženiny apod.

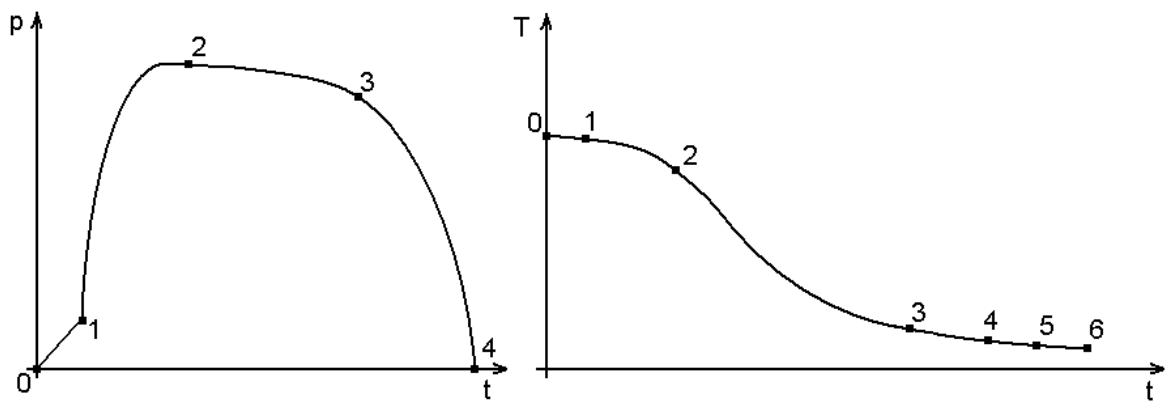


Obr. 15. Zpracovatelská oblast procesu vstřikování.

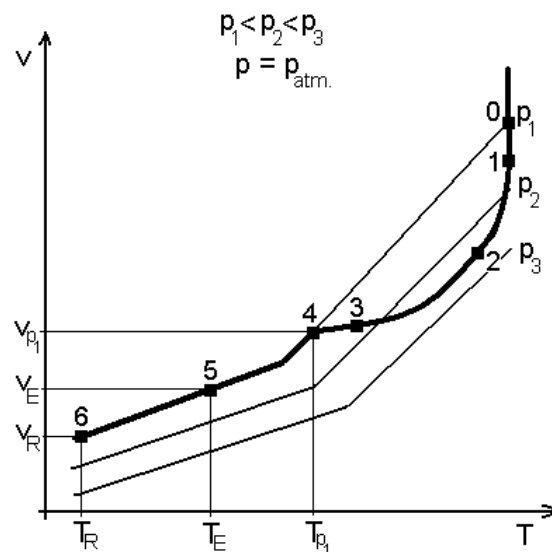
2.8 Tlak, teplota a měrný objem v průběhu vstřikování

Znalost termodynamických charakteristik polymerů jako jsou hustota, měrné teplo, tepelná a teplotní vodivost a zejména pVT diagram (závislost specifického objemu na teplotě při různých tlacích) umožňuje teoretické pochopení fyzikálních procesů probíhajících v dutině formy. To přispívá nejen k teoretickému objasnění procesu vstřikování, ale také k přesnějšímu nastavení optimálních podmínek vstřikovacího procesu.

Na obrázku (Obr. 16) je znázorněn průběh tlaku a teploty v závislosti na čase a na obrázku (Obr. 17) je zobrazena závislost specifického objemu na teplotě při různých tlacích během vstřikovacího procesu, kde index R značí pokojovou (Room) a index E vyhazovací (Ejection) teplotu.



Obr. 16. Průběh tlaku a teploty během procesu vstřikování. [3]



Obr. 17. Diagram $p-v-T$ během procesu vstřikování. [3]

Jednotlivé fáze vstřikovacího procesu pak jsou:

- 0 – 1: objemové plnění,
- 1 – 2: stlačování taveniny,
- 2 – 3: izobarické chlazení,
- 3 – 4: izochorické chlazení,
- 4 – 5: ochlazování na teplotu vyhazování,
- 5 – 6: ochlazování na pokojovou teplotu. [3]

3 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování patří mezi nejvýznamnější technologie v plastikářském průmyslu. Vstřikovací proces se vyznačuje složitými fyzikálními procesy, na kterém se podílí polymer, forma a vstřikovací stroj a touto metodou se v dnešní době vyrábí plastové výrobky téměř pro všechna odvětví lidské činnosti. Během vstřikovacího procesu je polymer ve vstřikovacím stroji nejdříve dopravován, taven a následně vstříknut do formy, odkud je zatuhnutý výrobek vyhozen. Tento nejdůležitější proces zpracování termoplastů je též využíván pro některé reaktoplasty a elastomery. Jedná se o cyklický proces.

Hlavní výhody vstřikování:

- přímá cesta ze suroviny v konečný výrobek,
- žádné nebo malé dokončovací operace,
- proces je plně automatizovaný,
- vysoká reprodukovatelnost,
- při velkovýrobě jsou nízké náklady na jeden kus výrobku.

3.1 Způsoby vstřikování

- intruzní (klasické) vstřikování – forma se uzavře, materiál se v plastikační jednotce roztaví a tavenina je vstříknuta do formy, po zaplnění dutiny působí dotlak, probíhá chlazení a výstřik je po zatuhnutí z formy vyhozen;
- vstřikování s dolisováním – tavenina je vstříknuta do polootevřené formy, následuje dolisování uzavřením formy. Dosahuje se vysokých přesností rozměrů, malého smrštění, deformace a vnitřního pnutí. Vhodné zejména pro tenkostěnné výrobky, výrobu kompaktních disků apod.;
- sendvičové vstřikování – pomocí dvou plastikačních jednotek jsou do jedné dutiny formy vstříknuty po sobě dva materiály. Z prvního materiálu tak vznikne povrchová vrstva výstřiku a z druhého pak jeho jádro. Vyrábí se hlavně výrobky, u kterých je možno použít recyklát nebo výrobky s určitými specifickými vlastnostmi;
- multikomponentní vstřikování – podstata multikomponentního vstřikování spočívá ve vstříknutí více druhů plastů nebo jejich barevných odstínů (vícebarevné vstřiko-

vání), přičemž během procesu je částečný výstřík z jednoho materiálu přesunut do další vstříkovací dutiny, kde je vstříknut další materiál, což samozřejmě vyžaduje více vstříkovacích jednotek připojených ke stroji. Přesunutí výstříku je nejčastěji realizováno na rotační formě nebo pomocí robotů;

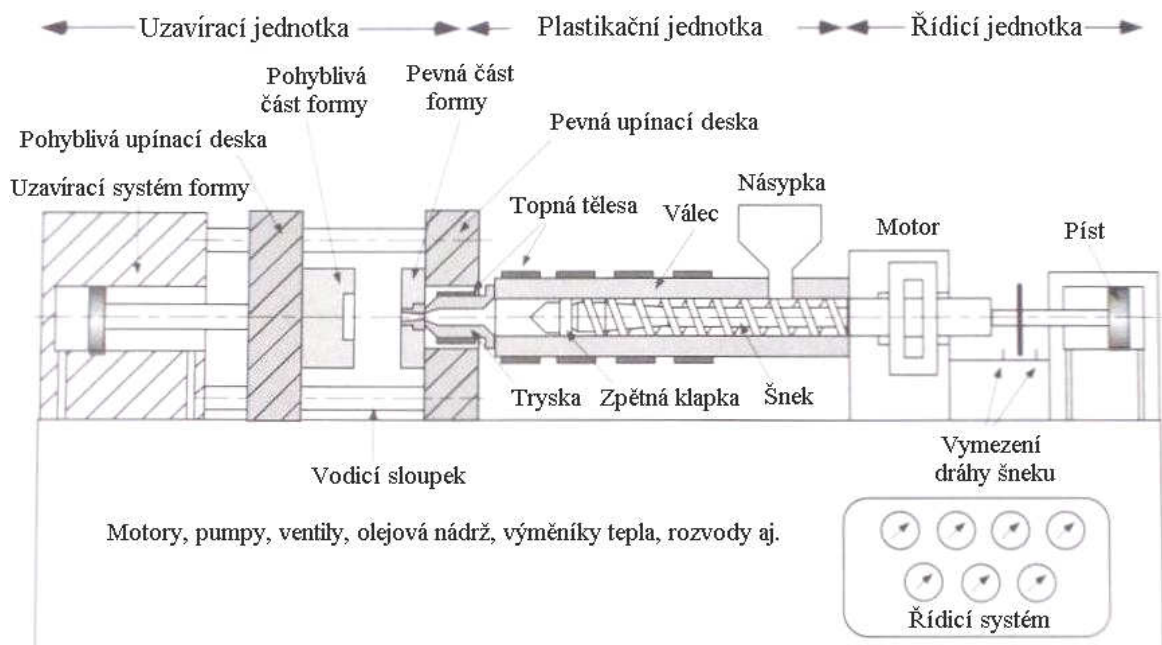
- intervalové vstříkování – je založeno na míchání dvou barevných materiálů v míchací trysce, kam ústí vstříkovací jednotky. Narozdíl od vícebarevného vstříkování dojde ke smíšení těchto barevných materiálů, nejsou tedy patrné hranice mezi odstíny;
- vstříkování pomocí plynu (GIT – Gas Injection Technology) – dutina formy se plní nejdříve polymerem a potom plynem, který nám ve výstříku vytvoří dutinu. Nejčastěji se používá vysoce čistý dusík. Zkrátí se tak vstříkovací cyklus, dochází k úspoře materiálu, zlepšení poměru hmotnost / tuhost a snížení uzavíracích sil. Jistou nevýhodou jsou velké pořizovací náklady, licenční poplatky a časté čištění plynového ventilu;
- vstříkování pomocí vody (WIT – Water Injection Technology) – oproti technologii GIT se po vstříknutí polymeru za účelem vytvoření dutiny vstříkne do taveniny voda a to buď tryskou nebo jehlou. Nakonec je voda vytlačena tlakovým vzduchem nebo odsáta zpět. Výhody jsou srovnatelné s metodou GIT a navíc lze vstříkování pomocí vody použít u takových dílců, kde nelze použít technologii GIT;
- práškové vstříkování (PIM – Powder Injection Molding) – vstříkování plastů s prášky na bázi kovů, skla nebo keramiky se používá k výrobě vysoce přesných dílů s výbornou kvalitou povrchu, kde se polymer používá pouze jako nosné pojivo. Podíl objemu plastu je v rozsahu 35 – 50%. Prášky jsou smíchány s plastem, vstříknuty do dutiny formy, po ochlazení je výrobek přenesen do pece k vypálení polymeru a následně jako poslední probíhá fáze spékání kovového nebo keramického prášku až při teplotě 2000°C;
- vstříkování reaktoplastů – narozdíl od vstříkování termoplastů je místo chlazení reaktoplast ve formě vyhříván na vytvrzovací teplotu, dochází tedy k vytvrzování reaktoplastu. Vstříkování reaktoplastů má oproti jejich lisování tyto výhody: automatický proces, žádný technologický odpad, menší vytvrzovací časy aj. Vstříkováním se v současné době vyrábí asi 30% reaktoplastů;

- vstřikování elastomerů – stejně jako reaktoplasty a termoplasty lze vstřikovat i elastomery. A stejně jako reaktoplasty jsou i elastomery vstřikovány při relativně nízkých teplotách do elektricky vyhřívaných forem. Při dodání tepla dochází k vulkanizaci a k vytvoření zesíťované struktury;
- vstřikování strukturních pěn – plasty pro výrobu strukturních pěn jsou nadouvány přídatkem 0,7 – 3% chemického nadouvadla nebo fyzikálně přídatkem uhlovodíků. Při vstřikování je objem zaplnění dutiny formy z 80 – 90% a plný objem výrobku vzniká v důsledku expanze plynu. Forma musí být dokonale odvzdušněna, aby nevznikaly povrchové propadliny. Oproti vstřikování termoplastů jsou chladicí doby mnohem delší v důsledku špatného přenosu tepla. Výrobky mají kompaktní povrchovou vrstvu a napěněné jádro;
- reakční vstřikování (RIM – Reaction Injection Molding) – reakční směs je vstříknuta do dutiny formy, kde proběhne polymerace materiálu s vytvrzením složek. Protože reakční směsi jsou nízkoviskózní materiály, je reakční vstřikování odlišné od klasické technologie vstřikování. Mezi výhody patří: nízké vstřikovací tlaky a tím také malé uzavírací síly spojené s možností výroby velkých dílů, díly jsou bez vnitřního pnutí, deformací a propadlin. Hlavní materiál pro tento typ vstřikování je polyurethan (PUR). Pořizovací a provozní náklady pro tuto technologii jsou levnější právě proto, že se pracuje s nižšími tlaky;
- hybridní technologie (technologie zastříkávání) – principem této technologie je nastříknutí taveniny na jiný materiál předem umístěný do dělicí roviny formy, dojde tak ke spojení těchto dvou materiálů a vzniku jednoho výrobku s lepšími vlastnostmi. Tavenina může být nastříknuta např. na potištěnou plastovou fólii (in-mold labeling) nebo na textílii (in-mold lamination), kov, keramiku aj. Vyrábí se tak výrobky s lepšími vzhledovými vlastnostmi nebo výrobky s vysokou kvalitou povrchu;
- střídavé (cyklické) vstřikování (MLFIM – Multi Live Feed Injection Molding) – tato technologie je založena na kontrolovaném tečení taveniny v dutině vstřikovací formy během plnění a fáze dotlaku. Při vstřikování dochází k promíchávání taveniny v dutině formy během jednoho cyklu, když předtím došlo k rozdělení taveniny plastů do dvou proudů, kdy jeden píst svůj proud dotlačuje a druhý vstřikuje, tak se cyklicky střídají, až v poslední fázi provádí dotlak oba písty najednou;

- tandemové vstřikování – při tomto typu vstřikování vstřikovací formu tvoří dvě protilehlé dutiny s výrobky, které jsou v přesně stanovených cyklech plněny, dotlačovány a chlazeny, stejně jako u klasického vstřikování, ale pomocí samostatných vstřikovacích jednotek. Princip je tedy založen na tom, že zatímco v jedné dutině probíhá proces otevření, vyhození výrobku a zavření formy, plnění a dotlaku, tak ve druhé dutině probíhá proces chlazení. Tato technologie tak v podstatě zkrátí vstřikovací cyklus na polovinu (vyrobí se dva výrobky během jednoho cyklu), což při velkosériové výrobě přináší značné ekonomické výhody. [12]

3.2 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj má za úkol nejprve převést tuhý materiál v taveninu, tuto taveninu dále dopravovat a vstříknout do dutiny formy, kde je zafixován tvar budoucího výrobku, který je na konci procesu z formy vyhozen. Vstřikovací stroj se skládá z uzavírací jednotky, plastikační jednotky a řídicí jednotky (Obr. 18).



Obr. 18. Schéma vstřikovacího stroje. [5]

3.2.1 Rozdělení vstřikovacích strojů

Podle konstrukce vstřikovacích jednotek rozdělujeme vstřikovací stroje na stroje bez předplastikace a s předplastikací:

- u strojů bez předplastikace se materiál plastikuje v tavné komoře (tavném válci) a do formy je vstřikován pístem, nebo se plastikuje i vstřikuje šnekem,
- vstřikovací stroje s předplastikací, používané pro velké výstřiky, mají plastikační jednotku oddělenou od vstřikovací. Polymerní směs je buď zplastikována v odděleném tavném válci nebo ve šnekovém vytlačovacím stroji, přetlačována do vstřikovacího válce a teprve potom pístem vstřikována do formy.

Šnekové vstřikovací stroje jsou z hlediska převodu tepla i toku polymerní směsi vyvážené a dovolují zpracovávat polymery, které se na pístových strojích vstřikovat nedají. [12]

3.2.2 Uzavírací jednotka

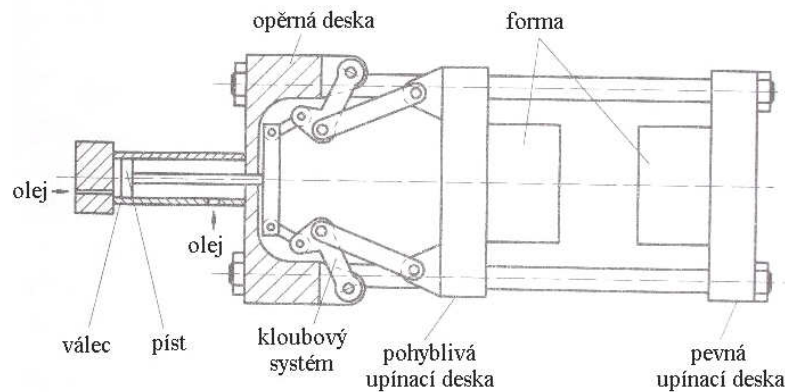
Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje:

- uzavírá formu,
- drží ji pevně zavřenou proti působícímu vstřikovacímu tlaku,
- otevírá formu pro vyhození výstřiku.

Uzavírací jednotka se skládá z těchto hlavních částí: opěrné desky pevně spojené s ložem stroje, pohyblivé desky, na kterou je upnuta pohyblivá část formy, pevné upínací desky s otvorem pro trysku stroje, na kterou se připevní nepohyblivá část vstřikovací formy, vedení pro pohyblivou desku, a také z uzavíracího a přidržovacího mechanismu.

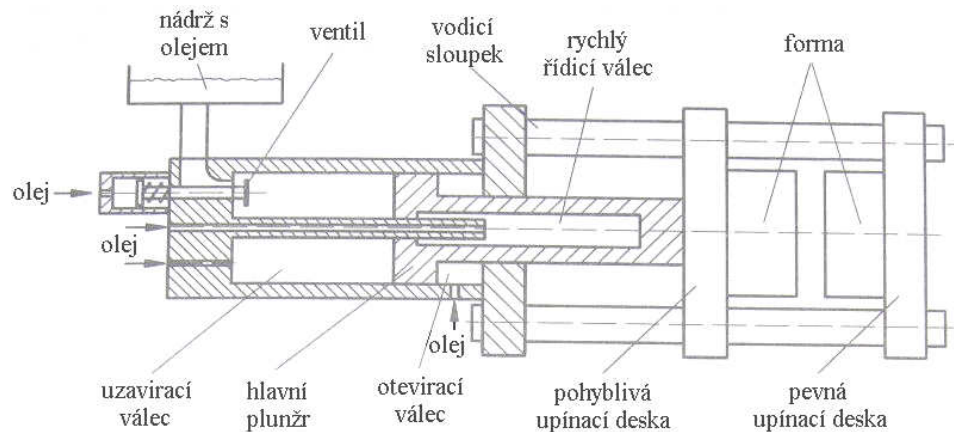
Existují tři hlavní typy uzavíracích jednotek:

- mechanické – mechanické uzavírání je často tvořeno kloubovým systémem s hydraulickým ovládním pro otevírání a zavírání. Jednoduchý kloubový systém se většinou používá u menších vstřikovacích strojů s uzavírací silou do 50t. Dvojitý kloubový systém se používá u strojů s uzavírací silou mezi 250 až 1000t. Kloubový uzavírací systém ve srovnání s hydraulickým umožňuje rychlejší otevírání a zavírání formy, je levnější, ale má kratší zdvih a větší opotřebení součástí. Podle způsobu návržení se může také jednat o samouzamykatelný systém;



Obr. 19. Schéma mechanického uzavíracího systému s pěti bodovou dvojitou kloubovou pákou s centrálním řídicím válcem. [8]

- hydraulické – u hydraulického systému slouží k otevírání a uzavírání formy hydraulický válec a píst. Tento systém je používán u většiny vstřikovacích strojů. Umožňuje kontrolu uzavírací síly a rychlost pohybu pístu stejně jako rychlé seřízení formy. Zdvih pístu může být jednoduše uzpůsoben, systém je nenáročný na údržbu. Mezi nevýhody patří hlavně vyšší pořizovací a provozní náklady a možnost úniku oleje;



Obr. 20. Schéma hydraulicko-mechanického uzavíracího systému. [8]

- hydraulicko – mechanické – tento systém uzavírání využívá kombinaci kloubového a hydraulického systému, což spojuje některé výhody obou systémů jako rychlé otevírání a zavírání formy a přesná kontrola uzavírací síly. U hydraulicko – mechanického systému píst nebo jiné zařízení provádí rychlé počáteční zavírání formy, zatímco hydraulický systém je využit až při konečném uzavření formy.

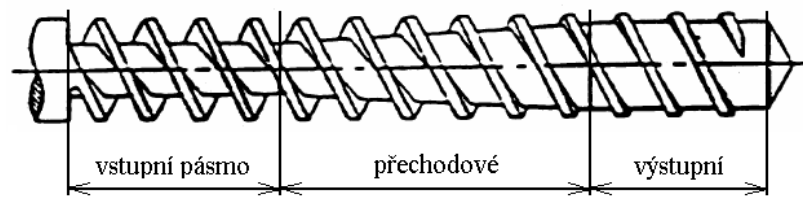
3.2.3 Plastikační jednotka

Plastikační jednotka zabezpečuje roztavení plastového materiálu a vstříknutí této taveniny do dutiny vstřikovací formy. Aby bylo možné vyrábět kvalitní shodné výstřiky, musí být do dutiny formy dopraveno konstantní množství plastikovaného materiálu stejné kvality při každém vstřikovacím cyklu. Proto musí plastikační jednotka produkovat homogenní taveninu s konstantní teplotou v požadovaném množství.

Mezi nejčastější typy plastikačních jednotek u vstřikovacích strojů patří plastikační jednotky s jedním šnekem, který plastikuje materiál a provádí vstřikování taveniny. Dříve se používaly i plastikační jednotky s pístem, ty ale vytlačily šneky pro lepší plastikační výkon a kvalitu taveniny.

Šnek se v plastikační jednotce otáčí a zároveň koná přímočarý zpětný pohyb, přitom bere materiál z násypky. Otáčením šneku je materiál posouván dopředu, dochází ke smýkání, disipaci (vlivem tření materiálu o vnější válec) a předávání tepla z topných těles skrze plášť válce a tím dochází k přeměně tuhého materiálu v taveninu. Tavenina je posouvána dopředu a shromažďuje se před čelem šneku. Prostor pro taveninu před čelem šneku je vytvářen zpětným pohybem šneku, dokud se neshromáždí dostatek taveniny potřebné k vyplnění dutiny formy. Po tom, co je plastikační fáze skončena, šnek pracuje jako píst a působením hydraulického válce se tento šnek posune rychle dopředu a vstříkne tak taveninu skrze vstřikovací trysku do dutiny formy. Aby při dopředném pohybu šneku nedocházelo ke zpětnému pohybu taveniny, je ve výstupním pásmu šneku zpětná klapka, která je při pohybu šneku vpřed zavřena a při natavování materiálu otevřena.

Pro dobrou distribuci materiálu musí být povrch šneku leštěný a povrch válce zdrsněný, event. se může pod násypku přidat chlazení, které má stejný účinek jako zdrsnění válce. Intenzita dopředného pohybu materiálu je tedy určena třecími poměry mezi šnekem, materiálem a válcem. Šnek je rozdělen na tři pásma – vstupní, přechodové a výstupní, kdy ve vstupním pásmu dochází k dopravování materiálu a vytváří se zde potřebný tlak, v přechodovém pásmu se začíná materiál tavit, vyskytují se zde obě fáze, jak tuhé lože, tak polymerní tavenina, a nakonec ve výstupním pásmu probíhá doprava a míchání taveniny. Přitom hloubka kanálu se postupně zmenšuje, jak je patrné z obrázku (Obr. 21).



Obr. 21. Schéma standardního šneku.

Existuje mnoho různých modifikací šneků určených pro specifické materiály a za účelem zlepšení požadovaných procesních vlastností. Tak lze např. vypustit některé ze šnekových pásem, přidat šroubovici nebo změnit její stoupání, přidat míchací elementy apod. Potom jsou rozlišovány šneky standardní jednochodé, modifikované jednochodé a šneky vícechodé. Mezi základní charakteristiky šneku patří průměr šneku D , hloubka šnekového kanálu H a úhel stoupání šroubovice θ . Přitom délka šneku se uvádí poměrem L/D .

3.2.4 Řídící jednotka

Vstřikovací stroj sestává také z vnějšího řídicího systému, který zabezpečuje správný průběh vstřikovacího procesu. Mezi nejdůležitější fyzikální parametry, které jsou během procesu hlídány, patří:

- teplota taveniny, válce, formy a příp. teplota horkého vtokového systému,
- poloha plastikační jednotky, šneku a formy,
- rychlost šneku během vstřikování a rychlost formy při zavírání,
- vstřikovací tlak a dotlak, tlak v případě hydraulického uzavírání pro správnou uzavírací sílu.

Řídící jednotka nejenže kontroluje tyto výše uvedené parametry, ale také musí koordinovat celý vstřikovací proces. Jednotlivá měření jsou tak prováděna pomocí speciálních senzorů, které odesílají naměřená data do centrálního počítače, který je zpracuje a popř. vyvolá potřebnou akci ke korekci určitého procesu. Komunikace s počítačem pak probíhá přes pracovní panel, který je vidět na obrázku (Obr. 25).

3.2.5 Výběr vstřikovacího stroje

Počáteční výběr vstřikovacího stroje se řídí podle následujících kritérií:

- velikost uzavírací síly - aby nedošlo k otevření formy během vstřikování, musí být uzavírací síla větší než síla vstřikovací (tlak při vstřikování vztahený na plochu výstřiků a studeného vtokového systému v dělicí rovině: $F = p \cdot S$),
- rozteč vodicích sloupků – pokud má být vůbec forma umístěna do stroje, musí tato forma projít mezi vodicími sloupky vstřikovacího stroje,
- plastikační jednotka – důležité parametry jsou zejména maximální vstřikovaná dávka, maximální materiálový tok a také vstřikovací tlak.

3.2.6 Arburg Allrounder 420 C

Praktická část diplomové práce bude prováděna na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420 C 1000–350 od německé firmy Arburg (Obr. 22). V tabulce (Tab. 5) jsou pak uvedeny některé důležité technické parametry. Tento stroj je umístěn v dílně technologické fakulty.



Obr. 22. Arburg Allrounder 420 C 1000-350.

Tab. 5. Technické parametry vstřikovacího stroje.

ARBURG ALLROUNDER 420 C 1000-350	
Uzavírací jednotka	
Uzavírací síla	1000 kN
Rozměr upínacích desek	570 x 570 mm
Rozteč vodících sloupků	420 x 420 mm
Maximální pojezd upínací desky	500 mm
Maximální vzdálenost upínacích desek	750 mm
Plastikační jednotka	
Vstřikovací tlak	212 MPa
Maximální objem dávky	182 cm ³
Maximální vstřikovací tok	168 cm ³ /s
Maximální materiálová výkonnost – PS / PA6.6	29 / 15 kg/h
Průměr šneku	40 mm
Poměr L/D	20

3.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací formy se používají nejen zvláště pro vstřikování termoplastů, ale i reaktoplastů a elastomerů. Při návrhu vstřikovací formy se vychází z tvaru výrobku, násobnosti formy, vlastností zpracovávaného materiálu, z možností vstřikovacího stroje a dále také z požadavků na kvalitu výroby, produktivitu práce a ekonomických možností.

Hlavní funkce formy jsou:

- rozvádět taveninu,
- dát tvar a rozměry budoucímu výrobku,
- chladiť horkou taveninu (v případě reaktoplastů a elastomerů vyhřívat taveninu),
- vyhodit výstřik.

Mezi další úkoly formy patří vydržet vstřikovací tlak, převádět pohyb a vést ostatní pohyblivé části formy.

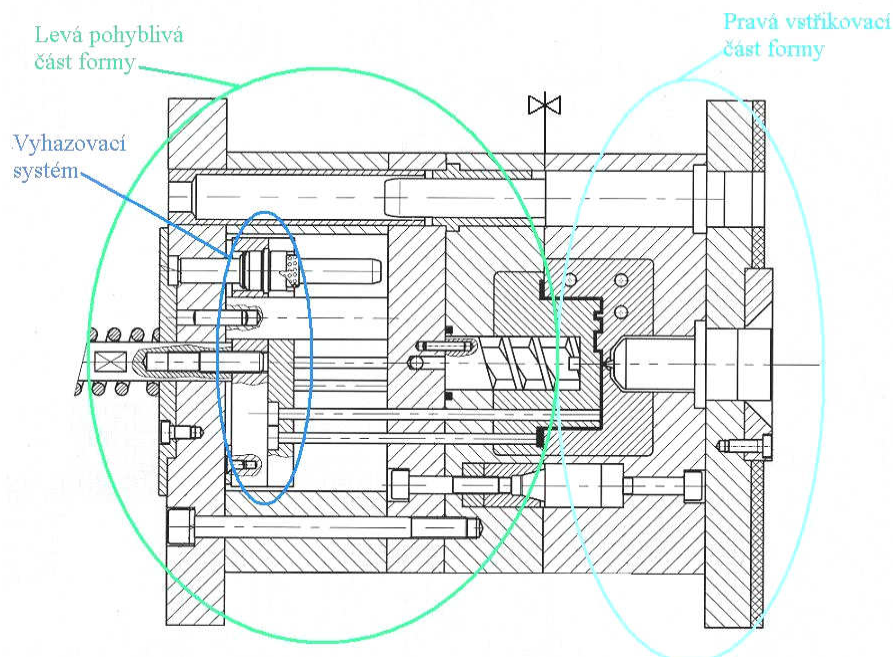
Požadavky na formu:

- vysoká přesnost a požadovaná jakost funkčních ploch zhotovené dutiny formy a ostatních funkčních dílů,

- maximální tuhost a pevnost jednotlivých částí formy i celků pro zachycení potřebných tlaků,
- správná funkce formy, vhodný vtokový systém, vyhazování, odvzdušnění, temperování apod.,
- optimální životnost zaručená konstrukcí, materiálem i výrobou.

Mnohoznačnost požadavků vede k různým řešením forem. Používané typy forem zpravidla mají tyto hlavní části:

- tvarové díly vymezující dutinu formy,
- vtokový systém,
- temperační systém,
- vyhazovací zařízení pro výstřik a vtokový zbytek,
- upínací a vodící systém. [14]



Obr. 23. Řez formou. [13]

Forma sestává většinou ze tří základních částí, jak ukazuje obrázek (Obr. 23). První částí se do formy vstříkuje a rozvádí tavenina, jedná se o pravou vstřikovací část formy. Levá pohyblivá část formy pak umožňuje otevření a uzavření formy v dělicí rovině. Obě části spolu

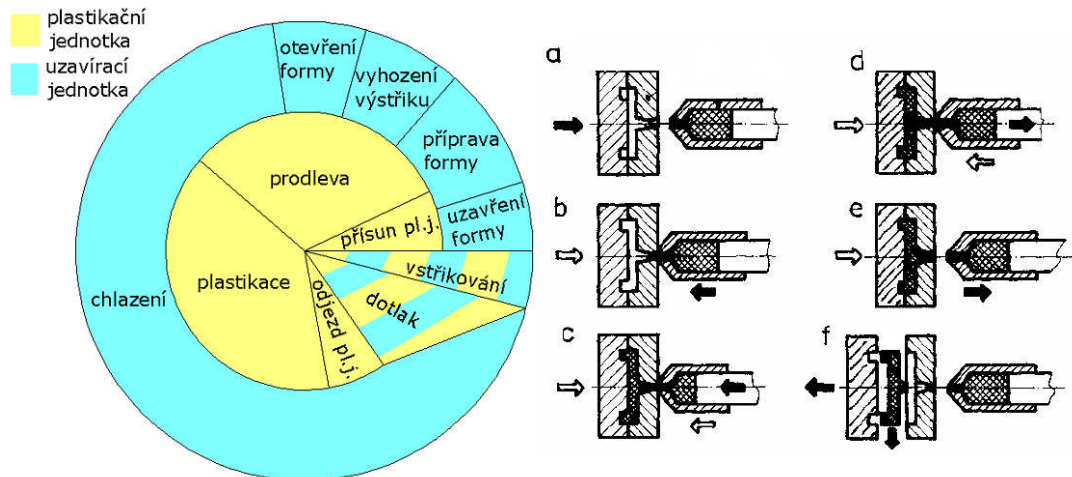
vytváří dutinu, která dává tvar budoucímu výrobku. Třetí, vyhazovací systém, pak při otevřené formě vyhazuje výrobek ven z formy.

