

# Vliv procesních parametrů na zatékavost polymerního materiálu

Ondřej Šírek

---

Bakalářská práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej ŠÍREK**

Osobní číslo: **T080406**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv procesních parametrů na zatékavost  
polymerního materiálu**

Zásady pro vypracování:

- 1. Provést měření ITT materiálů Ultradur S4090 G6 a Ultradur S4090 G6 High Speed**
- 2. Provést zkoušku zatékavosti obou materiálů při stejných procesních parametrech**
- 3. Provést zkoušku zatékavosti obou materiálů při změněných procesních parametrech**
- 4. Vytvořit simulaci MPI**
- 5. Vyhodnotit a porovnat měření, zkoušku a simulaci MPI**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J.,** Polymery-výroba, struktura, vlastnosti a použití, vyd. Sobotáles, 2000, ISBN 80-85920-72-7.

**ZEMAN, L.,** Vstřikování plastů, vyd. Ben technická literatura, 2009, ISBN 80-7300-026-1

**NEUHÄUSL, E., ING.,** Vstřikování plastických hmot, vyd. Praha; SNTL 1973

**NEUHÄUSL, E., ING. a kol.,** Využití technologie vstřikování plastů, vstřikování plastů ve strojírenství, vyd. Dům techniky ČSVTS České Budějovice; 1988

**BOBČÍK, L. a kol.** Formy pro zpracování plastu I. díl, Vstřikování termoplastu. 2. opr. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999. 133 s.

**HALÁŠKA, P., MAŇAS, M.,** Význam Moldflow pro tepelnou a mechanickou analýzu vstřikovací formy, 2002.

**MAŇAS, M., HELŠTÝN, J.,** Výrobní stroje a zařízení, Gumárenské a plastikářské stroje II. Brno: VUT, 1990. 199 s. ISBN 80-214-0213-X.

**MAŇAS, M., VLCEK, J.,** Aplikovaná reologie. Zlín: UTB, 2001. 144 s. ISBN 80 7318-039-1.

**BRUMMEL, M.,** Rozměrově přesné výrobky z plastu. 1.vyd. Praha: VÚNM, 1977. 278s.

**ŠTEPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A.,** Technologie zpracování a vlastností plastu. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 637 s.

**TOMIS, F.,** Základy gumárenské a plastikářské technologie. 1. vyd. Praha : SNTL, 1975. 278 s. ISBN 414-33543.

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

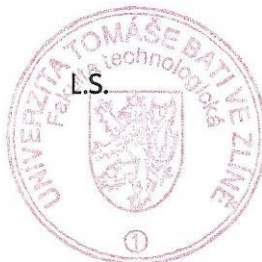
**14. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**3. června 2011**

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Cílem bakalářské závěrečné práce bylo identifikovat procesní parametry, které mají velký podíl na zatékavost polymerního materiálu do dutiny vstřikovací formy při procesu vstřikování a na základě této identifikace procesní parametry aplikovat do výrobního procesu vstřikovaného dílce.

Teoretická část popisuje proces vstřikování, popis jeho hlavních prvků a seznámí s typem zkoumaného materiálu.

V praktické části byl změřen index toku taveniny dvou druhů materiálů při optimálních procesních parametrech doporučených výrobcem. Dále byla provedena zkouška zatékavost polymerní taveniny testovaných materiálů. Třetí fáze je zaměřena na aplikaci těchto výsledků zkoušek do výroby problémového vstřikovaného dílce spojená s vytvořením analýz vstřikovacího procesu.

Závěr práce patří návrhům pro optimalizaci procesu vstřikování plastového dílce, založených na testech reologických vlastností daných materiálů a na základě provedených analýz v programu Cadmould.

Klíčová slova: Vstřikování, vstřikovací stroj, index toku taveniny, polymerní materiál

## **ABSTRACT**

The aim of the final bachelor work was to identify the process parameters that have a large share of the fluidity of the polymer material into the cavity injection mold during the injection molding process. And based on this identification process. I applied the parameters of the production process injection parts.

The theoretical part describes the injection process, description of its main elements and familiar with the type of material studied.

The practical part was measured melt flow rate of two types of materials with different melt flow at optimum process parameters according to the manufacturer's recommendations. The second phase of the practical part was conducted in the laboratory school at Arburg injection molding machine, where we performed the test fluidity of the polymer material. The third phase is focused on the application of these test results in the production of injection molded parts problem associated with it analysis of injection process.

The conclusion includes suggestions to optimize the process of plastic injection parts, based on tests of rheological properties of the materials on the basis of the analysis in the program Cadmould.

Keywords: Injection molding, injection molding machine, melt flow rate, polymer material

Velmi rád bych poděkoval touto cestou svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc. za cenné rady, návrhy a připomínky při realizaci této práce, a také Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za pomoc při zjišťování reologických vlastností daných materiálů. Dále bych rád poděkoval pracovnímu kolegovi Martinu Paláskovi za pomoc při tvoření analýz v programu CADMOULD.

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

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

Ve Zlíně dne 20. 5. 2011

.....

Podpis studenta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POLYMERY</b> .....	<b>11</b>
1.1 TECHNICKÉ VYUŽITÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ .....	12
1.1.1 Vlastnosti materiálu PBT (polybutylenterephtalat).....	12
<b>2 SUŠENÍ TERMOPLASTŮ</b> .....	<b>13</b>
2.1.1 Sušení termoplastů .....	13
2.1.2 Sušárny granulátů – způsoby sušení:.....	13
<b>3 VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>15</b>
3.1 POSTUP VSTŘIKOVÁNÍ .....	15
3.1.1 Vstřikovací cyklus .....	15
3.1.2 Průběh plnění dutiny formy.....	16
3.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ A JEHO FUNKCE .....	17
3.2.1 Funkce uzavírací jednotky.....	18
3.2.2 Funkce šnekové vstřikovací jednotky .....	19
3.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA .....	20
3.3.1 Vstřikovací formy.....	21
3.3.2 Řešení vtokové soustavy .....	21
3.3.3 Řešení vtokových systémů .....	23
3.3.4 Formy s horkými rozváděcími kanálky .....	24
3.3.5 Zatížení vstřikovací formy .....	26
3.3.6 Teplotní zatížení vstřikovací formy .....	26
3.3.7 Odvzdušnění vstřikovací formy .....	28
<b>4 HODNOCENÍ TOKOVÝCH VLASTNOSTÍ TAVENIN POLYMERŮ</b> .....	<b>30</b>
4.1 INDEX TOKU TAVENINY TERMOPLASTŮ (MFI) DLE ČSN EN ISO 1133.....	30
4.2 SPIRÁLOVÁ ZKOUŠKA ZATÉKAVOSTI TAVENINY .....	32
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>33</b>
<b>5 ZÁMĚR PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>34</b>
5.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ ULTRADUR S 4090G6 A ULTRADUR S 4090G6 HIGH SPEED .....	35
5.2 MĚŘENÍ INDEXU TOKU TAVENINY .....	36
5.2.1 Naměřené hodnoty .....	37
Ultradur S 4090 G6 .....	37
Ultradur S 4090 G6 High speed .....	38
5.3 ZKOUŠKA ZATÉKAVOSTI POLYMERNÍHO MATERIÁLU .....	40
5.3.1 Test I.....	41
5.3.2 Test II .....	42
5.3.3 Test III .....	43
5.3.4 Test IV .....	44
5.3.5 Test V .....	45

5.3.6	Porovnání výsledků zkoušky zatékavosti polymerní taveniny.....	46
<b>6</b>	<b>APLIKACE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ DO PRAXE-VYUŽITÍ PŘI OPTIMALIZACI VÝROBY VSTŘIKOVANÉHO DÍLU .....</b>	<b>47</b>
6.1	SOUČASNÝ STAV .....	48
6.1.1	Vstřikovací stroj .....	48
6.1.2	Analýza průběhu plnění dutiny formy.....	49
6.1.2.1	Zobrazení analýzy průběhu vstřikování .....	50
6.1.2.2	Zobrazení analýzy po ukončení vstřikování .....	50
6.1.2.3	Zobrazení teploty na čele taveniny .....	51
6.1.2.4	Skutečný stav – v kroužku je zobrazeno nedolití plastového dílce .....	51
6.1.3	Působení síly na jádra.....	52
6.1.3.1	Působení síly na jádra- zobrazení směru.....	52
6.2	VÝSLEDKY BUDOUCÍHO STAVU PO ÚPRAVĚ PROCESNÍCH PARAMETRŮ A VÝSLEDKY ANALÝZ .....	54
6.2.1	Přínos změny procesních parametrů.....	54
6.2.2	Změna designu vtokového systému na základě analýzy .....	56
6.2.3	Nahrazení studeného vtokového systému za vyhřívaný vtokový systém.....	57
	Nahrazení studeného vtokového systému za vyhřívaný vtokový systém na základě analýzy přinese:.....	57
6.2.4	Změna designu vstřikovaného dílce .....	58
6.2.4.1	Výsledek analýzy pro optimální zesílení odlehčení stěny.....	58
6.3	GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY .....	61
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>70</b>



## ÚVOD

Cílem této práce bylo identifikovat procesní parametry, které mají velký podíl na zatékavost polymerního materiálu do dutiny vstřikovací formy při procesu vstřikování.

Teoretická část popisuje teorii vstřikování a hlavních prvků tohoto procesu se zaměřením na konstrukci vstřikovací formy. Obsahuje základní rozdělení polymerů, popis skupiny testovaného polymerního materiálu, dále popis vstřikovacího stroje, vstřikovací formy a teorii zkoušek zatékavosti polymeru.

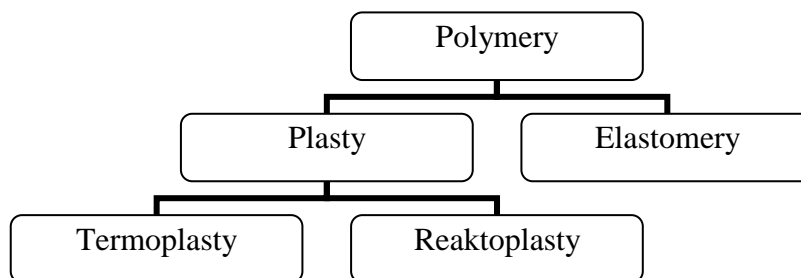
V první fázi praktické části byl změřen index toku taveniny dvou druhů materiálů s odlišným indexem toku při optimálních procesních parametrech dle doporučení výrobce. Druhá fáze probíhala ve školní laboratoři na vstřikovacím stroji ARBURG, kde jsme do formy s dutinou tvaru Archimédovy spirály vstřikovali při optimálních a změněných procesních parametrech polymerní materiál. Konec praktické části je věnován aplikaci výsledků do výroby. Naměřené výsledky testů na zatékavost polymerního materiálu jsem aplikoval do výrobního procesu pro optimalizaci procesu vstřikování problémového dílce. Tento dílec je tvořen šedesáti kavitami (otvory) pro následné osazení terminálem. Díl je tvořen tenkými stěnami. Při výrobě vstřikováním tohoto plastového dílce docházelo k častému nedolití zejména tenkých stěn a k tvoření vysokých sil, vyvolaných tokem taveniny, které působí na velmi tenká jádra a ty následně praskají. Tyto úpravy jsou doprovázeny analýzami v programu Cadmould.

Závěr práce patří návrhům pro optimalizaci procesu vstřikování plastového dílce, založených na testech reologických vlastností daných materiálů a na základě provedených analýz v programu Cadmould.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

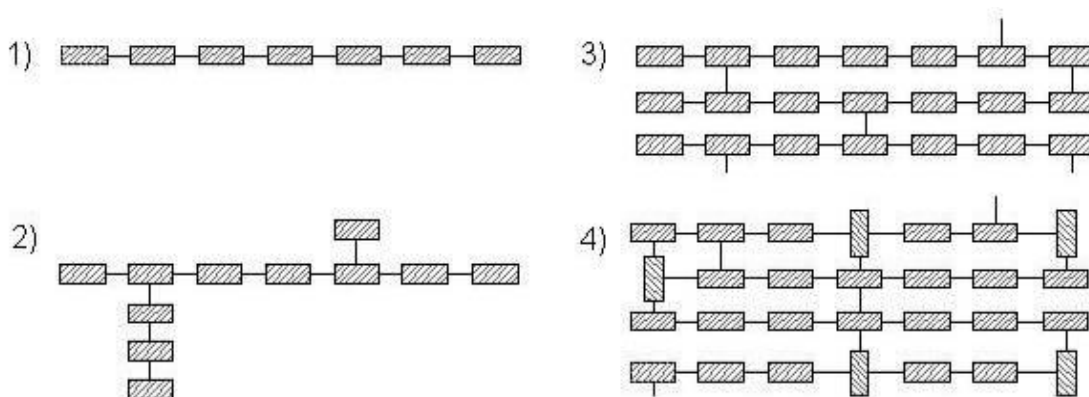
## 1 POLYMERY

Polymery jsou materiály, jejichž základem jsou makromolekulární látky, buď přírodní polymery (např. kaučuk) a jejich deriváty (např. acetát celulózy) nebo dnes nejvíce rozšířené syntetické polymery (např. polystyren, polyetylén a polypropylén). Jejich základní vlastnosti jsou dány chemickou stavbou a vzhledem ke kombinačním možnostem (ABS,PBT) v organické chemii jsou možnosti nových typů téměř neomezené.



Obrázek 1. Základní rozdělení polymerů

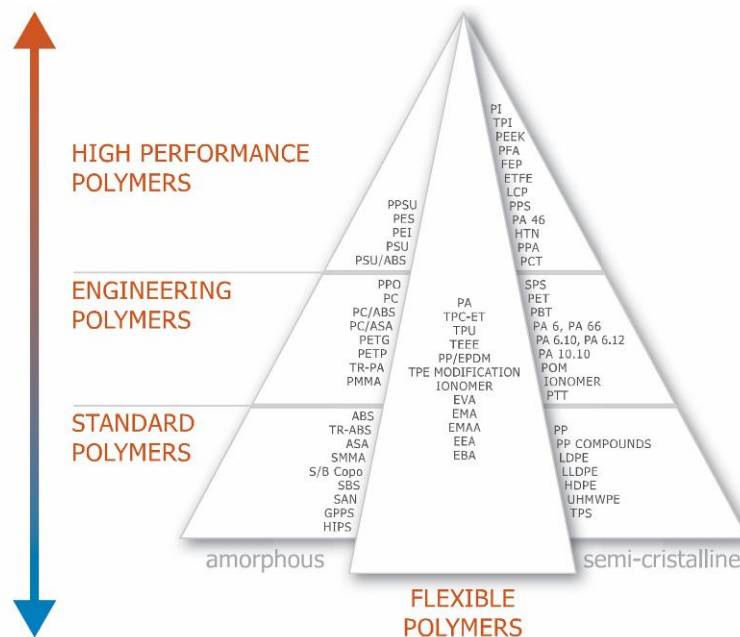
Základem makromolekulárních látek je makromolekula, což je velká molekula složená z mnohonásobně se opakujících strukturních jednotek spojených v dlouhé řetězce chemickými nebo jinými vazbami. Počet těchto jednotek v jedné makromolekule udává tzv. polymerační stupeň. Aby měl polymer určitou mechanickou pevnost, musí být polymerační stupeň minimálně 40 až 80 (podle typu hmoty), tj. makromolekula musí obsahovat nejméně 40 až 80 struktur. Makromolekuly mají různý tvar a podle toho jsou tříděny na lineární, rozvětvené a síťované. [2]



Obrázek 2. Schéma tvaru makromolekul

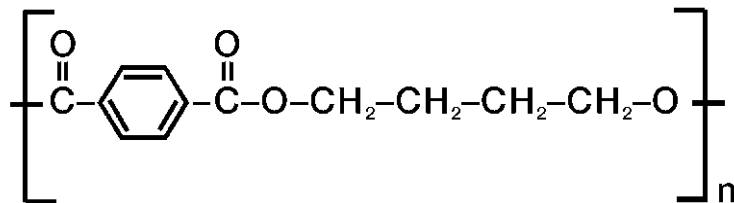
1 - lineární, 2 - rozvětvené, 3 - síťované,  
4 - prostorově středěné

## 1.1 Technické využití polymerních materiálů



Obrázek 3. Využití polymerních materiálů

### 1.1.1 Vlastnosti materiálu PBT (polybutylterephtalat)



Obrázek 4. Chemický vzorec (PBT)

PBT pro zpracování vstřikováním a vylačováním je na trhu nabízen od roku 1970. Jeho velkou výhodou je dobrá zpracovatelnost. Pro dosažení krystalinity postačí teploty kolem 30 až 60 °C. Mechanické vlastnosti a  $T_g$  jsou nižší než u PET. Technické využití tohoto polyesteru pod zatížením je vzhledem k nízké hodnotě  $T_g$  možné jen do 50 až 70 °C. Materiál je odolný proti oděru a řadě chemikálií, má velkou rázovou houževnatost, rozměrovou stabilitu a malou absorpci vody. Dobré kluzné vlastnosti a rozměrová stabilita ve spojení s výhodným zpracováním otevírají produktu možnost použití v technice. Ze zahraničních výrobců lze uvést výrobky ARNITE (AKZO, Nizozemsko), Ultradur (BASF, Srn) a Vestodur (CREANOVA, dříve Hüls). Světová spotřeba v r. 1997 byla 96 kt. Ze slitiny s polykarbonátem se (PBT/PC) se vyrábějí vstřikováním automobilové nárazníky. [1]

## 2 SUŠENÍ TERMOPLASTŮ

Charakteristickou vlastností téměř všech termoplastů je větší nebo menší schopnost přejímat z okolního prostředí, ve kterém se nacházejí, nízkomolekulární látky nebo je do okolního prostředí uvolňovat. To se v největší míře týká vlhkosti, resp. obsahu vody v granulátu nebo výstřiku.

Obsah vlhkosti v granulátu před zpracováním je při vstřikování termoplastů velmi závažný problém. Obsah vody (i velmi malý) způsobuje u výstřiků jak zhoršení mechanických vlastností, tak zejména povrchové vady – stříbření, nerovnoměrný lesk – matování, lokální změny barevného odstínu, stopy po unikající páře, mokřý materiál v plastikační komoře vstřikovacího stroje rychle degradovat (hydrolytická degradace), zejména u tlustostěnných výstřiků se mohou objevovat bubliny. Dále je nutné mít na paměti, že s obsahem vody ve výstřicích se mění jejich hmotnost a objem, čímž je nepříznivě ovlivňována jejich rozměrová a tvarová přesnost a stabilita rozměrů a tvarů. Materiál o vyšším obsahu vody než je přípustné, má také větší tekutost, což může vést k přetokům v dělicích rovinách vstřikovací formy. Při delší době sušení se tekutost granulátů snižuje. [4]

### 2.1.1 Sušení termoplastů

Jedním z hlavních požadavků na jakost termoplastů – granulátů určených ke vstřikování – je stanovení obsahu vlhkosti v nich – vstupní kontrola před vstřikováním a kontrola účinnosti sušení. Pro určení maximálního povoleného obsahu vlhkosti v granulátu před jeho zpracováním vstřikováním se obvykle vychází z údajů výrobce granulátů – materiálové listy, různé databáze, zkušenosti atd. [4]

### 2.1.2 Sušárny granulátů – způsoby sušení:

- Sušárny se samovolnou cirkulací ohřátého vzduchu
- Sušárny s nuceným oběhem ohřátého vzduchu
- Sušárny s nuceným oběhem ohřátého suchého vzduchu
- Podtlakové sušárny
- Tlakovzdušné sušárny

Vzduch/Období	Teplota vzduchu [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]	Obsah vlhkosti vzduchu [g.m-3]
Vlhký letní	25	80	19,00
Normální letní	25	60	14,00
Jaro/podzim	10	70	6,70
Zima	0	80	3,90

*Tabulka 1. Hodnoty obsahu vlhkosti vzduchu v závislosti na ročním období*

Polymer	Teplota sušení [°C]	Doba sušení [hod]
PE	50-70*	0,5 až 1*
PP	80*	0,5 až 1*
PS	80	3
ABS	80	3
SAN, ASA	80	3
PA6	80	7
PA66	60-70	6
PMMA	70-80	2 až 4
PC	120-130	4 až 20
POM	120-130	4
PBT	110-120	2 až 4

*Tabulka 2. Doporučená doba sušení pro dané materiály*

(Pozn. Podmínky pro sušení v této tabulce jsou zpracovány z materiálových norem, prospektů, doporučení výrobců. Hodnoty označené \* udávají teploty a doby sušení při nevhodném skladování, jinak se polyolefiny nemusí sušit)

### 3 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je způsob tváření zejména termoplastů, při kterém se polymerní materiál ve vstřikovací jednotce roztaví na polymerní homogenní taveninu. V roztaveném stavu se vstřikuje z pomocné vstřikovací jednotky do uzavřené tvarové dutiny vstřikovací formy, kde se pod tlakem ochladí a nechá ztuhnout na finální výrobek. Teplota vstřikovací formy je mnohem nižší než teplota tání zpracovávaného termoplastu. Vstřikovací jednotka je součástí vstřikovacího stroje a zásoba polymerního materiálu se v ní stále doplňuje během cyklu.

Vstřikování je technologie vhodná pro velkosériovou výrobu, neboť jednotlivé operace lze poměrně snadno automatizovat. Výhodou vstřikování jsou také krátké časy cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou, ale i konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Touto technologií lze vyrábět výrobky téměř ze všech termoplastů i termosetů, a to od miniaturních součástí po rozměrné výrobky. [2]

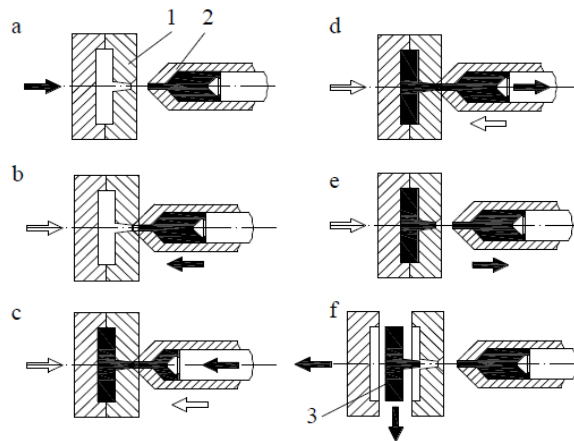
#### 3.1 Postup vstřikování

Plast v podobě granulí je nasypán do násypky, z níž je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která hmotu dopravuje do tavicí komory, kde za současného účinku tření a topení se plastové granule přemění na taveninu. Tavenina je následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela zaplní a zaujme její tvar. Následuje dotlak, pro snížení rozměrových změn a smrštění. Temperovaná forma odebírá z taveniny teplo a tuhnutím taveniny vzniká hotový výrobek. Poté se forma otevře a výrobek je za pomoci vyhazovačů z formy vyhozen. Celý cyklus se opakuje. [2]

##### 3.1.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus zahrnuje dvě oblasti. Jedna se vztahuje k plastikační jednotce, druhá k formě. Schematicky je vstřikovací cyklus znázorněn na obrázku (*Obr. 6*). Po uzavření formy (a) se přisune plastikační jednotka tak, že vstřikovací tryska dosedne do ústí vtokového kanálu (b). Časový úsek, v němž se dutina formy plní, je tzv. doba plnění. Po zaplnění dutiny formy působí na vstříknutou hmotu tlak, tzv. dotlak (c). Dotlak působí až

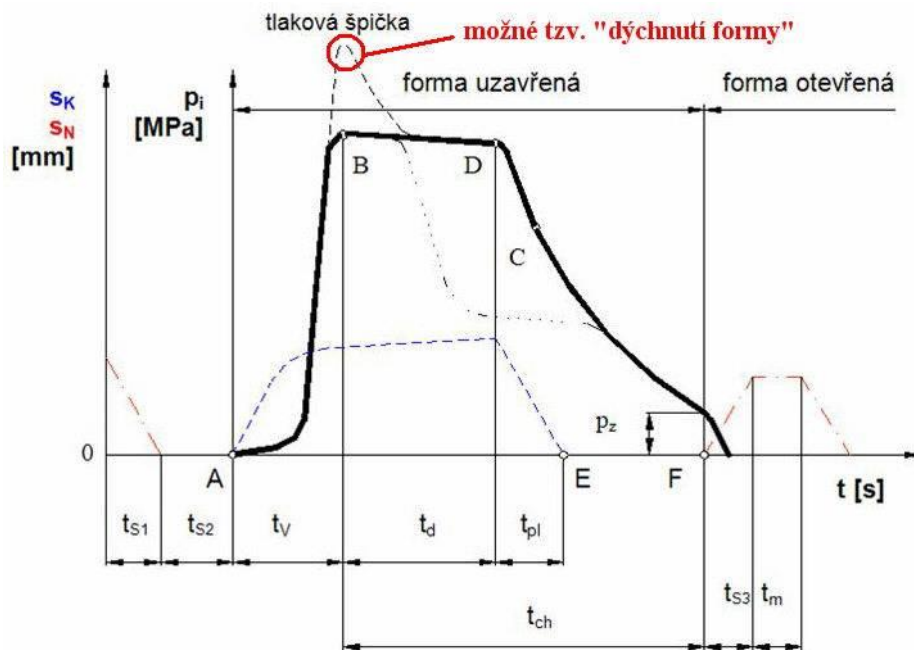
do chvíle, kdy dojde k úplnému zatuhnutí vtokového ústí. Dále polymer tuhne ve formě bez působení vnějšího tlaku (d). V této fázi také začíná postupné doplňování vstřikovací komory plastikovaným materiálem. V další fázi (e) odjíždí plastikační jednotka od formy, forma se otevírá a výstřík se automaticky nebo ručně vyhazuje (f). Forma i plastikační jednotka jsou ve výchozí poloze a celý cyklus se opakuje. [3]



Obrázek 5. Průběh vstřikovacího cyklu

1 - forma, 2 - plastikační jednotka, 3 – výstřík

### 3.1.2 Průběh plnění dutiny formy



Graf 1. Průběh tlaku  $p_i$  v dutině formy během procesu vstřikování, sk-pohyb šneku, sn-pohyb nástroje



### 3.2 Vstřikovací stroj a jeho funkce

Vstřikovací stroj je zařízení, které umožňuje roztavení plastu a jeho homogenizaci, dále vstříknutí taveniny pod tlakem do formy uzavřené a zajištěné proti otevření silou, která musí být větší než síla vyvolaná tlakem taveniny v dutině formy. [2]

#### Základní části stroje jsou:

- Vstřikovací jednotka

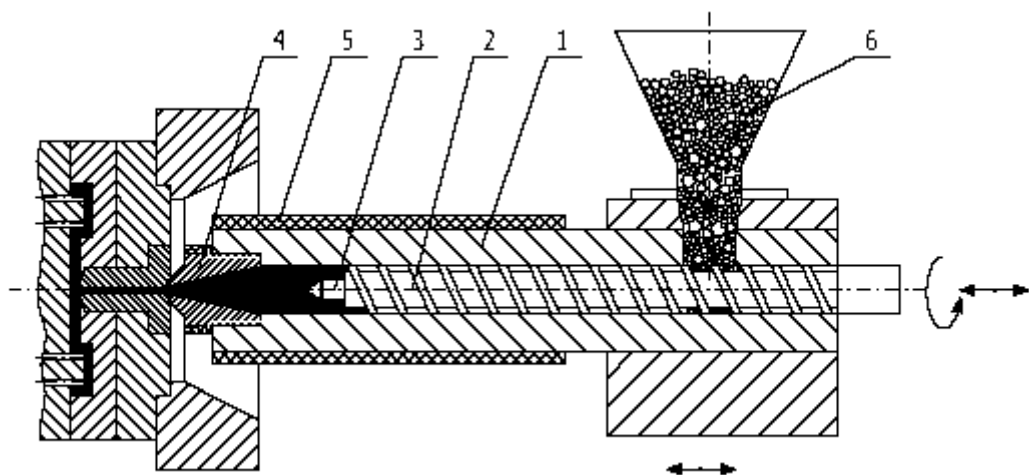
Tvoří ji: násypka, dávkovací zařízení, plastifikační a vstřikovací komora s pístem nebo se šnekem, tryska, topení a regulace.

- Uzavírací jednotka

Tvoří ji: uzavírací mechanismus, přidržovací mechanismus a forma

- Příslušenství vstřikovacího stroje

Tvoří je: zdroj energie (tlak pro vyvození vstřikovací, uzavírací a přidržovací síly), temperační zařízení forem a regulační a ovládací prvky. [2]



Obrázek 6. Plastifikační jednotka vstřikovacího stroje

1- pracovní válec, 2 - šnek, 3 - zpětný uzávěr, 4 - vstřikovací tryska,  
5 - topné těleso, 6 – násypka

### 3.2.1 Funkce uzavírací jednotky

Úkolem uzavírací jednotky je:

- a) *otevírat a uzavírat formu*
- b) *zajistit zavřenou formu* takovou silou, aby se při vstřiku a dotlaku neotevřela působením tlaku taveniny na stěně tvarové dutiny formy.

Uzavírací mechanismus je charakterizován tzv. uzavírací silou, což je největší síla k uzavření formy. Pod tento pojem se obvykle zahrnuje i max. síla, kterou je třeba vyvinout, aby byla zajištěna těsnost formy během celého vstřikovacího cyklu. U základních typů hydraulických uzávěrů byly tyto dvě hodnoty totožné. [2]

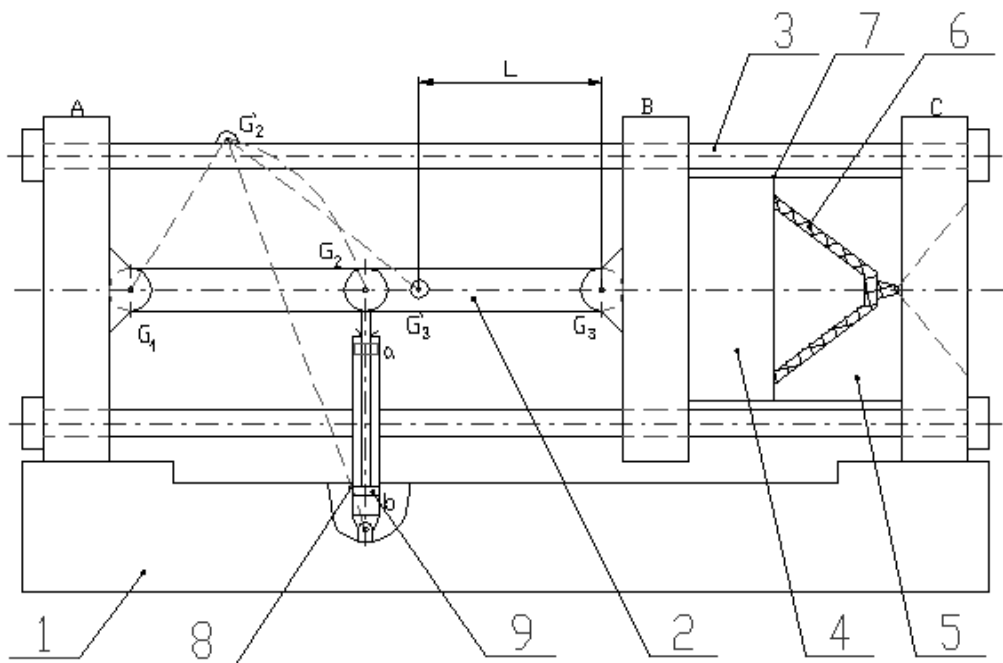
S vývojem nových uzávěrů je třeba rozlišovat:

- a) *uzavírací sílu* (sílu potřebnou k uzavření formy),
- b) *přidržovací sílu* (sílu potřebnou k zajištění formy proti otevření tlakem taveniny).

Obě síly působí ve stejném smyslu. [2]

Uzavírací jednotku (obr.7.) tvoří tyto hlavní části:

- a) *opěrná deska A*, která je pevně spojena s ložem stroje a na ní je upevněn systém uzávěru,
- b) *pohyblivá upínací deska B*, volně pohyblivá po vodících (sloupcích) – 3, u horizontálních strojů obvykle ve směru rovnoběžném s osou vstřikovací jednotky; na tuto desku se připevní jedna polovina formy – tvárník 4,
- c) *upínací deska s otvorem pro trysku C* – zde se připevní druhá polovina formy, tvárnice 5 s vtokovou soustavou a vtokem, vedoucím vtokovou vložkou ve směru osy vstřikovací jednotky,
- d) *vodící tyče* – sloupky 3, na nichž je deskami A, B, C vymezen úsek pro max. otevření formy,
- e) *zvedací a přidržovací mechanismus 2* s pohonem 8,
- f) *forma*, která je ovšem výměnnou částí uzavírací jednotky. [2]

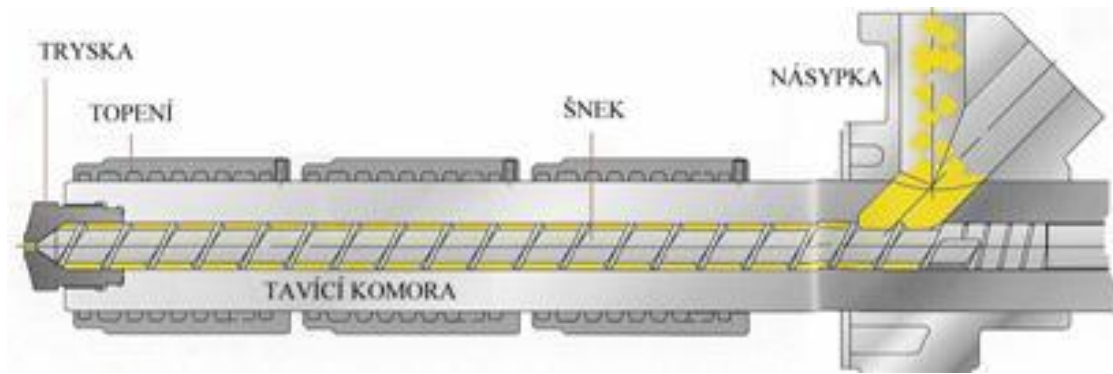


Obrázek 7. Schématické znázornění uzavírací jednotky s kloubovým mechanismem ovládaným hydraulicky

a - poloha „otevřeno“, b - poloha „zavřeno“, 1 - rám stroje, 2 - kloubový mechanismus, 3 - vodící sloupek, 4 - tvárník, 5 - tvárnice, 6 - výstřik, 7 - dělicí rovina formy, 8 - hydraulický válec, 9 - píst, A - opěrná deska, B - pohyblivá upínací deska, C - vtoková upínací deska.

### 3.2.2 Funkce šnekové vstřikovací jednotky

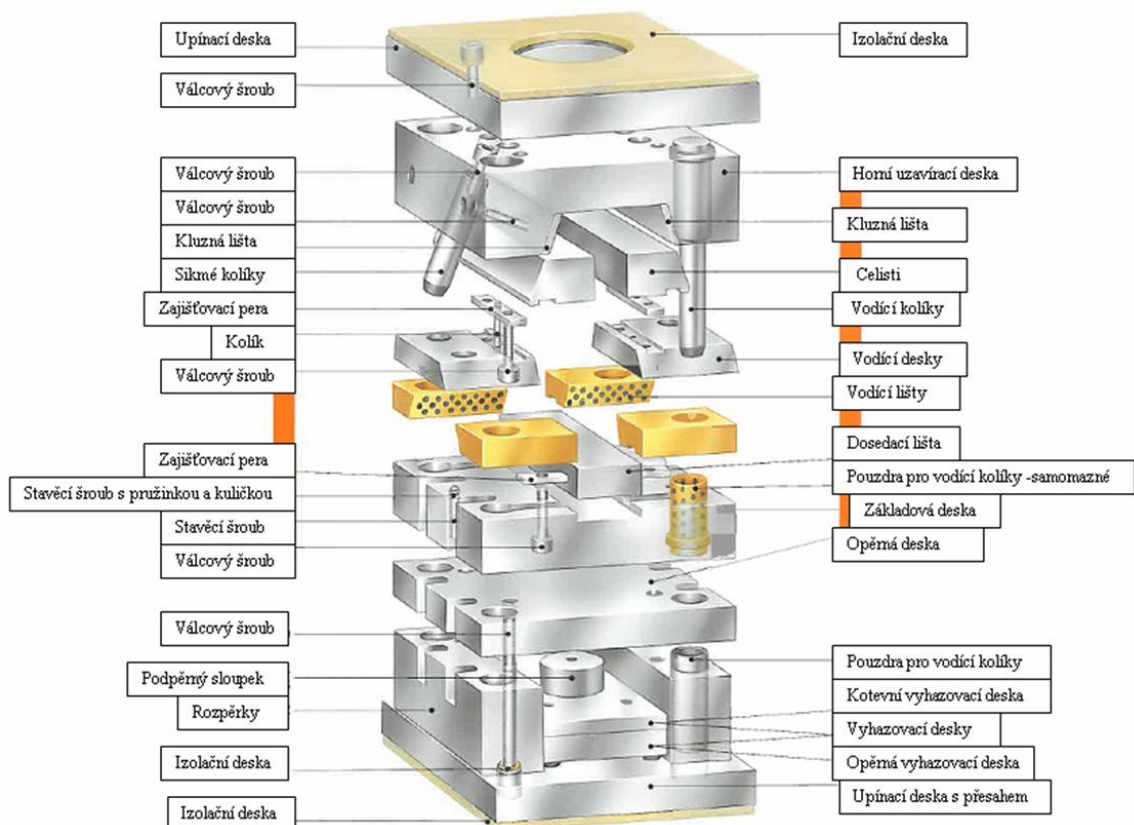
Při plastikaci ustupuje šnek dozadu a tavenina se hromadí v prostoru mezi tryskou a špičkou šneku. Zpětný pohyb šneku (axiální) a současně plastikace (otáčení) se zastaví po najetí spínací stavitelné vačky (zarážky) na koncový spínač. Radiální pohon šneku (otáčení) je vyvozován přes převodovku (soustava ozubených kol včetně spojky napojené hřídelem na elektromotor). Pohon umožňuje změnu rychlosti otáčení šneku (např. variátorem, regulačním elektromotorem nebo hydromotorem). Axiální (podélný) pohyb šneku je ovládán hydraulickým válcem a příslušná síla se vyvolá tlakem hydraulické kapaliny. Při pohybu šneku vpřed (impuls dá časové relé) se šnek pohybuje tak dlouho, až zarážky narazí na přední koncový spínač, který přepne tlak na dotlak, při němž se doplňuje tavenina do formy. Doba působení dotlaku se opět nastavuje časovým relé. Po impulsu se tedy dotlak přerušuje, válec odskočí od formy a může opět začít plastikace. Některé moderní stroje jsou opatřeny víceúrovňovými čerpadly a je na nich možno plastikovat v kterékoliv fázi cyklu. [2]



Obrázek 8. Vstřikovací jednotka

### 3.3 Vstřikovací forma

Forma je výměnnou částí uzavírací jednotky. Její funkce je dát tavenině výsledný tvar výrobku a zachovat jej až do ztuhnutí a ochlazení na takovou teplotu, při níž nedochází k podstatnější deformaci. Forma je vedle plastikačního válce nejdůležitější částí vstřikovacího stroje a na její konstrukční a výrobní přesnosti závisí nejen rozměrové tolerance výrobků, ale i jeho vlastnosti užitě (zejména mechanické) a také ekonomie celé výroby (dosahitelný stupeň automatizace). [2]



Obrázek 9. Forma pro vstřikování plastů

### 3.3.1 Vstřikovací formy

Vstřikovací formy mají své konstrukční zvláštnosti, vyplývající z chování polymerní taveniny pod tlakem (tlaky ve formě se pohybují v průměru od 15 až do 150 N/mm<sup>2</sup>). Vlivem hydraulického tlaku v dutině formy při vstřikování jsou její nosné části značně namáhány a nejsou-li dostatečně tuhé, mohou se deformovat (průhyb). Pro zatečení (a vytvoření otřepu) taveniny plastu do dělicí roviny postačí již průhyb větší než 0,05 mm (záleží na viskozitě taveniny). Na druhé straně může tlak vyvolaný na stěnu poddimenzované formy způsobit její vyboulení. Proto se tvarové části formy musí správně dimenzovat, popř. se musí vyztužit deskami nebo opěrnými sloupky. Pro dimenzování lze použít výpočtu pro namáhání desky určitého průřezu podepřené a zatížené rovnoměrným tlakem.

Návrh konstrukce formy musí vycházet z těchto údajů:

- a) *design výrobku* (požadovaných rozměrů a tolerancí),
- b) *typu stroje* (jeho parametrů),
- c) *druhu vstřikovaného materiálu* (zejména vlastnosti taveniny při podmínkách vstřikování),
- d) *požadovaného počtu kusů* (násobnost formy, jejich cena a dodací termíny).

Na základě těchto údajů se určí násobnost formy, způsob zaformování dílce, dělicí rovina a vtoková soustava. Počet výstřiků má rozhodující vliv na volbu násobnosti formy a ovlivňuje i výběr materiálu, z něhož bude zhotovena, a technologii její výroby. Když je určité řešení zvoleno, je třeba provést konkrétní výpočet se zřetelem na plastikační výkon stroje a na pracovní cyklus a musí se zkontrolovat, zda přídržovací síla formy u použitého stroje bude postačující s ohledem na tlak taveniny ve formě. [2]

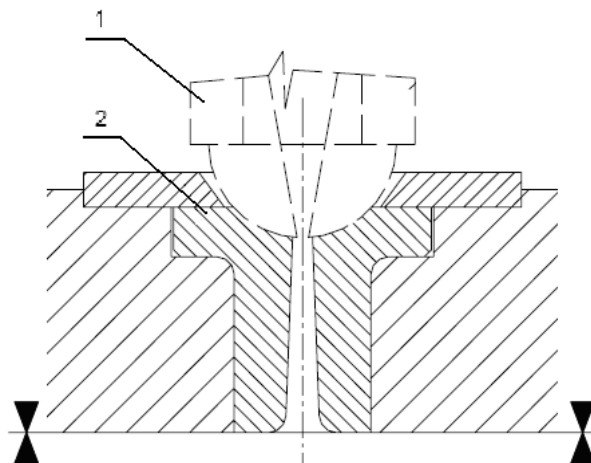
### 3.3.2 Řešení vtokové soustavy

Polymer roztavený v plastikační jednotce proudí tryskou do vtokové soustavy vstřikovací formy, jenž tvoří systém vtokových kanálů. Tyto kanály vedou k dutinám formy. Rozdíly v uspořádání vtokové soustavy jsou dány především konstrukcí formy a její násobností. [5]

Při návrhu vtokové soustavy musíme respektovat některé pravidla, jež vycházejí z technologických požadavků při samotném vstřikování:

- dráha toku od vstřikovací trysky k dutinám formy má být co nejkratší, aby mohla být tavenina vstřikována co největší rychlostí,
- dráha toku ke všem dutinám formy má být stejně dlouhá,
- průřez vtokových kanálů musí být dostatečně velký, aby po naplnění formy zůstalo jádro vtokového kanálu dostatečně dlouho v plastickém stavu, to umožní efektivnost dotlaku jako kompenzaci při smršťování výstřiku,
- ústí vtoků má být umístěno tak, aby tavenina vtékala do nejtlustšího průřezu výstřiku a tekla k nejužšímu místu,
- pro přesné výstřiky jsou výhodnější plné vtoky, protože na rozdíl od bodových vtokových ústí nezamrzne předčasně (neznemožní efektivní průběh dotlaku),
- ústí vtoků má být rovněž co nejkratší, vhodná je délka (0,5 - 1,2) mm,
- dosedací plochy trysky a vtokové vložky spolu musí lícovat; jsou-li kulovité, musí být poloměr koule na trysce o (0,4 – 0,6)mm menší než na vtokové vložce. Dále průměr
- otvoru v trysce musí být rovněž menší (přibližně o 0,5 mm) než průměr otvoru ve vtokové vložce. Pokud to není dodrženo, hrozí zatékání taveniny do dosedací plochy.