3.3.1 Postup při konstrukci formy

- posouzení součásti z hlediska tvaru, rozměrů a tvářecích podmínek. Je třeba znovu zkontrolovat rozměry, jejich tolerance, rozdíly v tloušťce stěn s ohledem na propadliny. Nezanedbat ani úpravy ostrých hran a rohů, které vyvolávají velké pnutí a obtížné plnění dutiny formy;
- určení, případně upřesnění dělicí roviny součásti a způsob zaformování s ohledem na funkci a vzhled. Respektovat také směr a velikost potřebných úkosů. Zaformování musí odpovídat vhodnému umístění ústí vtoků a vyhazování z dutiny formy;
- dimenzování tvarových dutin a jejich uspořádání ve formě. Volba vhodného typu vtokového systému, velikost průřezů, tvaru a délky hlavního a rozváděcího kanálu i ústí vtoků;
- stanovení koncepce vyhazovacího a temperačního systému i odvzdušnění dutin formy;
- navržení rámu formy s ohledem na danou typizaci, počet i rozmístění dutin, systém vyhazování i temperace formy;
- vhodné uspořádání středění a upínání formy na stroj s ohledem na využití dostupných prostředků;
- zkontrolování funkčních parametrů formy, hmotnost výstřiku, jeho průmětnou plochu, vstřikovací a uzavírací tlak, a další faktory vzhledem na doporučený stroj. [14]

3.4 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus lze rozdělit do několika fází, které jsou graficky znázorněny na obrázku (Obr. 24). Plastikační a uzavírací jednotky pak harmonicky vykonávají své jednotlivé kroky tak, aby nedocházelo v žádné části cyklu ke zbytečným prodlevám.



Obr. 24. Schéma vstřikovacího cyklu. [3]

Nejprve je materiál převeden v taveninu v plastikační jednotce, přitom šnek koná rotační a přímočarý vratný pohyb, tavenina se shlukuje před čelem šneku (a). Plastikační jednotka se přisune k uzavírací jednotce (b) a pohybem hydraulického pístu působícího na šnek je tavenina vstříknuta do dutiny zavřené formy. Po naplnění dutiny dále působí dotlak (c), kterým eliminujeme smrštění výstřiku. Dotlak je většinou menší než vstřikovací tlak a působí do zatuhnutí vtokového ústí (d). Během dotlaku začíná chlazení výstřiku, po skončení dotlaku plastikační jednotka odjíždí (e) a plastikuje se v ní nový materiál. Po ochlazení výstřiku na vyhazovací teplotu je forma otevřena, výstřik vyhozen (f), provedena eventuální příprava nebo kontrola formy, forma je uzavřena a může dojít k novému vstřikování.

3.5 Vlivy na jakost plastových součástí

Vstřikované pastové díly lze vyrobit ve stejné jakosti a přesnosti jako díly kovové.

Hlavní činitele ovlivňující jakost:

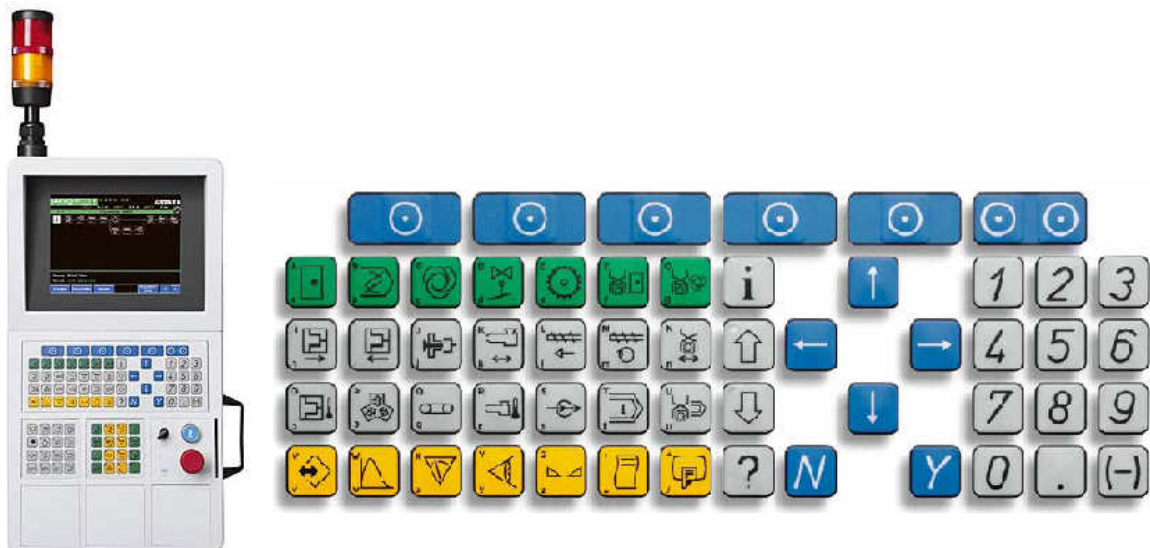
- smrštění – jeho velikost závisí na druhu materiálu a tvaru součásti,
- dodatečné smrštění – vzniká při uvolňování vnitřních pnutí, je to též výsledek časově závislých změn ve výstřiku,
- tečení (creep) – dochází k němu při větším a dlouhodobějším zatížení součásti, vznik plastických deformací,
- teplotní roztažnost – je cca o řád větší než u kovů, jedná se o vratnou změnu,
- navlhání – sorbce vody z okolního prostředí.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ŘÍDÍCÍ SYSTÉM SELOGICA

Jedná se o 32-bitový multiprocessorový řídicí systém pro všechny vstřikovací stroje Allrounder a periferní zařízení od firmy Arburg. Základní funkce řízení systému Selogica se vztahují na základní sekvence Allrounderu. Jedná se zde o pohyby formy a vstřikovací jednotky, vstřikování a dotlak, pohyby vyhazovače, dávkování, dekomprese a nastavení teploty.

Řídicí systém Selogica se vyznačuje jasnou strukturou a snadnou srozumitelností, což v neposlední řadě zajišťuje přehledné programování řízení. Modulární koncepce a množství balíků funkcí umožňuje správnou aplikační a potřebám vyhovující funkci řídicího systému, která je vždy orientována na technické vybavení stroje. Navíc použitím jednoduché posloupnosti příkazů se mohou jednotlivé dílčí sekvence individuálně sestavit a dále spravovat. Tím je zajištěn potřebný přehled v sestavení jednotlivých sekvencí seřizování a obsluhy.



Obr. 25. Systém Selogica – ovládací panel s tlačítky. [15]

Ovládací panel řízení Selogica se na klávesnici rozděluje do různých skupin:

- zelená tlačítka – slouží především k vytvoření pracovního cyklu stroje a robotického zařízení v grafickém editoru průběhu cyklu. Dále lze těmito tlačítky spravovat všechna data stroje a formy;
- šedá tlačítka – tato tlačítka přímo vyvolávají stránky parametrů stroje. Jsou zde definovány všechny fyzikální veličiny jako rychlosti, dráhy, tlaky, časy apod.;
- žlutá tlačítka – vyvolávají podpůrné funkce. Jsou zde spravovány datové soubory, zobrazena grafika nebo programovány kontrolní funkce;

- modrá funkční tlačítka – jsou v přímé souvislosti s modrými tlačítky zobrazenými na monitoru, aktivují a deaktivují funkce a vedou k jednotlivým podmenu;
- číslcová a směrová tlačítka – v této oblasti tlačítek jsou soustředěna tlačítka Y / N (Yes / No) pro potvrzení nebo odmítnutí nabízených funkcí, směrová tlačítka pro pohyb kurzoru, jakož i číslcová tlačítka pro zadávání absolutních hodnot;
- pole tlačítek pro ruční ovládání – tlačítka pro ruční ovládání jsou umístěna pod klávesnicí. První šedé pole tlačítek slouží k zapínání a vypínání různých funkcí stroje. Pomocí tlačítek druhého pole lze ovládat pohyby stroje v ručním režimu.

Cyklus stroje se programuje graficky pomocí symbolů. Výsledkem je srozumitelné a přehledné zobrazení automatického cyklu v podobě postupového diagramu. Odpovídající obrazovky jednotlivých parametrů lze vyvolat přímo z naprogramovaného průběhu procesu a zadat příslušná data. V závislosti na vybavení stroje, parametrech formy, zakázkových datech i průběhu cyklu jsou zobrazeny vždy jen ty nastavitelné veličiny, které budou skutečně použity. Tím se celé programování zjednoduší. Navíc systém také prověřuje všechna zadání z hlediska jejich přípustnosti, chybné funkce jsou tak prakticky vyloučeny.



Obr. 26. Funkční oblasti řízení Selogica. [15]

Obrazovka systému Selogica zobrazuje následující funkční oblasti:

- řádek alarmů – v tomto řádku řízení se zobrazují stručnými texty alarmy, chybová hlášení, informace a varování;
- stavový řádek – v tomto řádku je zobrazen pracovní a výrobní stav stroje Allrounder a jeho komponenty pohonu a topení. Kromě toho se v této oblasti zobrazuje provozní režim, aktuální programová úroveň, oprávnění k přístupu a aktuální stav výroby. Ve čtyřech přidavných polích jsou pak zaznamenány nejdůležitější skutečné hodnoty stroje;
- oblast zobrazení – zde je zobrazen naprogramovaný cyklus průběhu výroby, obrazovka parametrů a grafické symboly;
- oblast zadávání dat – v oblasti zadávání dat informuje řízení obsluhu o možnostech zadání a o aktuálně zadaných datech;
- zobrazení funkčních tlačítek – systém řízení zde zobrazuje výběr možných funkcí, které se mohou provést prostřednictvím funkční klávesnice.

Do řídicího systému Selogica lze také zařadit množství periferních a automatizačních zařízení jako např. sušící zařízení, dopravníky a robotické manipulátory, která jsou dnes pro hladký průběh vstřikovacího procesu neodmyslitelná. Systém taktéž umožňuje nasazení speciálních aplikací jako je vícekomponentní vstřikování, zpracování reaktoplastů, elastomerů a silikonů jakož i vstřikování se zástřiky bez nutnosti použití speciálního řízení a speciálních programů. [15]

5 MOLDFLOW PLASTICS XPERT 4.2

Program MPX je softwarové a hardwarové řešení, který přímo komunikuje s řídicí jednotkou vstřikovacího stroje. Komunikace je možná s téměř všemi vstřikovacími stroji na trhu. Program MPX kombinuje nastavení procesu, optimalizaci procesu, monitorování a řízení výrobního cyklu s ohledem na nastavené parametry v jednom systému. MPX na rozdíl od jiných kontrolních řešení může s výhodou využít pokročilých simulačních schopností programů Moldflow Plastics Advisers (MPA) a Moldflow Plastics Insight (MPI) k nastavení počátečních procesních podmínek.

Operátoři vstřikovacích strojů tak mohou s pomocí MPX jednoduše nastavit celý vstřikovací proces, provést automatický návrh experimentů (DOE) k přesnějšímu vymezení všech procesních parametrů a automaticky kontrolovat a upřesňovat celý proces během výroby.

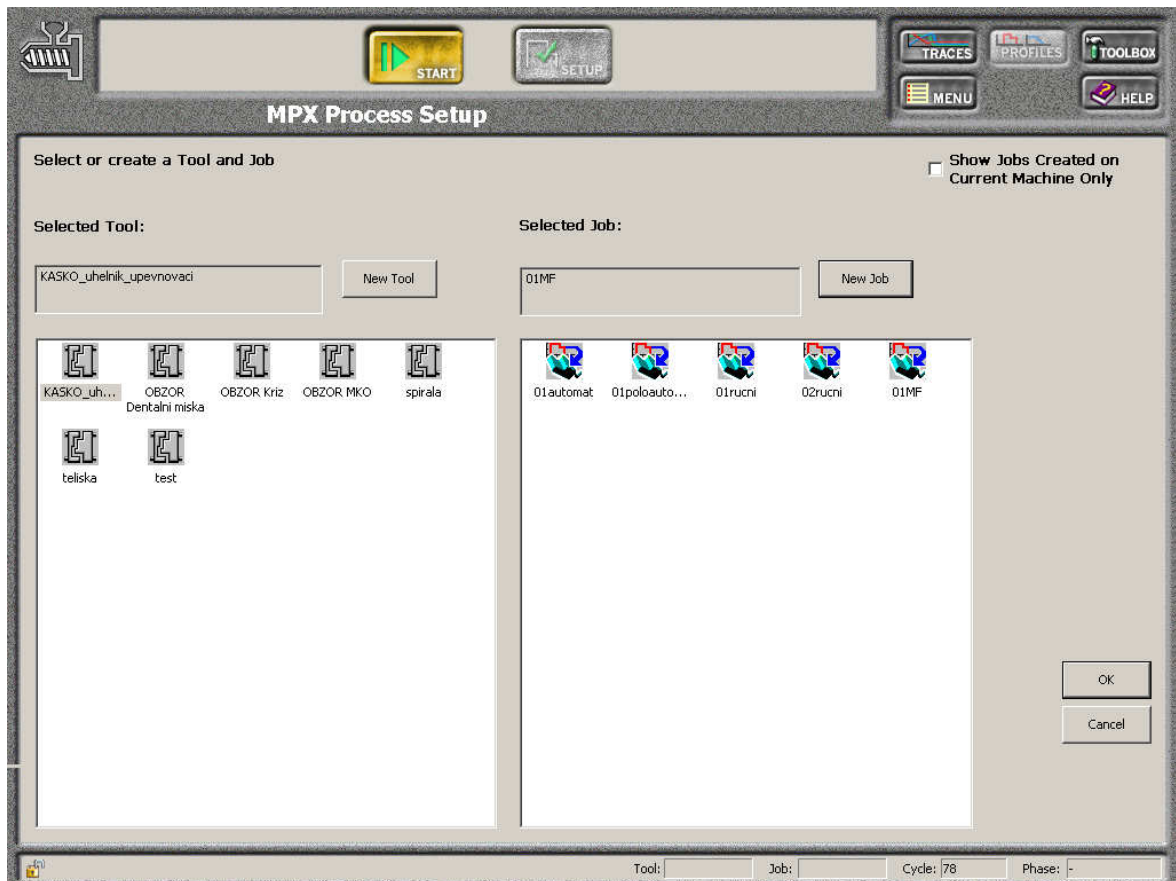
System je uživatelsky přátelský a na rozdíl od jiných produktů, které výrobní proces pouze sledují a jsou velmi složité, MPX může být naučen a zařazen do procesu velmi snadno a efektivně. Virtuální vstřikovací stroj umožňuje uživateli naučit se a probádat celý MPX systém bez nutnosti být připojen k reálnému vstřikovacímu stroji. Inteligentní nastavení je pak možné provádět s pomocí analýz a simulací.

MPX systém pracuje na podpoře jádrových programů Moldflow Foundation, který zahrnuje Foundation Configuration a Foundation Toolbox. Tyto programy umožňují konfigurovat a spravovat celý MPX systém.

Mezi volitelné programy MPX systému patří:

- nastavení procesu (Process Setup),
- optimalizace procesu (Process Optimization),
- kontrola procesu (Process Control).

Při spuštění kteréhokoliv MPX programu naběhne následující dialogové okno, ve kterém je potřeba pro danou formu vytvořit nový nástroj (New Tool) a pro tento nástroj vytvořit novou práci, která na něm bude probíhat (New Job). Pokud již existují nějaké nástroje a k nim přiřazené práce, vybere se jedna určitá, na které se bude dále pracovat (Obr. 27).



Obr. 27. Zvolení nástroje a práce v MPX systému.

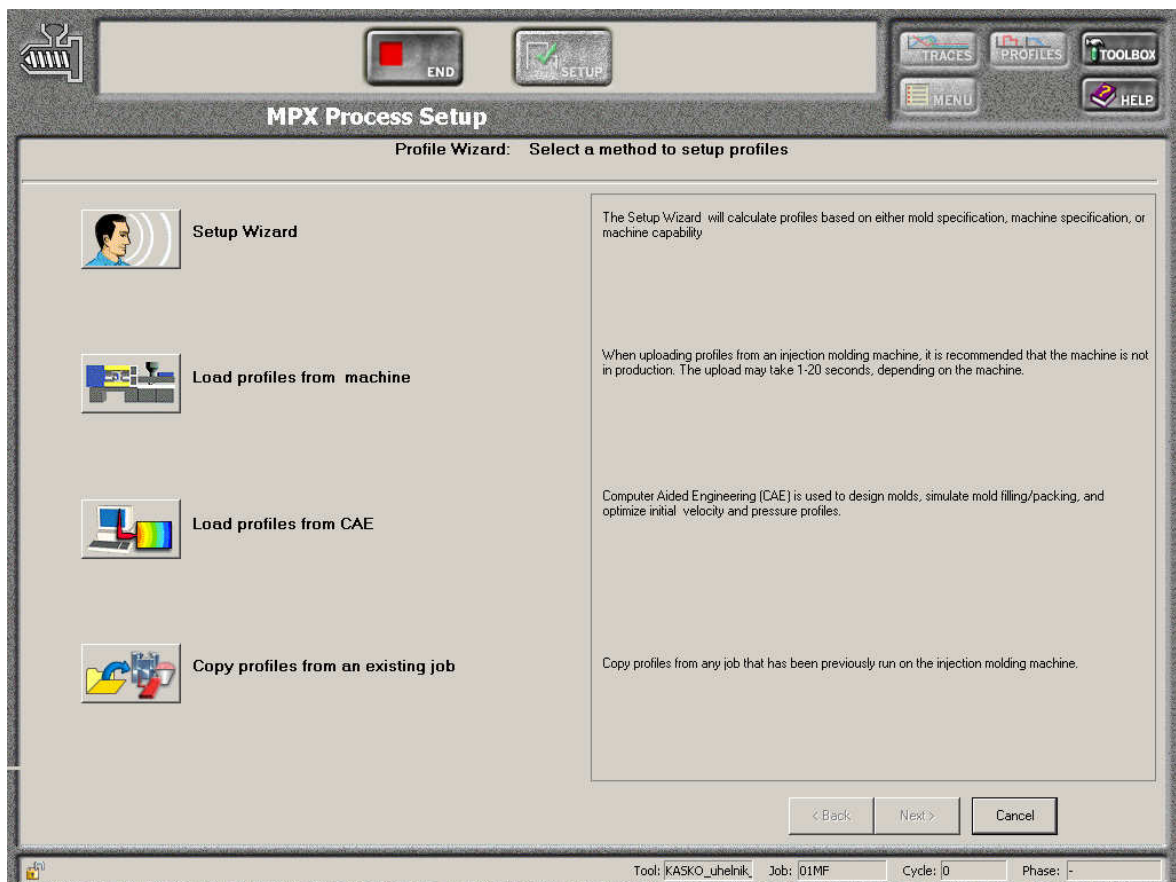
5.1 Nastavení procesu (Process setup)

Umožňuje uživateli nastavit základní kombinaci procesních parametrů, které vedou k produkci dobrých dílů. Při nastavení procesu využívá MPX sérii postupů nastavení na bázi rychlostních a tlakových profilů, aby systematicky eliminoval procesní vady výrobků. Každý postup nastavení pak řeší jeden faktor profilu jako je např. vstřikovací rychlost, čas zatuhnutí vtokového kanálu aj.

MPX při nastavení procesu určuje cestu nejlepšího zlepšení vstřikovacího procesu podle způsobu, jakým byly počáteční profily získány. Vybírá správnou posloupnost jednotlivých postupů nastavení pro rychlostní a tlakové fáze a nastartuje proces automatického nastavování stroje. Uživatel si také může vybrat jednotlivé postupy, které chce použít k nastavení profilů.

Nastavení počátečních profilů vstřikovacího procesu se provádí těmito metodami (Obr. 28):

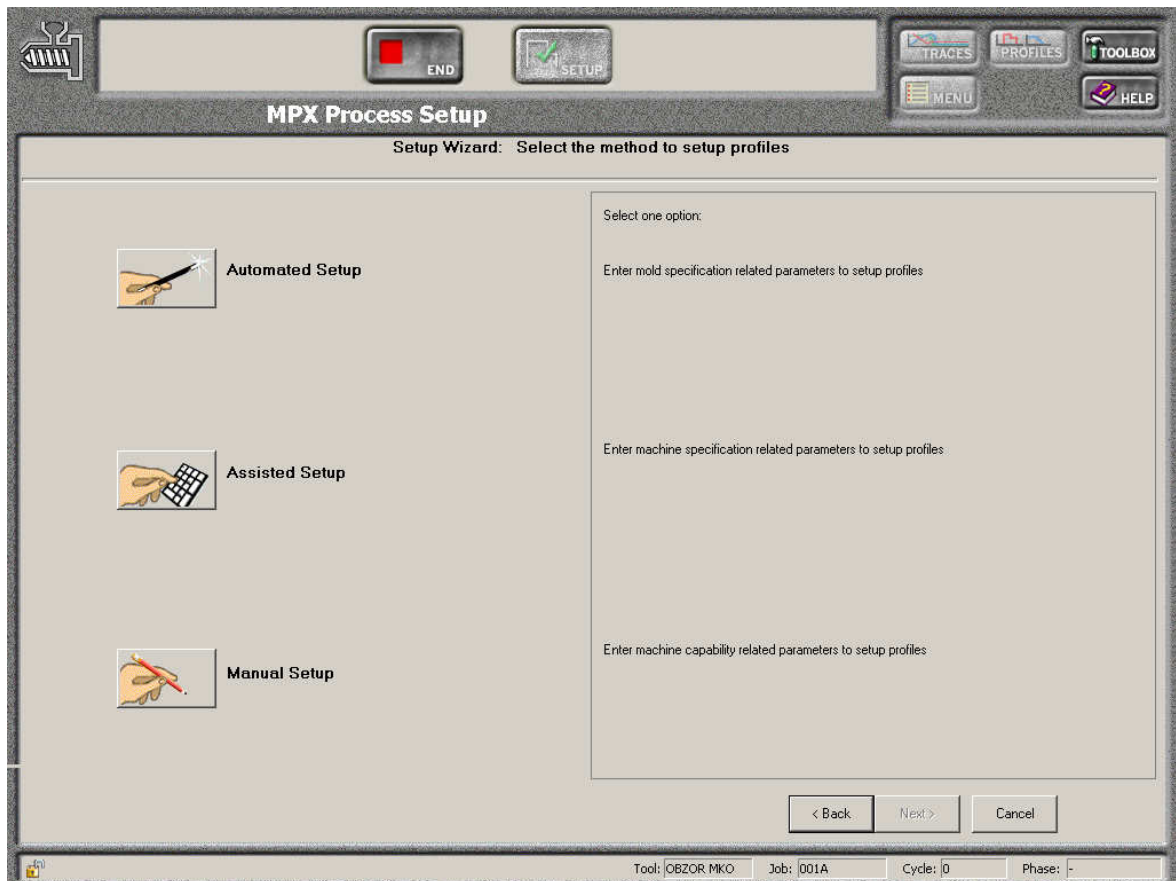
- asistent nastavení – vypočítá počáteční profily z vložených procesních parametrů buď formy anebo stroje,
- nahrání profilů ze stroje – nahraje počáteční profily přímo ze vstřikovacího stroje,
- nahrání profilů z CAE – nahraje počáteční profily z programu CAE – v tomto případě ze simulačního programu MPA nebo MPI,
- zkopírování profilů z provedeného nastavení – zkopíruje profily z nastavení, které už bylo na vstřikovacím stroji dříve provedeno.



Obr. 28. MPX nastavení procesu – metody nastavení.

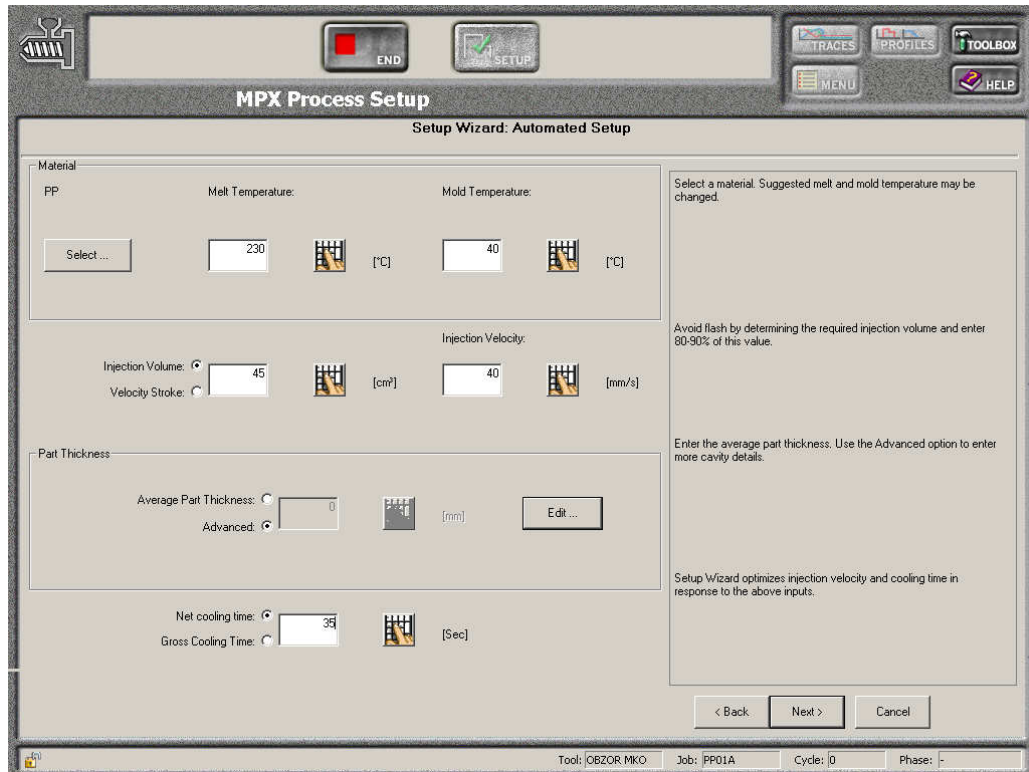
U asistenta nastavení je možné volit ze tří následujících druhů nastavení (Obr. 29):

- automatické – počáteční parametry jsou odvozeny ze specifikace formy,
- poloautomatické – počáteční parametry jsou odvozeny ze specifikace vstřikovacího stroje,
- ruční – počáteční parametry jsou nastaveny podle možností vstřikovacího stroje.



Obr. 29. MPX nastavení procesu – možnosti asistovaného nastavení.

Po zvolení druhu nastavení je třeba zadat počáteční parametry vstřikovacího procesu jako např. materiál, teplotu formy a taveniny, vstřikovaný objem, čas chlazení apod. (Obr. 30). Tyto podmínky jsou závislé od zvoleného druhu nastavení. MPX nastavení procesu pak sám navrhne počáteční profily a spustí sadu postupů nastavení procesu.

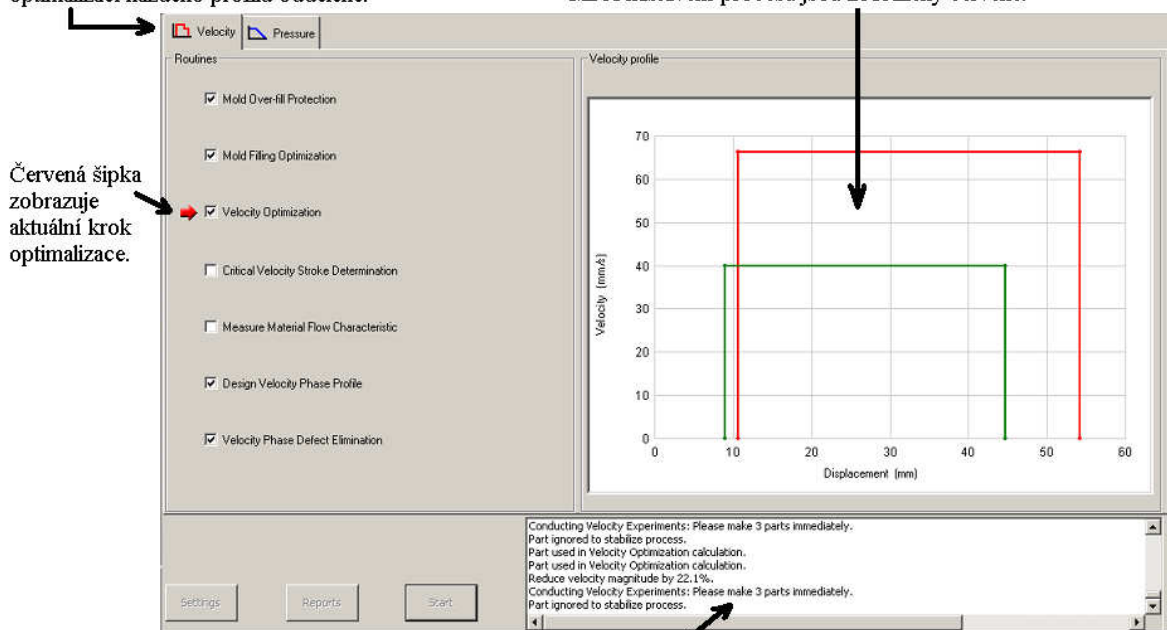


Obr. 30. MPX proces nastavení – zadání počátečních parametrů.

Po zadání počátečních parametrů a spuštění MPX nastavení procesu naběhne dialogové okno znázorněné na obrázku (Obr. 31).

MPX nastavení procesu provádí optimalizaci každého profilu odděleně.

Počáteční profil je zobrazen zeleně. Změny profilu provedené MPX nastavení procesu jsou zobrazeny červeně.



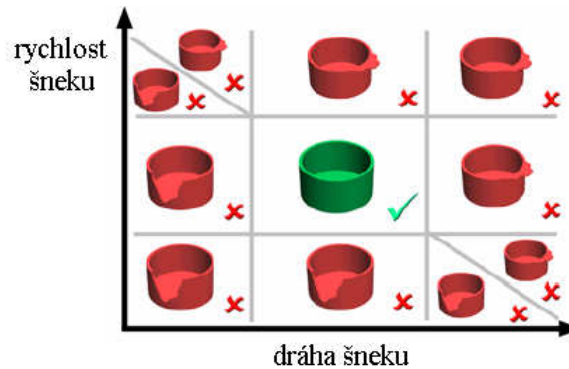
Červená šipka zobrazuje aktuální krok optimalizace.

V tomto okně jsou zobrazeny informace o vývoji celého procesu.

Obr. 31. MPX proces nastavení – dialogové okno.

5.1.1 Optimalizace rychlostní fáze

MPX nastavení procesu přizpůsobí rychlostní profil tak, aby našlo oblast, ve které může být vyroben dobrý výrobek. Obrázek (Obr. 32) ukazuje, jak variace rychlosti a dráhy šneku ovlivňuje kvalitu výrobku.



Obr. 32. Variace rychlosti a dráhy šneku.

Pokud má daný rychlostní profil příliš vysokou vstřikovací rychlost šneku nebo jeho vstřikovací dráha je příliš dlouhá, mají výrobky obvykle přetoky. Na druhou stranu, jestliže vstřikovací rychlost šneku je příliš malá nebo jeho dráha krátká, výrobky budou vykazovat nedotečená místa. Kombinace těchto problémů může vést k výrobkům s nedotečenými místy a přetoky zároveň. Pro správně navržený výrobek jsou hodnoty rychlosti a dráhy šneku v centrální části grafu, kde je možno produkovat dobré výrobky.

MPX nastavení procesu provádí optimalizaci rychlostní fáze ve třech krocích:

1. rychlost a dráha šneku,
2. nastavení rychlostního profilu,
3. eliminace vad spojených s rychlostí vstřikování.

Rychlost a dráha šneku

Tento krok zahrnuje postup ochrany přeplnění formy, optimalizaci plnění formy, optimalizaci rychlosti a určení kritické dráhy šneku. To předpokládá, že dutina formy může být plněna vygenerovaným rychlostním profilem. Pravidla v tomto kroku vedou k přiblížení podmínkám, které produkují dobrý výstřik, jestliže byl vložen alespoň slabý odhad rychlosti nebo dráhy šneku.

Zjištění optimální vstřikovací rychlosti je založeno na testu „aproximované viskozity“, který také určí optimální čas plnění dutiny formy. Optimální vstřikovací rychlost je taková, kdy je viskozita nejnižší a nejstabilnější.

Kritické plnění při vstřikování je nastaveno tak, aby bylo zaručeno, že se během fáze vstřikování neobjeví žádný dotlak. Kritické plnění je tedy bod, pokud je dutina formy pouze plněna.

Počáteční rychlostní profil je určen z:

- odhadu vstřikovací dráhy šneku,
- rychlosti, většinou 50% maximální vstřikovací rychlosti stroje.

Dráha naplastikování taveniny je přibližně nastavena jako 1,1 násobek dráhy šneku při vstřikování.

Nastavení rychlostního profilu

První krok odhaduje vztah mezi rychlostí vstřikování a průměrnou odlišností tlakového profilu taveniny v trysce. Tlak taveniny v trysce je odvozený z hydraulického tlaku při vstřikování násobeného šnekovým zvětšujícím koeficientem. Rychlost vstřikování je měněna z předešlých hodnot předdefinovanými procenty, např. $\pm 5\%$, $\pm 10\%$.