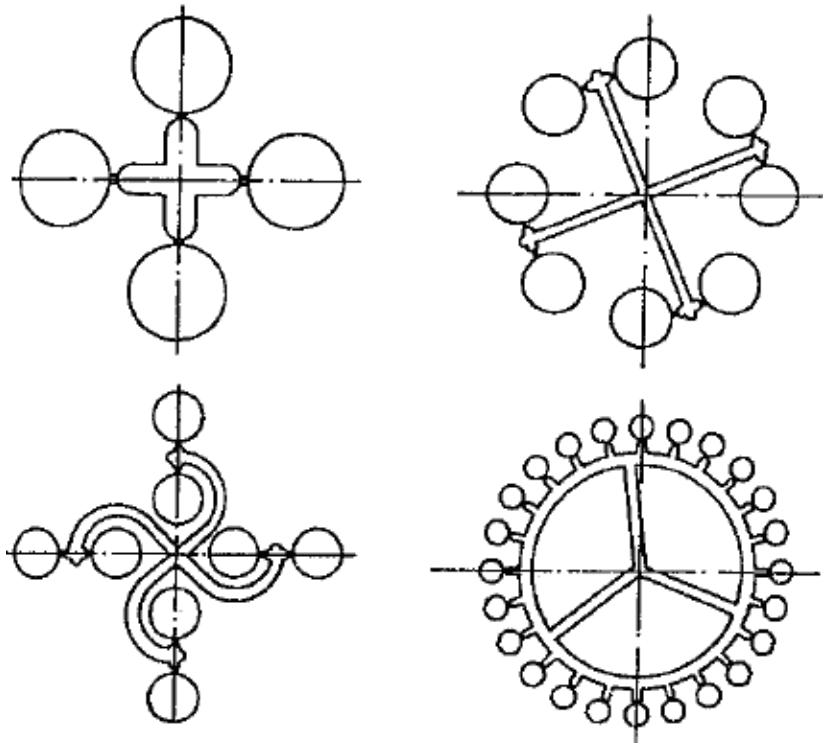
[2]



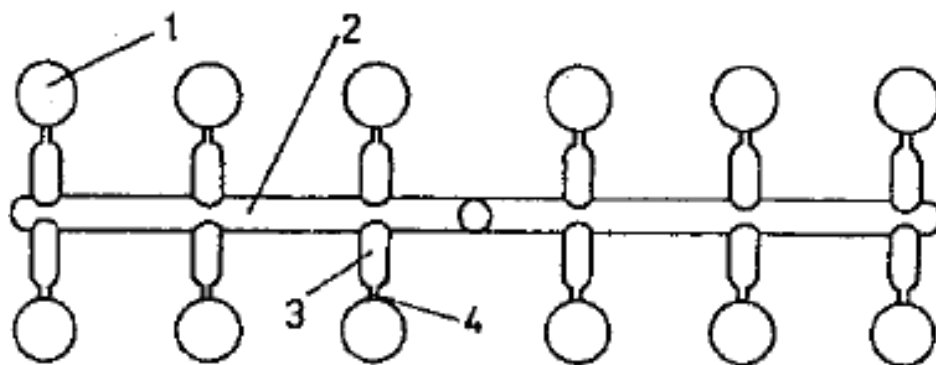
Obrázek 10. Dosednutí trysky stroje na vtokovou vložku

1 - tryska vstřikovacího stroje, 2 - vtoková vložka formy

## 3.3.3 Řešení vtokových systémů



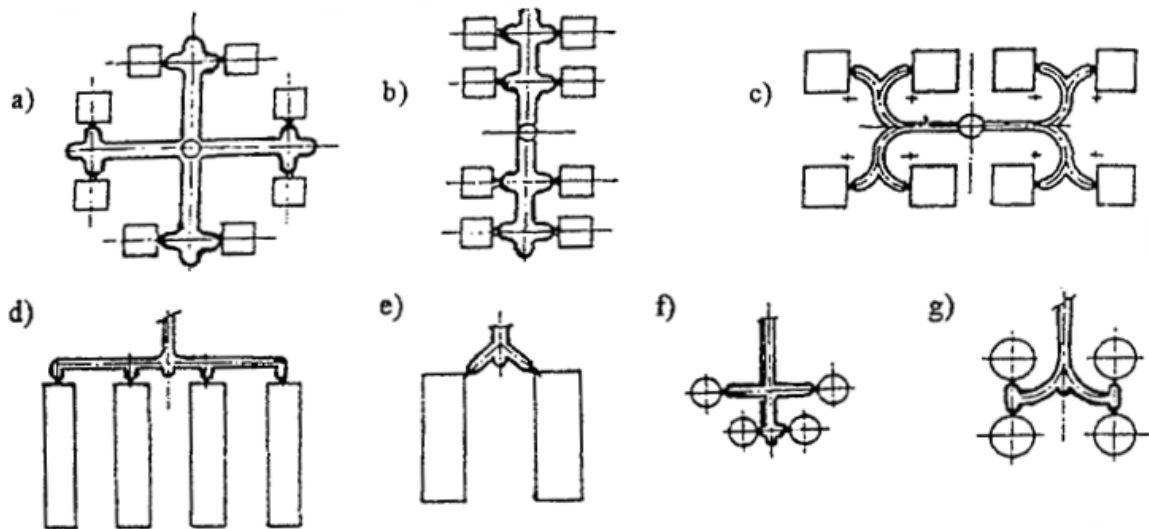
Obrázek 11. Hvězdicové a kruhové řešení rozváděcích kanálů násobných forem



Obrázek 12. Řádkový vtok vícenásobných forem

1- výstřík, 2 - hlavní rozváděcí kanál, 3 - vedlejší rozváděcí kanál,

4 - bodové ústí vtoku



Obrázek 13. Další typy vtokových systémů

a, c, e, f – stejná délka, g – vhodné řešení, b, d – nutná korekce vtokových sítí

### 3.3.4 Formy s horkými rozváděcími kanálky

Výhody použití:

- ušetření polymeru z vtokových zbytků,
- není nutné dodatečné odstraňování vtokových zbytků s eventuálním začišťováním,
- nejsou nutné třideskové formy,
- odpadá nutnost plastikovat materiál i na vtokové zbytky zkrácení vstřikovacího cyklu,
- snadná automatizace procesu. [2]

Nevýhody:

- vyšší cena forem,
- vzhledem k poměrně složitosti těchto forem - náročnější opravy možné delší přerušování výroby. [2]

Uplatnění:

- u malých výstřiků, kde objem vtokových zbytků by byl stejný nebo větší než objem výstřiku nebo kde vzhledem k malé tloušťce stěny, je nutné vstřikování několika vtoků. [2]



Základní typy:

- a) formy s izolovanými rozváděcími kanály,
- b) formy s vyhřívanými rozváděcími kanály,
- c) formy s modifikovanými izolovanými rozváděcími kanály. [2]

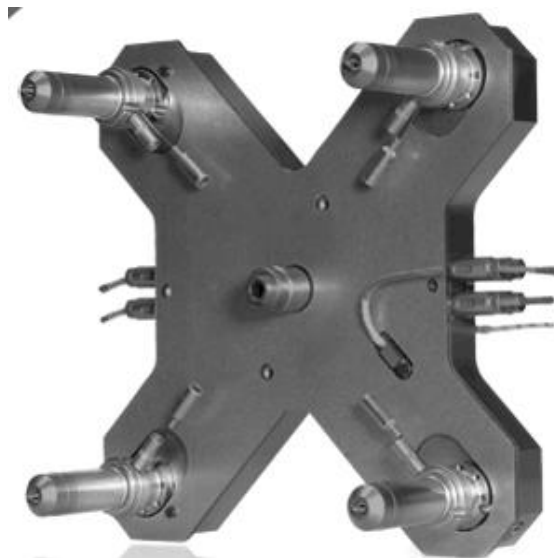
Formy s izolovanými rozváděcími kanály - třideskové formy s rozváděcími kanály o větším průměru. Na počátku vstřikování tavenina polymeru sice zatuhne na stěnách kanálů, ale zbylé plastické jádro má dostatečný průřez umožňující průtok taveniny v dalších cyklech. Dělicí rovina rozváděcích kanálů se otevírá pouze při přerušení výroby.

Formy s vyhřívanými rozváděcími kanály - rozváděcí systém taveniny trvale udržován nad teplotou tání taveniny vstřikovaného polymeru: celý obsah kanálů roztavený.

Velmi náročné po konstrukční a výrobní stránce, vyplatí se pro výstřiky menších hmotností ve velkých sériích.

Formy s modifikovanými izolovanými rozváděcími kanály - kompromis mezi oběma předchozími systémy.

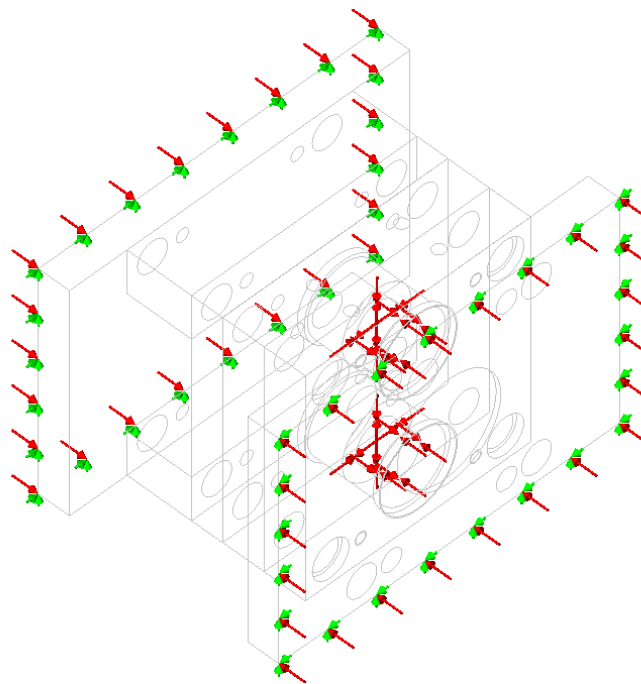
Tavenina v hlavních kanálech je izolována ztuhlým polymerem, ale trysky jsou vyhřívány malými odporovými tělesy - přesnější nastavení a ovládání teplot. [2]



Obrázek 14. Vyhřívaná vtoková soustava

### 3.3.5 Zatížení vstřikovací formy

Vstřikovací forma je nejvíce zatěžována tlakem vstřikované taveniny polymeru. Zatížení působí jednak na vtokovou soustavu, ale hlavně na tvarové části vstřikovací formy. Dále je vstřikovací forma zatěžována silami uzavírací jednotky vstřikovacího stroje. Tyto síly působí hlavně deformaci rámu formy. V důsledku teplotních změn, které vznikají při vstřikování taveniny polymeru do formy a následujícím chlazením je forma namáhána také tepelně. [8]



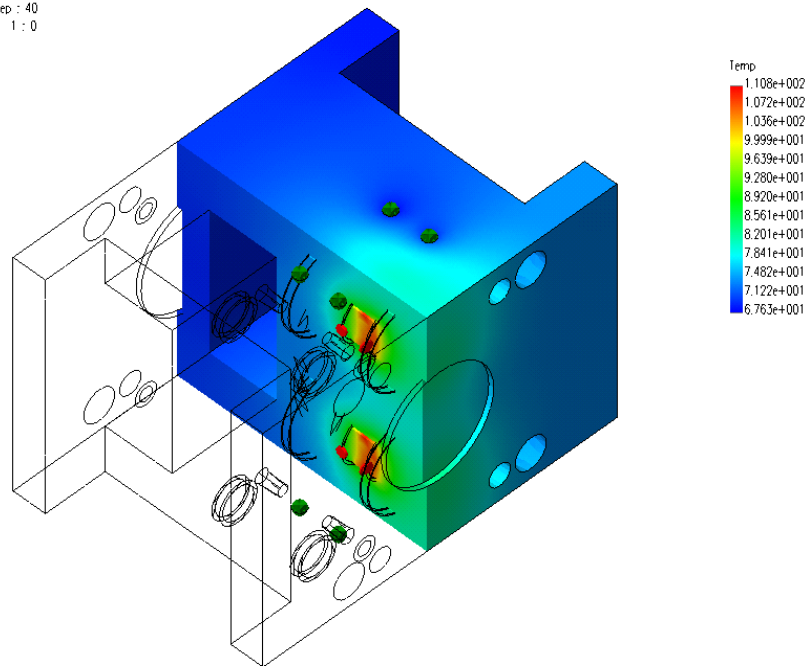
Obrázek 15. Zatížení vstřikovací formy tlakem taveniny a uzavírací silou.

### 3.3.6 Teplotní zatížení vstřikovací formy

Tepelné podmínky ve vstřikovací formě závisí na množství tepla, které se odvede z polymerní taveniny vstřiknuté do dutiny formy, na čase chlazení ve vstřikovacím cyklu. Odvedené teplo závisí na teplotě taveniny při vstřikování, na teplotě výstřiku při vyhození z formy a na měrné tepelné kapacitě polymeru. Protože měrná tepelná kapacita není u polymerní taveniny konstantní, hovoříme o rozdílu entalpií mezi teplotou taveniny a teplotou vyhozeného výstřiku. Největší část vstřikovacího cyklu je dána časem chlazení, tj. dobou, za kterou musíme odvést teplo přivedené taveninou polymeru do dutiny formy. Teplotní namáhání formy je výsledkem rozdílné teplotní roztažnosti dvou komponentů, ale hlavně rozdílem teplot v různých částech formy. Teplo je odváděno chladícím médiem, které

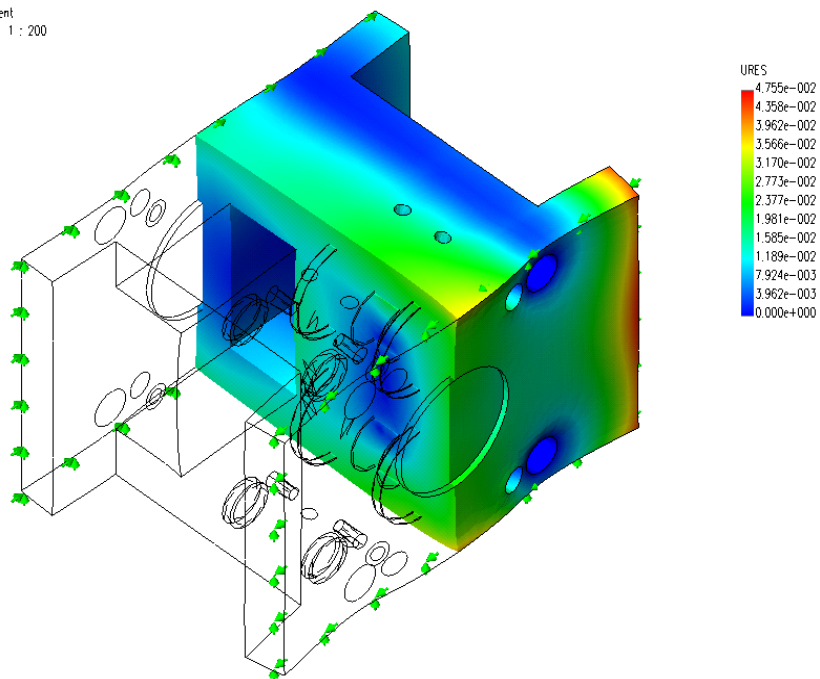
proudí chladícími kanály. Rozdíl teplot mezi stěnou dutiny formy a stěnou chladícího kanálu pak generuje mechanické napětí, které závisí na koeficientu teplotní roztažnosti a teplotním gradientu. Mechanické napětí pak způsobuje deformace komponentů vstřikovací formy. [8]

Mold\_1-Thermal :: Thermal Time Step : 40  
Units : Celsius Deformation Scale : 1 : 0



Obrázek 16. Teplota formy při vstřikovacím cyklu

Mold\_1-Stress :: Static Displacement  
Units : mm Deformation Scale : 1 : 200



Obrázek 17. Deformace formy v důsledku rozdílu teplot

### 3.3.7 Odvzdušnění vstřikovací formy

Technologie vstřikování termoplastů je diskontinuální, cyklický výrobní proces. Při každém výrobním cyklu jsou tvarové dutiny formy před naplněním polymerní taveninou zavzdušněny. Při toku taveniny tedy musí konstrukce formy zajistit úplný odvod vzduchu a případných plynných zplodin vzniklých při plastikaci vstřikovaného granulátu v plastikační komoře vstřikovacího stroje a s taveninou zanesených do dutiny formy. Samozřejmě platí přímá úměra – čím je větší rychlost plnění, tím účinnější musí být odvzdušnění tvarové dutiny formy. [4]

Neodvedený vzduch v tvarových dutinách vstřikovacích forem může mimo jiné vyvolat následující vady, resp. technologické problémy:

- Nedostříky – zamrznutí postupu čela taveniny
- Spálená místa na výstřicích vyvolaná tzv. Dieselovým efektem
- Uzavření vzduchu (tvorba bublin) ve stěnách výstřiků s větší tloušťkou stěn
- Zvýšení nebezpečí výskytu studených spojů a s nimi spojených vad povrchu a lokálním snížení pevnosti
- Vnesení vnitřního pnutí do výstřiku
- Zvýšení anizotropie vlastností výstřiku
- Nutnost enormního zvýšení vstřikovacího tlaku
- Velké tlakové spády v dutině formy

#### Technické provedení odvzdušnění

Pro oživování formy jsou vodítkem pro tvorbu odvzdušnění nedotečená místa na výstřiku, spálená místa, nutnost enormního zvyšování vstřikovacího tlaku, resp. nutnost používat velmi pomalé plnění atd. Kromě vytvoření příslušného odvzdušnění je nutné vždy při oživování formy pracovat s různými kombinacemi technologických parametrů (s ohledem na požadovanou hmotnost výstřiků), případně se změnou velikosti vtokového ústí s ohledem na dotlakovou fázi. [4]

**Způsob odvzdušnění:**

- hlavní dělicí rovinou formy, vedlejšími rovinami
- vřely mezi tvarovými pevnými částmi formy
- vřely mezi pohyblivými částmi formy
- odvzdušňovacími kanály
- speciálními prostředky do formy vloženými (obvykle jako poslední záchrana)

**Potíže s odvzdušněním:**

Vyskytuje se nových forem s dobře slícovanými dělicími rovinami, tvarovými prvky, vyhazovači, čelistmi, jádry atd. Provozem formy se vřely zvětšují a odvzdušnění se zlepšuje ( i když někdy na úkor dalších požadovaných jakostních parametrů, např. přetoky). U forem s vysokou pracovní teplotou formy, kdy si konstruktér neuvědomil vztah teploty formy a potřebných vřel mezi tvary, případně rozdílné tepelné roztažnosti použitých materiálů pro formy. Údržba formy – účinnost odvzdušnění všemi způsoby, jeho realizace je dána čistotou odvzdušňovacích spár, vřel, kanálů atd. K jejich zanesení dochází strženými konzervačními, mazacími, čistícími prostředky forem, zplodinami uvolňujícími se z polymerních tavenin, zplodinami případné tepelné degradace polymerů apod. Perioda čištění odvzdušňovacích kanálů je individuální pro každý výstřik a je nutné ji stanovit při provozu formy.

Druh polymeru	PS, ABS	PE, PP	PA	POM	PBT	PC	PMMA	plasty se SV
Hloubka odvzdušňovacích kanálků [mm]	do 0,04	do 0,04	do 0,02	do 0,04	do 0,03	do 0,04	do 0,04	do 0,05

*Tabulka 3. Doporučená hloubka odvzdušňovacích kanálků*

## 4 HODNOCENÍ TOKOVÝCH VLASTNOSTÍ TAVENIN POLYMERŮ

Jak pro výrobce surovin, tak jejich zpracovatele, výrobce strojů a forem je velmi důležitá znalost tokových vlastností a reologického chování tavenin polymerů. Výsledky tokových vlastností využívají:

- **Dodavatelé surovin a jejich zpracovatelé:**
  - Pro zajištění stejnoměrné kvality vstupního materiálu (granulátu)
  - Ke stabilnímu řízení zpracovatelského procesu
  - Při kontrole technologických parametrů (např. v případě zkřehnutí materiálu výrobku v důsledku jeho tepelné degradace při zpracovatelském procesu a plastikace vstupního materiálu)
- **Výrobci strojů:**
  - Při návrhu šneků, ozubených čerpadel, vstřikovacích trysek, ale také pro výpočet pohonů, uzavíracích sil, atd.
- **Konstruktéři vstřikovacích forem:**
  - Při návrhu designu plastového výstřiku
  - Při návrhu vtokového systému vstřikovacích forem (především velikostí vtokového ústí vtoku a dimenzování vtokových kanálů)

### 4.1 Index toku taveniny termoplastů (MFI) dle ČSN EN ISO 1133

Tato technologická zkouška je určena k posuzování vhodnosti použití polymerního materiálu k výrobě dílce daného konstrukčního požadavku. Tuto zkoušku nelze použít pro termoplasty, jejichž reologické chování ovlivňují jevy, jako je hydrolýza (rozklad sloučenin vodou), kondenzace nebo síťování.

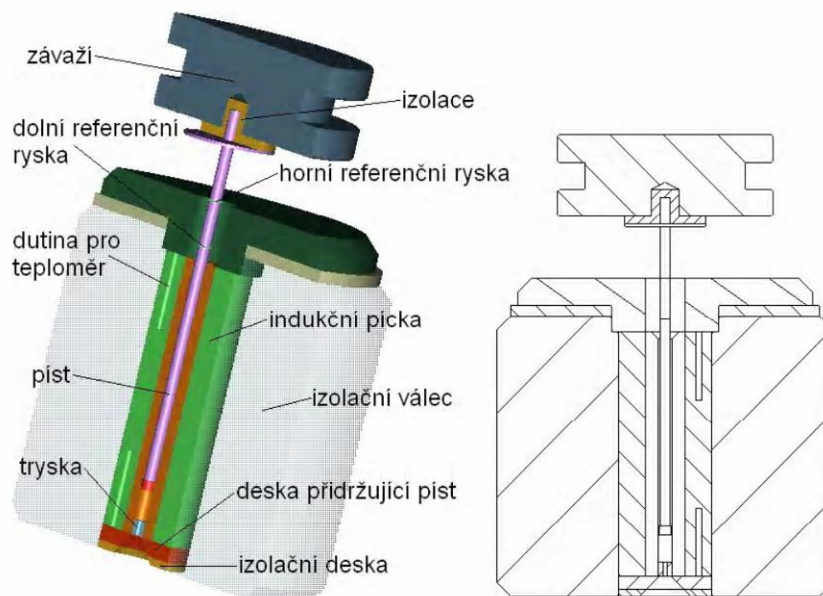
#### **Definice:**

Množství polymerní taveniny v gramech nebo v  $\text{cm}^3$ , které proteče tryskou definovaných rozměrů (Norma ASTM) o délce  $8,000 \pm 0,025$  mm a nejčastěji nominálním průměru  $2,095 \pm 0,005$ , při daných podmínkách (teplota a zatížení) za deset minut.

Obvyklý rozsah MFI je mezi 1 až 25. Nízká hodnota MFI znamená vysokou viskozitu a vysokou molekulovou hmotnost, zatímco vysoká hodnota MFI znamená nízkou viskozitu a nízkou molekulovou hmotnost. Odpovídá inverzní viskozitě při poměrně nízkých smykových rychlostech. [10]

### Index toku taveniny je obecně vhodný zejména pro:

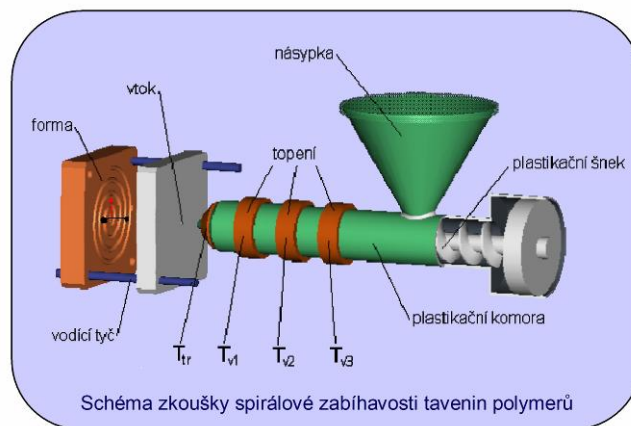
- Hodnocení kvality materiálu, resp. šarže materiálu. Není-li shodný MFI s hodnotami inspekčního certifikátu daného polymeru deklarovaného výrobcem, tj. liší-li se jeho tekutost, nebude vyhovovat polymer ani z hlediska mechanických vlastností, neboť jsou závislé, obdobně jako jeho tekutost na velikosti makromolekul.
- Hodnocení plněných a neplněných termoplastů
- Hodnocení kvality výrobního procesu. MFI stanoveného u granulátu výrobků lze jejich vzájemným porovnáváním prokázat degradaci taveniny způsobenou nevhodnými technologickými podmínkami během procesu vstřikování (např. v důsledku vysoké teploty taveniny polymeru nebo také vysokou dobou zdržení materiálu ve vstřikovací jednotce, apod.).



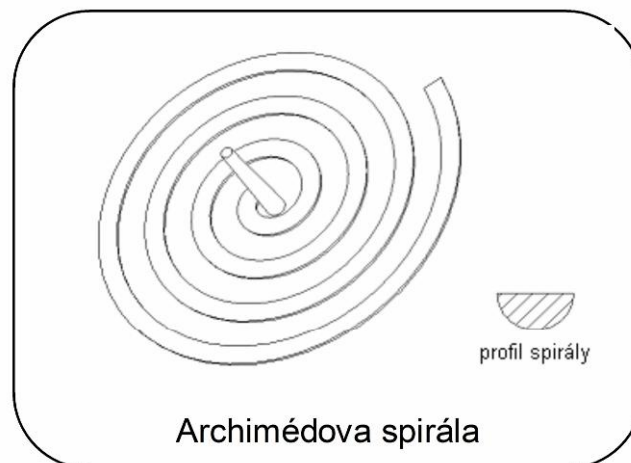
Obrázek 18. Kapilární výtlačný plastometr

## 4.2 Spirálová zkouška zatékavosti taveniny

Polymerní tavenina je na vstřikovacím stroji vstřikována při definovaných technologických podmínkách do formy, jejíž dutina má tvar ploché Archimédovy spirály teoreticky nekonečné délky, šířky 10 mm a výšky 2 mm nebo 4 mm. Při hodnocení zatékavosti polymeru se zvolí takové podmínky, aby se dutina nezaplnila v celé délce. Měřítkem zatékavosti je délka spirály. Tato ryze technologická zkouška umožňuje hodnotit tokové chování tavenin polymeru za podmínek, které jsou prakticky shodné s podmínkami při vlastním vstřikování. Dává nám také možnost prověřit vliv měnících se technologických parametrů a procesních parametrů (teplota a tlak), popř. aditivních prvků, na změnu zatékavosti zkoumaného polymeru. Dále také vliv druhu vkládané textilie (hybridní technologie vstřikování) na zatékavosti polymeru.



Obrázek 19. Schéma zkoušky zatékavosti polymerní taveniny



Obrázek 20. Archimédova spirála



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 ZÁMĚR PRAKTICKÉ ČÁSTI

V teoretické části byl popsán proces vstřikování zaměřený především na konstrukci vstřikovací formy, rozvodných vtokových kanálů, popis zkoušek reologických vlastností polymerních materiálů a seznámení se zkoumaným druhem polymerního materiálu PBT.

Úvod praktické části je zaměřen na seznámení s polymery Ultradur S4090 a Ultradur S4090 High speed dle materiálového listu s doporučenými procesními parametry.

Dále je zaměřen na zkoušku reologických vlastností polymerní taveniny jako je měření ITT a zkouška zatékavosti polymerního materiálu. U obou těchto zkoušek jsme zkoumali změnu tokových vlastností polymeru s měnícími se parametry zejména teploty taveniny, teploty formy a vstřikovacího tlaku. Na základě poznatků z těchto zkoušek jsem vytvořil grafy naměřených hodnot a z něj byla vybrána nejlepší kombinace procesních parametrů, které následně aplikujeme při výrobě vstřikovaného dílce, který je technicky výrobně náročný z hlediska jeho designu. Díl je tvořen tenkými i silnými stěnami a zároveň je složen z mnoha kavit, tudíž tvárník je složen z mnoha jader, které mají velmi tenké stěny a je na ně při toku polymeru vytvářena velká síla, která vytváří ohybový moment a následně dochází k praskání těchto jader. Za pomoci těchto testů jsem chtěl optimalizovat procesní parametry, tak abych co nejvíce snížil vstřikovací tlak a sílu působící na jádra formy. V první řadě mi šlo co nejvíce vytěžit z nastavení procesních parametrů, protože se jedná o velmi nízko nákladové testy a v případě nulového nebo zhoršujícího výsledku lze procesní parametry vrátit zpět do původního stavu. Tyto změny jsou doprovázeny simulacemi a následně zobrazen skutečný stav.

Následně jsem hledal další možnosti jak snížit tlak na jádra a to změnou průměru vtokového kužele trysky, zvětšením průřezu vtokového rozvodného kanálu nebo změnou studeného vtokového systému za horký vtokový systém a v poslední části změnou designu vstřikovaného dílu, kde se jedná o změnu tloušťky stěny. Tyto změny, jelikož jsou jak výrobně, tak i cenově náročné jsou doplněny pouze simulacemi vstřikování v programu CADMOULD.

Na závěr tohoto bloku jsem vyhodnotil přínosy a rizika jednotlivých úprav jak procesních tak technologických.

## 5.1 Základní vlastnosti materiálů Ultradur S 4090G6 a Ultradur S 4090G6 High speed

Tyto materiály patří do skupiny PBT (Polybutylenterephtalat) jejich přesné označení je PBT+ASA-GF30. Po dekódování tohoto označení zjistíme, že jde o slitinu PBT (Polybutylenterephtalat) a ASA (Acrylnitrilstyrolacrylester) plus 30% skleněných vláken. Tímto složením se řadí do skupiny konstrukčních materiálů pro výrobu velmi přesných technických dílů, pro které jsou rozměrové stability velmi důležité (např. pouzdra, zásuvkové konektory). Polymer je stabilní při teplotách do 280°C a nevede k ohrožení kvůli molekulární degradaci nebo vývoje plynů a par. Podobně jako všechny termoplastické polymery i Ultradur při působení tepelného namáhání podléhá degradaci a dochází k pálení a plynného rozkladu produktu. Rozklad urychluje teplota nad 350°C a dochází k tvoření nasycených aldehydů a nenasycených uhlovodíků. Při správném zpracování nehrozí žádná zdravotní rizika. Při zpracování jako je vstřikování by obsah vlhkosti v granulátu neměl překročit 0,04%.

Procesní parametry	Jednotky	Ultradur S4090 G6 HS	Ultradur S4090 G6
Index toku taveniny	cm <sup>3</sup> /10min	25	20
Hustota pevné látky	kg/cm <sup>3</sup>	1475	1470
Teplota sušení	°C	80-120	80-120
Doba sušení	Hod.	4	4
Max. obsah vlhkosti	%	0,04	0,04
Rozsah teploty taveniny	°C	250 – 270	250 – 270
Teplota formy(optimal)	°C	80	80
Rozsah teploty formy	°C	60 – 100	60 – 100
Teplota taveniny (optimal)	°C	270	270
Rozsah teploty taveniny	°C	250 – 270	250 – 270
Rychlost pohybu šneku	m/s	≤0,25	≤0,25
Podélné/příčné smrštění	%	0,17 / 0,71	0,1 / 0,75

Tabulka 4. Základní procesní parametry

## 5.2 Měření indexu toku taveniny

Index toku taveniny udává množství taveniny v gramech (MFR) nebo  $\text{cm}^3$  (MVR), které proteče tryškou vytlačovacího plastometru za deset minut při definovaných podmínkách zkoušky (teplotě  $t = 280^\circ\text{C}$  a zatížení  $F = 21,6 \text{ N}$ ).



Obrázek 21. Meltflow tester

### **Postup zkoušky:**

Před zahájením zkoušky se válec vyhřál na zvolenou teplotu, na které se ponechal cca 15 min. Následně se válec vyplnil daným materiálem, během čehož byl ručně stlačován pýchovací tyčkou ne déle než 1 minutu (vznik oxidace). Píst byl následně spuštěn do válce, a probíhalo předehtívání. Po čase, za kterým se teplota vrátí zpět na zvolenou hodnotu, se na píst umístí zvolené závaží. V našem případě se zatížení pístu rovnalo hodnotě 2,16 kg. Píst se nechal dále volně klesat. V místě, kdy spodní referenční značka pístu dosáhla horní hranice válce se aktivovali stopky a měří se poté vždy doba, za kterou se odřízla struna řezným nástrojem. Odřezávání se zastavilo, když horní referenční značka pístu dosáhla horní plochy válce. Po ochlazení se odřezky zvážily a vypočetla se průměrná hodnota hmotnosti odřezků.

## 5.2.1 Naměřené hodnoty

Ultradur S 4090 G6

Hmotnosti vytlačených odřezků				Průměrná hmotnost odřezku[g]
Číslo od- řezků	m [g]	m [g]	m [g]	
1	0,25	0,252	0,251	
2	0,252	0,249	0,251	
3	0,254	0,257	0,255	
4	0,256	0,254	0,256	
5	0,254	0,249	0,253	
6	0,255	0,251	0,252	
7	0,252	0,252	0,248	
8	0,257	0,252	0,254	
X	0,254	0,252	0,253	0,253

Tabulka 5. Naměřené hodnoty ITT

**Hmotnostní index toku taveniny (MFR) [g/10min] je dán rovnicí:**

$$MFR_{(T, m_{nom})} = \frac{t_{ref} \cdot m}{t} = \frac{600 \cdot 0,253}{5} = \underline{\underline{30,36}} \text{ g/10min}$$

kde je: T...zkušební teplota taveniny [280°C]

$m_{nom}$ ...nominální zatížení [2,16kg]

m...průměrná hmotnost odřezků [g]

$t_{ref}$ ...referenční čas [s] (10min=600s)

t...interval odřezávání [s]

**Ultradur S 4090 G6 High speed**

Hmotnosti vytlačených odřezků				Průměrná hmotnost odřezku [g]
Číslo od- řezků	m [g]	m [g]	m [g]	
1	0,301	0,302	0,301	
2	0,306	0,301	0,303	
3	0,301	0,304	0,305	
4	0,307	0,306	0,307	
5	0,305	0,307	0,305	
6	0,306	0,302	0,307	
7	0,303	0,306	0,303	
8	0,304	0,303	0,302	
X	0,304	0,304	0,304	<b>0,304</b>

Tabulka 6. Naměřené hodnoty ITT

**Hmotnostní index toku taveniny (MFR) [g/10min] je dán rovnicí:**

$$MFR_{(T, m_{nom})} = \frac{t_{ref} \cdot m}{t} = \frac{600 \cdot 0,304}{5} = \underline{\underline{36,48}} \text{ g/10min}$$

kde je: T...zkušební teplota taveniny [280°C]

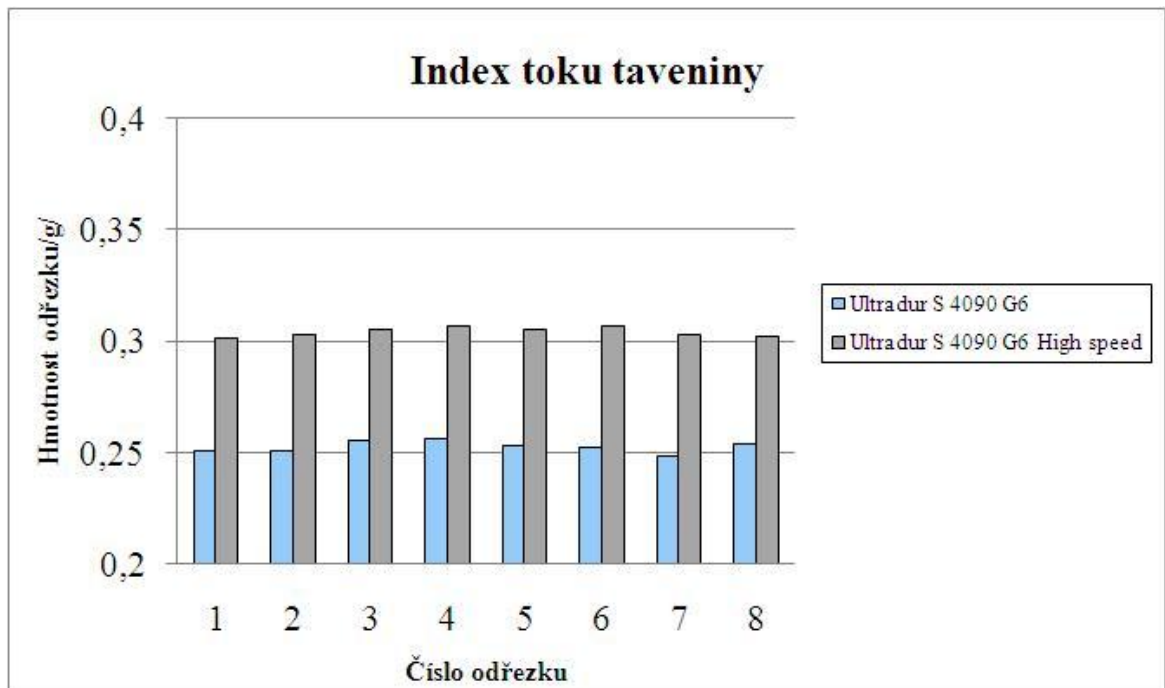
$m_{nom}$ ...nominální zatížení [2,16kg]

m...průměrná hmotnost odřezků [g]

$t_{ref}$ ...referenční čas [s] (10min=600s)

t...interval odřezávání [s]

## Porovnání naměřených hmotností odřezků:

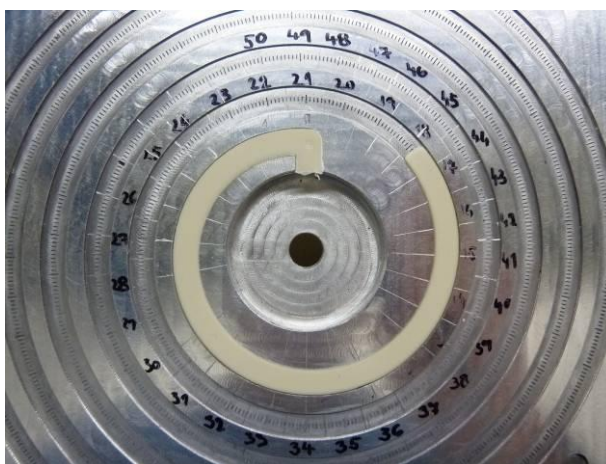


Graf 2. Grafické srovnání hmotností vytlačených odřezků

Úkolem bylo zjistit indexy toku taveniny a porovnat je mezi sebou. Nejdříve je třeba podotknout, že měření proběhlo v pořádku, protože rozdíl mezi maximální a minimální hmotností odřezků nebyl větší jak 15%, tudíž nebylo nutné měření opakovat. Pro Ultradur S 4090 G6 jsem naměřil hmotnostní index toku taveniny 30,36g/10min a u Ultraduru S4090 G6 High speed byla hodnota 36,48 g/10min.