Eliminace vad spojených s rychlostí vstřikování

Předpokladem je odezva uživatele, která informuje o kvalitě vystříknutého výrobku. Tento krok využívá postup eliminace vad spojených s rychlostním profilem a zahrnuje odstranění jakéhokoliv defektu z rychlostní fáze vstřikování. Hlavním cílem je měnit rychlostní profil tak, aby bylo dosaženo výrobku, na kterém nebude žádná vada způsobená nesprávným rychlostním profilem (Obr. 33).



Obr. 33. Vady při špatném rychlostním profilu.

Vady způsobené špatným rychlostním profilem:

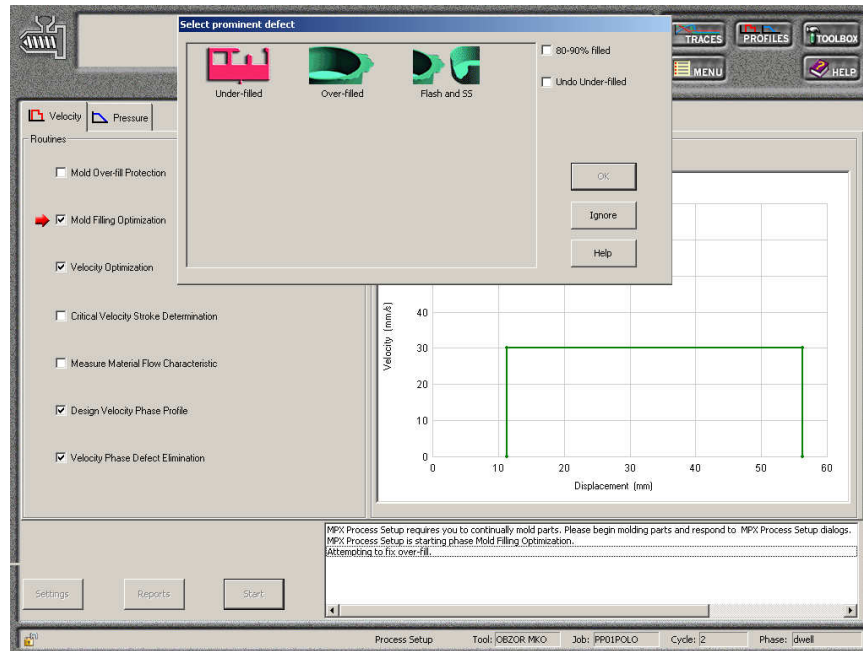
- nedotečené místo (Short shot, Under-filled) – dutina formy není zcela vyplněna materiálem, což vede k produkci nekompletních výrobků;
- přetok (Flash, Over-filled) – přetoky se objevují v případě, kdy se materiál při vstřikování dostane mimo dutinu formy. Nejčastější příčinou je příliš velká rychlost vstřikování;
- studený spoj (Weld line) – studený spoj je porucha nebo viditelná vada, která vznikne, když se potkají dva nebo více proudů taveniny během plnění dutiny formy. Jestliže čela taveniny jednotlivých proudů zamrzla dříve, než se setkala, vnitřně nedifundují a mohou způsobit vadu ve výrobku. Můžou se objevit v podobě linky, vrubu nebo barevné změny;
- spálené místo (Burn mark) – hnědá nebo černá stopa na povrchu výrobku. Spálená místa mohou být způsobena špatným odvodušněním dutiny formy. Chycený vzduch v dutině je při jeho současné kompresi velmi rychle zahříván a spaluje tak okolní plast. Často se snižuje vstřikovací rychlost, aby byl poskytnut dostatečný čas na únik vzduchu z dutiny formy;

- ventilační místo (Vent mark) – při chycení vzduchu v dutině formy, zvláště v posledních místech zaplňování dutiny a ve studených spojích se může objevit zčernání povrchu;
- zdrženiny (Hesitation marks) – u výrobků s několika proudy taveniny se může proud taveniny v tenkých oblastech zdržet nebo pozastavit. To umožňuje tavenině v těchto tenkých místech zchladnout a v některých případech zamrznout před úplným zaplněním dutiny formy, což může být příčinou nedotečených míst. Ke zpomalení toku nejčastěji dochází u výrobků s tenkými přepážkami, žebry a klouby a v místě vtoků;
- chycený vzduch (Entrapped air) – vzduchová nebo plynová bublina, která je chycena mezi čela proudu taveniny nebo proud taveniny a stěnu dutiny formy. Způsobuje povrchové skvrny na výrobku;
- zaznamenané drážky (Record grooves) – vzhled tohoto povrchového defektu je podobný drážkám na gramofonové desce. Zaznamenané drážky se utvářejí při velké tokové rezistivitě v dutině formy vedoucí k opakované dočasné stagnaci čela toku taveniny;
- tryskový tok (Jetting) – tryskový tok je pokroucený proud taveniny, který se objevuje při tlačení taveniny velkou rychlostí přes omezující místa (jako např. trysku, vtok apod.) do otevřených větších míst bez navázání kontaktu se stěnou dutiny formy;
- odloupávání (Delamination) – jedná se o lokální oddělování vrstviček povrchu výrobku. Nejčastější příčinou je příliš velká rychlost vstřikování;
- lesklý povrch (Gloss marks) – lesklá místa na povrchu výrobku způsobená projekcí rozdílného chování taveniny na povrch formy kvůli rozdílným podmínkám chlazení a smrštění;
- černé / hnědé pruhy (Black/brown streak marks) – tmavě zbarvené hnědé pruhy, které mohou být způsobeny tepelným poškozením materiálu během plnění nebo neadekvátním odvzdušněním. K odstranění těchto pruhů je třeba upravit odvzdušnění formy nebo snížit rychlost vstřikování;
- stříbrné / bílé pruhy (Silver/white streak marks) – vady podobné problematice černých / hnědých pruhů;

- barevné pruhy (Color streak marks) – obvykle je příčinou vzniku těchto vad rozdílná orientace pigmentů v toku taveniny nebo slabé promíchání barviva v základním materiálu v plastikační jednotce;
- pruhy skleněných vláken (Glass fiber streak marks) – hrubé a matné pruhy, které mohou být způsobeny rozdílným smrštěním nebo předčasným zamrznutím skelných vláken na stěně dutiny formy. K vyřešení těchto vad může přispět použití kratších skleněných vláken, zvýšení teploty taveniny nebo teploty formy;
- vtokové zapálení (Gate blush) – skvrna nebo kaz v oblasti vtoku vstřikovaného dílu;
- nerovný povrch (Splay) – povrchová vada způsobená abnormálním vtokem taveniny do dutiny formy;
- plochost (Flatness) – plošná vada povrchu výrobku, která se někdy objevuje při velké rychlosti vstřikování. Snížení rychlosti vstřikování by tuto vadu mělo odstranit;
- hluk formy (Tooling noise) – nadměrný hluk formy může být následkem problémů ve formě, kde je příliš velký vstřikovací tlak na konci fáze vstřikování. Nadměrný hluk formy může vést po opakovaném použití k jejímu zničení.

5.1.2 Postupy použité při optimalizaci rychlostní fáze

Optimalizace plnění formy (Mold Filling Optimization)



Obr. 34. Optimalizace plnění formy.

Tento postup se snaží najít takové hodnoty rychlosti a dráhy šneku, při kterých budou produkovány dobré výrobky. Při velké rychlosti nebo dlouhé dráze šneku totiž dochází k přetokům a při nízkých hodnotách k nedotokům.

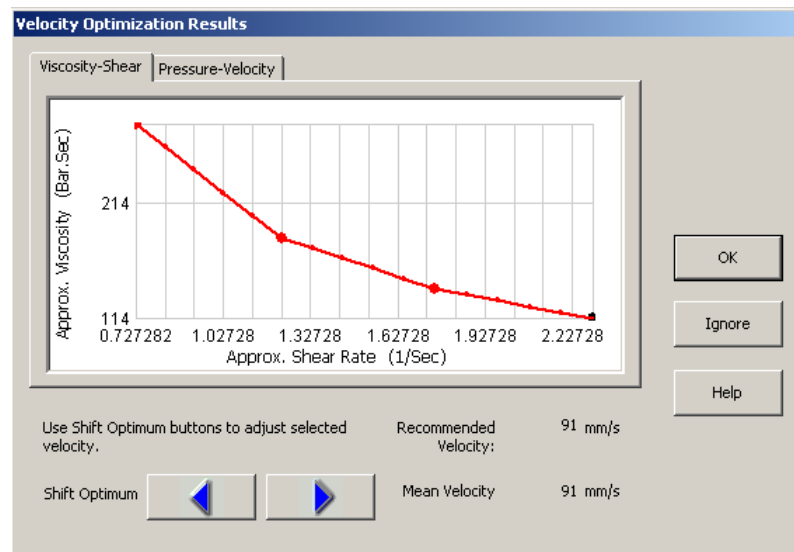
Po vyhození výstřiku z formy je možnost volby, zda je díl nedotečený (Under-filled), s přetoky (Over-filled), s přetoky i nedotečenými místy zároveň (Flash and SS) anebo zaplněn z 80 – 90%.

Optimalizace rychlosti (Velocity Optimization)

Optimální vstřikovací rychlost je stanovena v těchto krocích:

- maximální vstřikovací rychlost je určena postupným zvyšováním rychlosti ze zvolené počáteční hodnoty. Cílem je dosáhnout maximální rychlosti vstřikování a takové dráhy šneku, při kterém je díl zaplněn z 93 – 99%;
- jakmile je dosaženo maximální vstřikovací rychlosti, začne být rychlost po určitých částech snižována z maximální na minimální hodnotu. Tato minimální hodnota je kontrolována parametry optimalizace minimální rychlosti vstřikování;
- každé hodnotě rychlosti vstřikování je pak přiřazena hodnota rychlosti smykové deformace a smykové viskozity taveniny. Odpovídající závislost rychlosti smykové de-

formace na smykové viskozitě je na obrázku (Obr. 35). Doporučenou rychlost vstříkávání lze ještě pozměnit pomocí tlačítek s modrými šipkami;



Obr. 35. Výsledky optimalizace rychlosti.

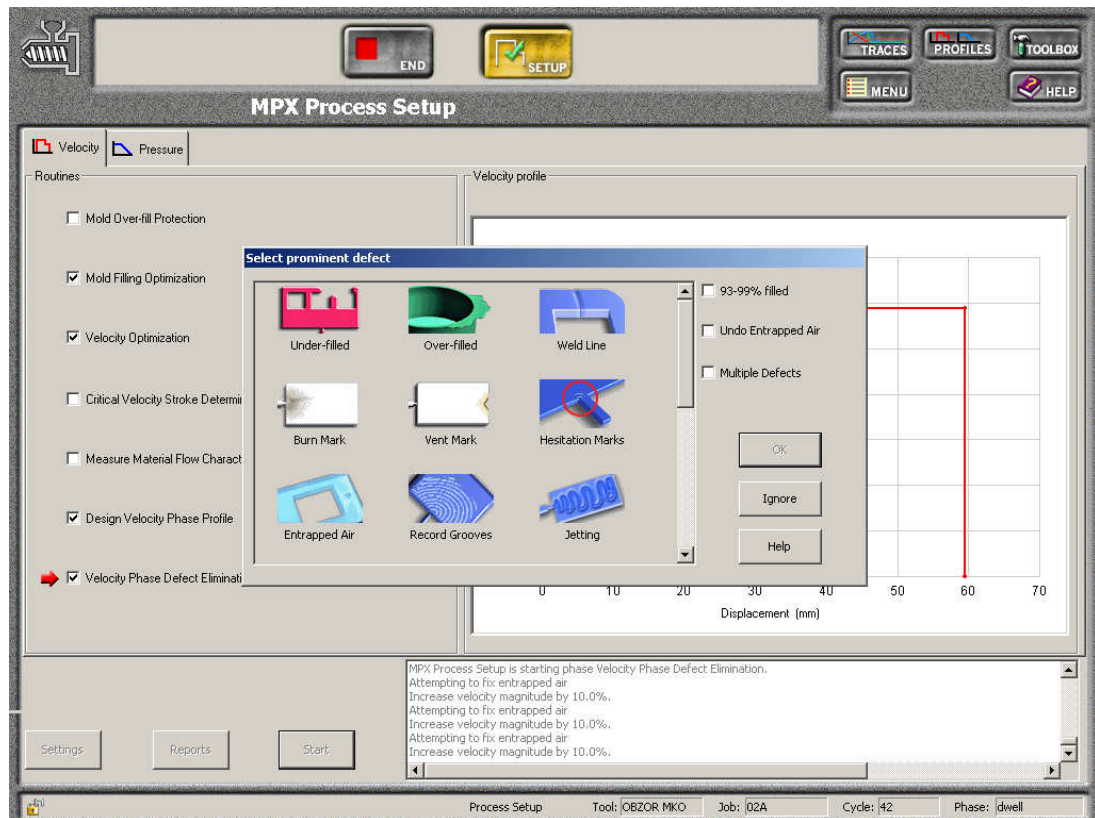
- potom, co je nalezena optimální rychlost vstříkávání, nabíhá další vstříkovací cyklus, při kterém je pozměněna dráha šneku a podle zjištěných vad přetoků, nedotečených míst nebo jejich kombinací je upravována dráha šneku, dokud není vyroben dobrý díl.

Návrh rychlostního profilu (Design Velocity Phase Profile)

Tento postup je plněn automatizován a nevyžaduje žádnou odezvu uživatele. Ke zvýšení pravděpodobnosti výroby dílu odpovídající kvality by mělo čelo taveniny téci do dutiny formy stejnou rychlostí. Tento postup využívá informace o tlaku a rychlosti získané ze vstříkovacího stroje k vytvoření odstupňovaného profilu, který zajistí stejnou rychlost čela taveniny při plnění dutiny formy.

Eliminace vad spojených s rychlostí vstříkávání (Velocity Phase Defect Elimination)

Tento postup se snaží zlepšit kvalitu výrobků eliminací vad spojených s rychlostí vstříkávání (Obr. 33). Při procesu se nejdříve zvolí nejhorší vada na výstřiku a potom se přechází k méně závažným vadám. Je ale také možno využít možnosti určení více vad najednou (Multiple Defects). Postup pokračuje, dokud nejsou odstraněny všechny vady a dokud součást není zaplněna z 93 – 99% (Obr. 36).



Obr. 36. Eliminace vad spojených s rychlostí vstřikování.

5.1.3 Optimalizace tlakové fáze

MPX nastavení procesu optimalizuje tlakovou fázi ve třech krocích:

- určení velikosti dotlaku,
- určení zatuhnutí vtoku a nastavení tlakového profilu,
- konečná eliminace vad.

Určení velikosti dotlaku

Tento krok zahrnuje postup optimalizace dotlaku a určuje kritickou hodnotu dotlaku, což je taková hodnota dotlaku, která zabrání zpětnému toku taveniny z dutiny formy do plastikačnické jednotky. To je dosaženo eliminací zpětného vrhu, který způsobuje propadlá místa, deformace a jiné rozměrové problémy. Cílem je začít s nízkým dotlakem a postupně jej zvyšovat až na požadovanou mez.

Určení zatuhnutí vtoku a nastavení tlakového profilu

Je zde zahrnuta optimalizace doby dotlaku, rychlá kontrola doby dotlaku a návrh dotlakového profilu. Určuje se odvozený čas zatuhnutí vtoku, počáteční čas tuhnutí a střední čas. Časy jsou určovány sledováním pohybu šneku se stejným použitým tlakovým profilem. Jakmile je nalezen čas zatuhnutí vtoku a počáteční čas tuhnutí, je vytvářen profil dotlaku.

Konečná eliminace vad

Do tohoto kroku patří proces konečné eliminace vad a zahrnuje odstranění vad tlaku nebo vad rychlostních, které se mohou stále ještě vyskytovat z předešlého kroku nastavení procesu. Hlavním cílem tohoto kroku je měnit rychlostní a tlakový profil tak, aby bylo dosaženo výrobku bez jediné vady. Vady vztahující se ke vstřikovací rychlosti, jako jsou svarové spoje, spálená místa a pruhy, jsou odstraněny změnou rychlostního profilu. S tlakem související vady jako propadliny nebo deformace jsou odstraněny protažením nebo snížením tlakového profilu.

5.1.4 Postupy použité při optimalizaci tlakové fáze

Optimalizace dotlaku (Packing Pressure Optimization)

Tento postup nastavuje dotlak, který je dostatečný k zabránění zpětného vytékání polymerní taveniny z dutiny formy, jakmile byla tato dutina naplněna. Počáteční hodnota dotlaku je zvolena jako určitá část vstřikovacího tlaku na konci plnění (standardně 40%). Profil je konstantní a má stejnou dobu trvání jako počáteční tlakový profil. Dotlak je následně zvyšován dokud se nezabrání zpětnému toku taveniny nebo uživatel dá odezvu, že se vyskytl problém. Po vyhození výstřiku se MPX nastavení procesu zeptá na přetok, problém s vyhazováním, hluk formy anebo se žádné uvedené problémy nevyskytují.

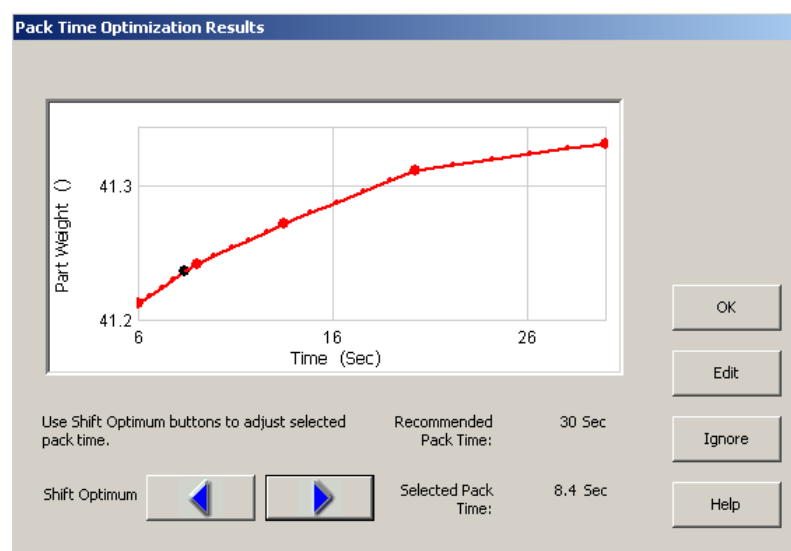
Optimalizace doby dotlaku (Packing Time Optimization)

Při tomto postupu je nastavena taková doba dotlaku, která zaručuje zatuhnutí vtoku. Jsou zde dvě rozdílné metody přístupu – optimalizace doby dotlaku je prováděna buďto přes pohyb šneku anebo přes hmotnost jednotlivých výstřiků.

Princip optimalizace doby dotlaku přes pohyb šneku spočívá ve velmi přesném měření pohybu šneku během kontrolní tlakové fáze za předpokladu konstantního tlaku. Jakmile začíná

tuhnout vtokové ústí, dochází ke snížení rychlosti posuvu šneku, což znamená, že je možno rozpoznat čas zatuhnutí vtoku.

Druhý princip optimalizace přes hmotnost výstřiků spočívá v tom, že MPX proces nastavení provede několik experimentů při zvyšování doby dotlaku dokud se neobjeví nějaký problém. Potom je požadováno zadání hmotností jednotlivých výstřiků, ze kterých je stanovena optimální doba dotlaku v bodě, kde se hmotnost výstřiku začíná stabilizovat. Výsledky závislosti hmotnosti výstřiku na době dotlaku lze vidět na obrázku (Obr. 37). Modrými šipkami je možno dobu dotlaku přizpůsobit.



Obr. 37. Závislost hmotnosti výstřiku na době dotlaku.

Návrh profilu dotlaku (Design Packing Pressure Profile)

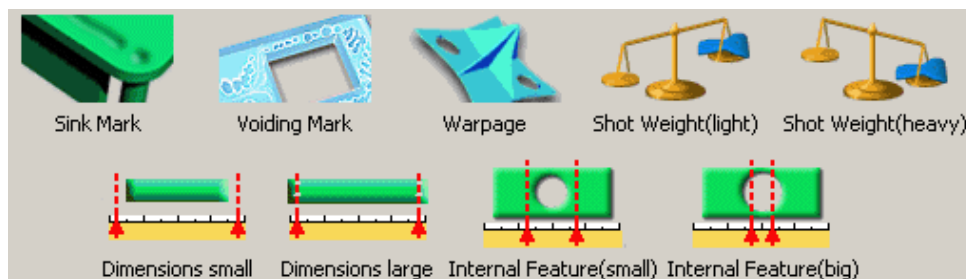
Jedná se o automatický postup, který počítá bod, ve kterém se materiál začíná smršťovat, od tohoto bodu je pak dotlakový profil snížen. Cílem je zabránění přeplnění a vzniku vysokých napětí v okolí vtoku.

Konečná eliminace vad (Final Defect Elimination)

Tento postup se snaží zlepšit kvalitu výrobku eliminováním vad spojených s fází dotlaku a jakékoliv rychlostní vady, která se objevila po optimalizování fáze dotlaku. Vady, které mohou být odstraněny a jsou spojené s fází dotlaku (Obr. 38):

- propadliny (Sink Mark) – propadlá místa na výrobku způsobená příliš malým dotlakem,

- pórovitost (Voiding Mark) – bubliny, které během vstřikování nestihnou uniknout z dutiny formy, vytvoří pórovitá místa na povrchu výstřiku,
- deformace (Warpage) – deformace a kroucení výrobku jsou příčinou uvolnění vnitřních pnutí ve výrobku, je potřeba zvýšit dobu dotlaku,
- malá hmotnost výrobku (Shot Weight (light)) – krátké působení dotlaku, nízký dotlak
- velká hmotnost výrobku (Shot Weight (heavy)) – dlouhé působení dotlaku, vysoký dotlak
- malé rozměry (Dimensions small) – krátké působení dotlaku, nízký dotlak,
- velké rozměry (Dimensions large) – dlouhé působení dotlaku, vysoký dotlak,
- vnitřní rozměry malé (Internal Feature (small)) – krátké působení dotlaku, nízký dotlak,
- vnitřní rozměry velké (Internal Feature (big)) – dlouhé působení dotlaku, vysoký dotlak.



Obr. 38. Vady spojené s fází dotlaku.

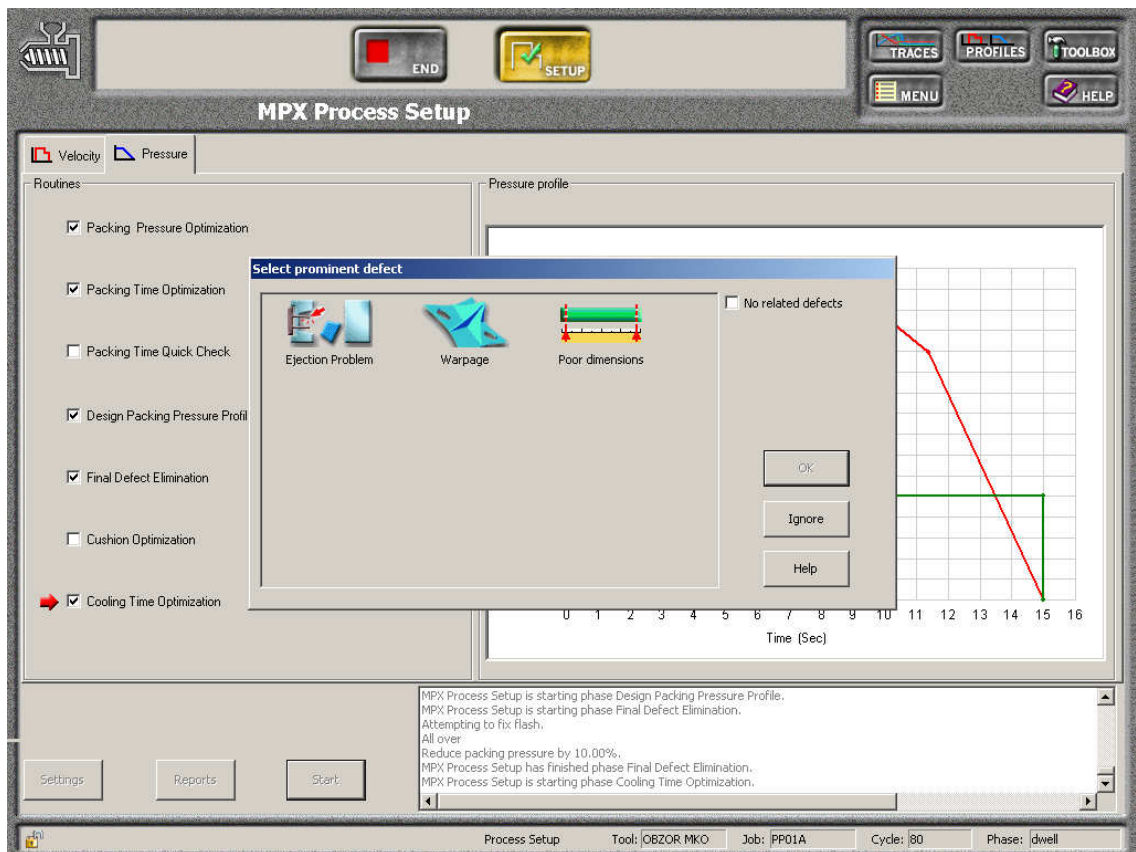
Ve výběru a zadávání vad se postupuje od nejhorší k nejméně závažné a pokračuje se tak dlouho, dokud výrobek nevykazuje žádnou z uvedených vad.

Optimalizace polštáře (Cushion Optimization)

Při této optimalizaci je hledán přijatelný polštář taveniny před čelem šneku. Jestliže je polštář příliš velký, je v tomto postupu redukován, aby nedocházelo k degradaci materiálu. Po vyhození výstřiku jsou dotazovány vady výrobku, pokračuje se tak dlouho, dokud nejsou vady odstraněny a tím nastaven optimální polštář taveniny.

Optimalizace doby chlazení (Cooling Time Optimization)

Hledá se minimální doba chlazení, která ale ještě dovoluje výrobku dostatečně zchladnout ve formě na vyhazovací teplotu a přitom se nevyskytnou žádné problémy s vyhozením výrobku nebo deformací výrobku nedostatečným zchlazením. Současně tato minimální doba chlazení nesmí být menší než doba naplastikování, proto se před započítáním této optimalizace provede jeden výrobní cyklus a odhadne se čas naplastikování materiálu. Čas chlazení je systematicky redukován tak dlouho, dokud uživatel nezahlásí problémy s vyhazováním, deformací nebo malé rozměry výrobku anebo je čas chlazení blízký času naplastikování (Obr. 39).



Obr. 39. Optimalizace doby chlazení.

Po skončení všech optimalizačních postupů lze získat z MPX procesu nastavení zprávu s výsledky celého průběhu procesu nastavení.

5.2 Optimalizace procesu (Process Optimization)

5.2.1 Obecná definice DOE (Design of experiments)

Jedná se o metodu statistického plánování a měření pro optimalizování procesů. Tato strukturovaná organizovaná metoda určuje vztah mezi několika faktory (proměnnými) ovlivňujícími proces a výstupem (výrobkem) tohoto procesu. DOE zahrnuje navrhování sady experimentů, ve které se dané faktory systematicky mění. Jakmile jsou analyzovány výsledky těchto experimentů, pomáhají tyto k navržení optimálních podmínek, určení faktorů, které nejvíce ovlivňují proces, a faktorů, které tento proces neovlivňují, stejně jako získání informací o existenci vztahů mezi jednotlivými faktory. DOE implementuje získaná data do matematických rovnic. Souborně pak tyto rovnice slouží jako modely k predikci, která nastane pro jakoukoliv kombinaci faktorů. Právě s těmito modely lze optimalizovat daný proces a najít pro něj nejlepší kombinaci faktorů. K tomu je potřeba získat dobře strukturovaná statistická data. Po aplikaci analýzy rozptylu jsou získány přesné výsledky, dokonce i tehdy, když se jedná o malý statistický soubor.

Cíle DOE:

- identifikovat důležité faktory ovlivňující kvalitu,
- určit základní účinky a vzájemné působení důležitých faktorů,
- snížit kolísání důležitých faktorů,
- zavést tolerance u nedůležitých faktorů za účelem snížení nákladů na výrobu.

5.2.2 Průběh optimalizace procesu

MPX spouští automatický návrh experimentů na základě zjištěných parametrů z procesu nastavení (Process Setup) a umožňuje dále optimalizovat kombinaci procesních parametrů a přesněji je vymezit za účelem zlepšení kvality výrobků při minimálním odpadu.

Návrh experimentů (DOE) produkuje sérii výrobků při použití mnoha rychlostních a tlakových profilů. Množství způsobů, kterými jsou profily upravovány, je závislé na počtu produkovaných výrobků a měření, jak se liší kvalita jednotlivých dílů s měnícími se profily. MPX optimalizace profilu potom mění jednotlivé body profilů, takže jsou rozmístěny v největší míře celého zpracovatelského okna. S jistými hranicemi tolerance zpracovatelské-

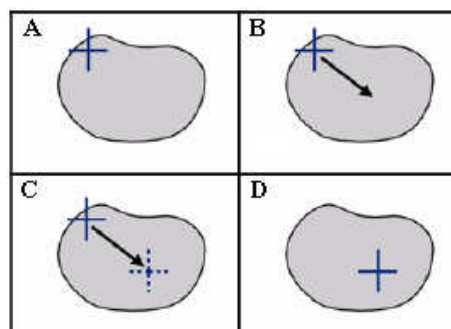
ho okna mohou být pozmeněné body profilů přenastaveny, jestliže se objeví mimo toto zpracovatelské okno. To znamená, že proces je schopný lépe provádět změny v menším měřítku. Navíc může být proces sledován, takže specifikace pro DOE parametry zůstanou zachovány.

Během výroby se procesní podmínky mění slabě. S dobrou sadou profilů tyto malé změny neovlivní kvalitu výrobku. MPX optimalizace procesu používá návrh experimentů (DOE) k ujištění, že typické procesní fluktuační neovlivní kvalitu výrobku tím, že nalezne okno takových zpracovatelských podmínek, které povedou k produkci pouze kvalitních dílů. Návrh experimentů zahrnuje použití sérií rozdílných profilů, které mohou být odvozeny z MPX nastavení procesu nebo přímo z průvodce profily. Každý profil je pak pozmeněn o malou hodnotu.

Následně je vytvořena série dílů s těmito profily a je zaznamenáno, které z těchto dílů mají nějakou vadu. MPX optimalizace procesu pak používá tyto získané informace k pozmenění profilů, které byly vygenerovány MPX nastavením procesu, takže profily jsou potom umístěny v nejstabilnější pozici zpracovatelského okna.

5.2.3 Zpracovatelské okno

MPX optimalizace procesu využívá zpracovatelské okno k určení stabilních procesních podmínek. Následující obrázek (Obr. 40) a text pod ním lépe pomáhá pochopit, jak návrh experimentů (DOE) funguje.



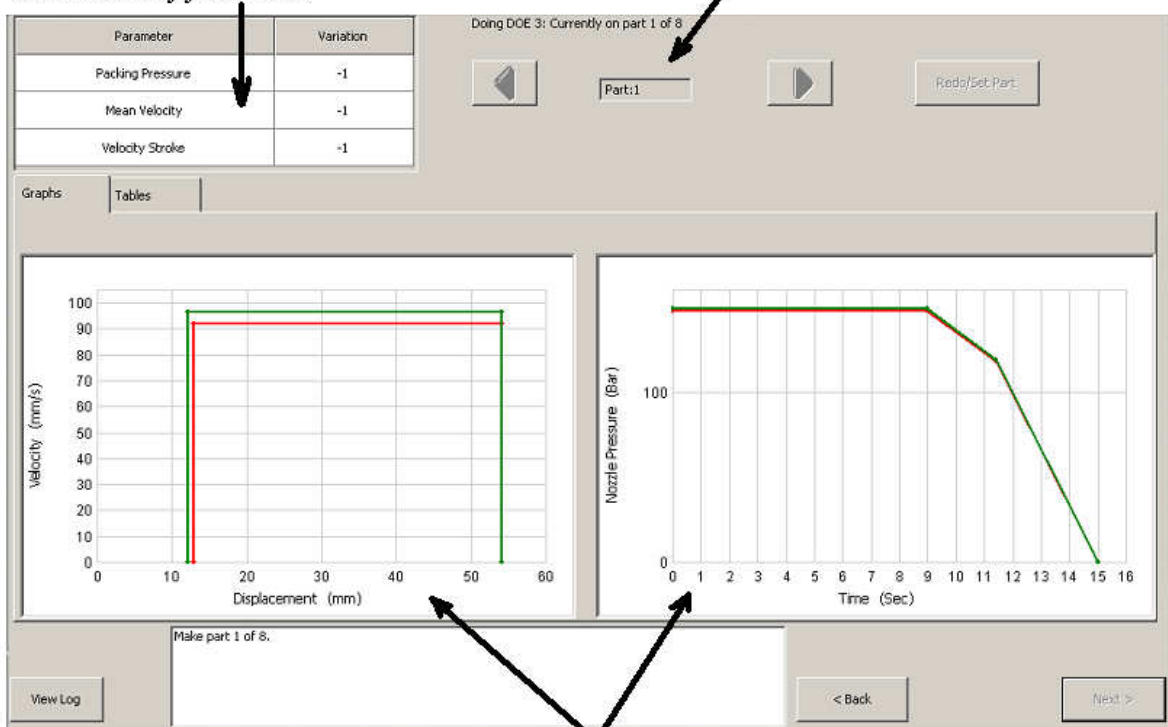
Obr. 40. Zpracovatelské okno.

Šedý region na obrázku (Obr. 40) reprezentuje parametry profilů, které produkují kvalitní díly. Jakýkoliv bod v šedém regionu je sada profilů, která umožní vstřikovacím stroji vyrábět dobré díly. Jakýkoliv bod mimo tuto šedou oblast je sada profilů, které vedou k produkci neshodných kusů.

Střed kříže v diagramu A reprezentuje profily se kterými MPX optimalizace procesu začíná a které již produkují dobré díly. Následně je vyrobeno několik dílů se slabě pozměněnými profily. Čtyři konce kříže reprezentují tyto pozměněné profily. Po výrobě sady dílů s pozměněnými profily je pak požadována zpětná vazba ohledně kvality dílů.

V diagramu A jsou díly nahoře a vlevo vyrobeny s vadami. Jestliže se v sadě výrobků nachází některé s vadami, MPX optimalizace procesu posune profily do oblasti výroby dobrých dílů – viz diagram B. Potom je produkována druhá sada výrobků (viz diagram C). Pokud jsou zde stále nějaké výrobky s vadami, profily budou znovu pozměněny a pokračuje se dále. Jestliže jsou všechny výrobky dobré kvality, jsou přijaty tyto nové profily a MPX optimalizace procesu končí (viz diagram D). Výsledky z tohoto procesu mohou být taktéž uloženy v další zprávě.

Parametry, které budou měněny během DOE a jejich variace.



Počáteční profily jsou zobrazeny zeleně, červené profily jsou měněny vzhledem ke každému aktuálnímu dílu.

Obr. 41. Dialogové okno MPX optimalizace procesu.

Po vyrobené sadě dílů se zadávají vady jednotlivých dílů do tabulky, je možno si zvolit buď vady vizuální nebo rozměrové (Obr. 42 a Obr. 43).

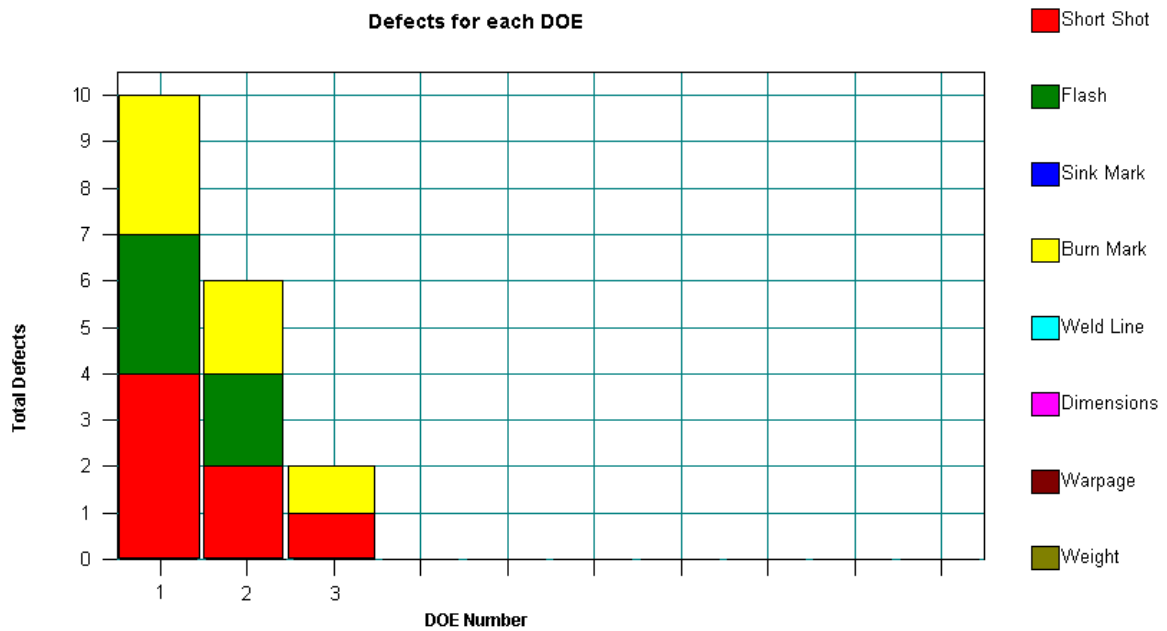
Visual Defects		Dimensional Defects						
Part:	1	2	3	4	5	6	7	8
Short Shot	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flash	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sink Mark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Burn Mark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weld Line	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Obr. 42. Vizuelní defekty.

Visual Defects		Dimensional Defects						
Part:	1	2	3	4	5	6	7	8
Dimensions Large	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dimensions Small	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Warpage Positive	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Warpage Negative	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weight Heavy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weight Light	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Obr. 43. Rozměrové defekty.

Vady jednotlivých sad výrobků jsou pak přehledně znázorněny v grafu na obrázku (Obr. 44).



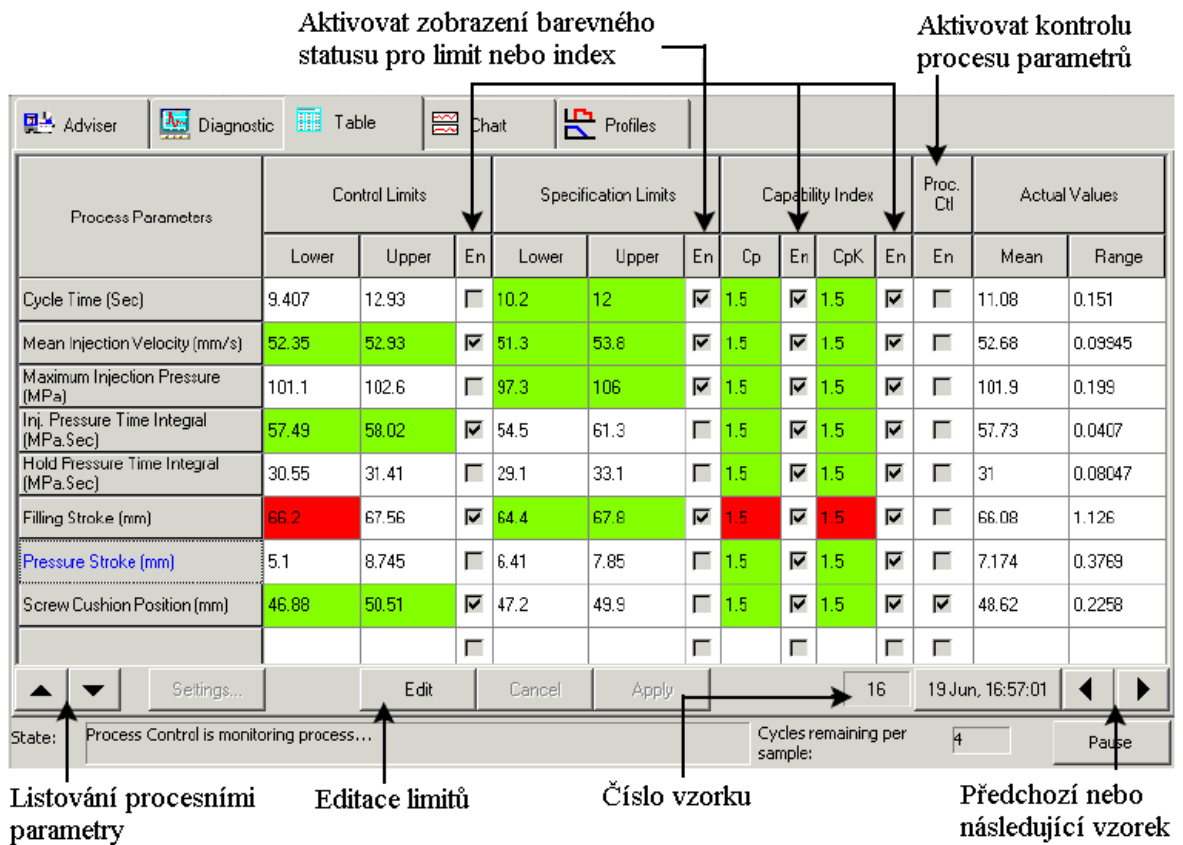
Obr. 44. Graf jednotlivých vad při návrhu experimentů.

5.3 Kontrola procesu (Process Control)

MPX kontrola procesu je komplexní monitorovací a kontrolní systém, který udržuje optimální procesní podmínky získané z optimalizace procesu. Tento program je možno použít pro soustavné sledování a úpravu výrobního procesu vedoucí ke snížení počtu neshodných kusů, vyšší kvalitě výrobku a lepšímu využití strojního času. Tento program lze také nastavit tak, aby automaticky upravoval proces, jestliže dojde k nějakému odchýlení mimo stanovené hranice.

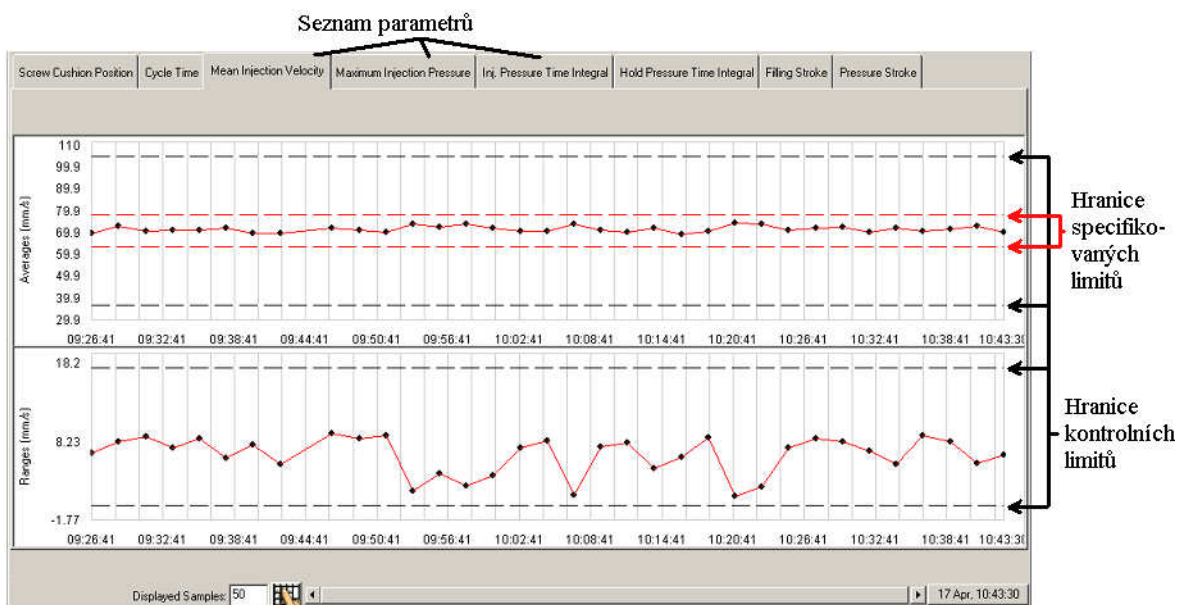
MPX kontrola procesu pomáhá udržovat optimální operační podmínky během výroby. Graficky sleduje specifické proměnné vstřikovacího procesu a automaticky určuje přijatelné kontrolní limity kvality. Pokud již byly nastaveny stabilní procesní podmínky, je možno využít MPX kontrolu procesu ke sledování kritických parametrů, které určují dané profily během výroby. MPX kontrola procesu odhaluje jakékoliv sklony procesu odchýlit se ze středu procesního okna. Následně může vydat varování s doporučeními pro opravu nebo může přímo opravit proces v závislosti na důvodech odchýlení.

Na obrázku (Obr. 45) je zobrazena tabulka parametrů, které jsou při procesu kontrolovány. Zelená barva znamená, že procesní parametry jsou v limitních mezích, červená pak, že jsou mimo tyto meze.



Obr. 45. Tabulka parametrů při MPX kontrole procesu. [16]

Obrázek (Obr. 46) pak ukazuje příklad kontrolního grafu jednoho z parametrů s vyznačenými limity.



Obr. 46. Grafy parametrů při MPX kontrole procesu. [16]

6 STANOVENÍ HMOTNOSTNÍHO (MFR) INDEXU TOKU TAVENINY TERMOPLASTŮ NA VÝTLAČNÉM PLASTOMETRU

Pro orientační hodnocení tokových vlastností polymerů (molekulové hmotnosti a viskozity) slouží index toku taveniny. Jedná se o množství vytlačeného polymeru v gramech za 10 minut. Tato veličina byla měřena na výtlačném plastometru Dynisco Kayeness LMI 4003 (Obr. 47). Technické údaje jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 6. Technické parametry výtlačného plastometru Dynisco Kayeness LMI 4003.

Teplotní rozsah	425°C ($\pm 0,1^\circ\text{C}$)
Rozměry	300 x 350 x 570 mm
Příkon	400W
Objem zkušebního tělesa	8 – 12 cm ³
Rozměr trysky	D = 2,095 mm, L = 8 mm



Obr. 47. Výtlačný plastometr Dynisco Kayeness LMI 4003.

Hmotnostní index toku taveniny (MFR) [g / 10 min] byl stanoven dle normy ČSN EN ISO 1133:1997 a je dán rovnicí:

$$MFR(\theta, m_{nom}) = \frac{t_{ref} \cdot m}{t}, \quad (1)$$

kde je

- θ ... zkušební teplota [°C],
- m_{nom} ... nominální zatížení [kg],
- m ... průměrná hmotnost odřezků [g],
- t_{ref} ... referenční čas [s] (10 min = 600 s),
- t ... interval odřezávání [s].

6.1 Hmotnostní index toku taveniny vstřikovaného PP

Zkušební teplota pro vstřikovaný polypropylen byla zvolena $\theta = 230^\circ\text{C}$, nominální zatížení $m_{nom} = 2,160\text{kg}$, referenční čas $t_{ref} = 10\text{min}$ a interval odřezávání $t = 15\text{s}$. Průměrná hmotnost měřených odřezků, která byla zjištěna z pěti měření, je pak uvedena v následující tabulce:

Tab. 7. Naměřené hodnoty pro index toku taveniny vstřikovaného PP.

Hmotnost vzorku [g] / série měření	1	2	3	4	5	
m_1	0,175	0,147	0,141	0,162	0,150	
m_2	0,152	0,184	0,168	0,173	0,152	
m_3	0,165	0,204	0,150	0,192	0,175	
m_4	0,194	0,180	0,206	0,198	0,181	
m_5	0,170	0,177	0,170	0,174	0,169	
m_6	0,194	0,216	0,169	0,169	0,174	
\bar{m}	0,175	0,185	0,167	0,178	0,167	\overline{ITT}
ITT [g / 10 min]	21,0	22,2	20,1	21,4	20,0	20,9
σ	0,8					

Naměřená hodnota hmotnostního indexu toku taveniny vstřikovaného polypropylenu pro výše uvedené podmínky je $20,9 \pm 0,8$ g/10 min.

6.2 Hmotnostní index toku taveniny vstříkovaného PC+ABS

Zkušební teplota pro vstříkovaný kopolymer PC+ABS byla zvolena $\theta = 265^{\circ}\text{C}$, nominální zatížení $m_{nom} = 2,160\text{kg}$, referenční čas $t_{ref} = 10\text{min}$ a interval odřezávání $t = 10\text{s}$. Průměrná hmotnost měřených odřezků, která byla zjištěna z pěti měření, je pak uvedena v následující tabulce:

Tab. 8. Naměřené hodnoty pro index toku taveniny vstříkovaného PC+ABS.

Hmotnost vzorku [g] / série měření	1	2	3	4	5	
m_1	0,114	0,109	0,099	0,111	0,098	
m_2	0,100	0,118	0,100	0,095	0,105	
m_3	0,103	0,107	0,103	0,103	0,103	
m_4	0,106	0,103	0,100	0,103	0,104	
m_5	0,100	0,115	0,099	0,104	0,103	
m_6	0,106	0,104	0,104	0,106	0,097	
m_7	0,105	0,111	0,100	0,102	0,107	
m_8	0,109	0,107	0,105	0,113	0,100	
\bar{m}	0,105	0,109	0,101	0,105	0,102	\overline{ITT}
ITT [g / 10 min]	6,3	6,6	6,1	6,3	6,1	6,3
σ	0,2					

Hmotnostní index toku taveniny vstříkovaného kopolymeru PC+ABS pro výše uvedené podmínky je $6,3 \pm 0,2 \text{ g/10 min}$.

7 VSTŘIKOVANÉ DÍLY

7.1 Těleso MKO

Jedná se o osminásobnou formu, výrobek je používán v elektrotechnickém průmyslu. Pro vstřikování byl zvolen materiál polypropylen s následujícími vlastnostmi:

Tab. 9. Vlastnosti vstřikovaného PP.

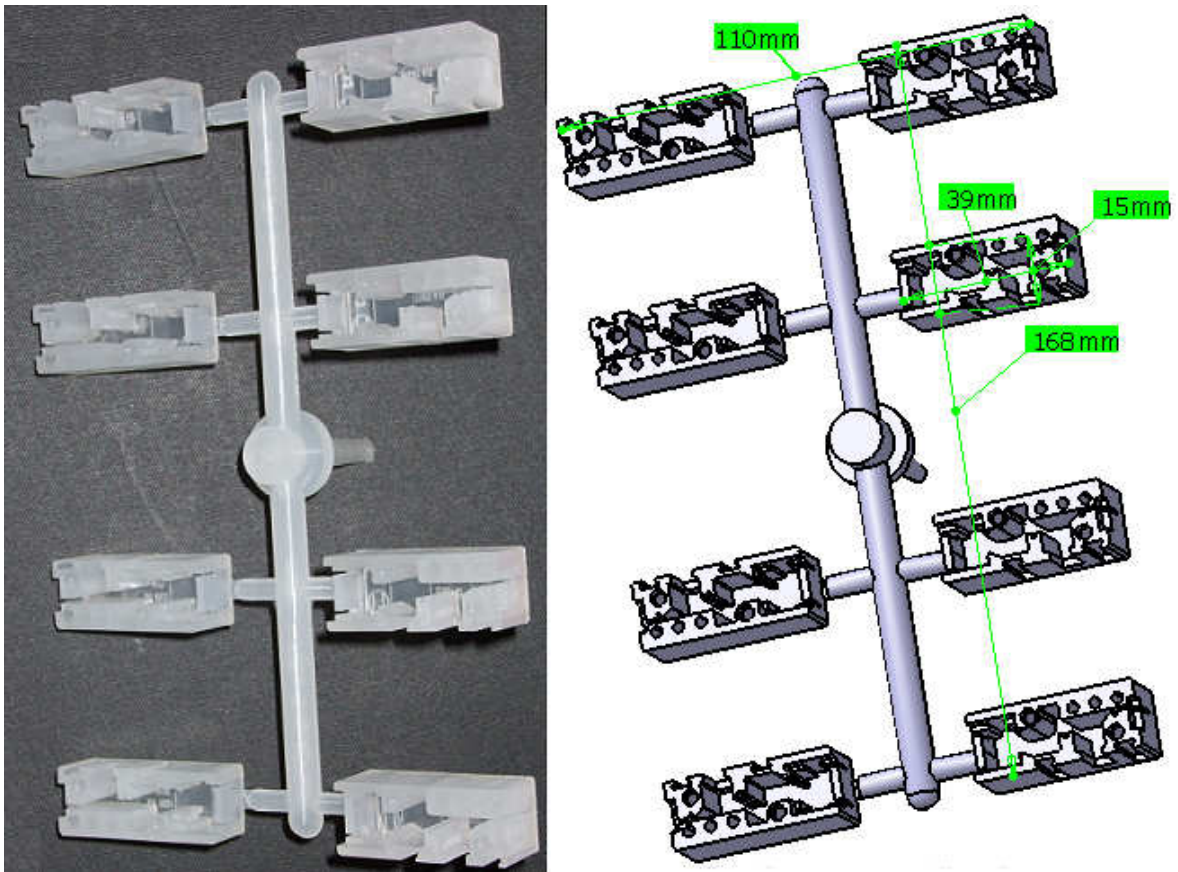
Obecné vlastnosti	Hustota taveniny	0,72828 g/cm ³
	Hustota pevné fáze	0,89163 g/cm ³
	Měrná tepelná kapacita	2740 J/kg.K
	Modul pružnosti	1340 MPa
	Index toku taveniny	21 g/10min
	Smrštění	1,3 %
	Struktura	semikrystalický
Doporučené procesní podmínky	Teplota formy	40°C
	Teplota taveniny	240°C
	Teplota vyhazování	101°C

Na obrázku (Obr. 48) je k vidění forma pro toto těleso.



Obr. 48. Levá a pravá polovina formy pro těleso MKO.

Na obrázku (Obr. 49) je pak vidět samotné těleso MKO a jeho počítačový model.



Obr. 49. Těleso MKO – fotografie a model.

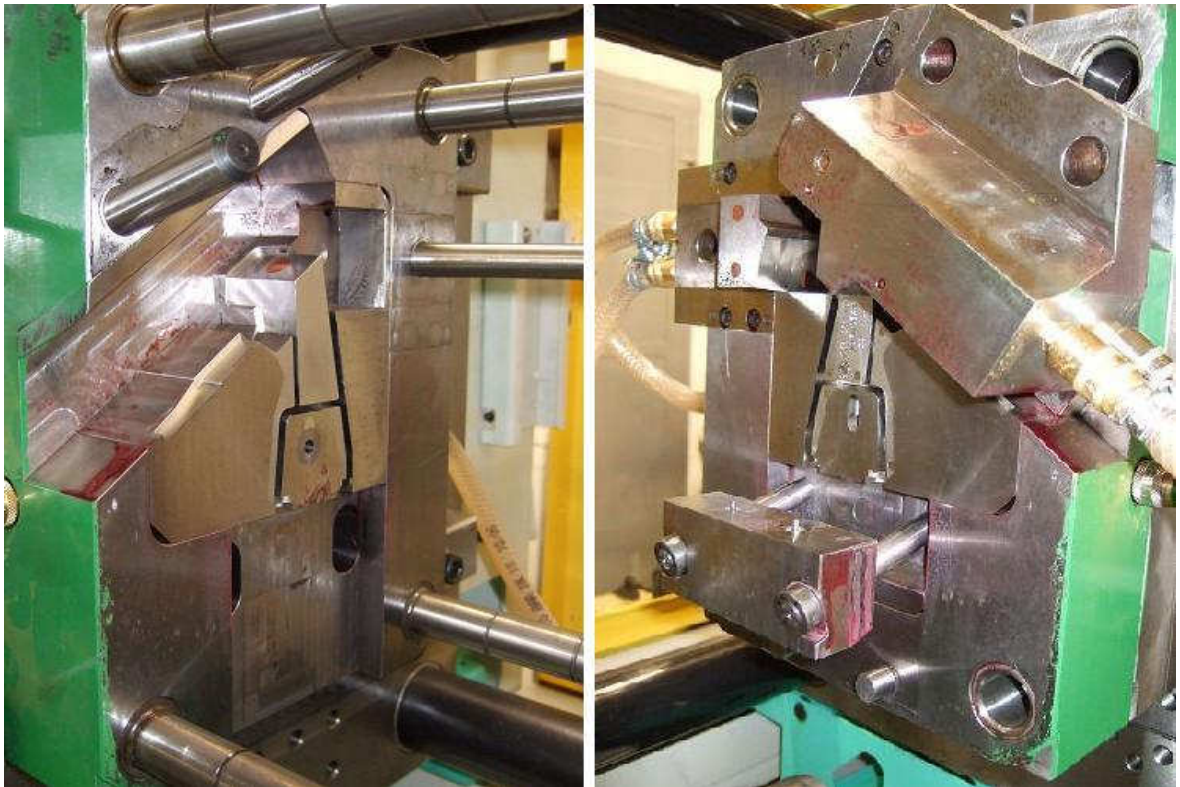
7.2 Úhelník upevňovací

Jednonásobná forma se šikmými čepy, výrobek je součástí automobilu Škoda a slouží k upevnění dalších dílů. Materiál výrobku je kopolymer PC+ABS s těmito vlastnostmi:

Tab. 10. Vlastnosti vstříkovaného PC+ABS.

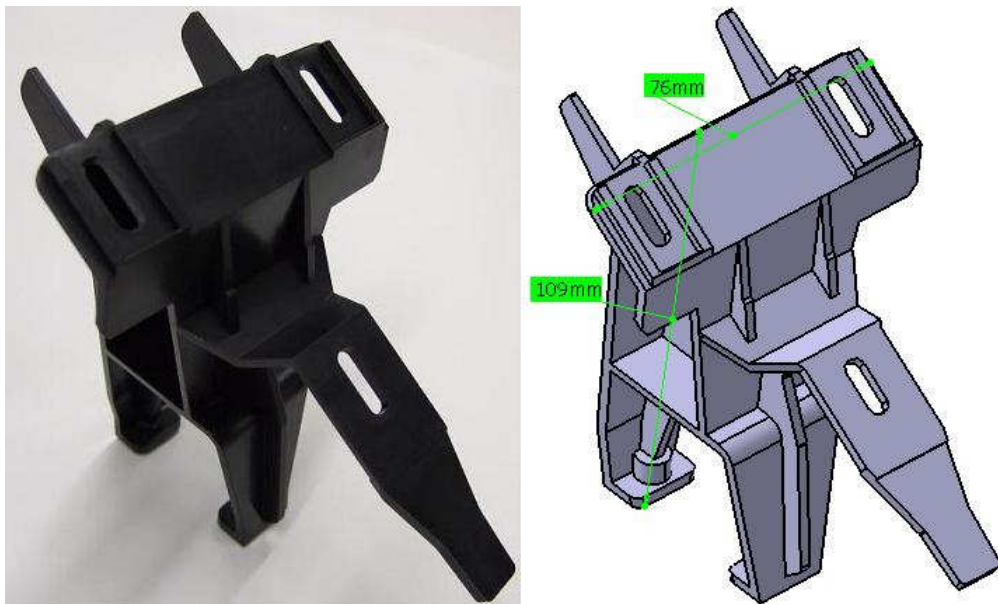
Obecné vlastnosti	Hustota taveniny	0,98581 g/cm ³
	Hustota pevné fáze	1,1161 g/cm ³
	Měrná tepelná kapacita	1872 J/kg.K
	Modul pružnosti	2780 MPa
	Index toku taveniny	6,3 g/10min
	Smrštění	0,50 %
	Struktura	amorfní
Doporučené procesní podmínky	Teplota formy	70°C
	Teplota taveniny	260°C
	Teplota vyhazování	142°C

Na obrázku (Obr. 50) je možno vidět formu tohoto výrobku.



Obr. 50. Levá a pravá polovina formy pro úhelník.

Na obrázku (Obr. 51) je pak vidět samotný úhelník a jeho počítačový model.

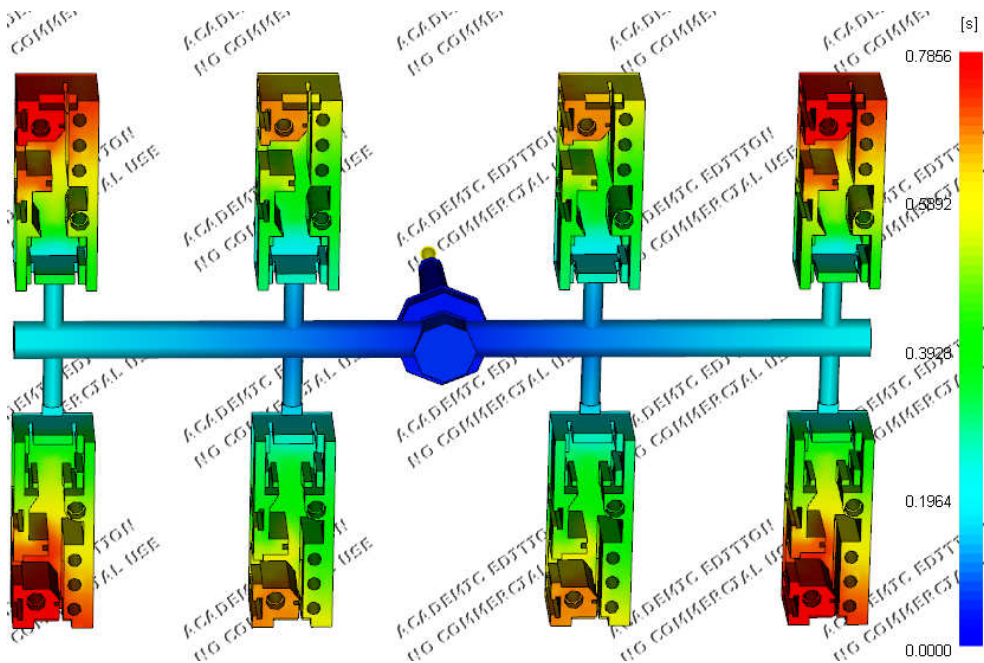


Obr. 51. Úhelník upevňovací – fotografie a model.

8 PROCESNÍ PARAMETRY ZJIŠTĚNÉ Z ANALÝZY MPI

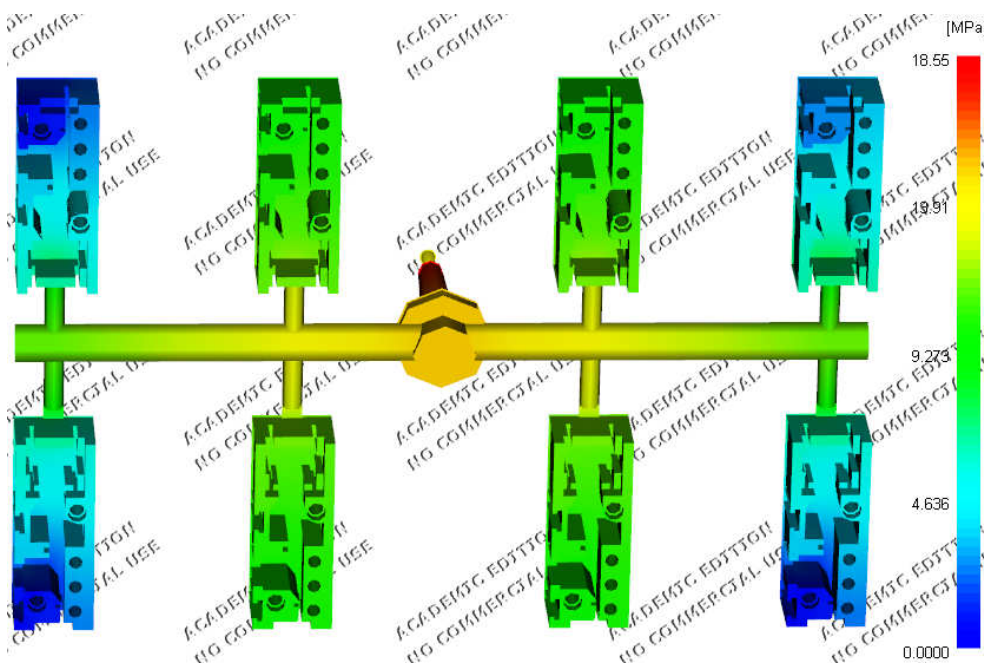
8.1 Parametry pro těleso MKO

- Čas vstřikování – 0,7856s,



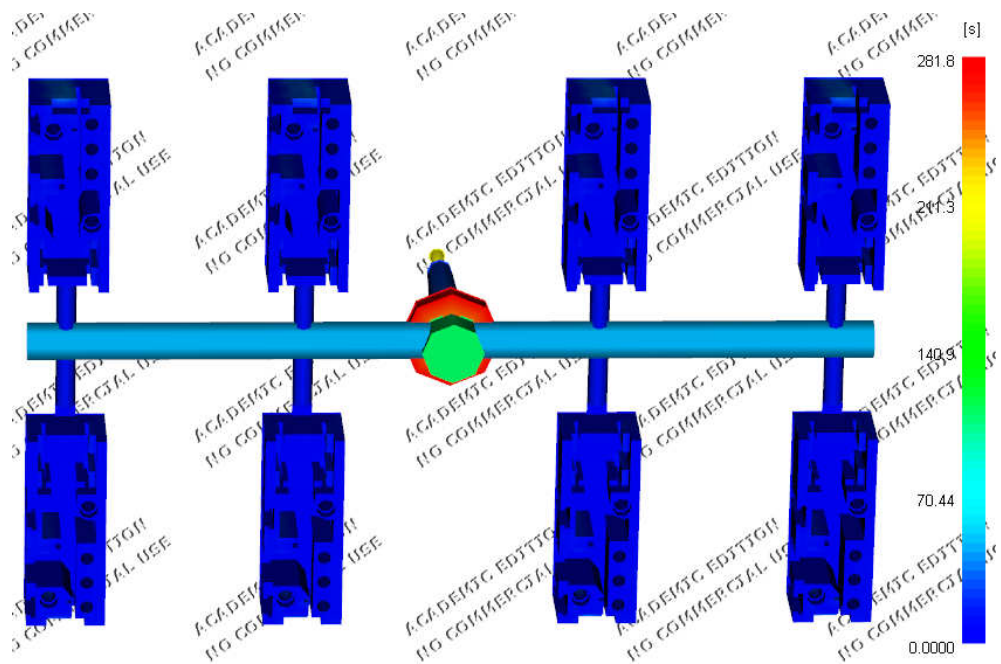
Obr. 52. Čas vstřikování pro těleso MKO.