### 5.3 Zkouška zatékavosti polymerního materiálu

Zkouška probíhala na univerzálním vstřikovacím stroji značky ARBURG, na kterém jsme vstřikovali do dutiny formy tvaru Archimédovy spirály polymerní teveninu. V první fázi jsme optimalizovali celý vstřikovací cyklus včetně pohybů uzavírací jednotky, správného nastavení ochrany formy, uzavírací síly, dále optimalizace vstřikovacího tlaku a času, dotlaku a jeho času, optimální zdvih dávky, zpětný tlak při dávkování a otáčky šneku a nakonec doby chlazení. Forma se skládala z výměnných desek, které byly různého tvaru dutin. My jsme instalovali desku s dutinou tvaru Archimédovi spirály. Zpojili temperační okruhy vstřikovací formy na term značky REGLOPLAST. Dalším krokem bylo nastavení tunelového vtoku, který odpovídal kuželovému tvaru. Následně jsme vstřikovali spirály dle nastavených procesních parametrů. Každý výrobní cyklus byl zakončen odběrem spirály z pohyblivé strany vstřikovací formy. Následovalo uzavření ochranné zábrany a spuštění opět do automatického cyklu. Po vyjmutí jsem spirálu vložil do měřicí desky s tvarem Archimédovi spirály s odměřovací stupnicí, ze které byly odečteny a zaznamenány hodnoty. Naměřené hodnoty byly zpracovávány a vyhodnoceny pomocí grafu, ze kterých je zřejmé jak se mění délka spirály při změně parametru a jaké jsou rozdíly mezi těmito materiály, které se výrazně liší indexem toku taveniny. Tato zkouška zatékavosti se skládala z 5 testů pro každý materiál. V každém testu byl změněn jeden procesní parametr. Měněné procesní parametry byly vybrány za účelem snížení vstřikovacího tlaku a síly působící na jádra tvárníku v dutině vstřikovací formy. Měněné procesní parametry byly *teplota na válci vstřikovací jednotky (teplota taveniny), teplota vstřikovací formy a doba setrvání polymeru ve vstřikovací jednotce.*



Obrázek 22. Měřicí deska se stupnicí

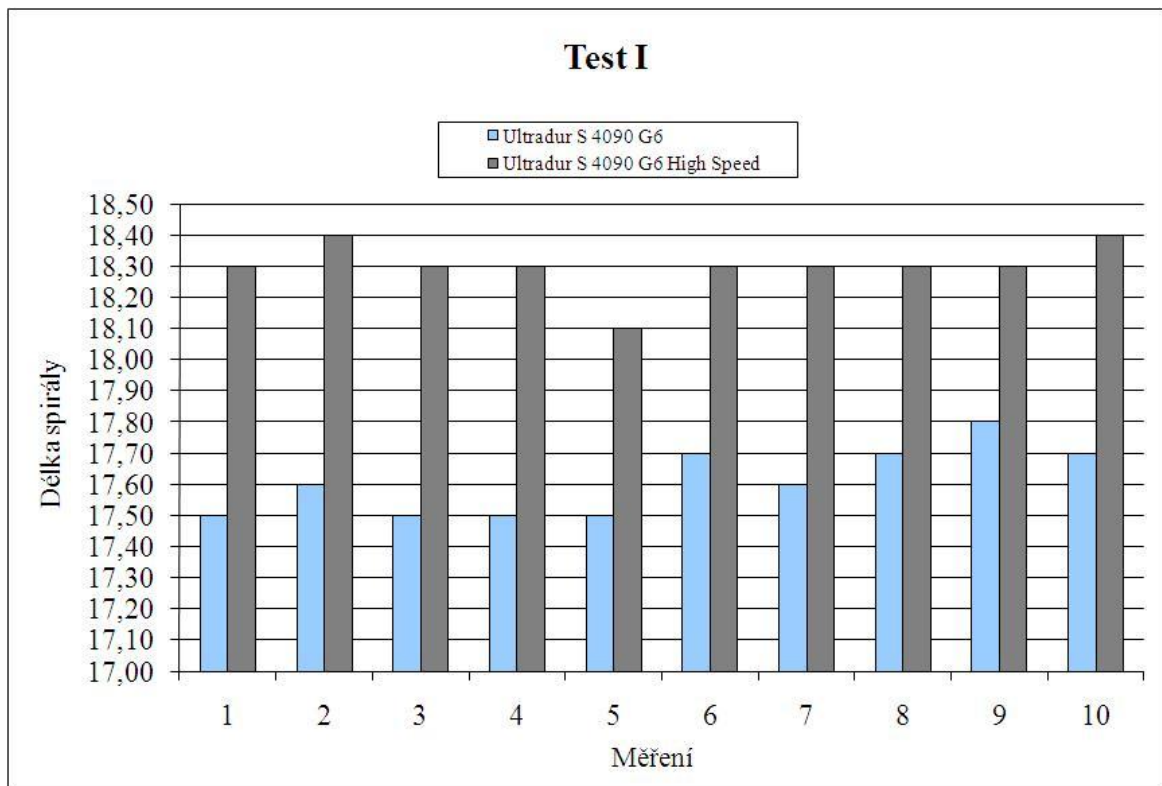


### 5.3.1 Test I

Procesní parametry byly nastaveny na spodních hodnotách procesních parametrů doporučených výrobcem. Teplota vstřikovací formy odpovídá hodnotě nastavené na problémové formě, u které dochází při vstřikování tvoření vysokého vstřikovacího tlaku a zejména vysoké síly, která působí na jádra dutiny formy. Průměrná hodnota délky spirály byla pro Ultradur S 4090 G6 High speed 18,3 a pro Ultradu S 4090 G6 17,6.

Topná pásma na vstřikovací jednotce							
Procesní parametr	Jednotky	Tryska	4	3	2	1	Vstupní pásmo
Teplota na válci	°C	260	260	255	250	240	60
Teplota vstřikovací formy	°C	20	Doba chlazení			sec.	10

Tabulka 7. Procesní parametry testu č.1



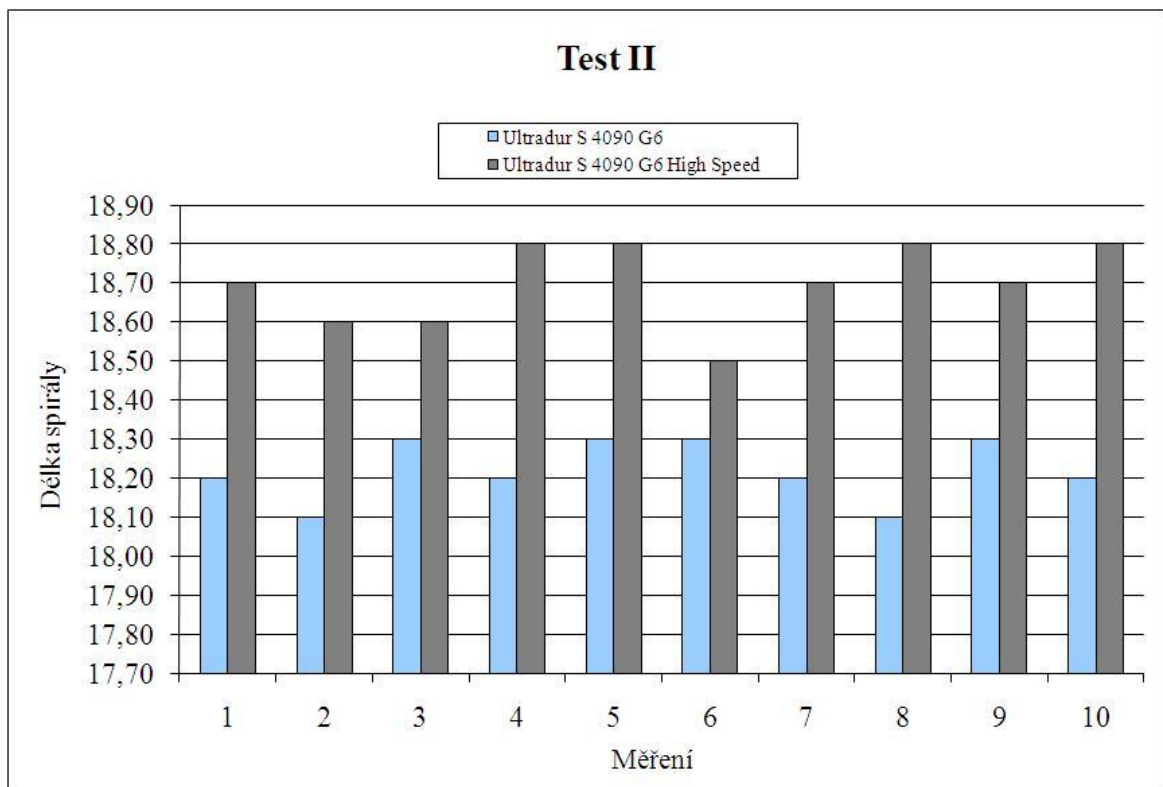
Graf 3. Výsledky měření testu I.

### 5.3.2 Test II

U tohoto testu jsme zvýšily teplotu na temperačním zařízení na 60°C. Teploty na válci vstříkovací jednotky zůstaly stejné, stejně tak i zbytková doba chlazení. Z grafu lze vidět mírné změny délky spirály. Spirála je delší než u testu I. Průměrná hodnota délky spirály byla pro Ultradur S 4090 G6 High speed 18,7 a pro Ultradu S 4090 G6 18,2.

Topná pásma na vstříkovací jednotce							
Procesní parametr	Jednotky	Tryska	4	3	2	1	Vstupní pásmo
Teplota	°C	260	260	255	250	240	60
Teplota vstříkovací formy	°C	60	Doba chlazení		sec.	10	

Tabulka 8. Zkoumané procesní parametry testu č.II



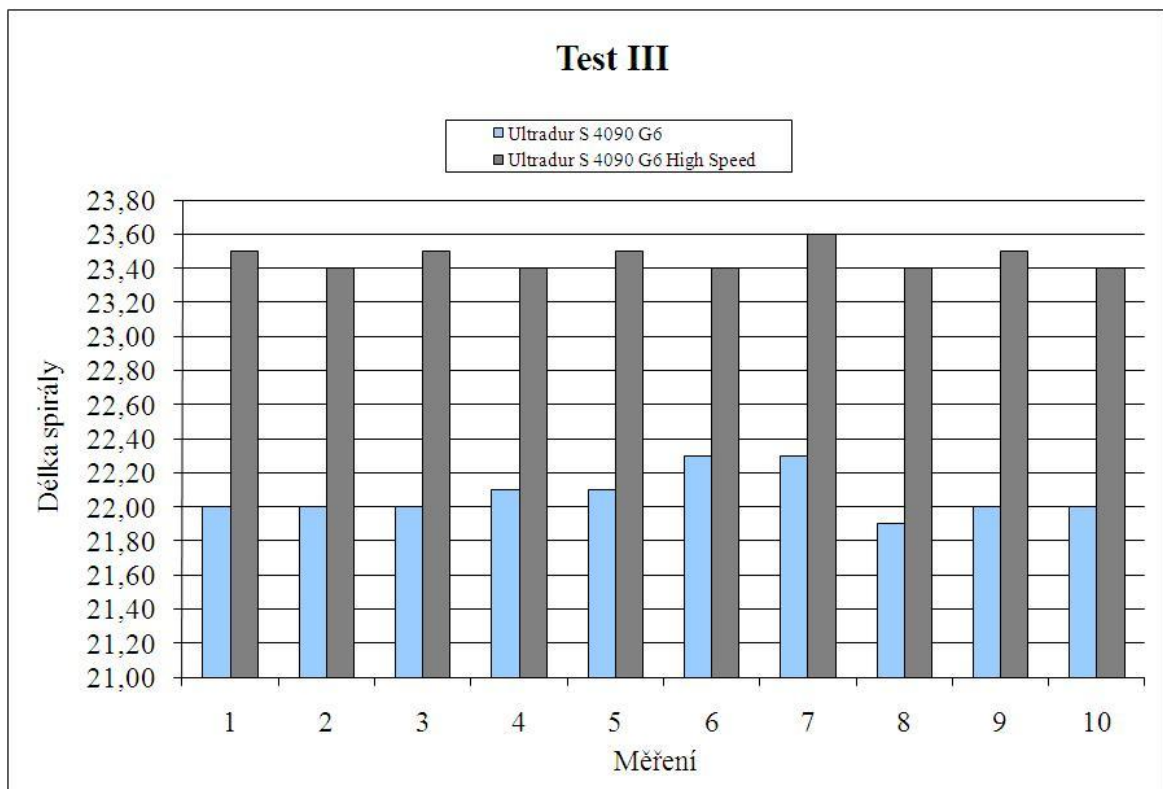
Graf 4. Výsledky měření testu II.

### 5.3.3 Test III

Tento test prošel změnou teplot na válci vstřikovací jednotky a snížením teploty na temperačním zařízení z 60°C na 20°C. Opět byla zjištěna změna délky spirály a její posunutí k vyšším hodnotám. Průměrná hodnota délky spirály byla pro Ultradur S 4090 G6 High speed 23,5 a pro Ultradu S 4090 G6 22,1.

Topná pásma na vstřikovací jednotce							
Procesní parametr	Jednotky	Tryska	4	3	2	1	Vstupní pásmo
Teplota	°C	280	280	275	270	265	60
Teplota vstřikovací formy	°C	20	Doba chlazení		sec.	10	

Tabulka 9. Procesní parametry testu č.III



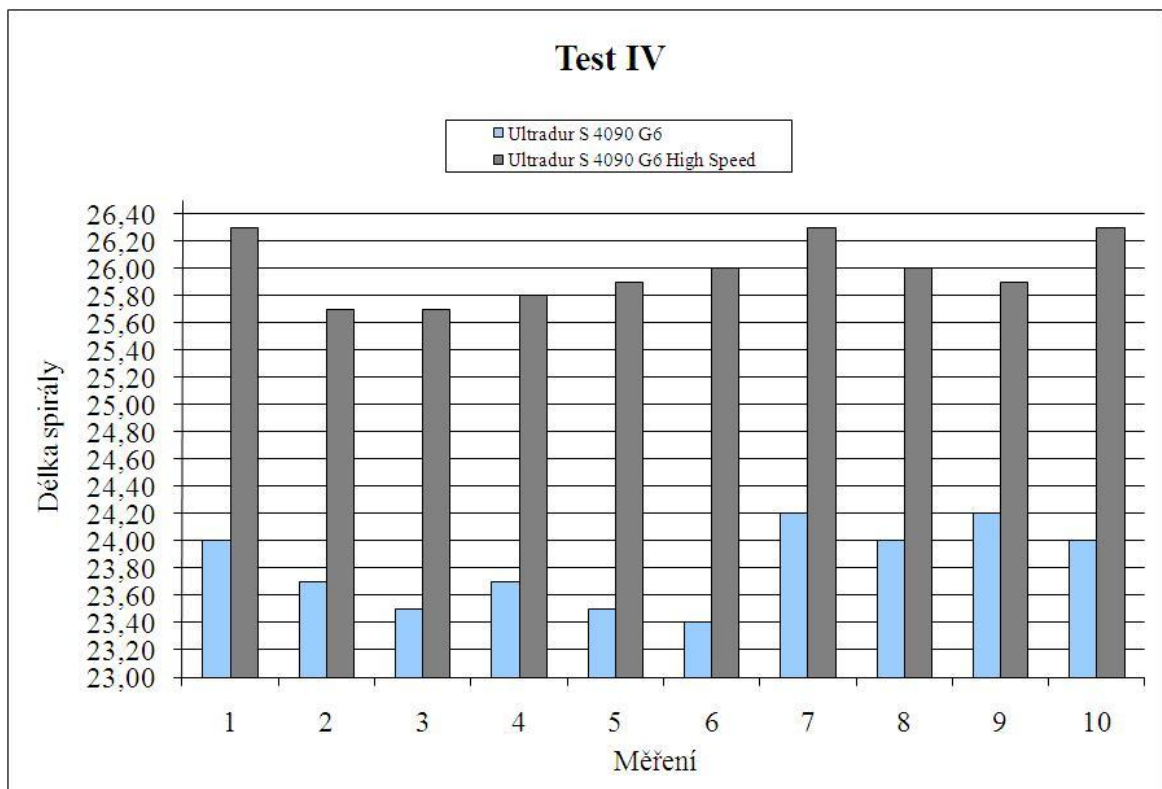
Graf 5. Výsledky měření testu III.

### 5.3.4 Test IV

V testu IV proběhla změna nastavení teploty na temperačním zařízení z 20°C na 60°C. Ostatní procesní parametry jsou stejné jako v předchozím testu III. Průměrná hodnota délky spirály byla pro Ultradur S 4090 G6 High speed 26,0 a pro Ultradu S 4090 G6 23,8.

Topná pásma na vstříkovací jednotce							
Procesní parametr	Jednotky	Tryska	4	3	2	1	Vstupní pásmo
Teplota	°C	280	280	275	270	265	60
Teplota vstříkovací formy	°C	60	Doba chlazení		sec.	10	

Tabulka 10. Procesní parametry testu č.IV



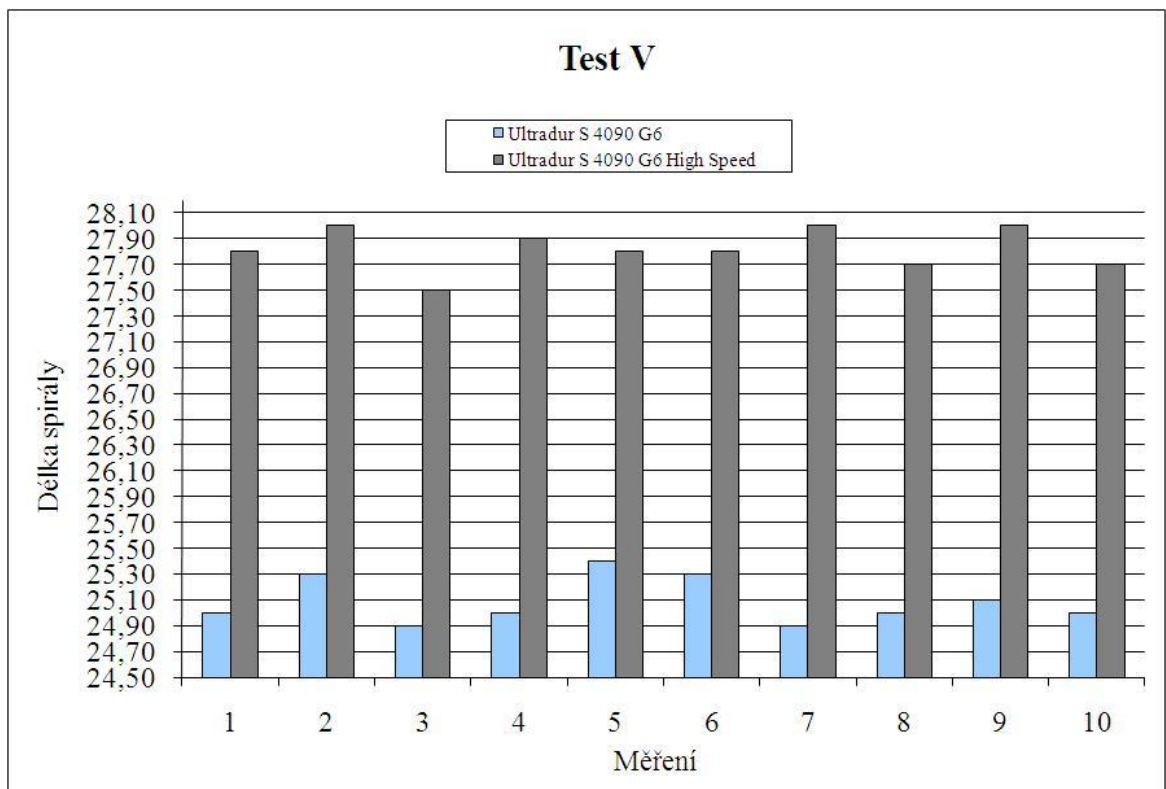
Graf 6. Výsledky měření testu IV.

### 5.3.5 Test V

Změna v tomto testu bylo zvýšení zbytkové doby chlazení za účelem zvýšení doby setrvání polymeru ve vstřikovací jednotce. Cílem bylo docílit ještě vyšší zatékavosti polymerního materiálu. Průměrná hodnota délky spirály byla pro Ultradur S 4090 G6 High speed 27,8 a pro Ultradu S 4090 G6 25,1.

Topná pásma na vstřikovací jednotce							
Procesní parametr	Jednotky	Tryska	4	3	2	1	Vstupní pásmo
Teplota	°C	280	280	275	270	265	60
Teplota vstřikovací formy	°C	60	Doba chlazení		sec.	15	

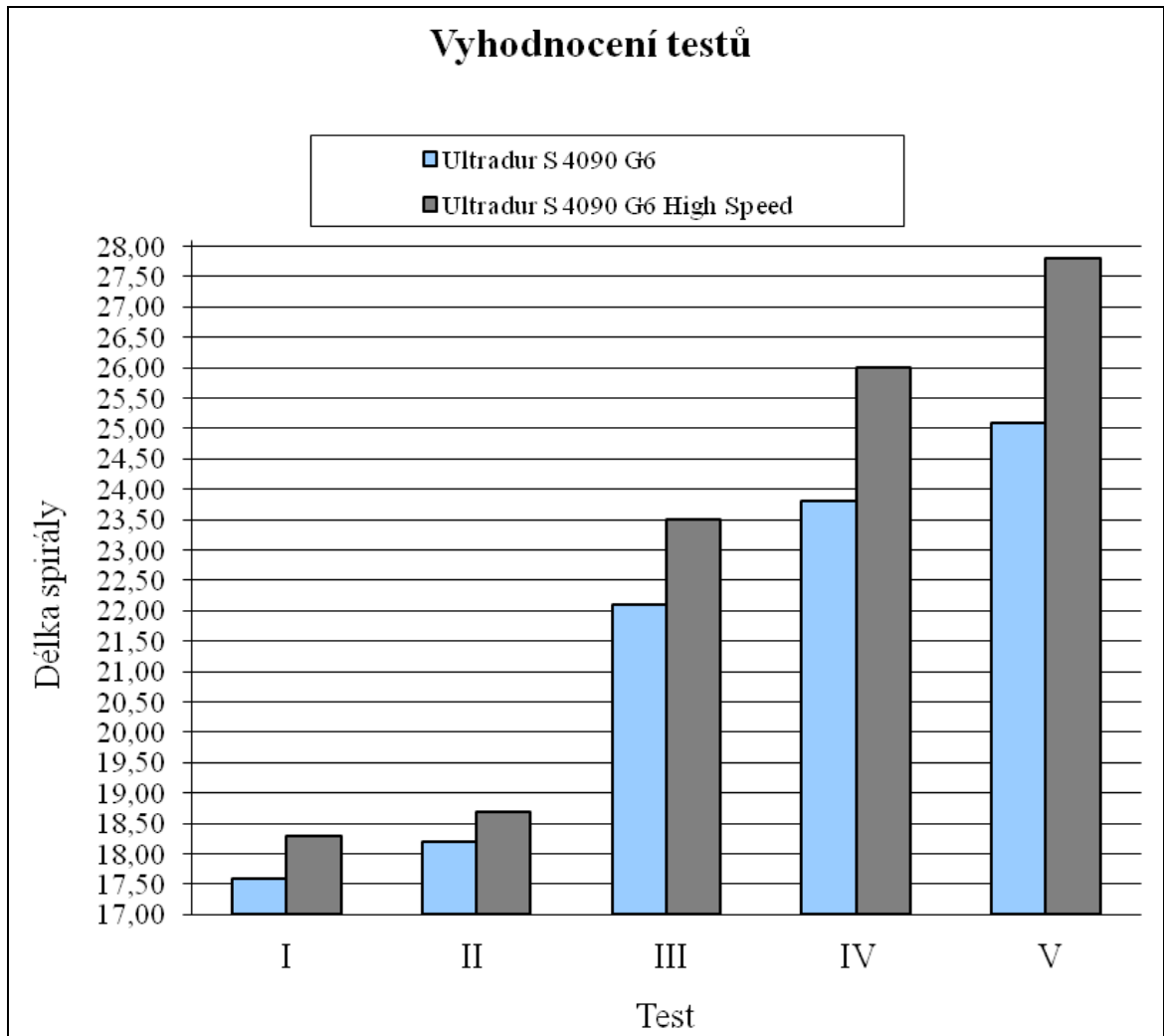
Tabulka 11. Zkoumané procesní parametry testu č.IV



Graf 7. Výsledky měření testu V.