- tlak na konci plnění – 18,55MPa,



Obr. 53. Tlak na konci plnění pro těleso MKO.

- čas chlazení výrobku – 281,8s.

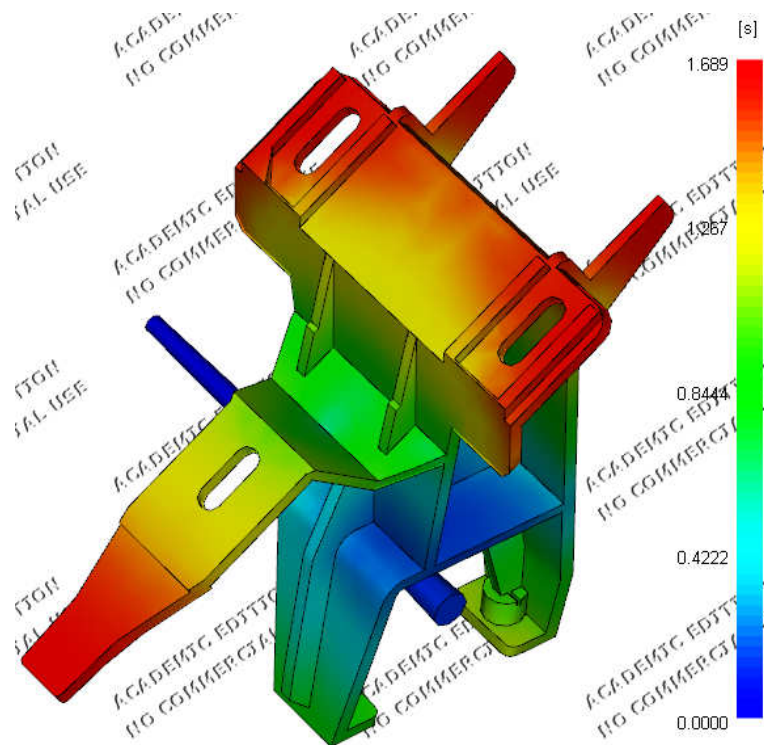


Obr. 54. Čas chlazení tělesa MKO.

Z času chlazení tělesa MKO vyplývá, že vtokový systém tohoto výrobku je velmi nevhodně navržen. Jednak se spotřebuje velké množství materiálu při tak velkém objemu vtokového systému a hlavně čas chlazení je pak neúměrně vysoký kvůli chlazení střední válcové části výrobku. Proto jsou i při nastavení procesu nahráním dat z analýzy tak vysoké hodnoty počátečního profilu. Navíc je tento vtokový systém nevyvážený, což souvisí s dalšími problémy při vstřikování.

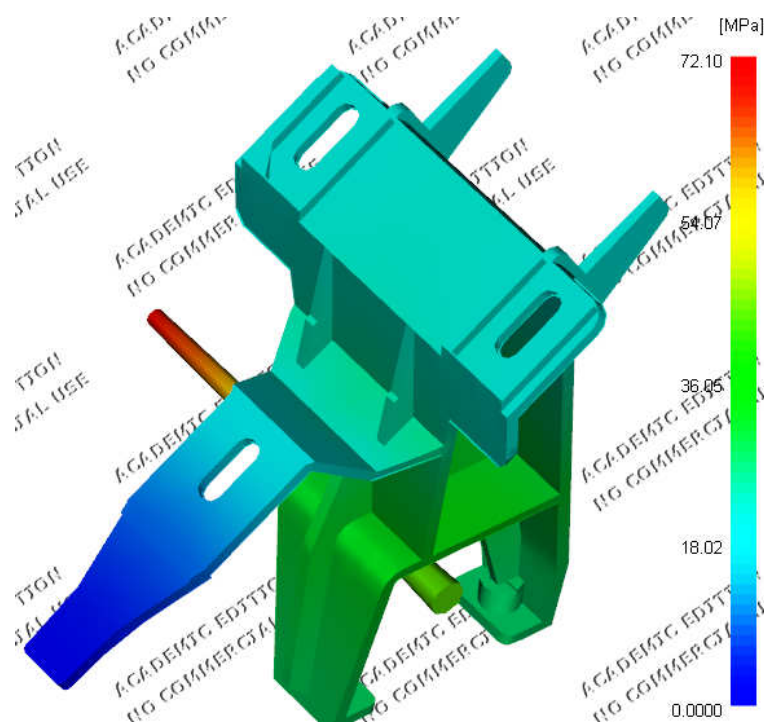
8.2 parametry Pro Úhelník

- Čas vstřikování – 1,689s,



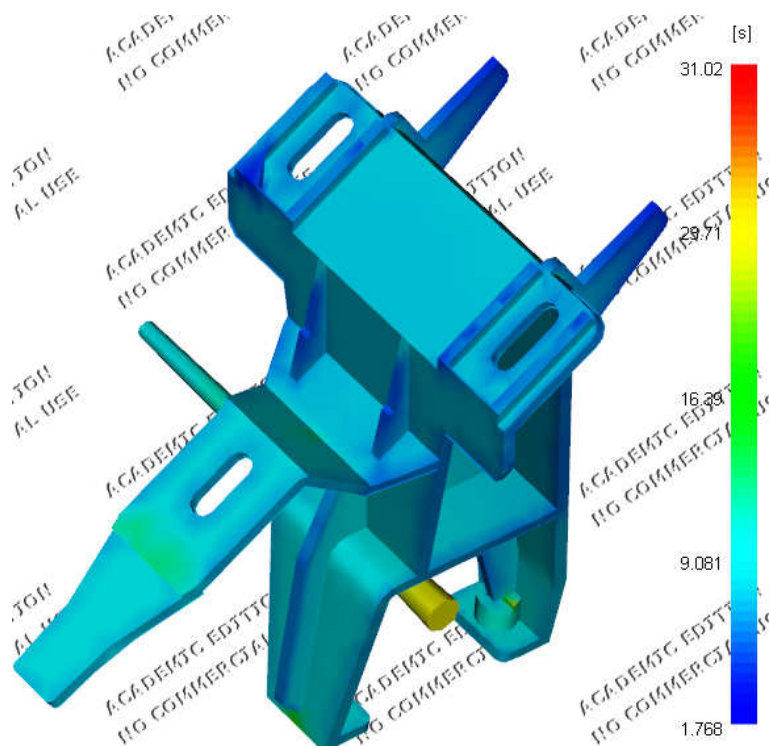
Obr. 55. Čas vstřikování pro úhelník.

- tlak na konci plnění – 72,10MPa,



Obr. 56. Tlak na konci plnění pro úhelník.

- čas chlazení výrobku – 31,02s.



Obr. 57. Čas chlazení úhelníku.

9 OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU TĚLESA MKO

Forma pro těleso MKO byla chlazená vodou přes temperační jednotku na teplotu 40°C. Teploty topných pásem plastikační jednotky jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 11.).

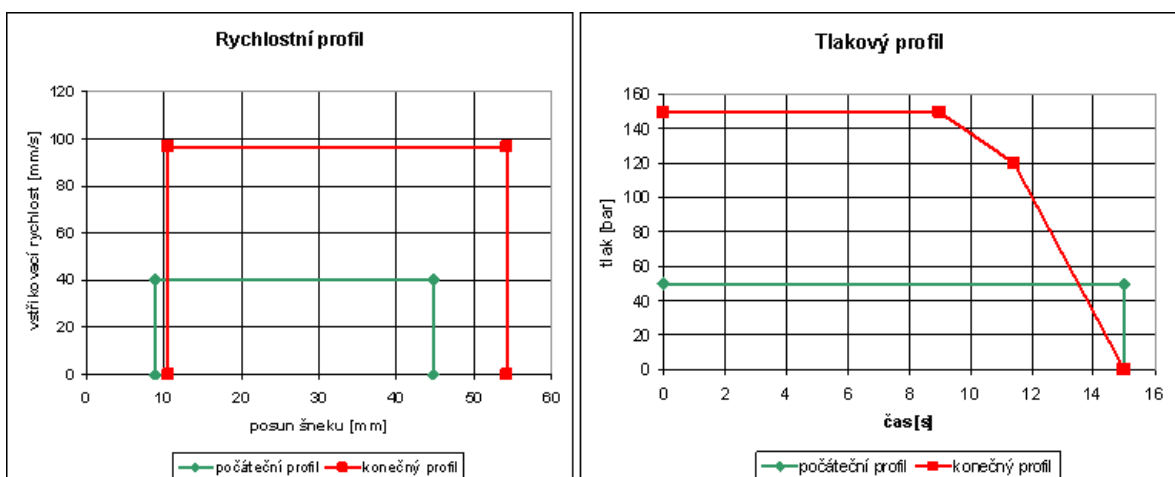
Tab. 11. Teplota topných pásem pro těleso MKO.

Topné pásmo	1 - vstupní	2 - přechodové	3 - výstupní	4 - tryska
Teplota / °C	205	210	220	230

9.1 Automatické nastavení

Tab. 12. Výsledky automatického nastavení pro těleso MKO.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	40	97	
Posun šneku (start - konec) [mm]	9,0 - 44,8	10,6 - 54,2	
Tlak [bar]	50	149	
Čas plnění [s]	0,90	0,45	-0,45
Čas dotlaku [s]	15	15	0,00
Čas chlazení [s]	35	13,63	-21,37
Celkový čas [s]	50,9	29,08	-21,82

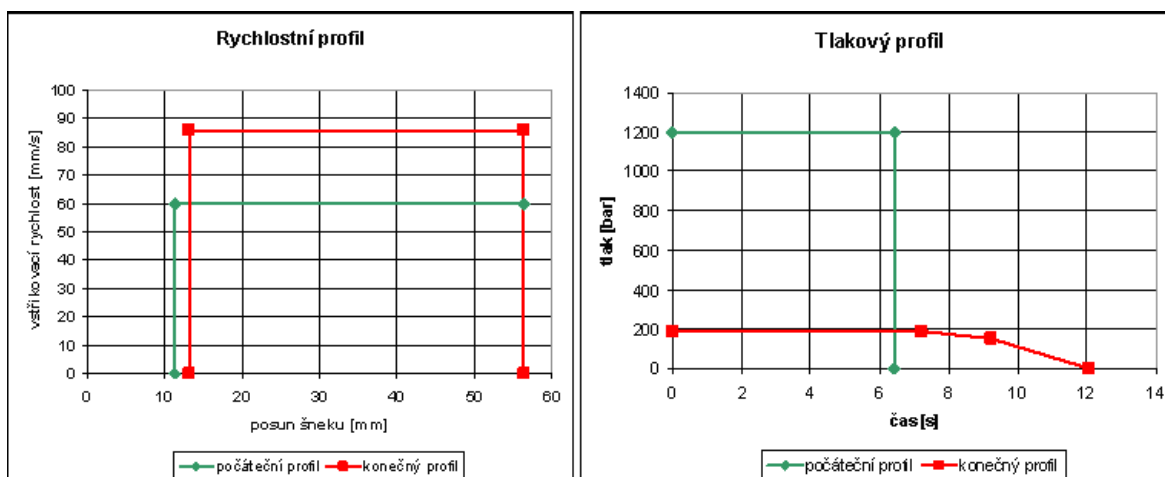


Obr. 58. Profily tělesa MKO – automatické nastavení.

9.2 Poloautomatické nastavení

Tab. 13. Výsledky poloautomatického nastavení pro těleso MKO.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	60	86	
Posun šneku (start - konec) [mm]	11,3 - 56,3	13,1 - 56,3	
Tlak [bar]	1200	189	
Čas plnění [s]	0,75	0,50	-0,25
Čas dotlaku [s]	6,43	12,05	5,62
Čas chlazení [s]	15	9,38	-5,62
Celkový čas [s]	22,18	21,93	-0,25

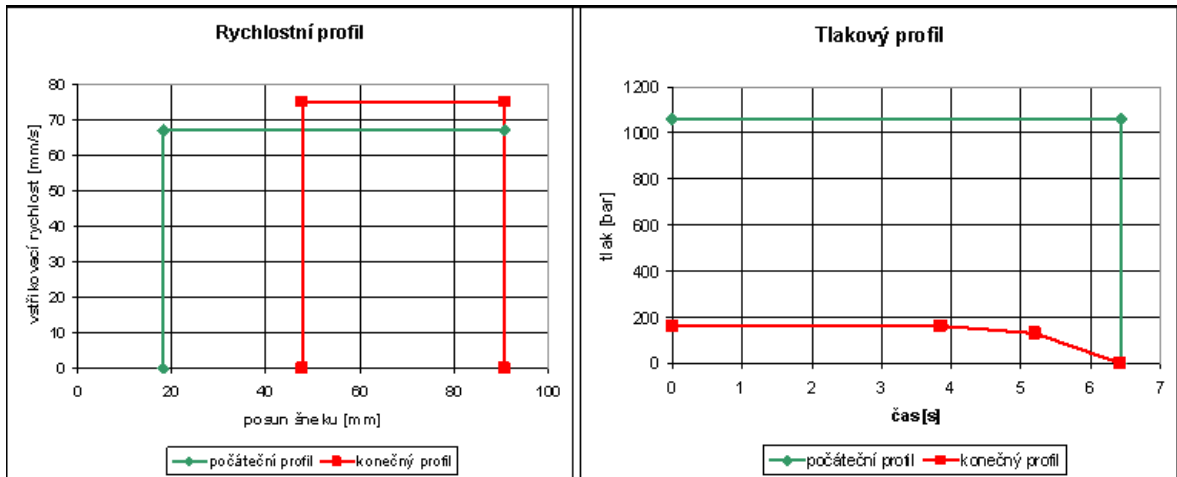


Obr. 59. Profily tělesa MKO – poloautomatické nastavení.

9.3 Ruční nastavení

Tab. 14. Výsledky ručního nastavení pro těleso MKO.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	67	75	
Posun šneku (start - konec) [mm]	18,1 - 90,6	47,7 - 90,6	
Tlak [bar]	1060	160	
Čas plnění [s]	1,09	0,57	-0,52
Čas dotlaku [s]	6,43	6,43	0,00
Čas chlazení [s]	15	10,39	-4,61
Celkový čas [s]	22,52	17,39	-5,13

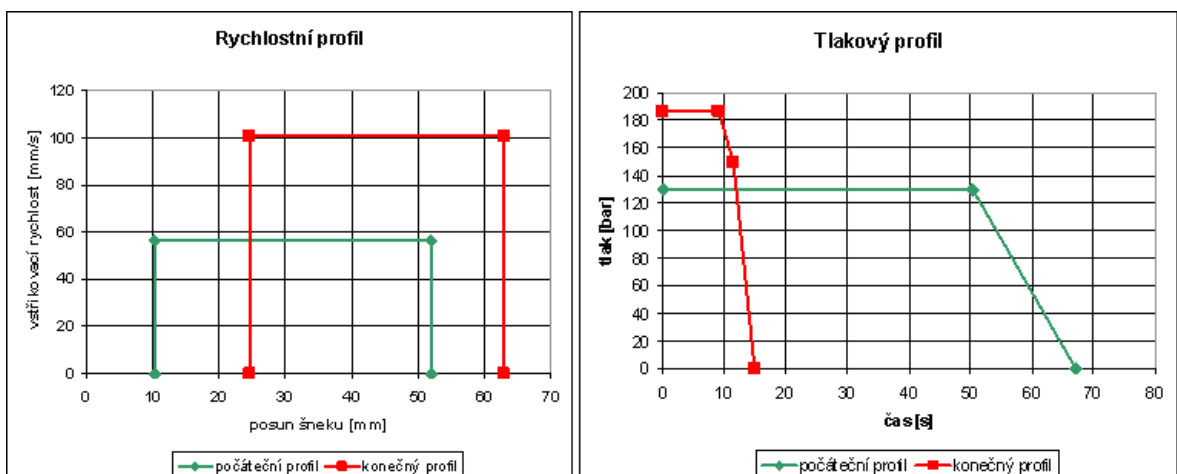


Obr. 60. Profily tělesa MKO – ruční nastavení.

9.4 Nahrání dat z analýzy MPI

Tab. 15. Výsledky nastavení z nahraných dat analýzy pro těleso MKO.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	56	100	
Posun šneku (start - konec) [mm]	10,4 - 52,0	24,7 - 62,9	
Tlak [bar]	130	187	
Čas plnění [s]	0,74	0,38	-0,36
Čas dotlaku [s]	67,08	14,95	-52,13
Čas chlazení [s]	212,42	11,63	-200,79
Celkový čas [s]	280,24	26,96	-253,28



Obr. 61. Profily tělesa MKO – nahrání dat z analýzy.

10 OPTIMALIZACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU ÚHELNÍKU UPEVNŮVACÍHO

Forma pro úhelník byla chlazená vodou přes temperační jednotku na teplotu 50°C. Teploty topných pásem plastikační jednotky jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 16).

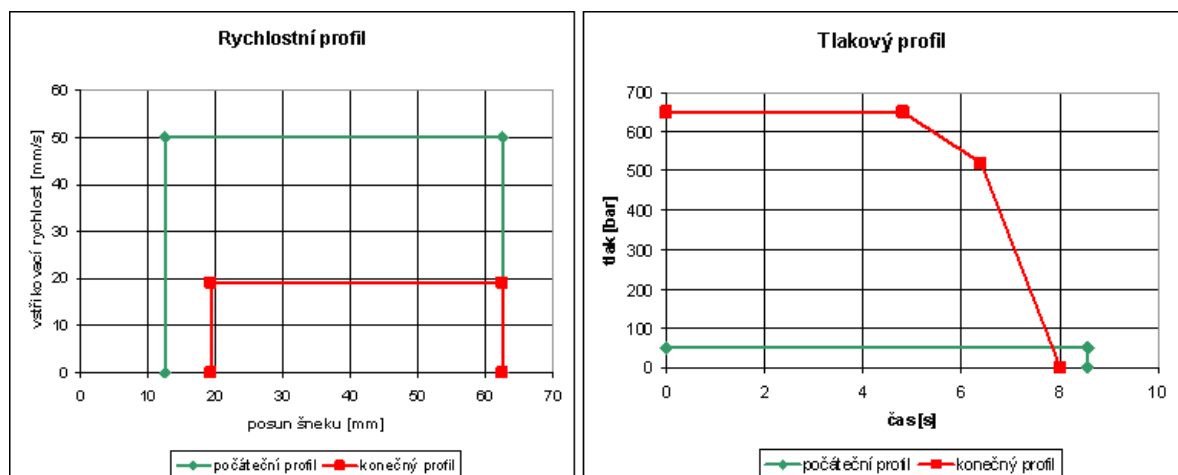
Tab. 16. Teplota topných pásem pro úhelník.

Topné pásmo	1 - vstupní	2 - přechodové	3 - výstupní	4 - tryska
Teplota / °C	235	250	255	265

10.1 Automatické nastavení

Tab. 17. Výsledky automatického nastavení pro úhelník upevňovací.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	50	19	
Posun šneku (start - konec) [mm]	12,5 - 62,5	19,3 - 62,5	
Tlak [bar]	50	649	
Čas plnění [s]	1,00	2,26	1,26
Čas dotlaku [s]	8,57	8	-0,57
Čas chlazení [s]	20	7,75	-12,25
Celkový čas [s]	29,57	18,01	-11,56

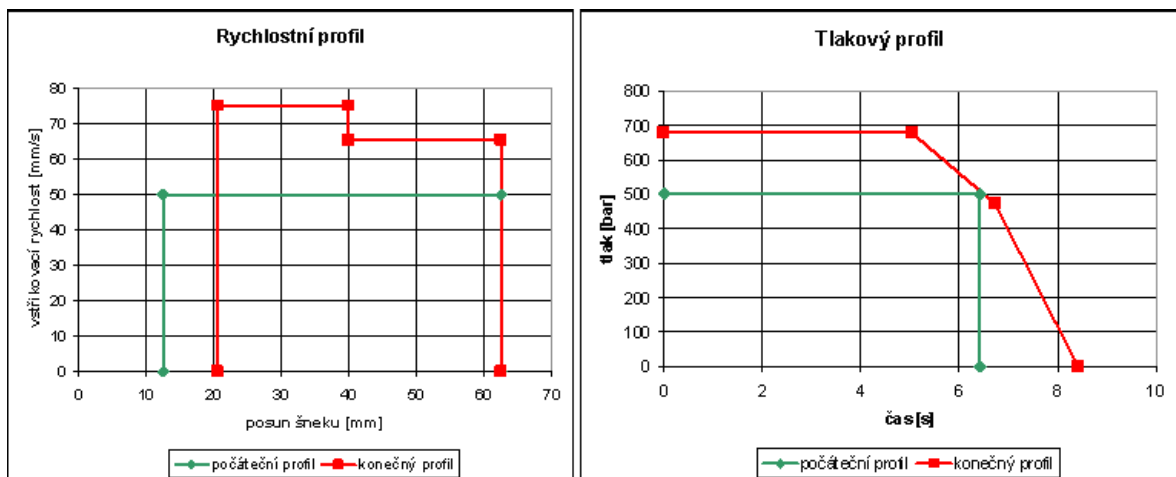


Obr. 62. Profily úhelníku – automatické nastavení.

10.2 Poloautomatické nastavení

Tab. 18. Výsledky poloautomatického nastavení pro úhelník upevňovací.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	50	75	
Posun šneku (start - konec) [mm]	12,5 - 62,5	20,5 - 62,5	
Tlak [bar]	500	677	
Čas plnění [s]	1,00	0,60	-0,40
Čas dotlaku [s]	6,43	8,42	1,99
Čas chlazení [s]	15	8,06	-6,94
Celkový čas [s]	22,43	17,08	-5,35

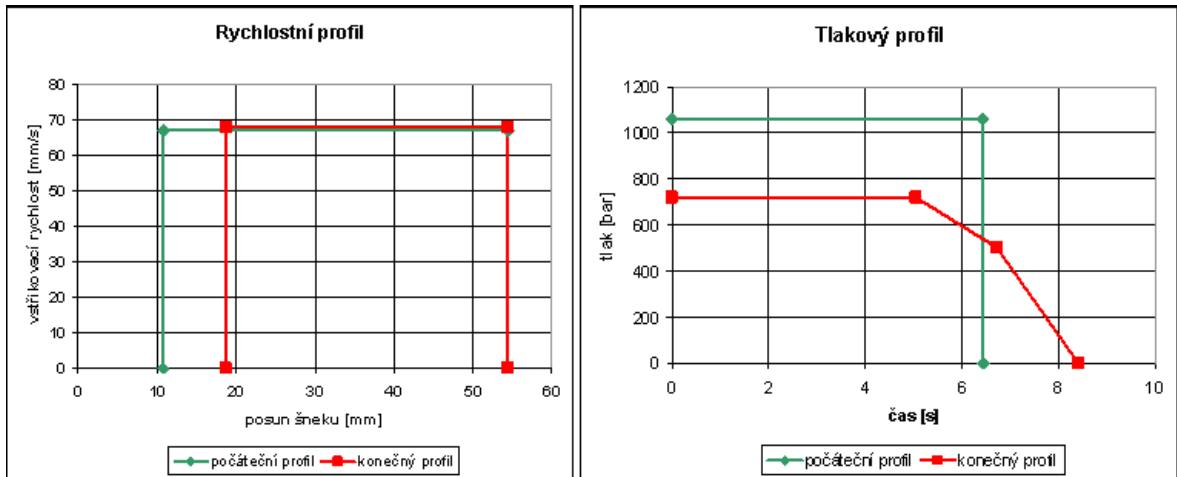


Obr. 63. Profily úhelníku – poloautomatické nastavení.

10.3 Ruční nastavení

Tab. 19. Výsledky ručního nastavení pro úhelník upevňovací.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	67	68	
Posun šneku (start - konec) [mm]	10,9 - 54,4	18,8 - 54,4	
Tlak [bar]	1060	721	
Čas plnění [s]	0,65	0,52	-0,13
Čas dotlaku [s]	6,43	8,4	1,97
Čas chlazení [s]	15	8,15	-6,85
Celkový čas [s]	22,08	17,07	-5,01

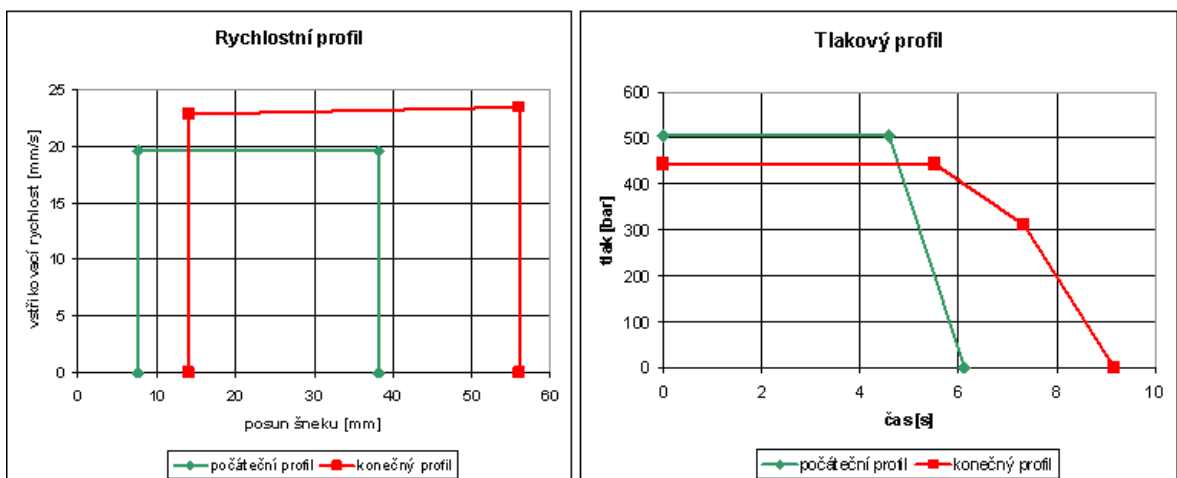


Obr. 64. Profily úhelníku – ruční nastavení.

10.4 Nahrání dat z analýzy MPI

Tab. 20. Výsledky nastavení z nahraných dat analýzy pro úhelník upevňovací.

	Počáteční profil	Konečný profil	Rozdíl
Vstřikovací rychlost [mm/s]	20	23	
Posun šneku (start - konec) [mm]	7,7 - 38,3	14,1 - 56	
Tlak [bar]	505	444	
Čas plnění [s]	1,57	1,81	0,24
Čas dotlaku [s]	6,12	9,18	3,06
Čas chlazení [s]	19,38	8,43	-10,95
Celkový čas [s]	27,07	19,42	-7,65



Obr. 65. Profily úhelníku – nahrání dat z analýzy.

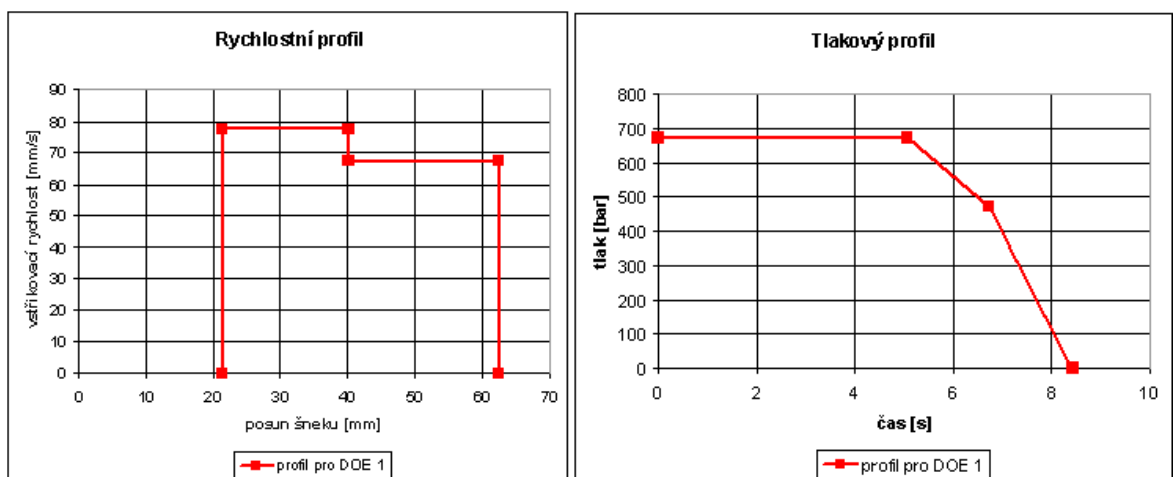
10.5 Příklad optimalizace procesu pomocí návrhu experimentů (DOE)

Z důvodu nedostupnosti a větší spotřeby materiálu během vstřikování je uvedena optimalizace procesu pouze pro jeden případ – poloautomatické nastavení, na kterém je možné si názorně přiblížit funkci a možnosti tohoto procesu.

Tab. 21. Hodnoty při optimalizaci poloautomatického nastavení.

	Nastavení procesu	DOE 1	DOE 2	DOE 3
Vstřikovací rychlost [mm/s]	75,12 ; 65,32	77,47 ; 67,36	73,78 ; 64,15	71,44 ; 62,53
Posun šneku (start - konec) [mm]	20,47 - 62,5	21,36 - 62,5	22,31 - 62,5	21,70 - 62,5
Tlak [bar]	677	670	670	672

Počáteční profil pro DOE 1:

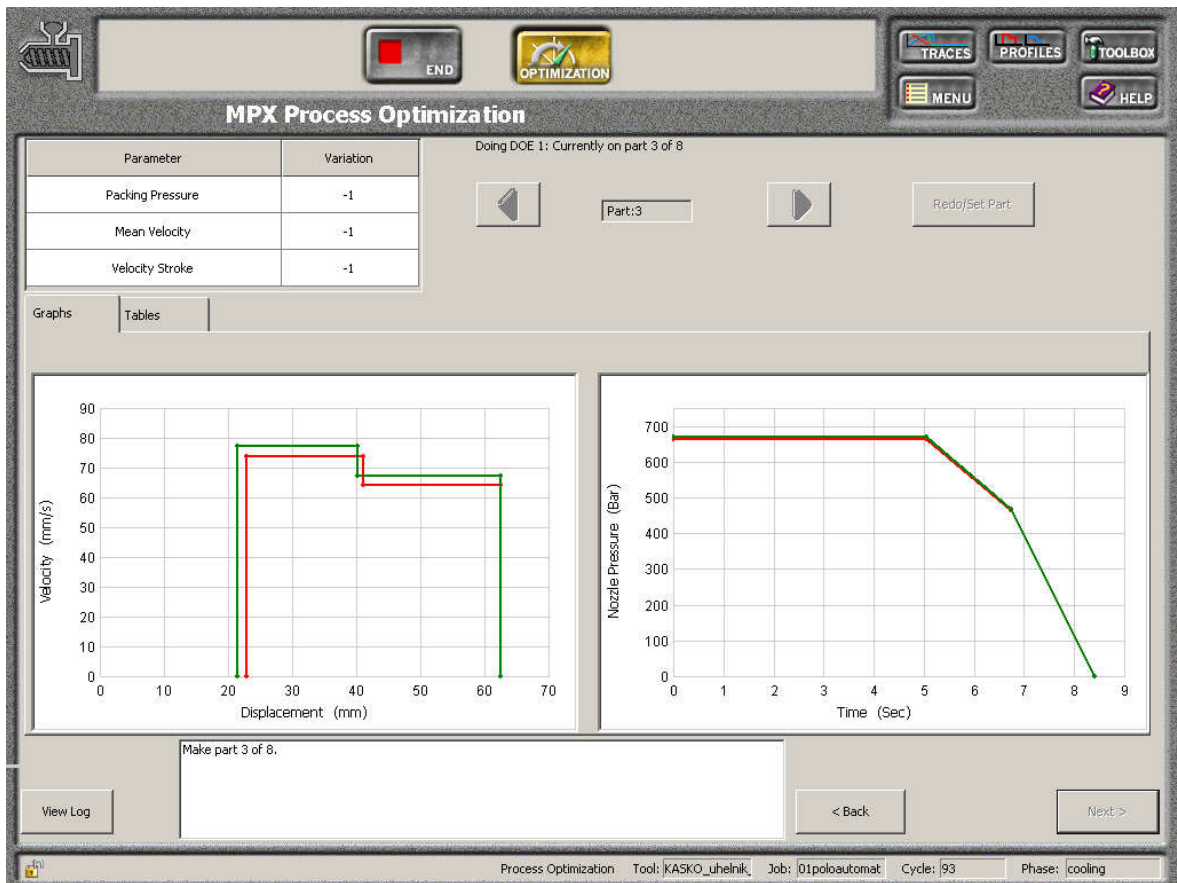


Obr. 66. Rychlostní a tlakový profil pro DOE 1.

Tab. 22. Variace procesních parametrů při DOE 1.

Díl	Dotlak [Mpa]	Rychlost [mm/s]	Posun šneku [mm]
1	663,06	68,57	39,71
2	663,06	68,57	42,58
3	663,06	75,43	39,71
4	663,06	75,43	42,58
5	676,46	68,57	39,71
6	676,46	68,57	42,58
7	676,46	75,43	39,71
8	676,46	75,43	42,58

V dialogovém okně optimalizace procesu na obrázku (Obr. 67) je vidět, jak je měněn rychlostní profil pro každý cyklus výrobku.

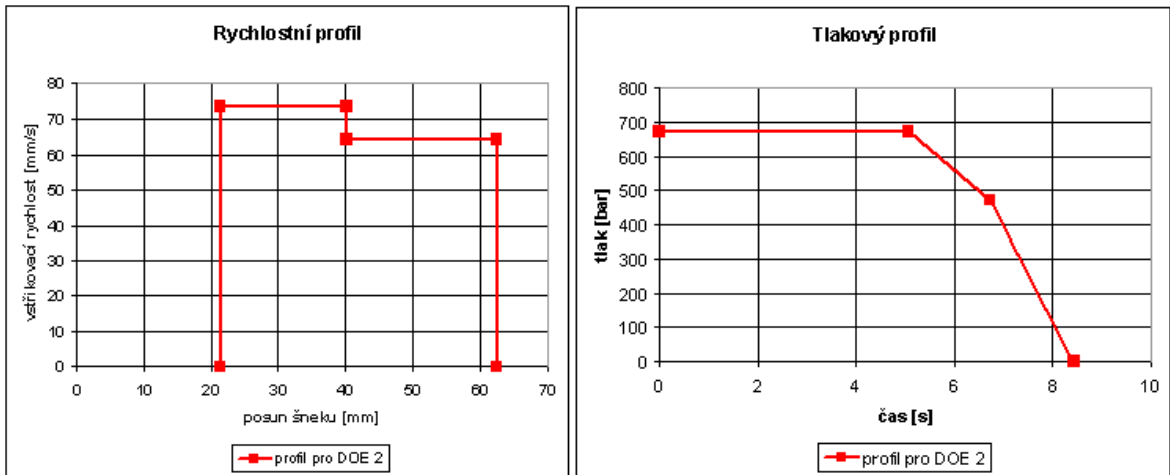


Obr. 67. Změna profilu během optimalizace poloautomatického procesu.

Tab. 23. Zjištěné vady při DOE 1.

Díl	Nedotečené místo	Přetok	Propadlina	Spálené místo	Studený spoj
1	ok	ok	ok	ok	ok
2	ok	ok	ok	ok	ok
3	ok	ok	ok	ok	ok
4	ok	ok	ok	vada	ok
5	ok	ok	ok	ok	ok
6	ok	ok	ok	ok	ok
7	ok	ok	ok	vada	ok
8	ok	ok	ok	ok	ok

Změněný profil pro DOE 2:



Obr. 68. Rychlostní a tlakový profil pro DOE 2.

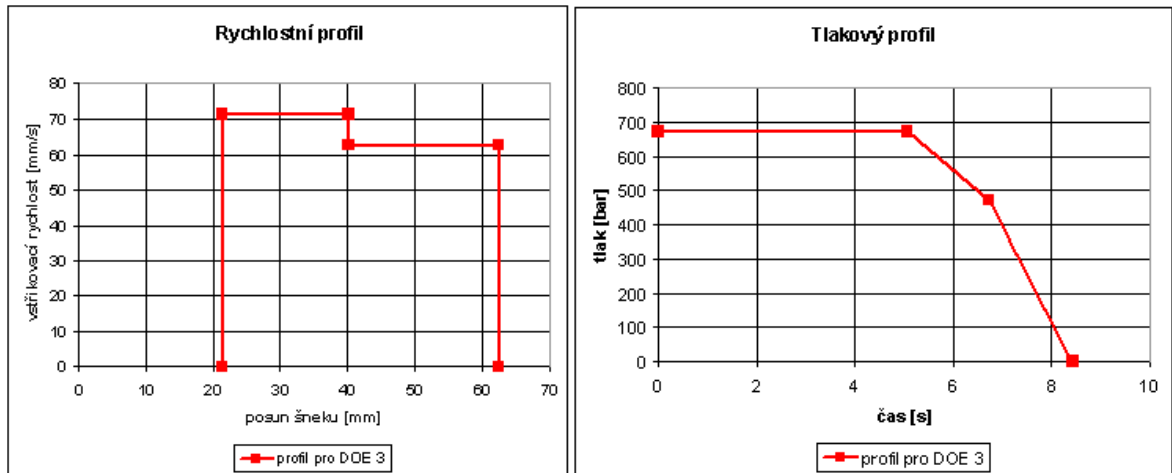
Tab. 24. Variace procesních parametrů při DOE 2.

Díl	Dotlak [Mpa]	Rychlost [mm/s]	Posun šneku [mm]
1	663,06	65,14	38,75
2	663,06	65,14	41,62
3	663,06	72,00	38,75
4	663,06	72,00	41,62
5	676,46	65,14	38,75
6	676,46	65,14	41,62
7	676,46	72,00	38,75
8	676,46	72,00	41,62

Tab. 25. Zjištěné vady při DOE 2.

Díl	Nedotečené místo	Přetok	Propadlina	Spálené místo	Studený spoj
1	ok	ok	ok	ok	ok
2	ok	ok	ok	ok	ok
3	ok	ok	ok	ok	ok
4	ok	ok	ok	ok	ok
5	ok	ok	ok	ok	ok
6	ok	ok	ok	ok	ok
7	ok	ok	ok	ok	ok
8	ok	ok	ok	vada	ok

Změněný profil pro DOE 3:

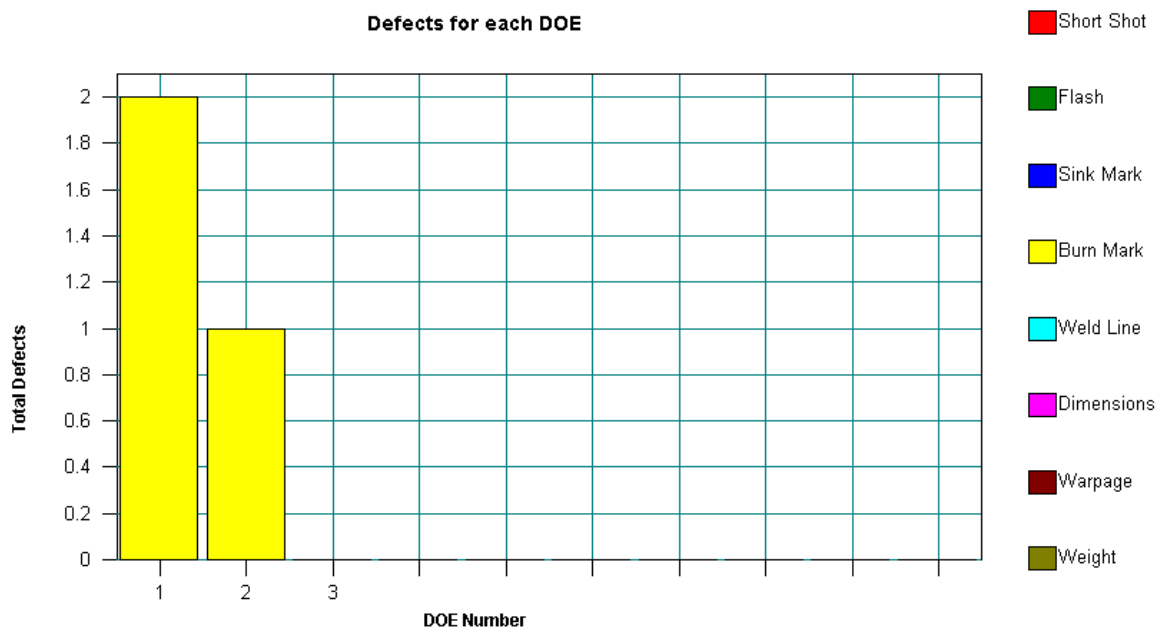


Obr. 69. Rychlostní a tlakový profil pro DOE 3.

Tab. 26. Variace procesních parametrů při DOE 3.

Díl	Dotlak [Mpa]	Rychlost [mm/s]	Posun šneku [mm]
1	665,06	63,57	39,20
2	665,06	63,57	42,13
3	665,06	69,43	39,20
4	665,06	69,43	42,13
5	678,46	63,57	39,20
6	678,46	63,57	42,13
7	678,46	69,43	39,20
8	678,46	69,43	42,13

Při tomto návrhu experimentů č. 3 se už nevyskytly žádné vady, procesní parametry byly vyoptymalizovány. Na obrázku (Obr. 70) je znázorněn graf počtu a druhu vad během této optimalizace procesu.



Obr. 70. Graf vad během optimalizace poloautomatického procesu.

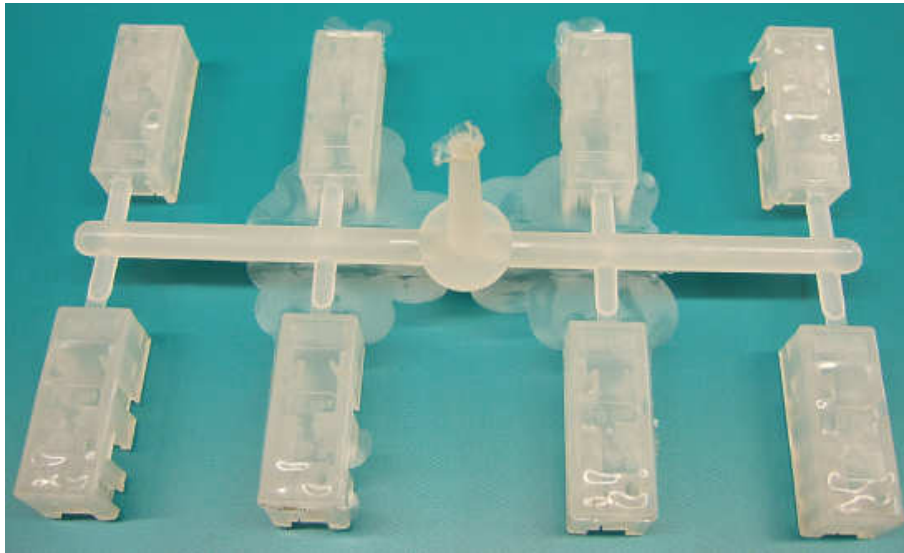
Při optimalizaci poloautomatického procesu za použití návrhu experimentů z počátečních a koncových profilů vyplývá, že pro eliminaci vad spálených míst byla v sadě experimentů postupně snižována vstřikovací rychlost a až při třetím kroku se nevyskytovala žádná spálená místa. Celý optimalizační proces tedy posunul procesní parametry z procesu nastavení blíže ke středu zpracovatelského okna a tak přispěl ke stabilizaci celého procesu vstřikování.

Optimalizace procesu s využitím návrhu experimentů je užitečné řešení, které je zejména dobré využít pro tvarově složitější a procesně náročnější výrobky, u kterých se může během vstřikovacího procesu občas vyskytnout i několik druhů vad najednou. Bude tedy větší důvod použít tuto optimalizaci, jelikož ruční nastavení obsluhou by mohlo být už velmi náročné a zdlouhavé.

11 VADY VÝROBKŮ ODSTRANĚNÉ BĚHEM OPTIMALIZACE

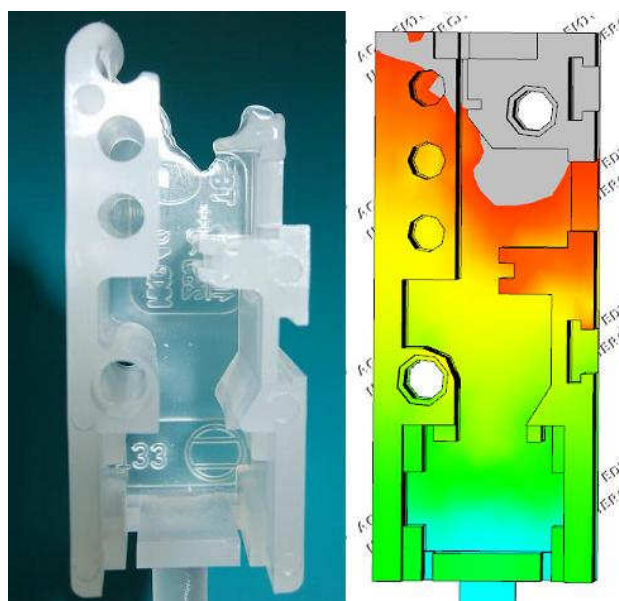
11.1 Vady tělesa MKO

- přetoky – vznikají při velké vstřikovací dráze šneku, velké rychlosti vstřikování a také k nim může docházet při velkém dotlaku s dlouhým časem,



Obr. 71. Vady tělesa MKO – přetoky.

- nedotečená místa – vada, která je příčinou především krátké vstřikovací dráhy šneku a také malé vstřikovací rychlosti, na obrázku (Obr. 72) je srovnání nedotečeného dílu a výsledku z analýzy MPI,



Obr. 72. Vady tělesa MKO – nedotečená místa.

- nečistoty – byly důsledkem špatného pročištění plastikační jednotky od posledního vstřikování,



Obr. 73. Vady tělesa MKO – nečistoty.

- propadliny – tyto vady se vyskytovaly při nedostatečném až nulovém dotlaku,



Obr. 74. Vady tělesa MKO – propadliny.

- bubliny – vznikají při velké vstřikovací rychlosti a špatném odvzdušnění formy.



Obr. 75. Vady tělesa MKO – bubliny.

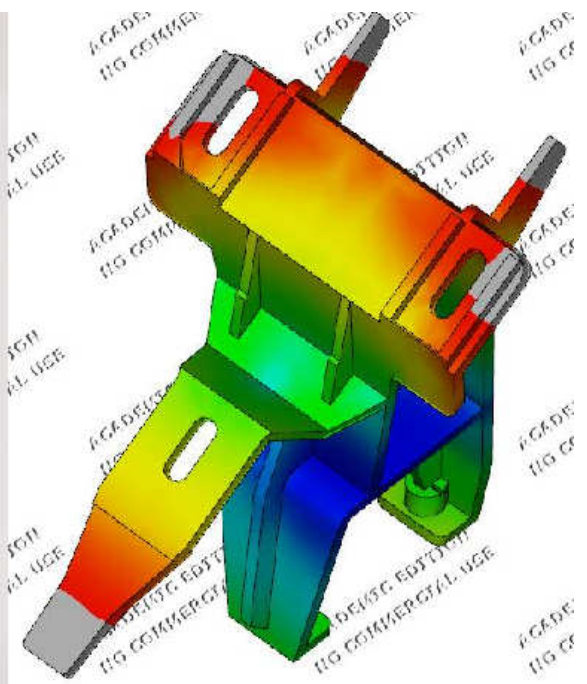
11.2 Vady úhelníku upevňovacího

- přetoky,



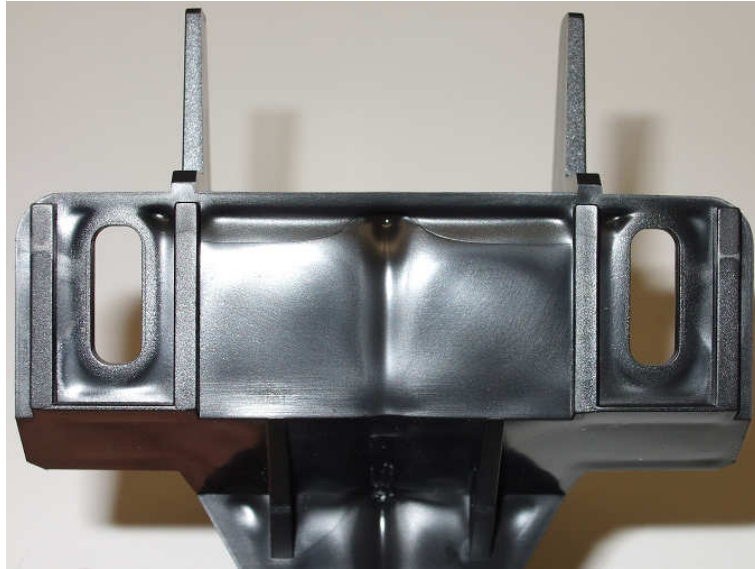
Obr. 76. Vady úhelníku – přetoky.

- nedotečená místa,



Obr. 77. Vady úhelníku – nedotečená místa.

- propadliny,



Obr. 78. Vady úhelníku – propadliny.

- barevné pruhy – jsou způsobené nedostatečným promícháním základního materiálu a barviva v plastikační jednotce,



Obr. 79. Vady úhelníku – barevné pruhy.

- zdrženiny – důsledek zpomalení proudu taveniny a její předčasné zchládnutí v místě vtoku.



Obr. 80. Vady úhelníku – zdrženiny.

12 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V následujících tabulkách (Tab. 27a Tab. 28) jsou uvedeny výsledky nastavení vstřikovacího procesu pro jednotlivé výrobky:

Tab. 27. Shrnutí výsledků nastavení procesu pro těleso MKO.

Nastavení procesu	Automatické	Poloautomatické	Ruční	Data z analýzy
Vstřikovací rychlost [mm/s]	97	86	75	100
Posun šneku (start - konec) [mm]	10,6 - 54,2	13,1 - 56,3	47,7 - 90,6	24,7 - 62,9
Tlak [bar]	149	189	160	187
Čas plnění [s]	0,45	0,50	0,57	0,38
Čas dotlaku [s]	15	12,05	6,43	14,95
Čas chlazení [s]	13,63	9,38	10,39	11,63
Celkový čas [s]	29,08	21,93	17,39	26,96

Tab. 28. Shrnutí výsledků nastavení procesu pro úhelník.

Nastavení procesu	Automatické	Poloautomatické	Ruční	Data z analýzy
Vstřikovací rychlost [mm/s]	19	75	68	23
Posun šneku (start - konec) [mm]	19,3 - 62,5	20,5 - 62,5	18,8 - 54,4	14,1 - 56
Tlak [bar]	649	677	721	444
Čas plnění [s]	2,26	0,60	0,52	1,81
Čas dotlaku [s]	8	8,42	8,4	9,18
Čas chlazení [s]	7,75	8,06	8,15	8,43
Celkový čas [s]	18,01	17,08	17,07	19,42

Z uvedeného vyplývá, že pro dobrou optimalizaci procesu je třeba se dobře seznámit s celým MPX systémem, který byl popsán v kapitole 5.

Během nastavení procesu bylo v jednotlivých krocích odstraněno množství problematických vad, které jsou uvedeny v kapitole 11.

Výsledky nastavení procesu pro těleso MKO se mírně liší v časech tlaku a dotlaku, což může být způsobeno zadanými počátečními parametry u jednotlivých druhů nastavení a také subjektivním posouzením některých vad při optimalizaci dotlaku a chlazení.

Výsledky nastavení procesu pro úhelník se liší v případě automatického a analyzového druhu nastavení svou vstřikovací rychlostí a tím také časem plnění, což může být opět způsobeno zadáním počátečních parametrů.

Pro ekonomickou stránku celého vstřikovacího procesu jasně hovoří hodnoty celkových vstřikovacích časů, což je čas potřebný k výrobě jednoho výrobku. A právě cílem optimalizace procesu je nejen správné nastavení procesních podmínek a odstranění všech výrobních vad, ale také následně snížení celkového vstřikovacího času na minimum.

Jestliže obsluha stroje nastaví čas vstřikovacího cyklu na 35s a při použití MPX systému je tento čas snížen na hodnotu 17s – přibližně poloviční čas, je nasnadě jak velké ekonomické výhody to přináší podniku, zvláště při velkosériových výrobcích. Produkce jednoho výrobku se tím může zkrátit ze dvou měsíců na měsíc jeden, podnik tak vydělá stejné peníze za mnohem kratší dobu.

Měření, během kterého byly odstraněny vady výrobků a počáteční časy vstřikovacích cyklů velmi významně redukovány, ukazuje, že MPX systém je velmi dobrým rádcem a pomocníkem při optimalizování vstřikovacího procesu, ale pro finální určení a výběr správných dat je potřeba využít soudnosti a zkušeností odpovědného pracovníka.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá tématem vstřikování, konkrétně optimalizací vstřikovacího procesu s pomocí MPX systému. Teoretická část uvádí do problematiky plastů, jejich vlastností a chování při vstřikování, dále je rozebráno celé téma vstřikování, jsou popsány jeho způsoby, stroj, formy a vstřikovací cyklus. V praktické části byla provedena optimalizace vstřikovacího procesu na dvou formách – pro těleso MKO a pro úhelník. Optimalizace byla provedena pro všechny druhy nastavení, výsledky optimalizace jsou uvedeny v kap. 9 a 10, odstraněné vady během procesu v kap. 11. V příloze jsou pak uvedeny podrobnější hodnoty a závislosti zjištěné během měření. Diskuze výsledků je rozebrána v kap. 12 a dochází k závěru, že MPX systém je velmi dobrý pomocník při nastavení a optimalizaci vstřikovacího procesu, který může přinést velké ekonomické výhody pro celý podnik, ale na druhou stranu se stále neobejde bez zdravého úsudku a zkušeností uživatele.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Mleziva, J., Šňupárek, J. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Sobotáles Brno, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [2] Rybníkář, F. Makromolekulární chemie. 1. vyd. VUT Brno, 2000. ISBN 80-214-1556-8.
- [3] Maňas, M., Vlček, J. Aplikovaná reologie. 1. vyd. UTB Zlín, 2001. ISBN 80-7318-039-1.
- [4] Lapčík, L., Raab, M. Nauka o materiálech II. 2. rozš. vyd. UTB Zlín, 2004. ISBN 80-7318-229-7.
- [5] Rauwendaal, Ch. SPC: Statistical Process Control in Injection Molding and Extrusion. 1st ed. München (Germany): Hanser Publishers, 2000. ISBN 1-56990-285-2.
- [6] Štěpek, J., Zelinger, J., Kuta, A. Technologie zpracování a vlastnosti plastů. 1. vyd. Praha: SNTL/Alfa, 1989. 04-602-89.
- [7] Čaučík, P., aj. Prísady do plastov. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1985. 63-040-85.
- [8] Pötsch, G., Michaeli, W. Injection molding: An introduction. 2nd ed. München (Germany): Hanser Publishers, 2008. ISBN 978-1-56990-419-0.
- [9] Elias, H.-G. An Introduction to Plastics. 2nd compl. rev. ed. Mörlenbach (Germany), 2003. ISBN 3-527-29602-6.
- [10] Tres, P. Designing Plastic Parts for Assembly. 5th ed. München (Germany): Hanser Publishers, 2003. ISBN 1-56990-350-6.
- [11] Ducháček, V. Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 1. vyd. VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-241-3.
- [12] Technická univerzita Liberec, fakulta strojní. Speciální způsoby vstřikování. [cit. 10.1.2008]. Dostupný z WWW:
<http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/>.
- [13] Katalog od fy Hasco Hasenclever GmbH + Co KG. Dostupný z WWW:
<<http://www.hasco.com/www-gb/main.html>>.

- [14] Bobčík, L., aj. Formy pro zpracování plastů; I. díl – Vstřikování termoplastů. 2. opr. vyd. Uniplast Brno, 1999.
- [15] Selogica; User Manual, Arburg GmbH + Co KG, 2007
- [16] Moldflow Plastics Xpert 4.2; User Manual, Moldflow Corporation, 2006

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAE	Computer Added Engineering
DOE	Design Of Experiments
GIT	Gas Injection Technology
HDPE	High Density Polyethylene
ITT	Index Toku Taveniny
LDPE	Low Density Polyethylene
MLFIM	Multi Live Feed Injection Molding
MPA	Moldflow Plastics Advisers
MFR	Mass Flow Rate
MPI	Moldflow Plastics Insight
MPX	Moldflow Plastics Xpert
P	Polymerační stupeň
PA6	Polyamid 6
PC	Polykarbonát
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylentereftalát
PIM	Powder Injection Molding
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PUR	Polyurethan
RIM	Reaction Injection Molding
WIT	Water Injection Technology

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Polymerní řetězce.	12
Obr. 2. Způsoby zesíťování polymerních řetězců. [2]	13
Obr. 3. Rozdělení polymerů. [3].....	14
Obr. 4. Světová spotřeba termoplastů (cca 125 mil. t / 1998). [3].....	20
Obr. 5. Energetická spotřeba pro výrobu různých druhů materiálu. [5]	24
Obr. 6. Závislost některých vlastností polymerů na P. [2]	25
Obr. 7. Deformační křivka. [10].....	26
Obr. 8. Termomechanická křivka amorfního (1) a semikrystalického (2) polymeru. [11]	27
Obr. 9. Tokové křivky různých materiálů.	28
Obr. 10. Toková křivka v závislosti na různých parametrech. [5].....	29
Obr. 11. Relaxace napětí.	29
Obr. 12. Překmit napětí.....	30
Obr. 13. Zaplňování dutiny formy taveninou. [3].....	30
Obr. 14. Jev „jetting“.....	31
Obr. 15. Zpracovatelská oblast procesu vstřikování.....	32
Obr. 16. Průběh tlaku a teploty během procesu vstřikování. [3].....	33
Obr. 17. Diagram pV-T během procesu vstřikování. [3]	33
Obr. 18. Schéma vstřikovacího stroje. [5]	37
Obr. 19. Schéma mechanického uzavíracího systému s pěti bodovou dvojitou kloubovou pákou s centrálním řídicím válcem. [8].....	39
Obr. 20. Schéma hydraulického uzavíracího systému. [8]	39
Obr. 21. Schéma standardního šneku.....	41
Obr. 22. Arburg Allrounder 420 C 1000-350.	42
Obr. 23. Řez formou. [13]	44
Obr. 24. Schéma vstřikovacího cyklu. [3].....	46
Obr. 25. Systém Selogica – ovládací panel s tlačítky. [15]	48
Obr. 26. Funkční oblasti řízení Selogica. [15].....	49
Obr. 27. Zvolení nástroje a práce v MPX systému.....	52
Obr. 28. MPX nastavení procesu – metody nastavení.	53
Obr. 29. MPX nastavení procesu – možnosti asistovaného nastavení.....	54

Obr. 30. MPX proces nastavení – zadání počátečních parametrů.	55
Obr. 31. MPX proces nastavení – dialogové okno.	55
Obr. 32. Variace rychlosti a dráhy šneku.	56
Obr. 33. Vady při špatném rychlostním profilu.	58
Obr. 34. Optimalizace plnění formy.	61
Obr. 35. Výsledky optimalizace rychlosti.	62
Obr. 36. Eliminace vad spojených s rychlostí vstřikování.	63
Obr. 37. Závislost hmotnosti výstřiku na době dotlaku.	65
Obr. 38. Vady spojené s fází dotlaku.	66
Obr. 39. Optimalizace doby chlazení.	67
Obr. 40. Zpracovatelské okno.	69
Obr. 41. Dialogové okno MPX optimalizace procesu.	70
Obr. 42. Vizuální defekty.	71
Obr. 43. Rozměrové defekty.	71
Obr. 44. Graf jednotlivých vad při návrhu experimentů.	72
Obr. 45. Tabulka parametrů při MPX kontrole procesu. [16]	73
Obr. 46. Grafy parametrů při MPX kontrole procesu. [16]	73
Obr. 47. Výtlačný plastometr Dynisco Kayeness LMI 4003.	74
Obr. 48. Levá a pravá polovina formy pro těleso MKO.	77
Obr. 49. Těleso MKO – fotografie a model.	78
Obr. 50. Levá a pravá polovina formy pro úhelník.	79
Obr. 51. Úhelník upevňovací – fotografie a model.	79
Obr. 52. Čas vstřikování pro těleso MKO.	80
Obr. 53. Tlak na konci plnění pro těleso MKO.	80
Obr. 54. Čas chlazení tělesa MKO.	81
Obr. 55. Čas vstřikování pro úhelník.	82
Obr. 56. Tlak na konci plnění pro úhelník.	82
Obr. 57. Čas chlazení úhelníku.	83
Obr. 58. Profily tělesa MKO – automatické nastavení.	84
Obr. 59. Profily tělesa MKO – poloautomatické nastavení.	85
Obr. 60. Profily tělesa MKO – ruční nastavení.	86
Obr. 61. Profily tělesa MKO – nahrání dat z analýzy.	86

Obr. 62. Profily úhelníku – automatické nastavení.....	87
Obr. 63. Profily úhelníku – poloautomatické nastavení.....	88
Obr. 64. Profily úhelníku – ruční nastavení.....	89
Obr. 65. Profily úhelníku – nahrání dat z analýzy.....	89
Obr. 66. Rychlostní a tlakový profil pro DOE 1.	90
Obr. 67. Změna profilu během optimalizace poloautomatického procesu.....	91
Obr. 68. Rychlostní a tlakový profil pro DOE 2.	92
Obr. 69. Rychlostní a tlakový profil pro DOE 3.	93
Obr. 70. Graf vad během optimalizace poloautomatického procesu.....	94
Obr. 71. Vady tělesa MKO – přetoky.....	95
Obr. 72. Vady tělesa MKO – nedotečená místa.	95
Obr. 73. Vady tělesa MKO – nečistoty.....	96
Obr. 74. Vady tělesa MKO – propadliny.	96
Obr. 75. Vady tělesa MKO – bubliny.	96
Obr. 76. Vady úhelníku – přetoky.....	97
Obr. 77. Vady úhelníku – nedotečená místa.....	97
Obr. 78. Vady úhelníku – propadliny.....	98
Obr. 79. Vady úhelníku – barevné pruhy.	98
Obr. 80. Vady úhelníku – zdrženiny.	99

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Schematické znázornění uspořádání dlouhých makromolekulárních řetězců v různých polymerech a jejich vlastnosti. [3]	15
Tab. 2. Vlastnosti amorfních a semikrystalických polymerů. [5].....	17
Tab. 3. Možnosti zlepšení vlastností polymerů přísadami. [7]	22
Tab. 4. Charakteristické teploty vybraných polymerů. [3].....	27
Tab. 5. Technické parametry vstřikovacího stroje.....	43
Tab. 6. Technické parametry výtlačného plastometru Dynisco Kayeness LMI 4003.....	74
Tab. 7. Naměřené hodnoty pro index toku taveniny vstřikovaného PP.....	75
Tab. 8. Naměřené hodnoty pro index toku taveniny vstřikovaného PC+ABS.....	76
Tab. 9. Vlastnosti vstřikovaného PP.....	77
Tab. 10. Vlastnosti vstřikovaného PC+ABS.....	78
Tab. 11. Teplota topných pásem pro těleso MKO.	84
Tab. 12. Výsledky automatického nastavení pro těleso MKO.	84
Tab. 13. Výsledky poloautomatického nastavení pro těleso MKO.	85
Tab. 14. Výsledky ručního nastavení pro těleso MKO.	85
Tab. 15. Výsledky nastavení z nahraných dat analýzy pro těleso MKO.	86
Tab. 16. Teplota topných pásem pro úhelník.	87
Tab. 17. Výsledky automatického nastavení pro úhelník upevňovací.	87
Tab. 18. Výsledky poloautomatického nastavení pro úhelník upevňovací.	88
Tab. 19. Výsledky ručního nastavení pro úhelník upevňovací.	88
Tab. 20. Výsledky nastavení z nahraných dat analýzy pro úhelník upevňovací.	89
Tab. 21. Hodnoty při optimalizaci poloautomatického nastavení.	90
Tab. 22. Variace procesních parametrů při DOE 1.	90
Tab. 23. Zjištěné vady při DOE 1.....	91
Tab. 24. Variace procesních parametrů při DOE 2.	92
Tab. 25. Zjištěné vady při DOE 2.....	92
Tab. 26. Variace procesních parametrů při DOE 3.	93
Tab. 27. Shrnutí výsledků nastavení procesu pro těleso MKO.	100
Tab. 28. Shrnutí výsledků nastavení procesu pro úhelník.....	100

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výsledky nastavení procesu tělesa MKO