### 5.3.6 Porovnání výsledků zkoušky zatékavosti polymerní taveniny

V této části jsem porovnal průměrné hodnoty z každého testu pro oba zkoumané materiály, aby bylo zřetelné, která kombinace parametrů měla nevyšší vliv na zatékavost polymerní taveniny. Nejdelší spirála byla u testu V.



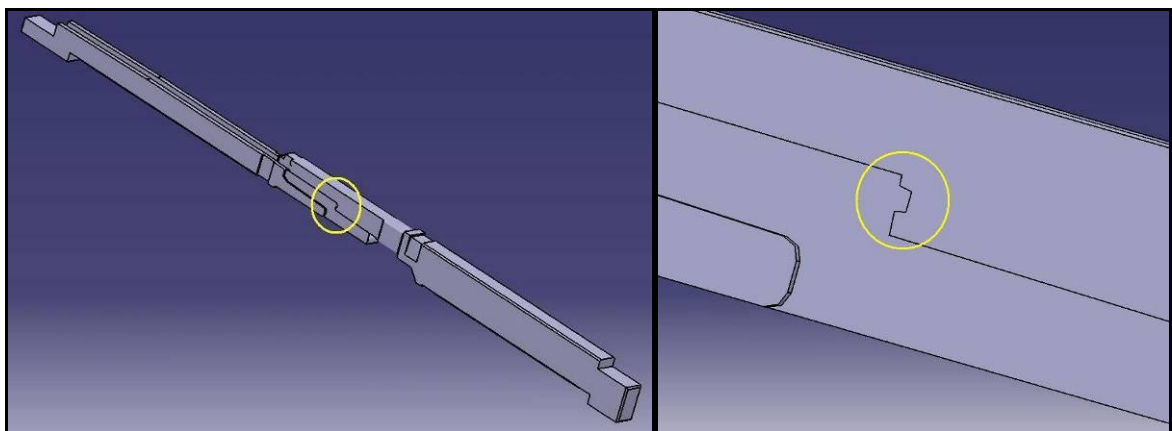
Graf 8. Porovnání výsledků měření.

## 6 APLIKACE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ DO PRAXE-VYUŽITÍ PŘI OPTIMALIZACI VÝROBY VSTŘIKOVANÉHO DÍLU

Na základě znalostí z předchozích měření reologických vlastností materiálů Ultradu S4090 G6 a Ultradur S4090 G6 High speed jsem přistoupil k aplikaci těchto poznatků do optimalizace sériové výroby vstřikovaného polymerního dílce. Jedná se konektor se 60 kavítami určené pro montáž terminálu. Díl je tvořen tenkými stěnami, tudíž dochází k rychlému tuhnutí čela vstřikované taveniny a výsledkem jsou nedostříknuté díly. Zároveň při nochlazování čela taveniny dochází ke zvyšování viskozity polymerní taveniny a tento jev se projevuje vznikem vysokých sil působící na tenká jádra formy, která následně praskají a dochází k zalití západky, která zajišťuje terminál proti vypadnutí. Pokud se jádro nebo zámek ulomí, západka se stává nefunkční.

Proto v prvním případě využiji maximum z procesních parametrů, které díky poznatkům z předchozích testů aplikujeme na vstřikovací lis, kde vyrábíme problémový plastový díl. Tato aplikace bude doprovázena analýzou procesu vstřikování a pak i skutečnými údaji.

Dalším krokem jsou návrhy designových úprav jak vtokového kužele, tak vtokových rozvodů přes vtokové ústí až k úpravě designu vstřikovaného dílce. Vzhledem k tomu, že se jedná o velmi drahé a časově náročné kroky, je tato část doprovázena pouze analýzami v programu CADMOULD.



Obrázek 23. Zámek jádra, který nejvíce praská. Vpravo je detail na zámek .

## 6.1 Současný stav

### 6.1.1 Vstříkovací stroj

Problémový díl se vstříkuje do čtyřnásobné formy na vstříkovacím stroji Arburg série Golden edition s označením 420C - 1000 - 290 rok výroby 2010. Stroj je osazen manipulátorem Wittmann a gravimetrickým dávkovačem materiálu. Doprava materiálu do stroje je centrální pneumatická. Forma je temperována pomocí dvou temperančních zařízení od firmy HB-Term.

Vstříkovací jednotka		
Průměr šneku	mm	30
Délka šneku	L/D	23,3
Maximální objem zdvihu	cm <sup>3</sup>	106
Zdvih dávkování	mm	150
Rychlost dávkování	m/min	46
Maximální specifický vstříkovací tlak	bar	2500
Počet topných zón	-	5

Tabulka 12. Základní parametry vstříkovacího stroje – vstříkovací jednotka

Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla	kN	1000
Dráha otevření formy	mm	500
Minimální výška formy	mm	250
Max. otevření upínacích desek	mm	750
Velikost upínacích desek hor. × vert.	mm	420 × 420
Průměr středícího otvoru	mm	125

Tabulka 13. Základní parametry vstříkovacího stroje – uzavírací jednotka





Obrázek 24. Vstřikovací stroj Arburg 420 C 1000-475

### 6.1.2 Analýza průběhu plnění dutiny formy

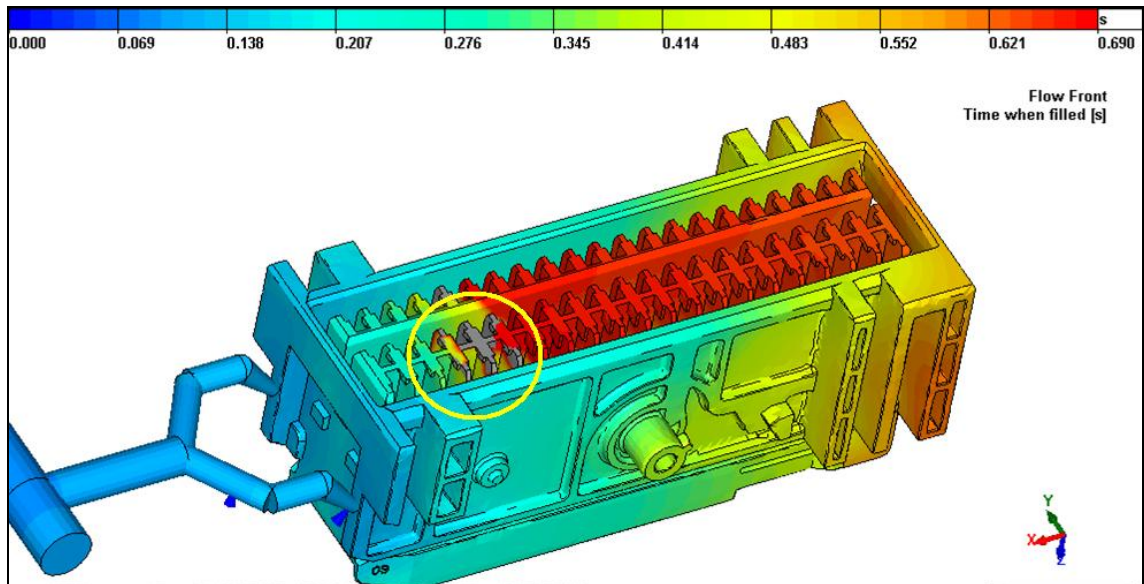
Pro spuštění analýzy je nutné určit procesní parametry podle kterých bude analýza nastavena. Jedná se především o základní procesní parametry. Tyto parametry se shodují s parametry nastavenými na vstřikovacím stroji.

Procesní parametr	Jednotky	Hodnota
Teplota formy	°C	80
Teplota taveniny	°C	275
Vstřikovací rychlost	mm/s	100
Doba vstřikování	sec	0,66
Tlak dotlaku	bar	600
Doba dotlaku	sec	2,3
Zbytková doba chlazení	sec	25

Tabulka 14. Základní procesní parametry pro vytvoření analýzy plnění dutiny formy

### 6.1.2.1 Zobrazení analýzy průběhu vstřikování

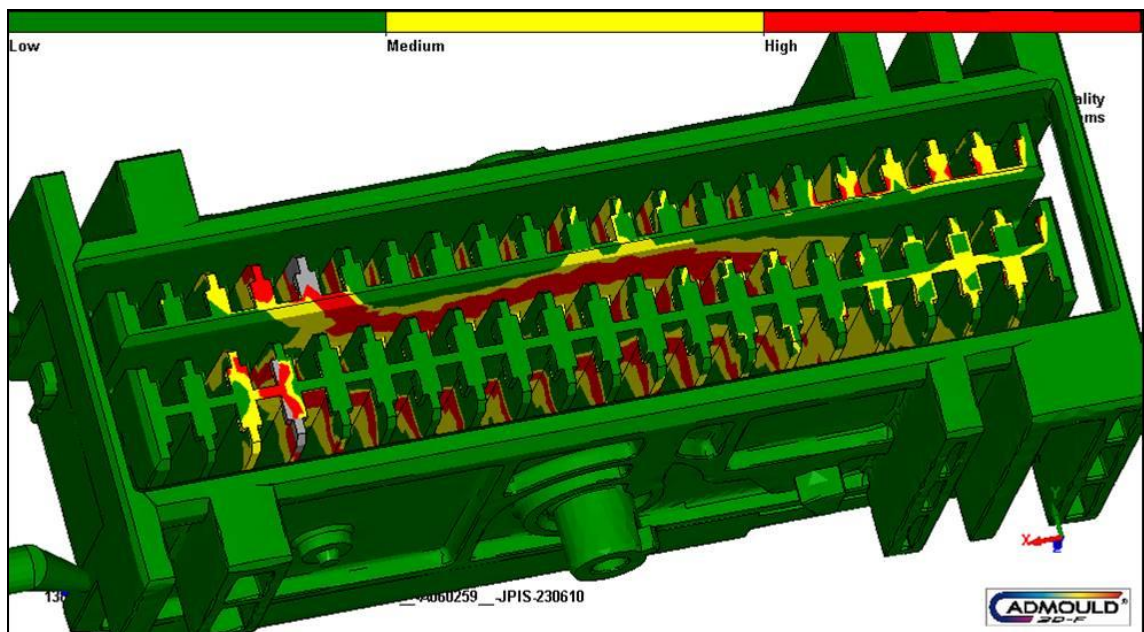
Šedá místa v kroužku zobrazují místa, kde hrozí nedostříknutí dílů a červená barva zobrazuje kritická poslední místa plnění dutiny formy.



Obrázek 25. Průběh plnění dutiny formy

### 6.1.2.2 Zobrazení analýzy po ukončení vstřikování

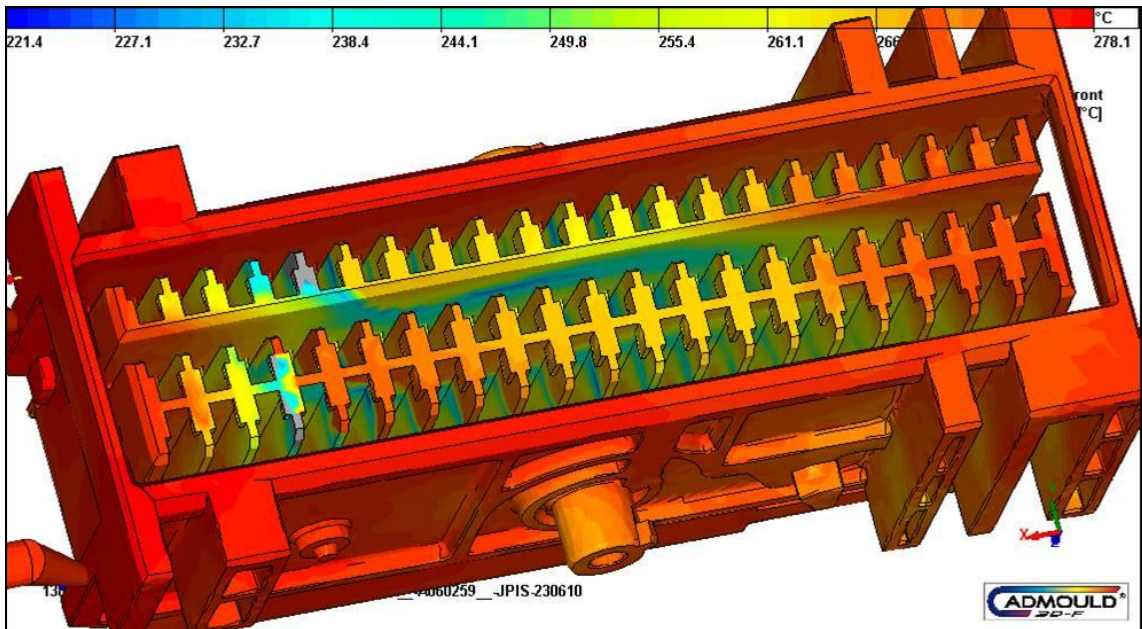
Šedá místa zobrazují, kde nedošlo k dolití dílů a červená barva zobrazuje kritická místa plnění dutiny formy.



Obrázek 26. Zobrazení naplnění dílu po ukončení vstřikování

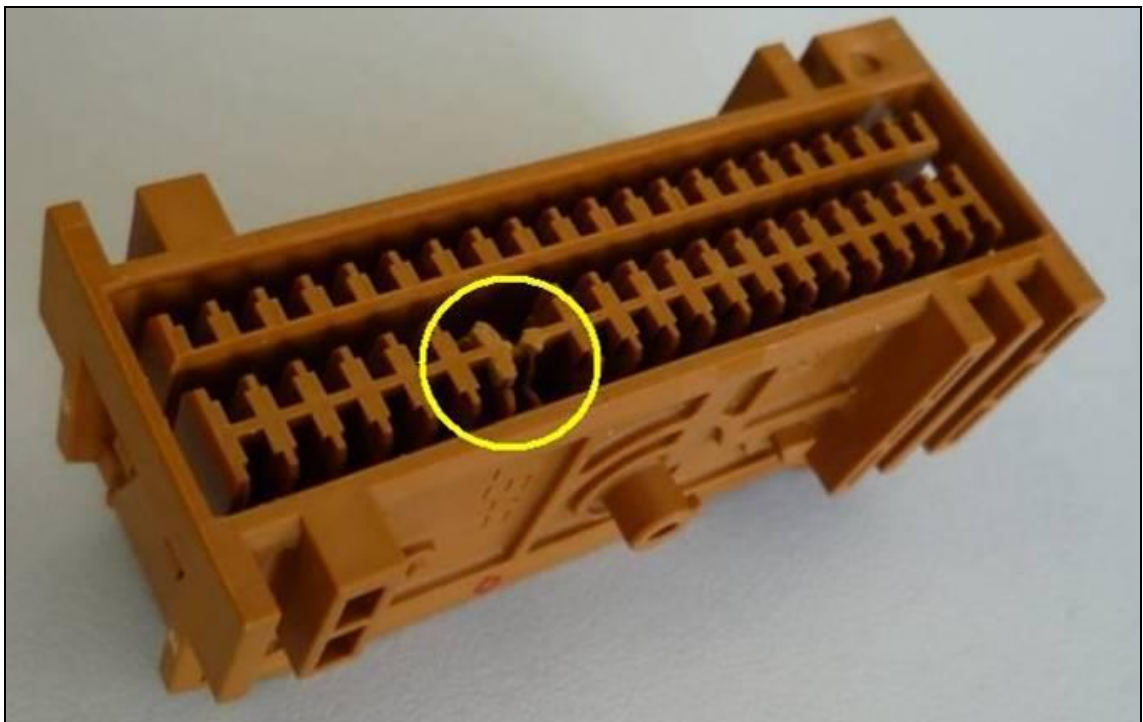
### 6.1.2.3 Zobrazení teploty na čele taveniny

Teplota na čele taveniny je příliš nízká (zobrazují zelené a modré části). Efektivní úprava je zvětšit tloušťky stěn nebo zvýšit teplotu taveniny nebo teplotu formy.



Obrázek 27. Zobrazení teploty na čele taveniny

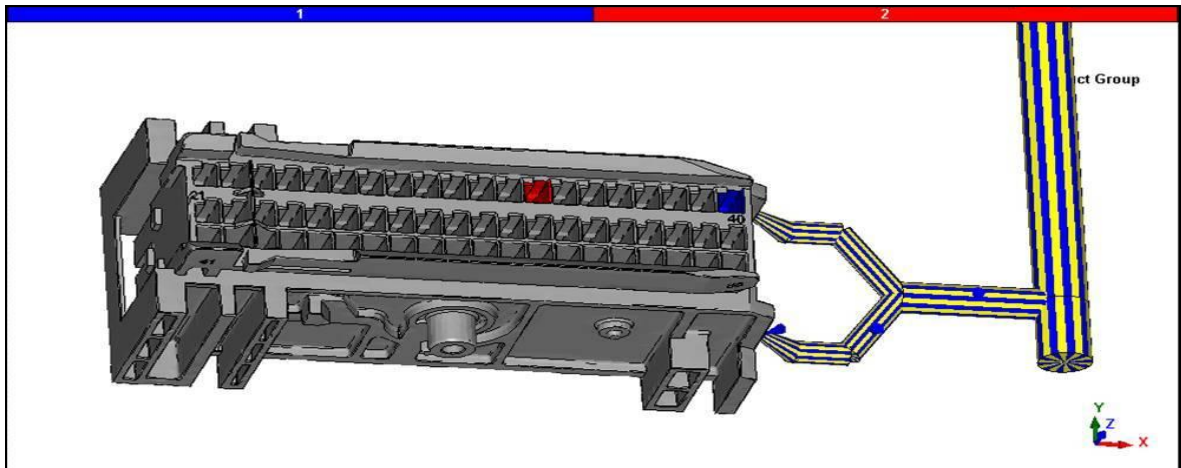
### 6.1.2.4 Skutečný stav – v kroužku je zobrazeno nedolité plastového dílce



Obrázek 28 . Skutečný stav

### 6.1.3 Působení síly na jádra

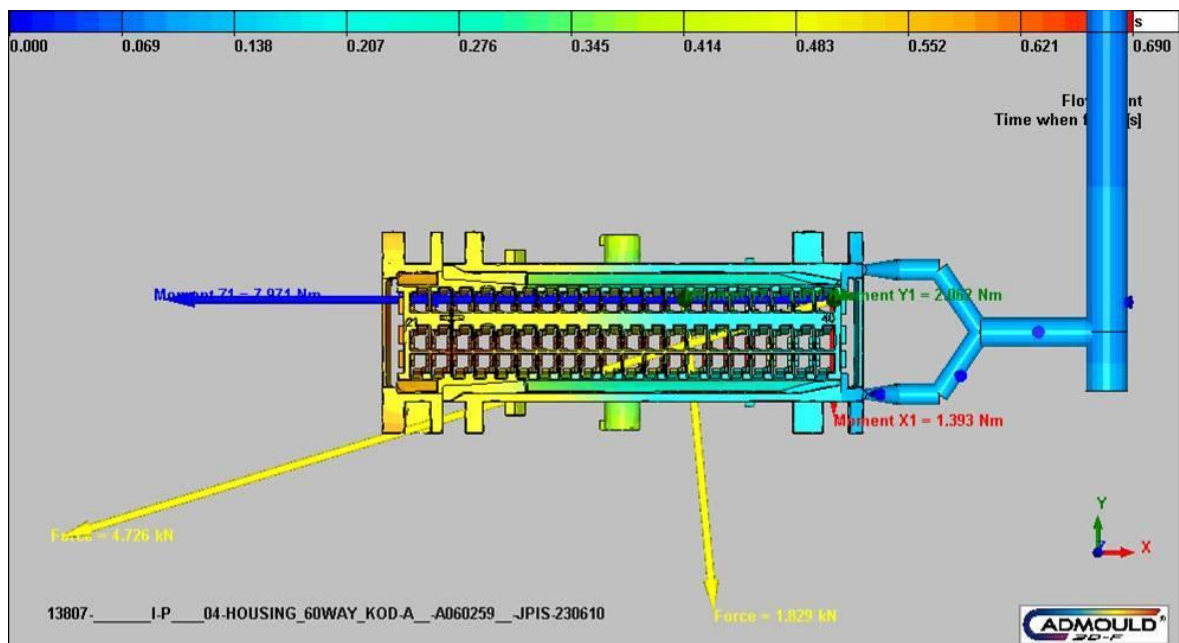
Pro analýzu byly vybrány jádra kavity č.20 (zobrazená modře) a jádra kavity č.13 (zobrazená červeně). Tyto jádra byla vybrána, protože nejčastěji praskají. Dále kavita č. 20 je umístěna přímo u ústí tunelového vtoku, kde je namáhána tlakem polymerní taveniny.