Příloha P II: Výsledky nastavení procesu úhelníku

Příloha P III: Výsledky kontroly ručního nastavení procesu tělesa MKO

Příloha P IV: Výsledky kontroly ručního nastavení procesu úhelníku

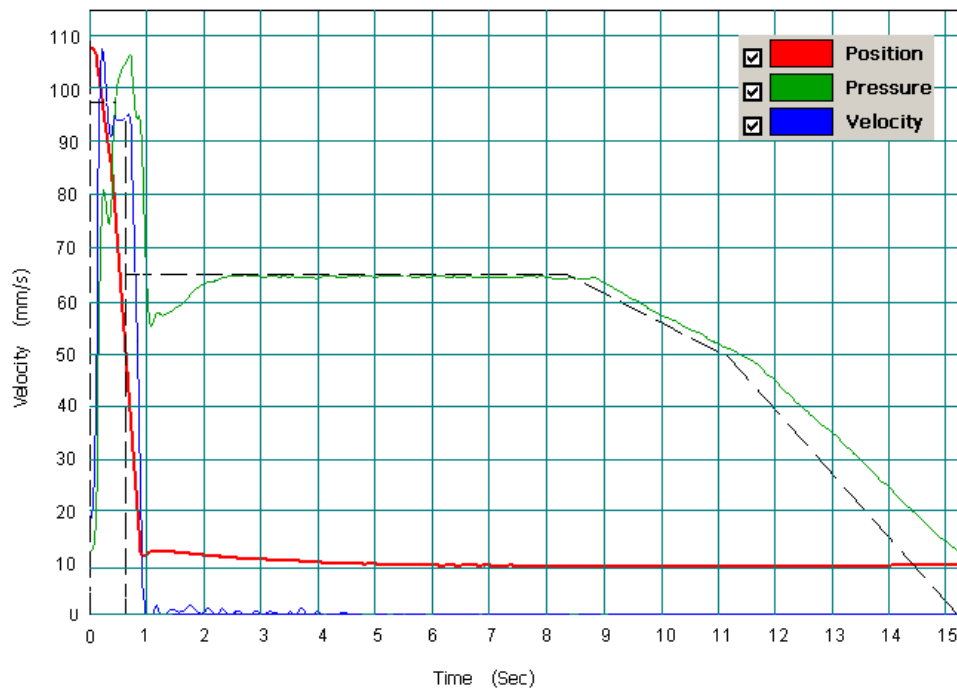
PŘÍLOHA P I: VÝSLEDKY NASTAVENÍ PROCESU TĚLESA MKO

1) Automatické nastavení

1. Průběh nastavení procesu:

Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	4	5,58
Optimalizace rychlosti	33	46,37
Návrh rychlostního profilu	4	4,47
Eliminace rychlostních vad	5	9,12
Optimalizace dotlaku	6	9,08
Optimalizace doby dotlaku	4	4,82
Konečná eliminace vad	3	7,82
Optimalizace doby chlazení	18	21,78
Celkem	77	109,04

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:

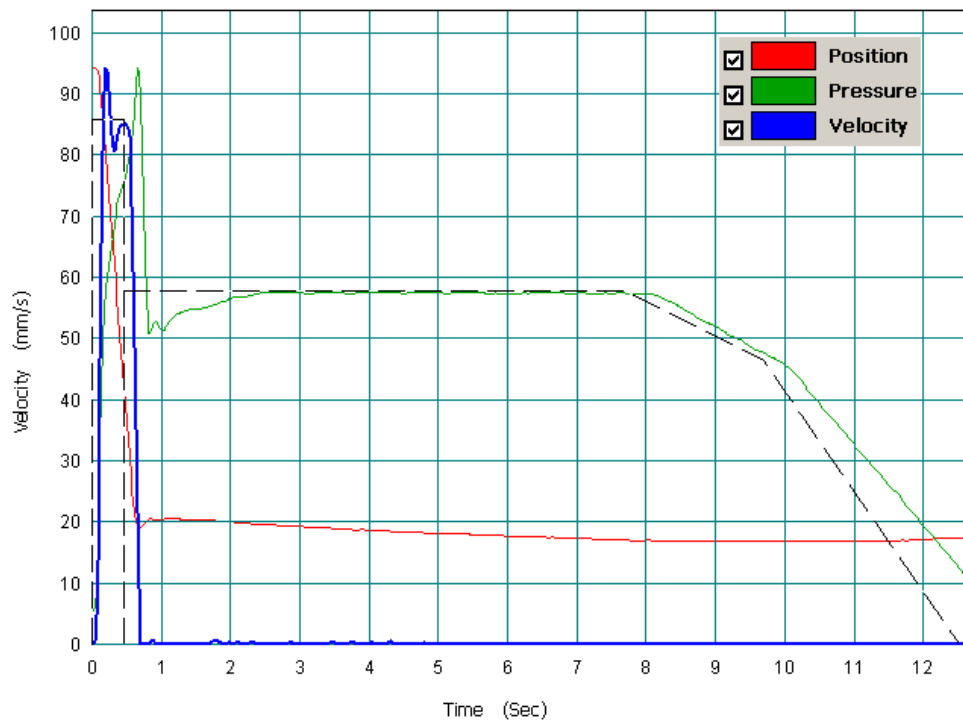


2) Poloautomatické nastavení

1. Průběh nastavení procesu:

Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	6	22,97
Optimalizace rychlosti	21	16,42
Návrh rychlostního profilu	3	1,52
Eliminace rychlostních vad	1	1,87
Optimalizace dotlaku	8	7,33
Optimalizace doby dotlaku	12	17,33
Konečná eliminace vad	3	3,72
Optimalizace doby chlazení	2	1,8
Celkem	56	72,96

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:

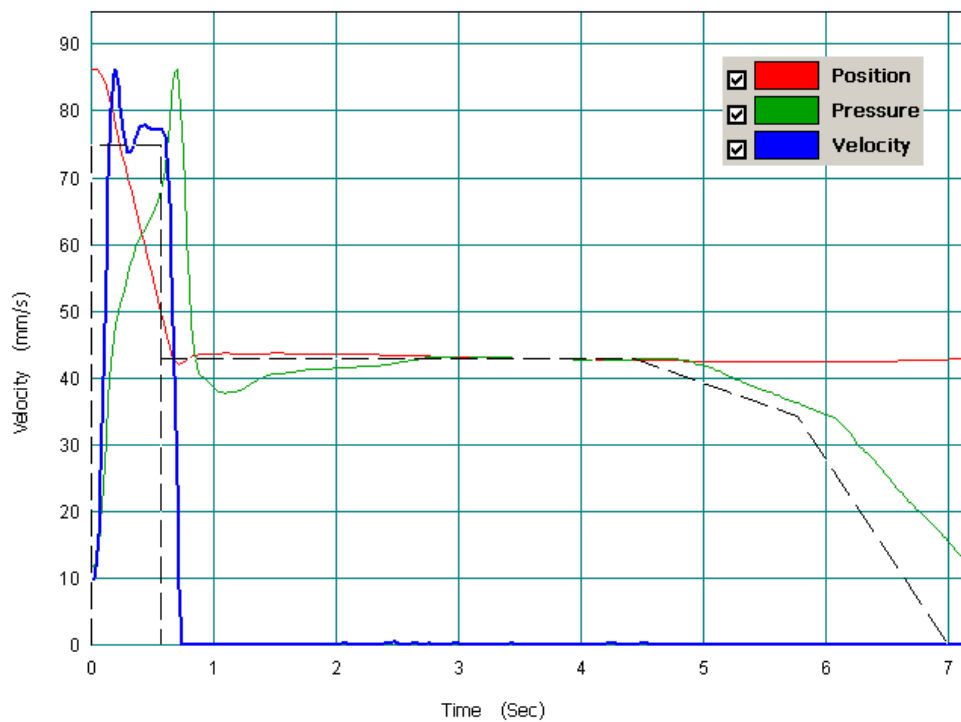


3) Ruční nastavení

1. Průběh nastavení procesu:

Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	8	8,47
Optimalizace rychlosti	26	21,43
Návrh rychlostního profilu	3	1,47
Eliminace rychlostních vad	4	9,27
Optimalizace dotlaku	13	13,12
Optimalizace doby dotlaku	9	7,63
Konečná eliminace vad	22	30,03
Optimalizace doby chlazení	12	8,97
Celkem	97	100,39

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:

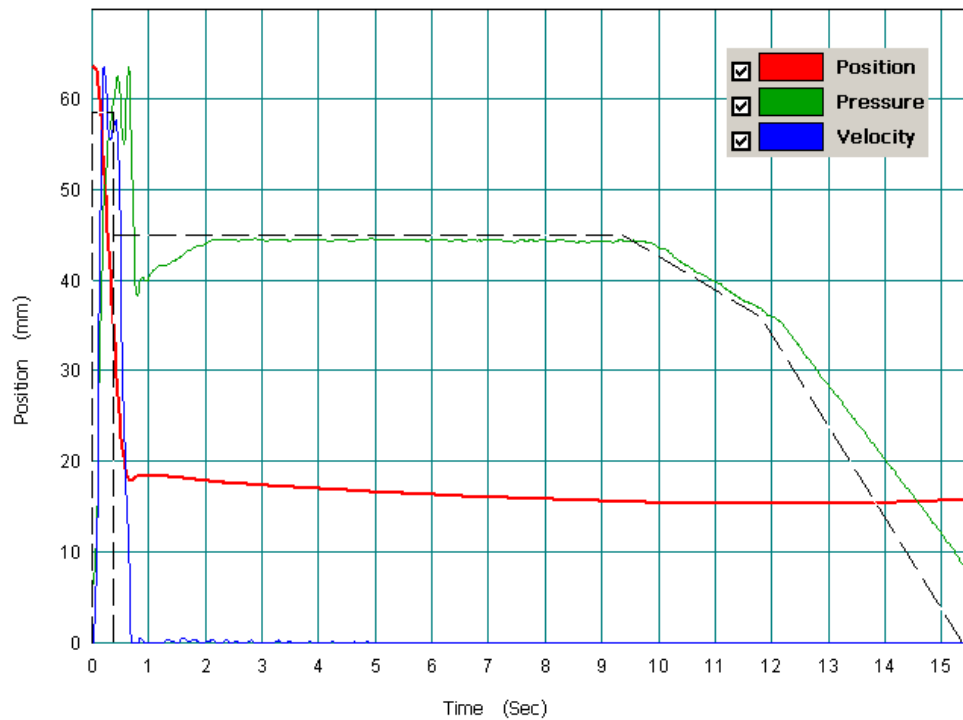


4) Nahrání dat z analýzy MPI

1. Průběh nastavení procesu:

Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	14	30,42
Optimalizace rychlosti	30	29,75
Návrh rychlostního profilu	3	2,18
Eliminace rychlostních vad	5	5,93
Optimalizace dotlaku	10	19,58
Optimalizace doby dotlaku	18	48,7
Konečná eliminace vad	1	2,22
Optimalizace polštáře	2	2,23
Optimalizace doby chlazení	3	2,6
Celkem	86	143,61

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:



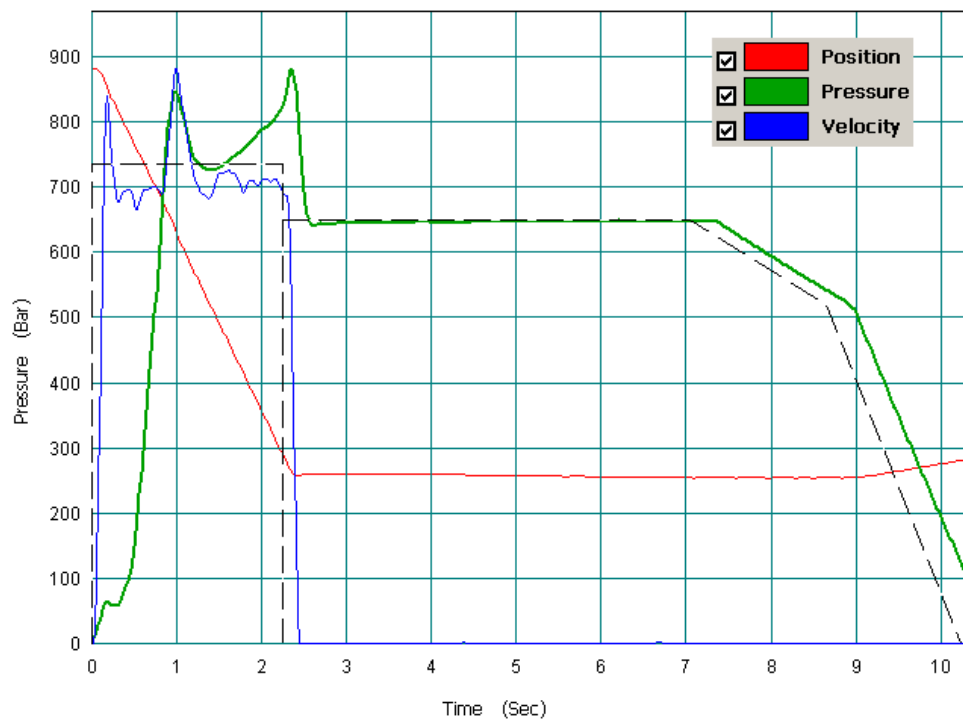
PŘÍLOHA P II: VÝSLEDKY NASTAVENÍ PROCESU ÚHELNÍKU

1) Automatické nastavení

1. Průběh nastavení procesu:

Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	20	37,9
Optimalizace rychlosti	23	23,22
Návrh rychlostního profilu	3	2,05
Eliminace rychlostních vad	1	1,53
Optimalizace dotlaku	3	2,33
Optimalizace doby dotlaku	12	20,32
Konečná eliminace vad	3	6,57
Optimalizace polštáře	2	1,8
Optimalizace doby chlazení	11	10,88
Celkem	78	106,6

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:

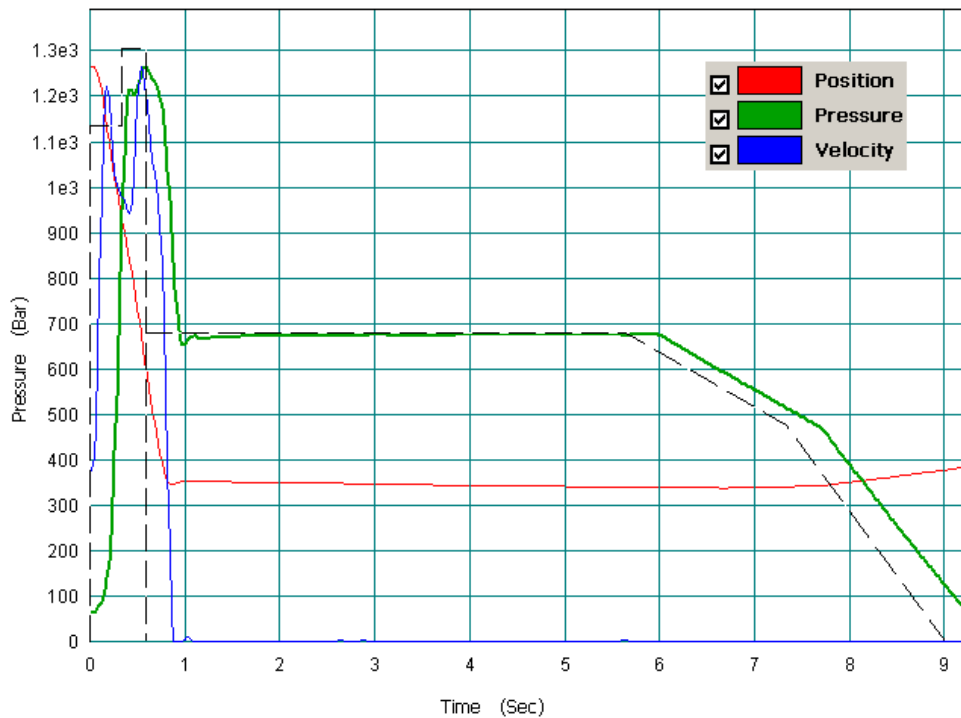


2) Poloautomatické nastavení

1. Průběh nastavení procesu:

Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	12	17,02
Optimalizace rychlosti	19	16,38
Návrh rychlostního profilu	4	3,65
Eliminace rychlostních vad	8	8,23
Optimalizace dotlaku	3	2,78
Optimalizace doby dotlaku	10	17,55
Konečná eliminace vad	4	5,6
Optimalizace polštáře	1	0,73
Optimalizace doby chlazení	8	7,8
Celkem	69	79,74

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:

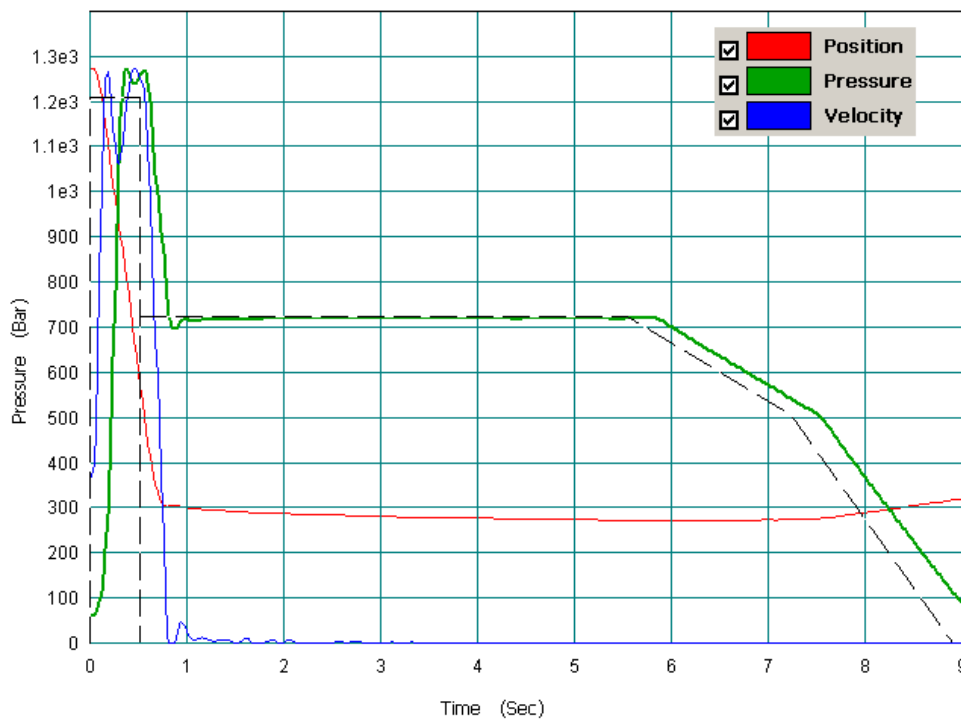


3) Ruční nastavení

1. Průběh nastavení procesu:

Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	5	5,38
Optimalizace rychlosti	16	12,35
Návrh rychlostního profilu	3	1,95
Eliminace rychlostních vad	1	1,67
Optimalizace dotlaku	3	2,23
Optimalizace doby dotlaku	10	9,2
Konečná eliminace vad	1	2,23
Optimalizace polštáře	2	1,5
Optimalizace doby chlazení	9	7,37
Celkem	50	43,88

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:

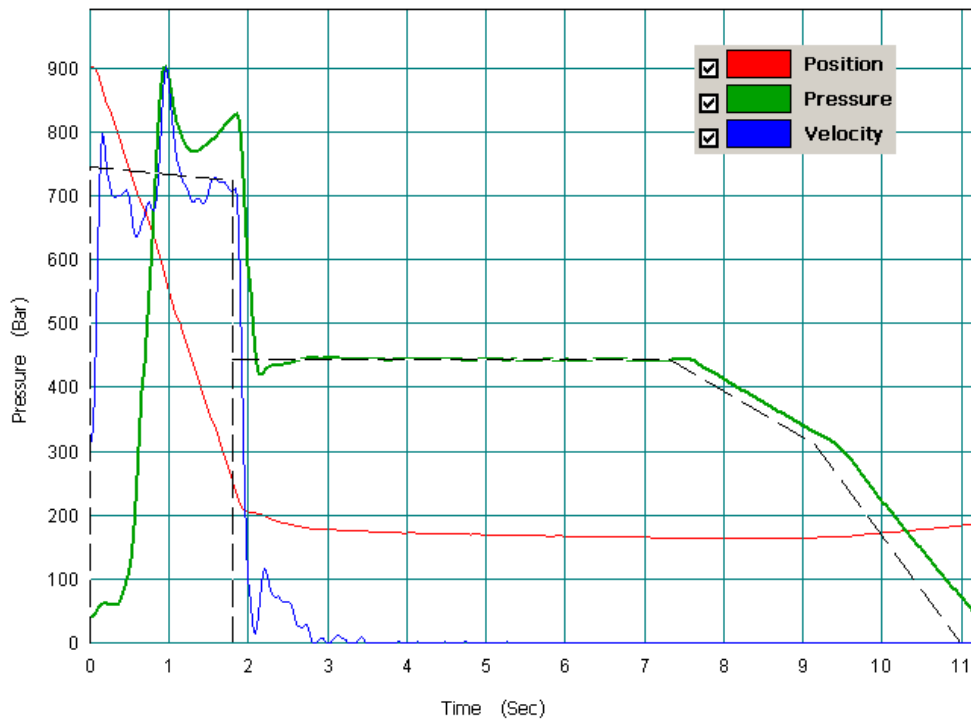


4) Nahrání dat z analýzy MPI

1. Průběh nastavení procesu:

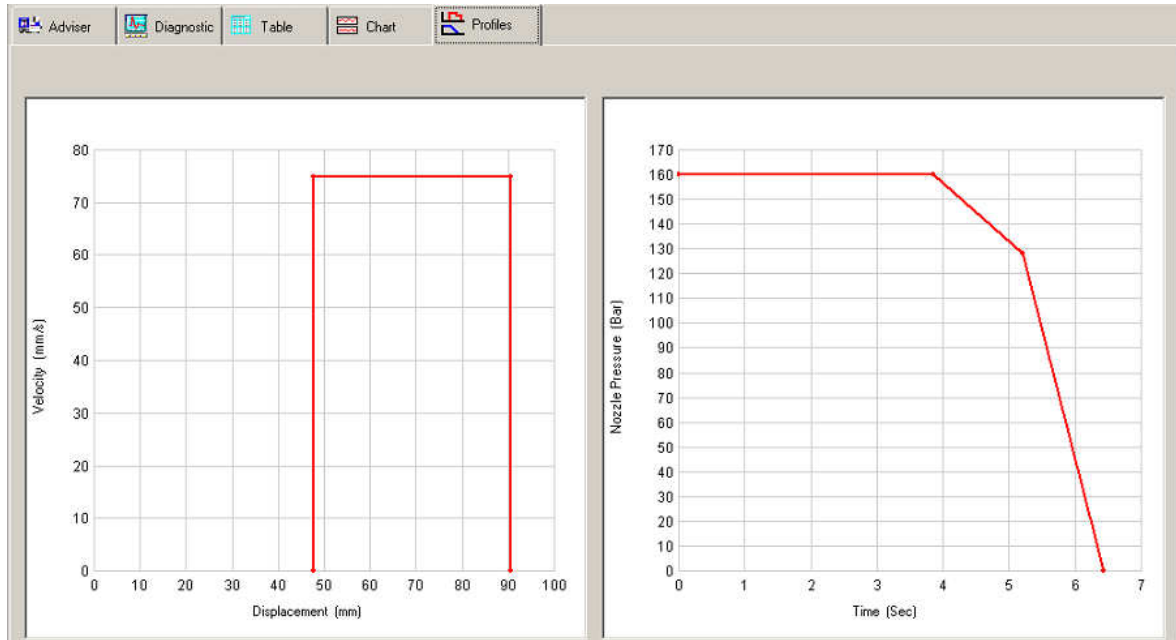
Optimalizační postup	počet dílů	čas [min]
Optimalizace plnění formy	4	4,32
Optimalizace rychlosti	21	18,43
Návrh rychlostního profilu	3	1,85
Eliminace rychlostních vad	14	15,7
Optimalizace dotlaku	1	0,7
Optimalizace doby dotlaku	11	11,17
Konečná eliminace vad	3	5,05
Optimalizace polštáře	3	2,87
Optimalizace doby chlazení	11	9,15
Celkem	71	69,24

2. Graf jednotlivých veličin v závislosti na čase:



PŘÍLOHA P III: VÝSLEDKY KONTROLY RUČNÍHO NASTAVENÍ PROCESU TĚLESA MKO

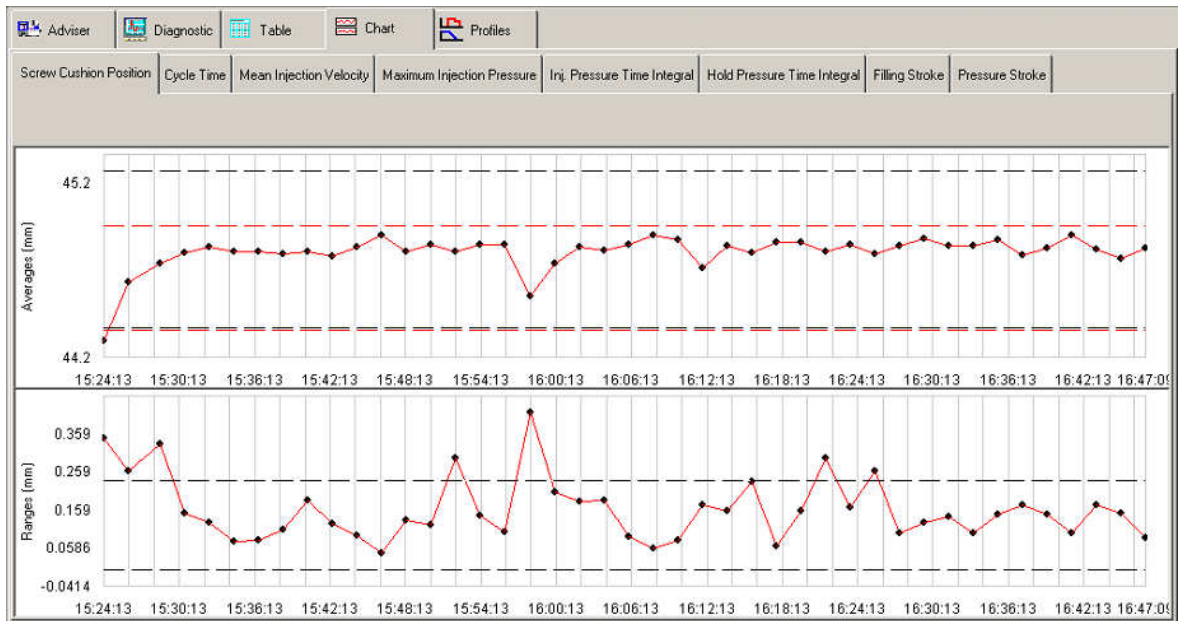
1) Rychlostní a tlakový profil



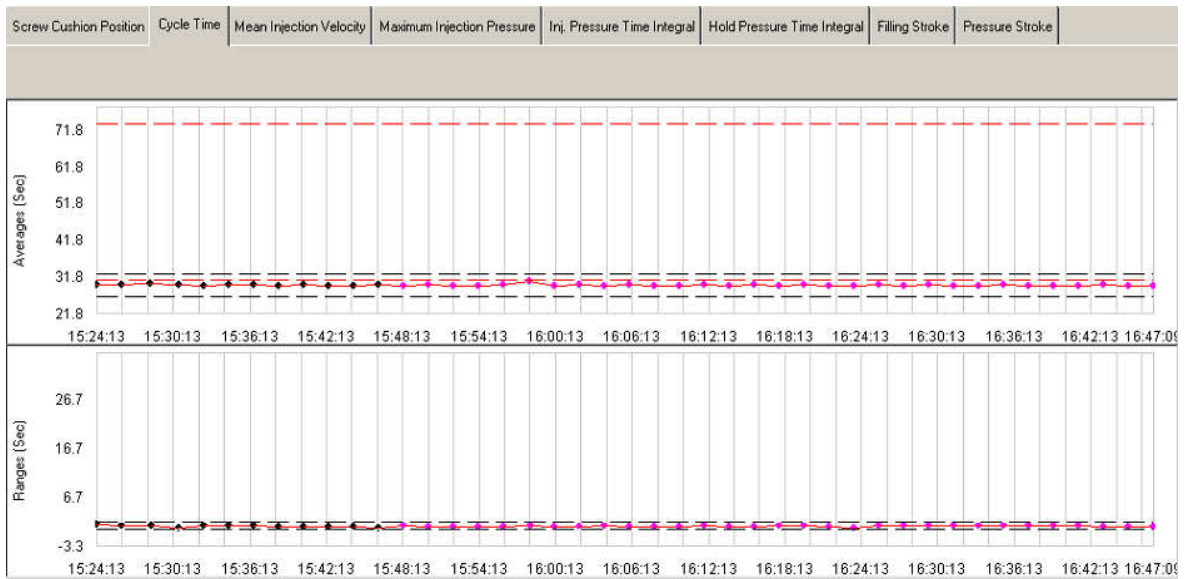
2) Tabulka kontrolovaných hodnot

Process Parameters	Control Limits			Specification Limits			Capability Index				Proc. Ctl	Actual Values		
	Lower	Upper	En	Lower	Upper	En	Cp	En	CpK	En		En	Mean	Range
Screw Cushion Position (mm)	44.4	45.3	<input type="checkbox"/>	44.4	45	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	44.9	0.0841
Cycle Time (Sec)	26.5	32.4	<input type="checkbox"/>	31	73.2	<input checked="" type="checkbox"/>	1.5	<input checked="" type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	29.4	0.681
Mean Injection Velocity (mm/s)	45.2	81.3	<input type="checkbox"/>	57.9	68.6	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	62.7	4.4
Maximum Injection Pressure (Bar)	237	264	<input type="checkbox"/>	237	249	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	250	3.55
Inj. Pressure Time Integral (Bar.Sec)	75.3	96.3	<input type="checkbox"/>	75.8	90.7	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	85.4	5.01
Hold Pressure Time Integral (Bar.Sec)	948	976	<input type="checkbox"/>	947	978	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	964	6.74
Filling Stroke (mm)	41.7	44.7	<input type="checkbox"/>	42.2	44.4	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	43.2	0.446
Pressure Stroke (mm)	4.36	11.7	<input type="checkbox"/>	7.62	10.7	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8.24	1.56