Obrázek 29. Barevné zobrazení zkoumaných jader

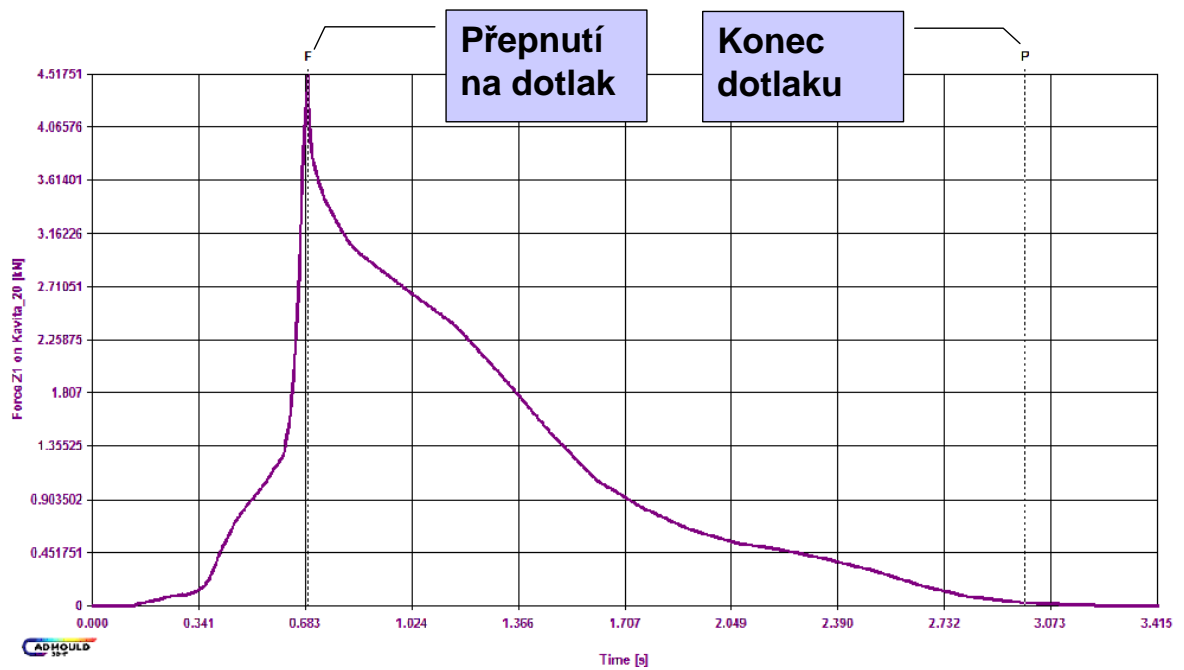
#### 6.1.3.1 Působení síly na jádra- zobrazení směru

Maximální síla a směr (zobrazená žlutě), která působí na jádra (kavita 13 = 1,829 kN a kavita 20 = 4,726 kN) v době, kdy dochází k přepnutí na dotlak.



Obrázek 30. Zobrazení velikosti a směru působení síly

Největší síla 4,517 kN působí na jádra v kavitě 20 v době přepnutí na dotlak (tlaková špička).



Graf 9. Síla působící na jádro při přepnutí na dotlak

## 6.2 Výsledky budoucího stavu po úpravě procesních parametrů a výsledky analýz

### 6.2.1 Přínos změny procesních parametrů

#### Přínos zvýšení teplot na základě analýzy:

##### **Přínos zvýšení teploty taveniny o 10 °C:**

- Snížení vstřikovacího tlaku z 130,3 MPa na **96** MPa
- Snížení síly, která působí na jádra (kav. 20) z 4,726 kN na **3,864** kN
- Snížení síly, která působí na jádra (kav. 13) z 1,829 kN na **1,618** kN
- Zlepšení plnění tenkých stěn (menší riziko nedolití)

##### **Přínos zvýšení teploty formy o 10 °C:**

- Snížení vstřikovacího tlaku z 130,3 MPa na **104,7** MPa
- Snížení síly, která působí na jádra (kav. 20) z 4,726 kN na **4,261** kN
- Snížení síly, která působí na jádra (kav. 13) z 1,829 kN na **1,760** kN
- Zlepšení plnění tenkých stěn (menší riziko nedolití)

#### Přínos zvýšení teplot na základě skutečnosti:

##### **Přínos zvýšení teploty taveniny o 10 °C:**

- Snížení vstřikovacího tlaku z 187,8 MPa na **175,4** MPa

##### **Přínos zvýšení teploty formy o 10 °C:**

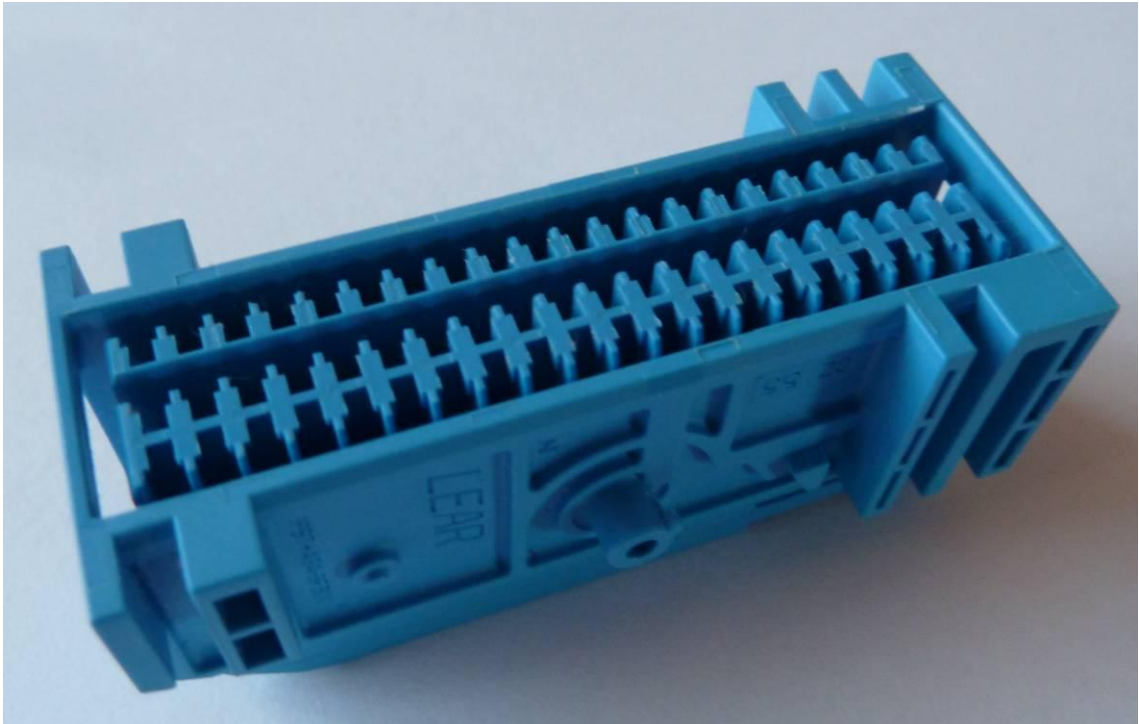
- Snížení vstřikovacího tlaku z 187,8 MPa na **187,0** MPa

##### **Přínos zvýšení teplot:**

- Zvýšením teploty taveniny selepší plnění dutiny formy (zmenší se riziko nedotečených dílů v kritických oblastech).
- Zvýšením teploty taveniny se sníží síla, která působí na jádra.

**Rizika:**

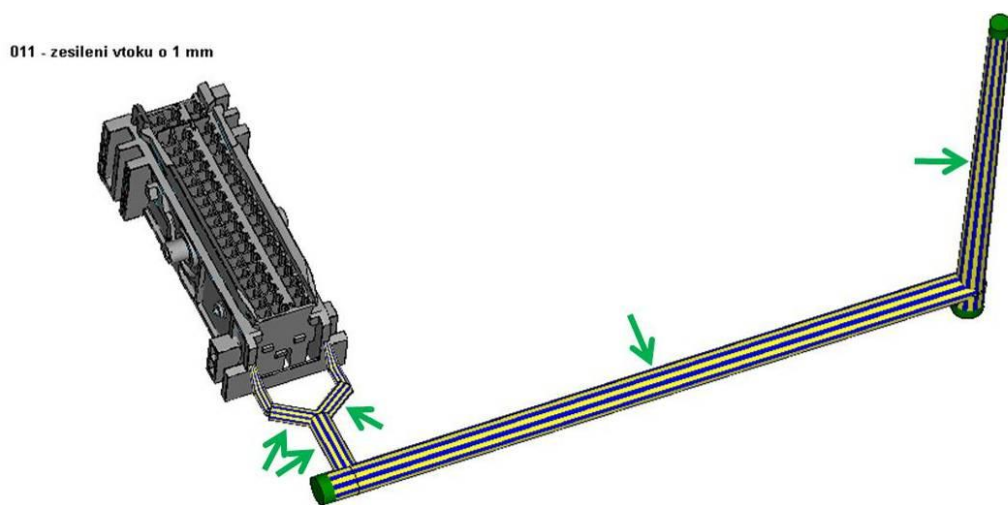
- Praskání západek při zatížení vlivem tepelné degradace materiálu.
- Zatrhávání západek v nástroji vlivem tepelné degradace materiálu nebo špatného dochlazování jader, které tvoří západky.



*Obrázek 31. Díl po optimalizaci procesních parametrů – díl je 100% vstříknutý.*

### 6.2.2 Změna designu vtokového systému na základě analýzy

Vtok je tvořen vtokovým kuželem, hlavním rozvodem, který ústí do vedlejších vtokových rozvodů a následně přes tunelové vtoky do čtyř kavit. Do každé kavity ústí dva tunelové vtoky. Vtokový rozvod má ve všech délkách kruhový průřez. Analýza bude definována pro zvětšený průměr o 1 mm. Tyto průměry jsou označeny zelenými šipkami. Cílem je dostat pokud možno co nejteplejší taveninu do kavit vstříkovací formy, abychom zamezily předčasnému ztuhnutí čela taveniny hlavně v tenkých stěnách plastového dílce.



Obrázek 32. Změna designu vtokového systému

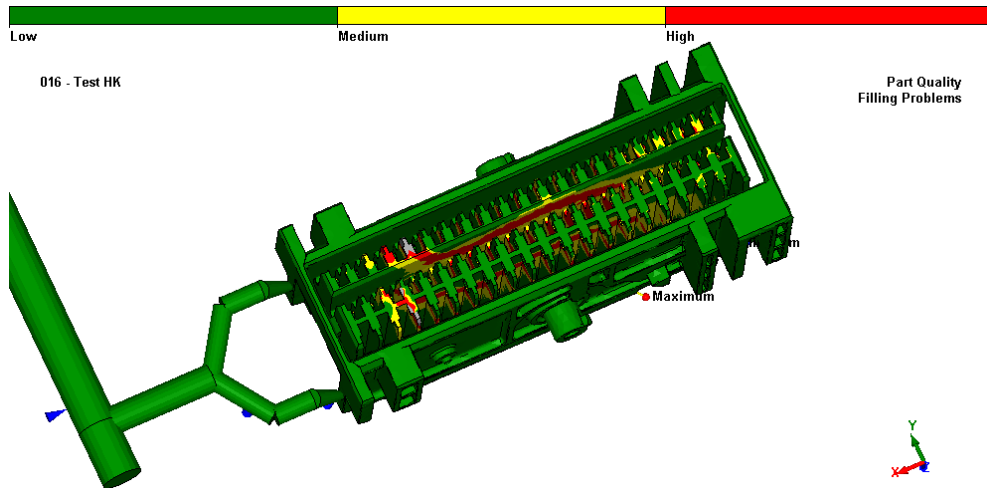
#### Přínos zvětšení průměru vtokového systému na základě analýzy:

- Zvětšením vtoku se sníží vstříkovací tlak z 130,3 MPa na **100,3 MPa**
- Zvětšením vtoku se sníží síla na jádra v kavitě č. 20 z 4,726 kN na **3,852 kN**

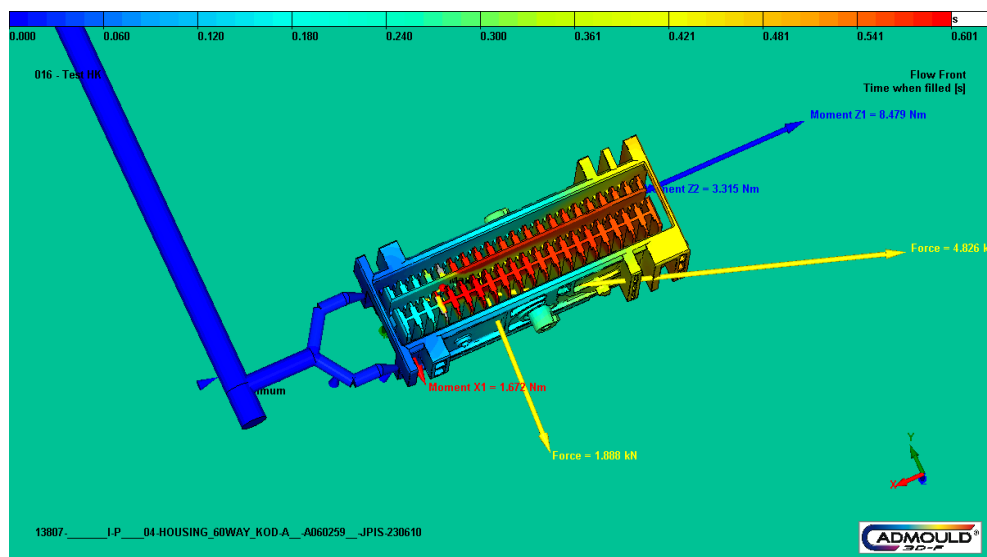


### 6.2.3 Nahrazení studeného vtokového systému za vyhříváný vtokový systém

V tomto bloku jsem provedl analýzu, kdy jsem studenou vtokovou soustavu nahradil vyhřívánou vtokovou soustavou. Cílem bylo oddálit tuhnutí čela taveniny během vstříkování a efektivnější vyplnění kontur tenkých stěn.



Obrázek 33. Zobrazení plastového dílce po úpravě



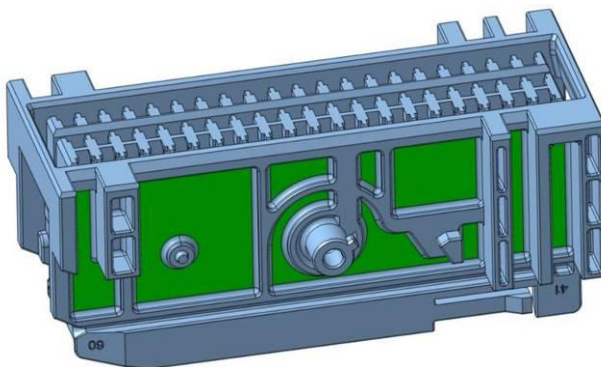
Obrázek 34. Zobrazení působících sil

Nahrazení studeného vtokového systému za vyhříváný vtokový systém na základě analýzy přinese:

- Změnou systému se sníží vstřikovací tlak z 130,3 MPa na **130,3 MPa**
- Změnou systému se sníží síla na jádra v kavitě č. 20 z 4,726 kN na **4,826 kN**

#### 6.2.4 Změna designu vstřikovaného dílce

Tato analýza je založena na zvětšení odlehčení tenkých stěn plastového dílce. Tyto stěny jsou klíčové pro plnění celé dutiny formy. Při vstřikování jsou tyto stěny nastříknuté jako první a polymer odtud dále zatíká do ostatních kontur dutiny formy. Tím že zvětšíme tloušťku stěny, tak při tečení polymer nebude tak rychle chladnout a lépe zateče do dalších kontur dutiny formy. Tloušťka stěn je 0,8 mm.



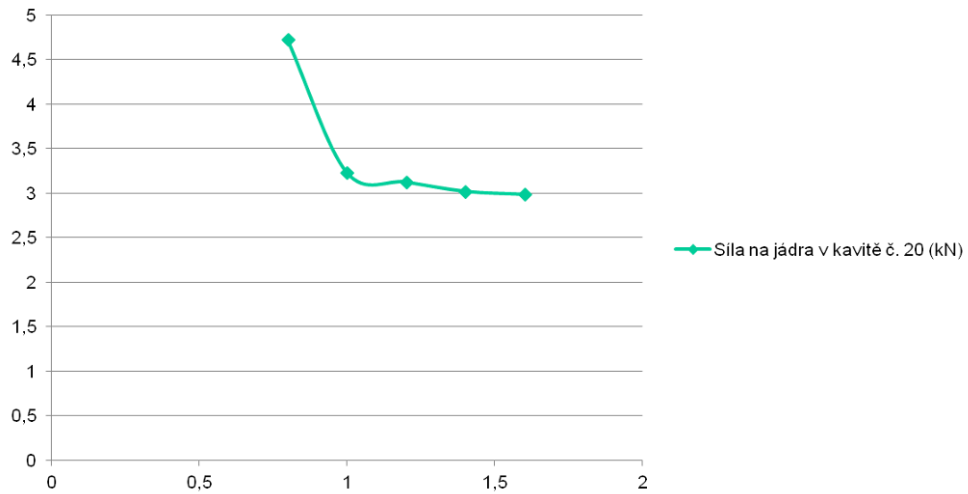
Obrázek 35. Designová změna tloušťky bočních stěn  
plastového dílce

##### 6.2.4.1 Výsledek analýzy pro optimální zesílení odlehčení stěny

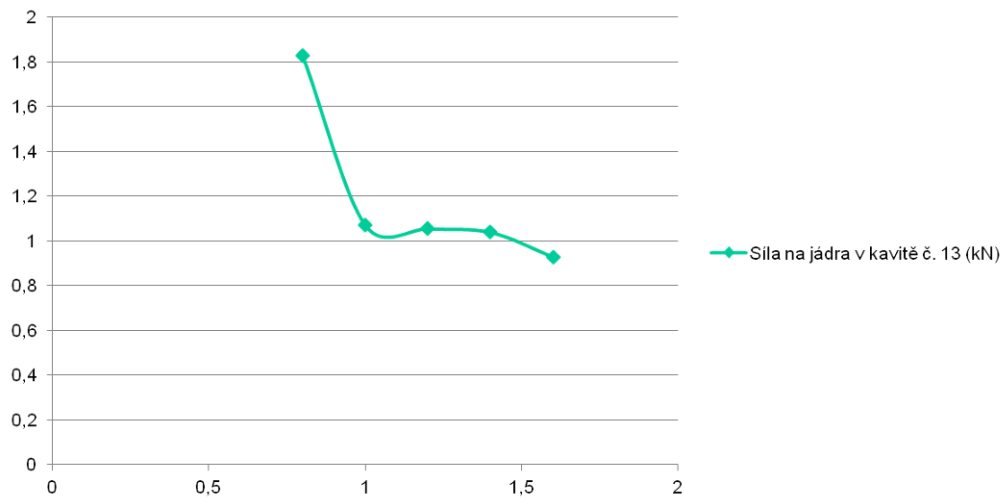
Na základě analýzy je vhodné zvětšit šířku stěny na 1,0 až 1,1 mm. V této šířce stěny je největší pokles sil působící na jádra a také vstřikovací tlaku. U větších tloušťek je pokles minimální. Při zesílení stěn se výrazně sníží síla působící na jádro v kavitě 20 a 13.