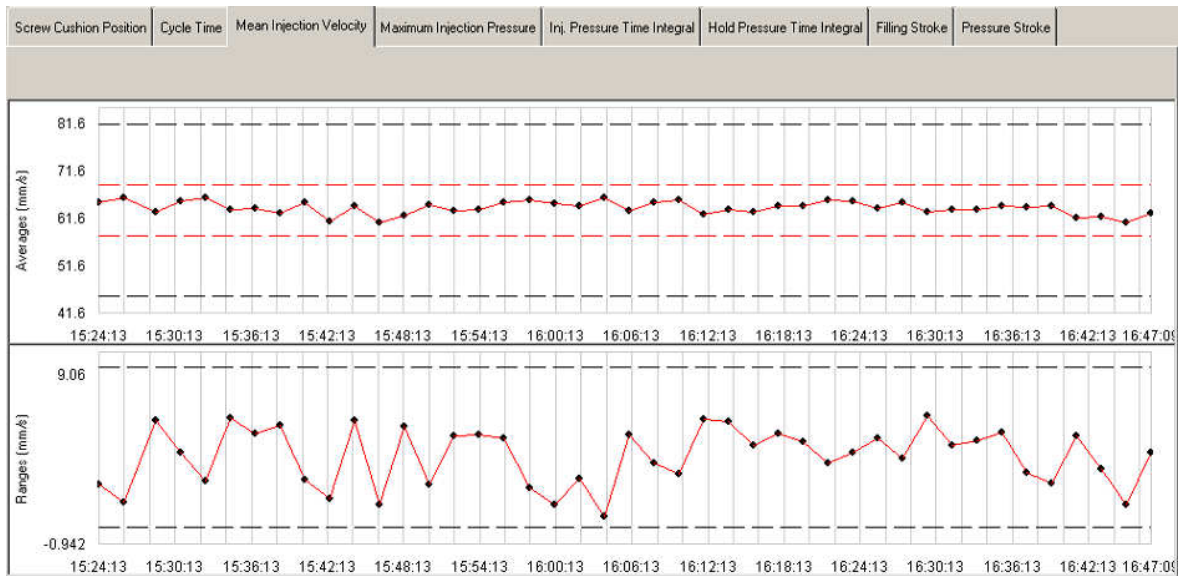
3) Pozice polštáře



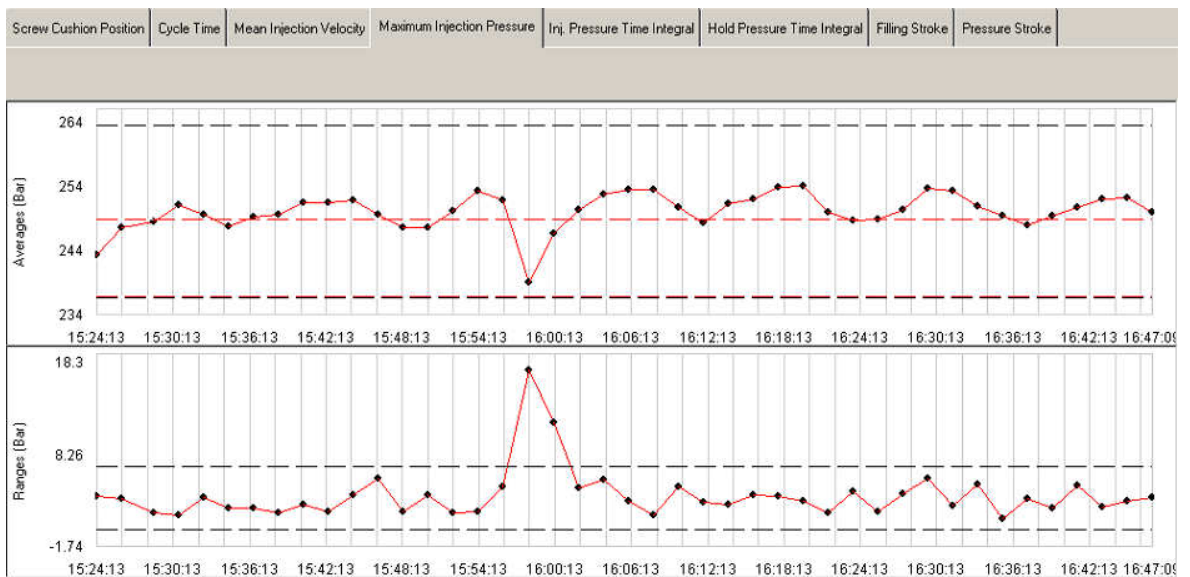
4) Čas cyklu



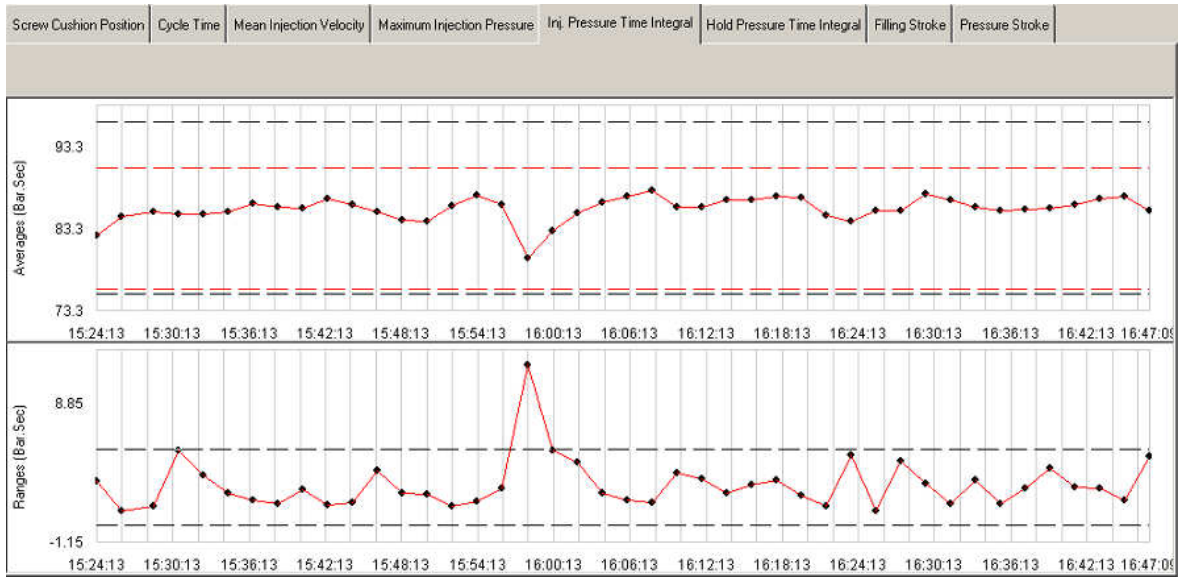
5) Vstřikovací rychlost



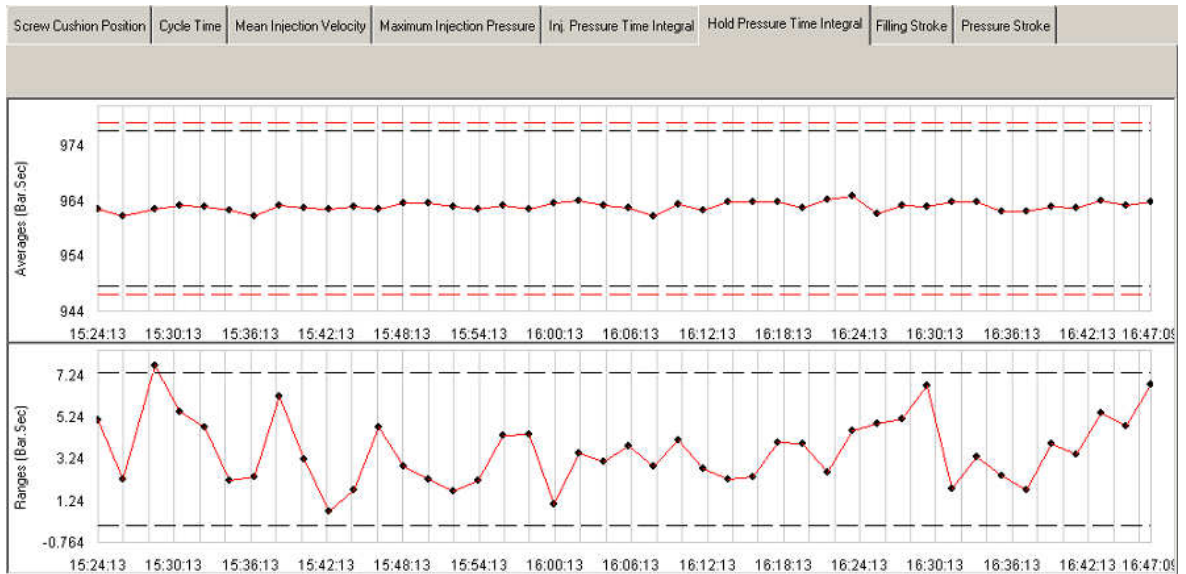
6) Maximální vstřikovací tlak



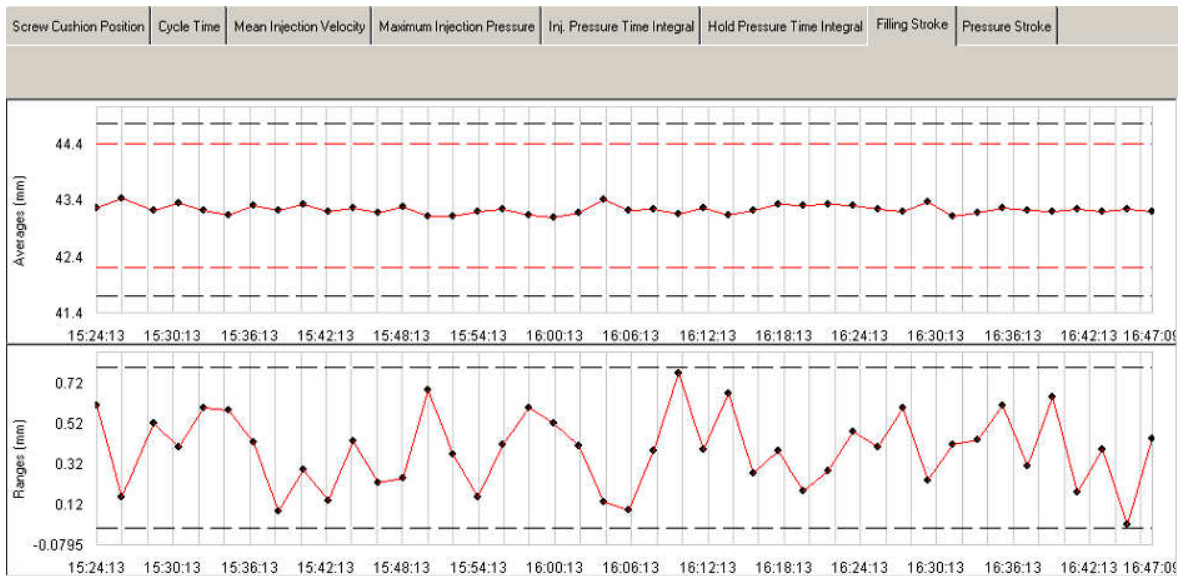
7) Součin vstřikovacího tlaku a času



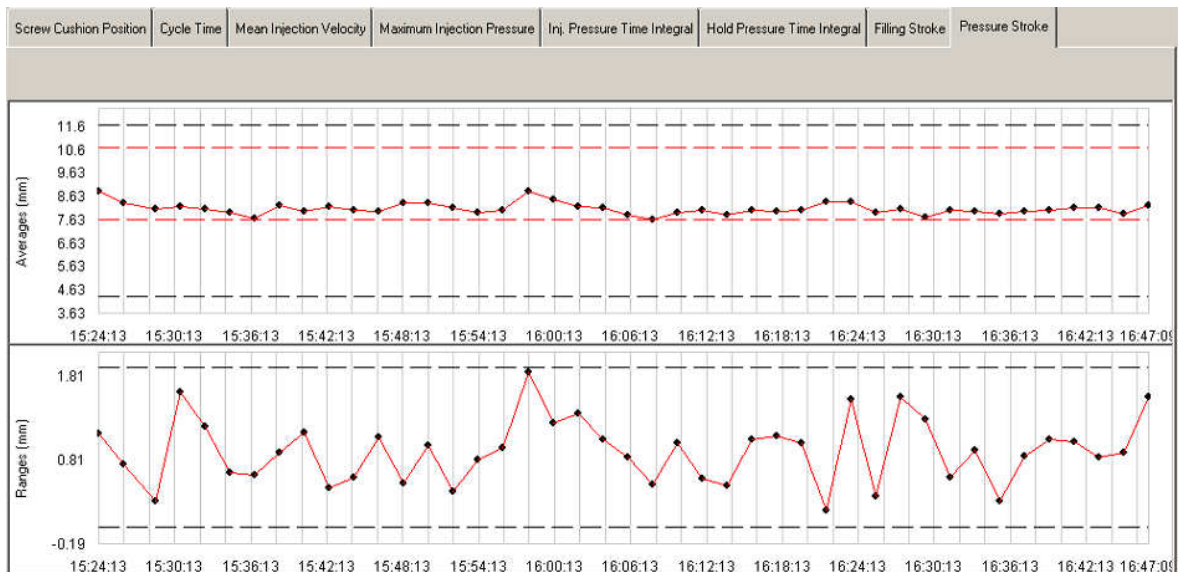
8) Součin dotlaku a času



9) Posun šneku při plnění



10) Posun šneku při vývinu tlaku



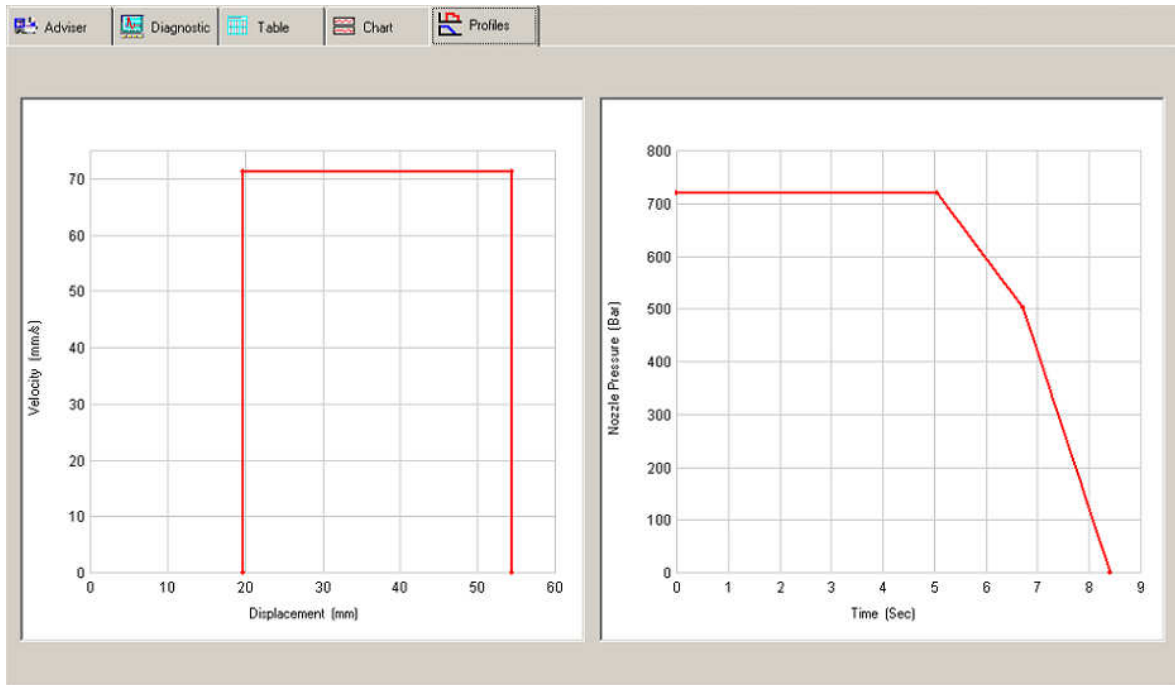
11) Naměřená hmotnost dílů během produkce

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
hmotnost výrobku [g]	43,11	43,08	43,10	43,11	43,12	43,06	43,09	43,12	43,08	43,11

Průměrná hmotnost tělesa MKO $\bar{m} = 43,10 \pm 0,019g$.

PŘÍLOHA P IV: VÝSLEDKY KONTROLY PROCESU ÚHELNÍKU

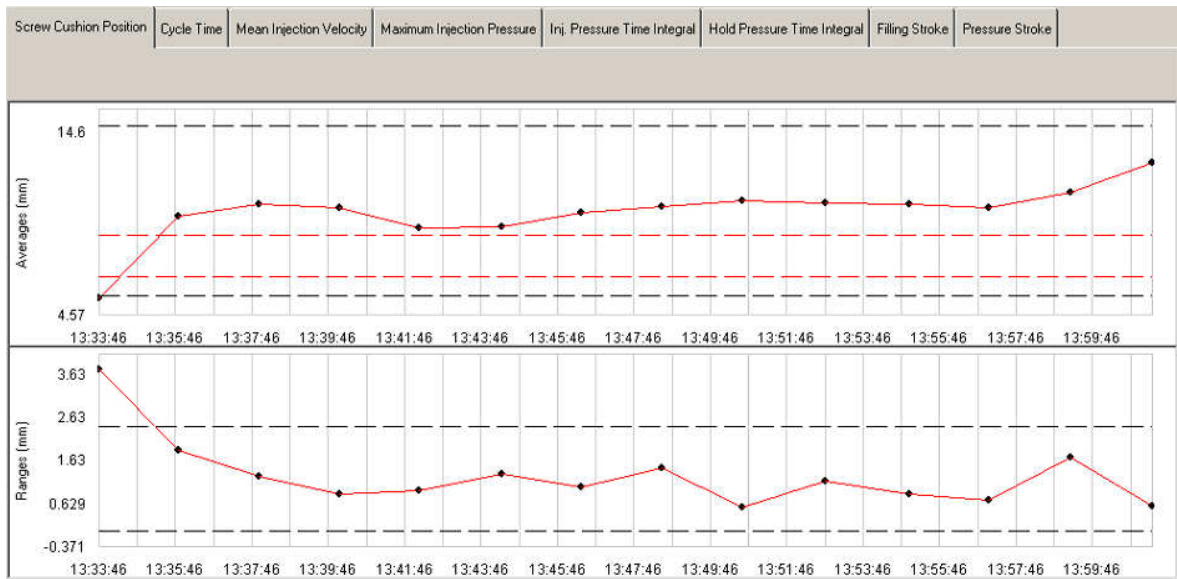
1) Rychlostní a tlakový profil



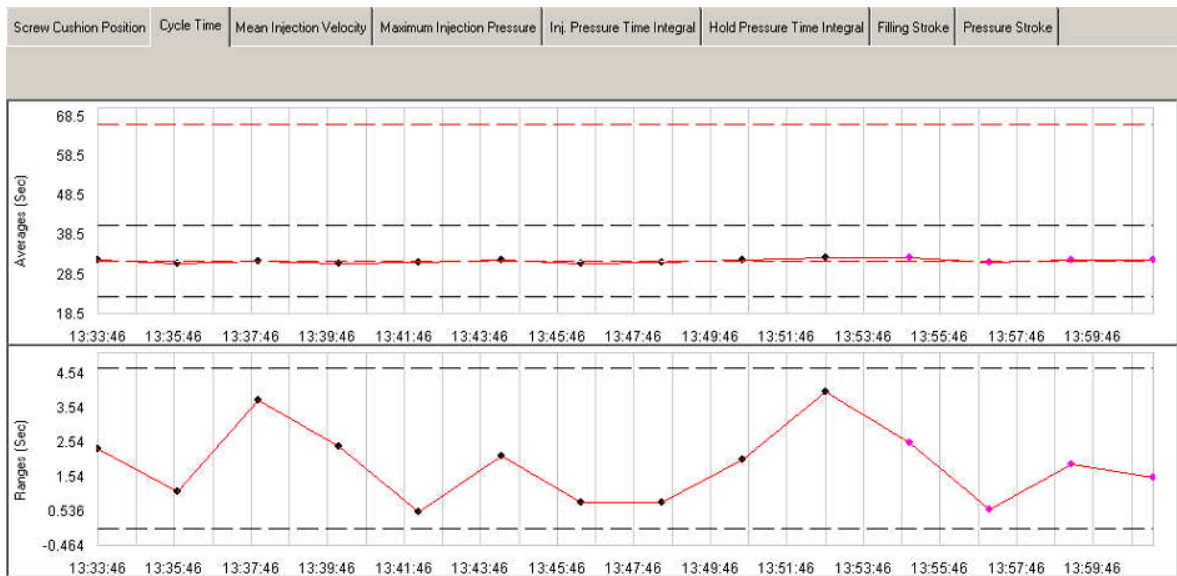
2) Tabulka kontrolovaných hodnot

Process Parameters	Control Limits			Specification Limits			Capability Index				Proc. Ctl	Actual Values	
	Lower	Upper	En	Lower	Upper	En	Cp	En	CpK	En	En	Mean	Range
Screw Cushion Position (mm)	5.61	14.8	<input type="checkbox"/>	6.66	8.88	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.6	0.845
Cycle Time (Sec)	22.9	40.7	<input type="checkbox"/>	31.7	66.2	<input checked="" type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	32.5	2.49
Mean Injection Velocity (mm/s)	40.1	76.2	<input type="checkbox"/>	55.8	61.8	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	59.4	6.43
Maximum Injection Pressure (Bar)	1.27e3	1.36e3	<input type="checkbox"/>	1.28e3	1.35e3	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.32e3	15.9
Ini. Pressure Time Integral (Bar.Sec)	137	341	<input type="checkbox"/>	123	220	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	246	45.3
Hold Pressure Time Integral (Bar.Sec)	5.33e3	5.45e3	<input type="checkbox"/>	5.36e3	5.47e3	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.39e3	18.1
Filling Stroke (mm)	32	37.8	<input type="checkbox"/>	33.7	36.7	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	35.2	0.352
Pressure Stroke (mm)	9.58	20.6	<input type="checkbox"/>	16	21.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	14.5	2.17

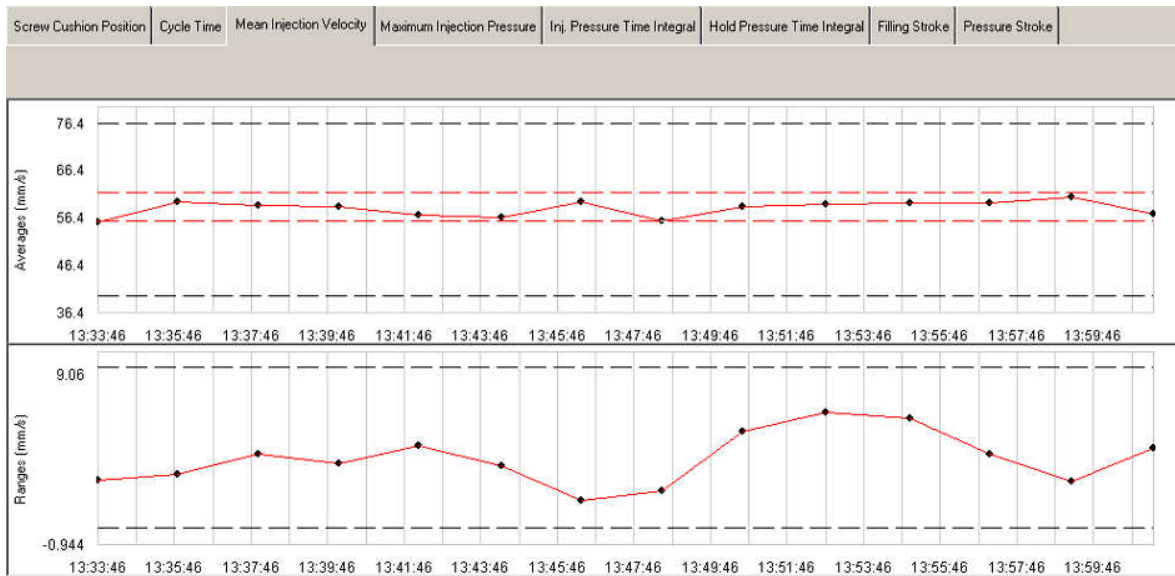
3) Pozice polštáře



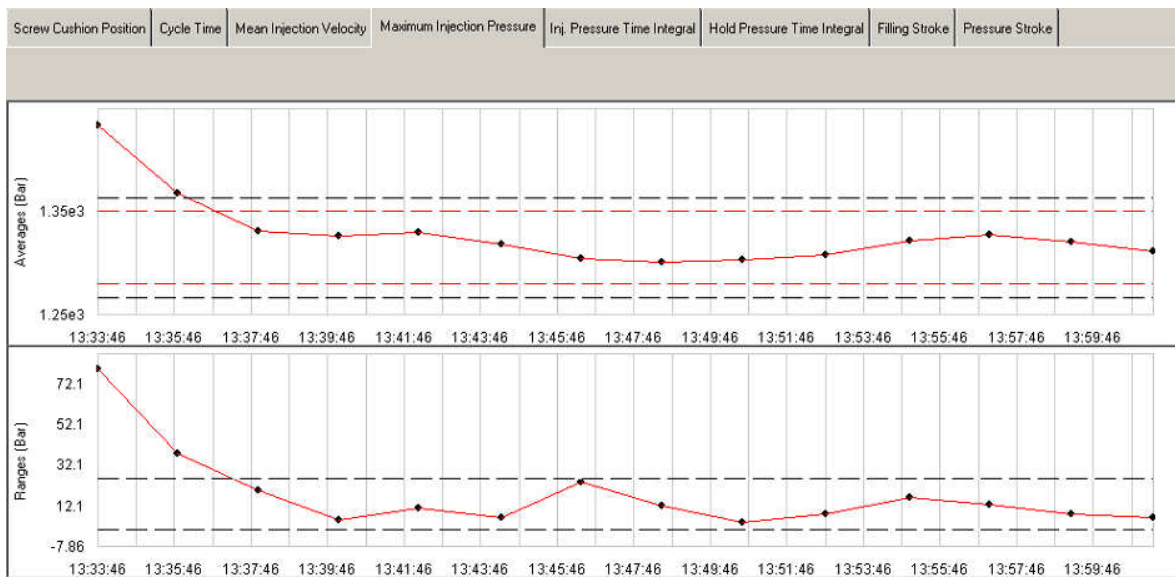
4) Čas cyklu



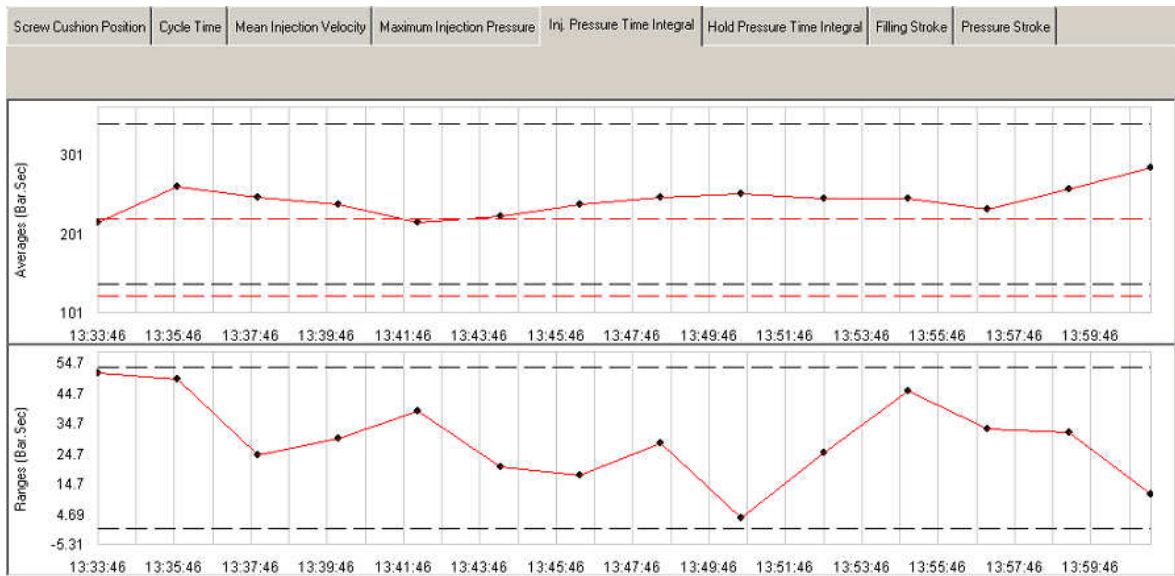
5) Vstřikovací rychlost



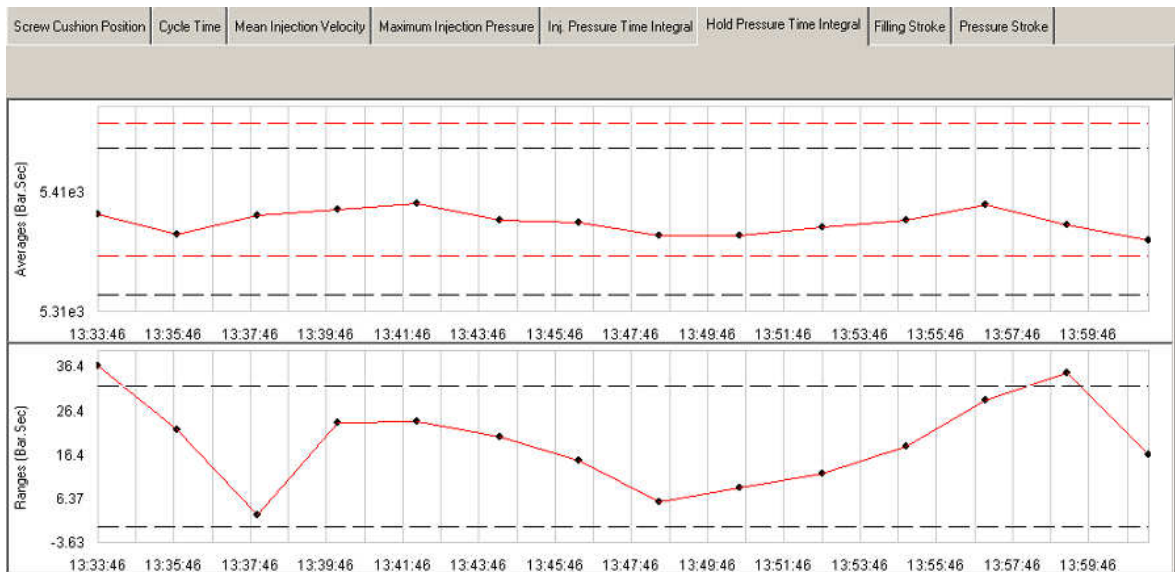
6) Maximální vstřikovací tlak



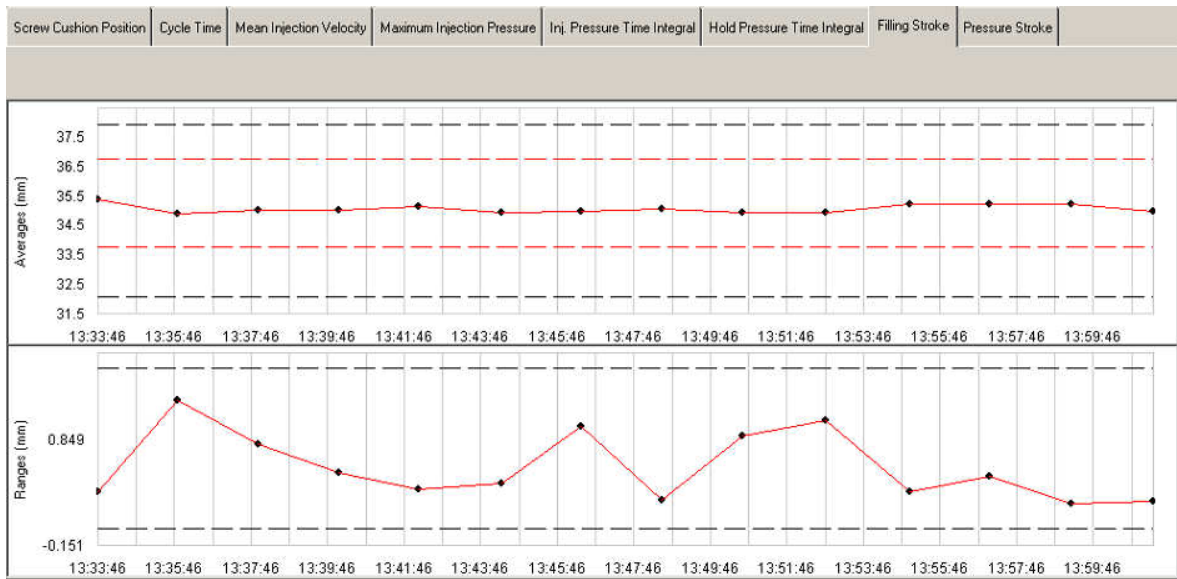
7) Součin vstřikovacího tlaku a času



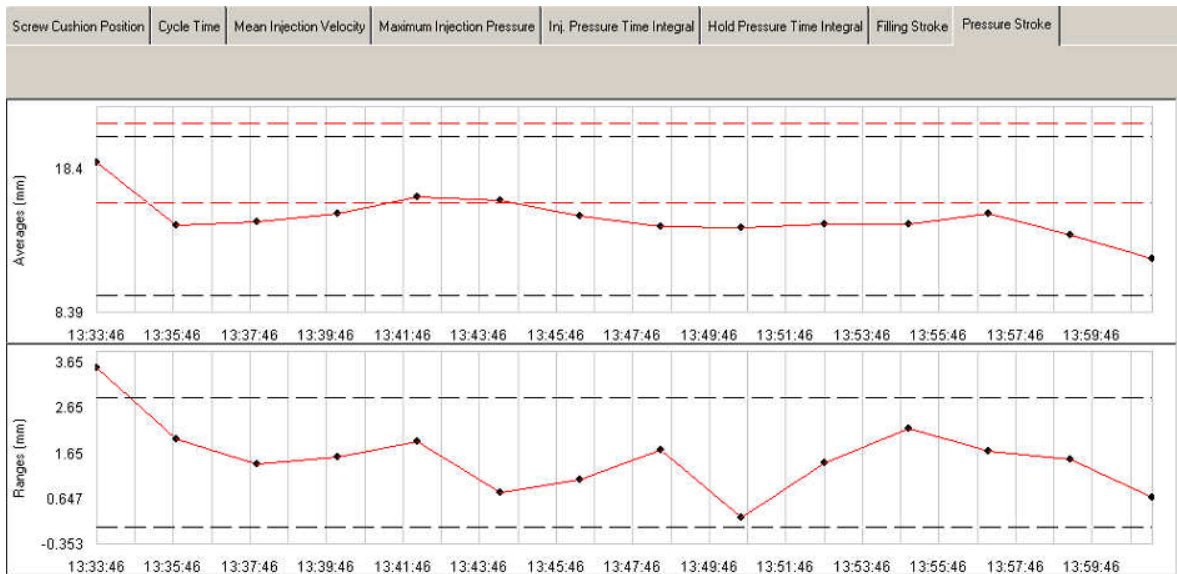
8) Součin dotlaku a času



9) Posun šneku při plnění



10) Posun šneku při vývinu tlaku



11) Naměřená hmotnost dílů během produkce

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
hmotnost výrobku [g]	41,24	41,24	41,26	41,24	41,23	41,24	41,25	41,25	41,24	41,24

Průměrná hmotnost úhelníku $\bar{m} = 41,243 \pm 0,008g$.