Tloušťka stěny [mm]	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Síla na jádra v kavitě č.20 [kN]	4,726	3,232	3,126	3,021	2,987
Síla na jádra v kavitě č.13 [kN]	1,829	1,071	1,055	1,039	0,929
Vstřikovací tlak [MPa]	130,3	101,9	96,4	90,9	88,4

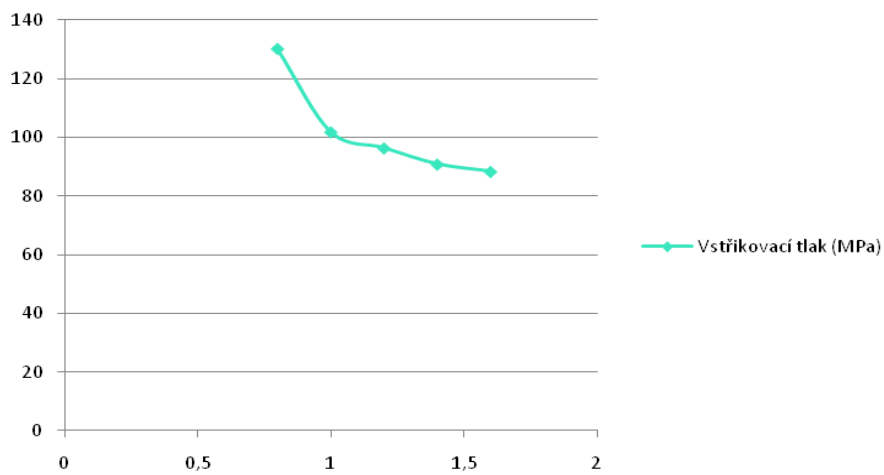
Tabulka 15. Výsledek analýzy pro zesílení stěny



Graf 10. Zobrazení síly působící na jádra v kavitě 20



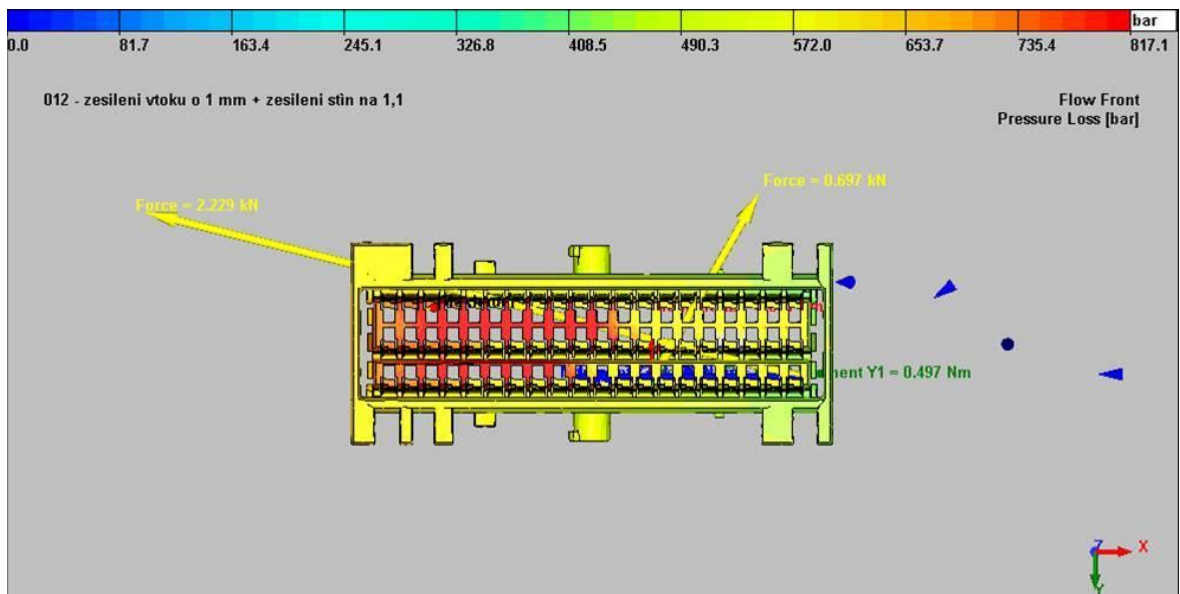
Graf 11. Zobrazení síly působící na jádra v kavitě 13



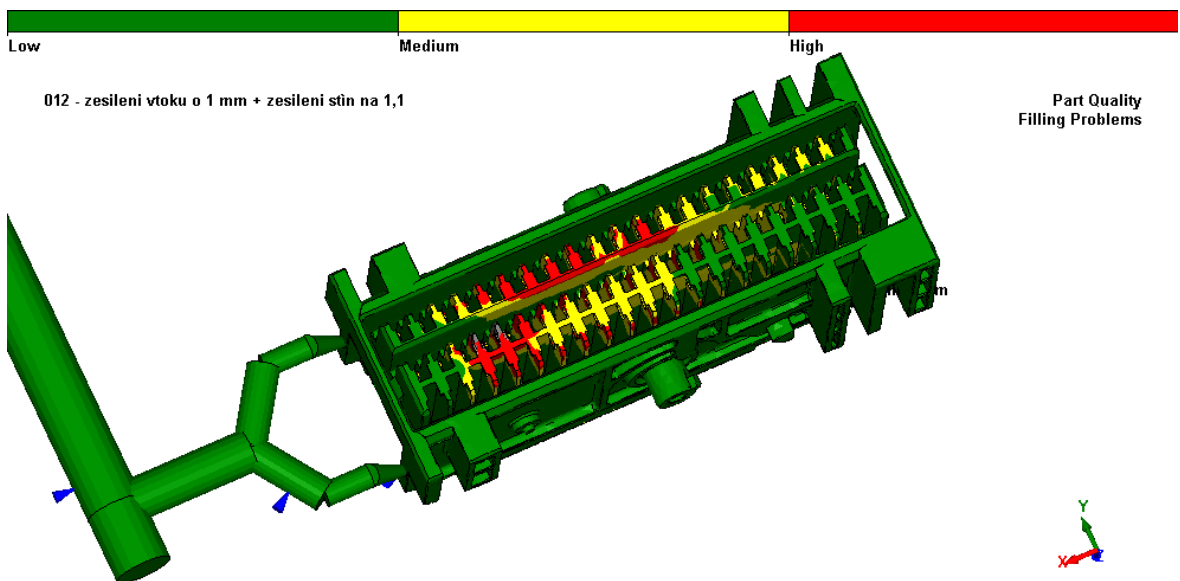
Graf 12. Zobrazení snížení vstřikovacího tlaku

**Kombinace změn - zvětšení vtoku o 1 mm a zesílení bočních odlehčovacích stěn na 1,1mm přinese:**

1. Snížení síly která působí na jádra v kavitě č. 20 z 4,726 kN na **2,229 kN**
2. Snížení síly která působí na jádra v kavitě č. 13 z 1,829 kN na **0,697 kN**
3. Snížení vstřikovacího tlaku z 130,3 MPa na **81,7 MPa**



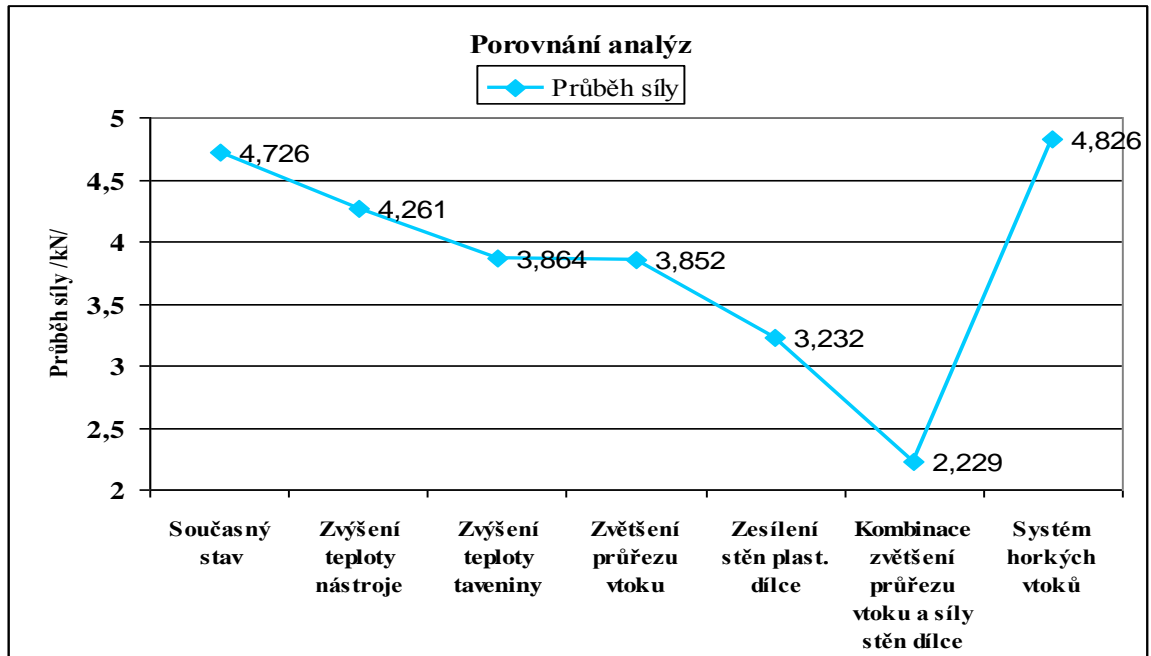
Obrázek 36. Zobrazení analýzy po úpravě průměru vtoku a zesílení tloušťky stěn dílce



Obrázek 37. Zobrazení vstříkovaného dílce po úpravě průměru vtoku a zesílení tloušťky stěn dílce

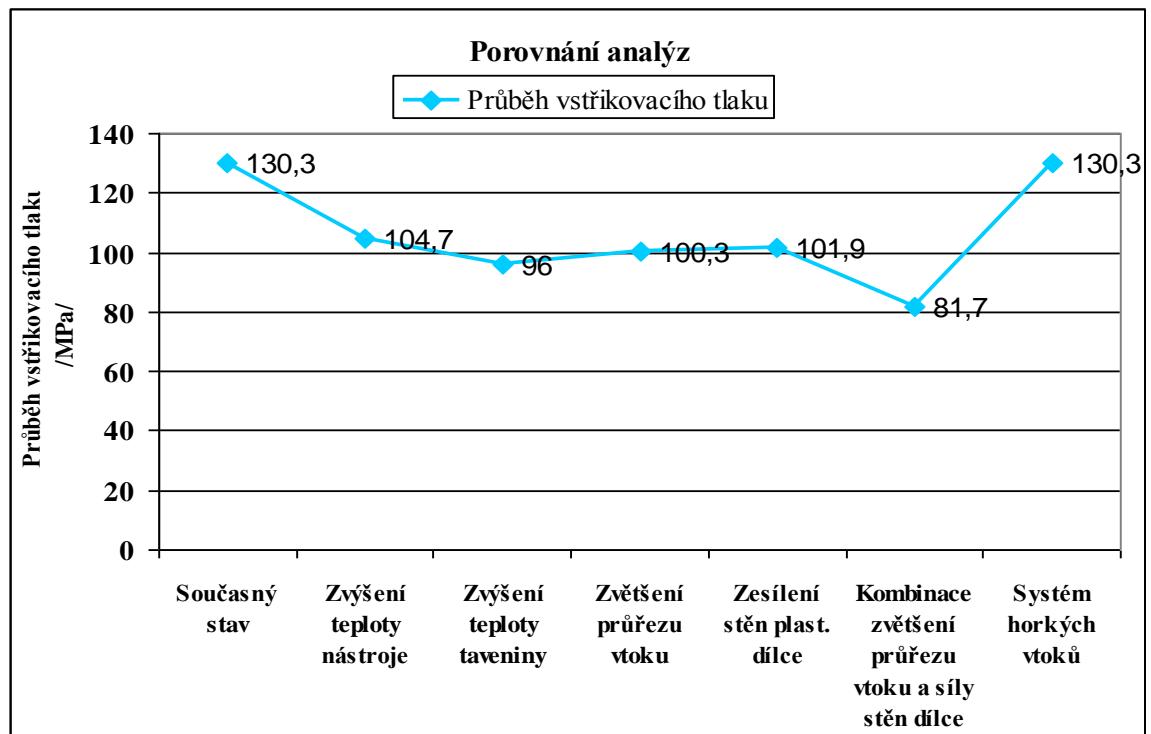
### 6.3 Grafické zobrazení výsledků analýzy

Grafické znázornění průběhu síly působící na jádra v kavitě č.20 při vstřikování:



Graf 13. Síla působící na jádra v kavitě č. 20

Grafické znázornění průběhu vstřikovacího tlaku při vstřikování:



Graf 14. Průběh vstřikovacího tlaku

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo analyzovat procesní parametry, které nejvíce ovlivňují zatékavost polymerního materiálu při procesu vstřikování plastů a následně díky těmto parametrům optimalizovat výrobní proces vstřikovaného plastového dílce.

Reologické zkoušky jsme prováděli na dvou, složením stejných materiálech, ale s odlišným indexem toku taveniny. Při měření ITT jsme ověřovali, zda opravdu mají tyto materiály odlišný index toku taveniny, jak udává výrobce. Ultradur S 4090 G6 High speed měl MFR=36,48g/10min a Ultradur S 4090 G6 měl MFR=30,36g/10min. Výsledkem je, že materiály mají odlišný index toku taveniny. Zjištěné údaje odpovídají údajům výrobce.

Druhou reologickou zkouškou bylo měření zatékavosti polymerní taveniny. Zde jsme měnili procesní parametry zejména teplotu taveniny, teplotu formy a tlak. Výsledkem byla postupně prodlužující se spirála. Nejdelší spirály jsme dosáhli při nastavení parametrů: Teplota taveniny:280°C; Teplota formy:60°C.

Na základě poznatků z těchto zkoušek jsem vytvořil grafy naměřených hodnot a z něj byla vybrána nejlepší kombinace procesních parametrů, které jsem následně aplikoval do nastavení vstřikovacího stroje pro výrobu vstřikovaného dílce, který je technicky výrobně náročný z hlediska jeho designu. Touto optimalizací se vyřešil problém nedostříknutí tenkých stěn plastového dílce.

Dalším cílem bylo navrhnout optimální řešení problematiky lámání zámků na velmi tenkých jádrech formy. Vzhledem k tomu, že tyto úpravy formy jsou jak finančně, tak časově nákladné, jsou tyto návrhy podloženy pouze analýzami v programu Cadmould. Analýzy směřovaly k úpravám, které mají přispět ke snížení vstřikovacího tlaku a snížení sil, které působí při toku taveniny na tenká jádra formy.

Pro zlepšení plnění formy a snížení vstřikovacího tlaku (zmenšení síly působící na jádra) navrhuji tento postup:

- A) Zvětšení vtokové vložky o 1 mm
- B) Zvětšení hlavního rozvodu o 1 mm
- C) Zvětšení vedlejších rozvodů o 0,5 mm až 1 mm

D) Zesílení bočních odlehčovacích stěn z 0,8 mm na 1,1 mm

Na plnění formy a tím i parametrech se svou měrou podílí i stroj. U takto komplikovaných dílů, kde jsou velmi tenké stěny (až 0,35 mm) je vhodné použít elektrický vstřikovací stroj nebo stroj hydraulický s akumulátorem. Tyto stroje jsou schopny dosáhnout rychlých vstřikovacích časů. Vhodné je také zvolit větší průměr šneku pro dosažení větší dynamiky vstřikování.

Poznatkem této práce je, že procesními parametry lze ovlivnit proces vstřikování, ale jen do určité míry. Při posouvání k vyšším hodnotám, jako je teplota taveniny, dochází k tepelnému zatížení polymeru a následně degradaci. Proto ne vždy se vyplatí vstřikovat polymerní taveninu na hranici jejích zpracovatelských parametrů. I když se jedná o méně nákladnou úpravu tj. nastavení vstřikovacího stroje.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ZEMAN,L., Vstřikování plastů, vyd. Ben technická literatura, 2009, ISBN 80-7300-026-1
- [2] NEUHÄUSL E., ING., Vstřikování plastických hmot, vyd. Praha; SNTL 1973
- [3] NEUHÄUSL E., ING. a kol., Využití technologie vstřikování plastů vstřikování plastů ve strojírenství , vyd. Dům techniky ČSVTS České Budějovice; 1988
- [4] MLEŽIVA,J.,ŠŇUPÁREK,J., Polymery-výroba, struktura, vlastnosti a použití, vyd. Sobotáles, 2000, ISBN 80-85920-72-7
- [5] BOBČÍK, L. a Kol. Formy pro zpracování plastu I. díl – Vstřikování termoplas- tu. 2. opr. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999. 133 s.
- [6] TOMIS, F. HELŠTÝN, J. Formy a přípravky. Brno:VUT, 1985. 278 s.
- [7] Smartplast [online] <http://www.smartplast.cz/index.php>
- [8] HALAŠKA P., MAŇAS M., Význam Moldflow pro tepelnou a mechanickou analýzu vstřikovací formy, 2002.
- [9] MAŇAS, M., HELŠTÝN, J. Výrobní stroje a zařízení, Gumárenské a plastikářské stroje II. Brno: VUT, 1990. ISBN 80-214-0213-X. 199 s.
- [10] MAŇAS, M., VLCEK, J. Aplikovaná reologie.Zlín: UTB, 2001. ISBN 80 7318-039-1. 144 s
- [11] BRUMMEL, M., Rozměrově přesné výrobky z plastu. 1.vyd. Praha: VÚNM, 1977. 278 s.
- [12] ŠTEPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A. Technologie zpracování a vlastnosti plastu. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 637 s.
- [13] TOMIS, F. Základy gumárenské a plastikářské technologie. 1. vyd. Praha : SNTL, 1975. ISBN 414-33543. 278 s.
- [14] REES, H. Mold engineering. 2. vyd., 2002. 688 s. ISBN 1-56990-322-0.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ABS	AkrylnitrilButadienStyrol.
ASTM	Technická norma.
GIT	Gas Innendruck Technik
WIT	Wasser-injektionstechnik
MFI	Melt Flow Index – Index toku taveniny.
Nmm	Newton-milimetr
mm	milimetr
PC	Polycarbonat
PBT	Polybutylenterephtalat
PET	Polyethertereftalat
MFR	Melt mass-flow rate (Hmotnostní index toku taveniny)
MPa	MegaPascal
kN	KiloNewton
T <sub>g</sub>	Teplota skelného přechodu
t <sub>s1</sub>	Čas strojní 1 (uzavření vstřikovací formy)
t <sub>s2</sub>	Čas strojní 2 (doba ochrany při uzavírání vstřikovací formy)
t <sub>v</sub>	Doba vstřikování (plnění) dutiny formy
t <sub>d</sub>	Doba dotlaku (doplňování materiálu do dutiny při chládnutí výrobku-trvá až do zamrznutí vtokového ústí.)
t <sub>pl</sub>	Doba plnění (dávkování materiálu do vstřikovací jednotky)
t <sub>ch</sub>	Doba chlazení
t <sub>s3</sub>	Čas strojní 3 (otevírání vstřikovací formy a vyhození výstřiku z formy)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1. Základní rozdělení polymerů.....</i>	11
<i>Obrázek 2. Schéma tvaru makromolekul .....</i>	11
<i>Obrázek 3. Využití polymerních materiálů .....</i>	12
<i>Obrázek 4. Chemický vzorec (PBT) .....</i>	12
<i>Obrázek 5. Průběh vstřikovacího cyklu .....</i>	16
<i>Obrázek 6. Plastikační jednotka vstřikovacího stroje.....</i>	17
<i>Obrázek 7. Schématické znázornění uzavírací jednotky s kloubovým mechanismem ovládaným hydraulicky.....</i>	19
<i>Obrázek 8. Vstřikovací jednotka .....</i>	20
<i>Obrázek 9. Forma pro vstřikování plastů .....</i>	20
<i>Obrázek 10. Dosednutí trysky stroje na vtokovou vložku .....</i>	22
<i>Obrázek 11. Hvězdicové a kruhové řešení rozváděcích kanálů násobných forem .....</i>	23
<i>Obrázek 12. Řádkový vtok vícenásobných forem .....</i>	23
<i>Obrázek 13. Další typy vtokových systémů .....</i>	24
<i>Obrázek 14. Vyhřívaná vtoková soustava .....</i>	25
<i>Obrázek 15. Zatížení vstřikovací formy tlakem taveniny a uzavírací silou. ....</i>	26
<i>Obrázek 16. Teplota formy při vstřikovacím cyklu .....</i>	27
<i>Obrázek 17. Deformace formy v důsledku rozdílu teplot .....</i>	27
<i>Obrázek 18. Kapilární výtlačný plastometr .....</i>	31
<i>Obrázek 19. Schéma zkoušky zatékavosti polymerní taveniny.....</i>	32
<i>Obrázek 20. Archimédova spirála .....</i>	32
<i>Obrázek 21. Meltflow tester.....</i>	36
<i>Obrázek 22. Měřicí deska se stupnicí .....</i>	40
<i>Obrázek 23. Zámek jádra, který nejvíce praská. Vpravo je detail na zámek .....</i>	47
<i>Obrázek 24. Vstřikovací stroj Arburg 420 C 1000-475.....</i>	49
<i>Obrázek 25. Průběh plnění dutiny formy .....</i>	50
<i>Obrázek 26. Zobrazení naplnění dílu po ukončení vstřikování .....</i>	50
<i>Obrázek 27. Zobrazení teploty na čele taveniny .....</i>	51
<i>Obrázek 28 . Skutečný stav .....</i>	51
<i>Obrázek 29. Barevné zobrazení zkoumaných jader .....</i>	52
<i>Obrázek 30. Zobrazení velikosti a směru působení síly.....</i>	52

---

<i>Obrázek 31. Díl po optimalizaci procesních parametrů – díl je 100% vstříknutý. ....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 32. Změna designu vtokového systému.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 33. Zobrazení plastového dílce po úpravě.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 34. Zobrazení působících sil.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 35. Designová změna tloušťky bočních stěn plastového dílce.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 36. Zobrazení analýzy po úpravě průměru vtoku a zesílení tloušťky stěn dílce .....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 37. Zobrazení vstříkovaného dílce po úpravě průměru vtoku a zesílení tloušťky stěn dílce .....</i>	<i>60</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1. Hodnoty obsahu vlhkosti vzduchu v závislosti na ročním období .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 2. Doporučená doba sušení pro dané materiály.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 3. Doporučená hloubka odvzdušňovacích kanálek.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4. Základní procesní parametry.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5. Naměřené hodnoty ITT .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 6. Naměřené hodnoty ITT .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 7. Procesní parametry testu č.I.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 8. Zkoumané procesní parametry testu č.II .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 9. Procesní parametry testu č.III .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 10. Procesní parametry testu č.IV .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 11. Zkoumané procesní parametry testu č.IV .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 12. Základní parametry vstřikovacího stroje – vstřikovací jednotka.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 13. Základní parametry vstřikovacího stroje – uzavírací jednotka .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 14. Základní procesní parametry pro vytvoření analýzy plnění dutiny formy.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 15. Výsledek analýzy pro zesílení stěny .....</i>	<i>58</i>

**SEZNAM GRAFŮ**

<i>Graf 1. Průběh tlaku <math>p_i</math> v dutině formy během procesu vstřikován, sk-pohyb šneku, sn-pohyb nástroje .....</i>	16
<i>Graf 2. Grafické srovnání hmotností vytlačených odřezků.....</i>	39
<i>Graf 3. Výsledky měření testu I.....</i>	41
<i>Graf 4. Výsledky měření testu II. ....</i>	42
<i>Graf 5. Výsledky měření testu III. ....</i>	43
<i>Graf 6. Výsledky měření testu IV. ....</i>	44
<i>Graf 7. Výsledky měření testu V.....</i>	45
<i>Graf 8. Porovnání výsledků měření. ....</i>	46
<i>Graf 9. Síla působící na jádro při přepnutí na dotlak .....</i>	53
<i>Graf 10. Zobrazení síly působící na jádra v kavitě 20.....</i>	59
<i>Graf 11. Zobrazení síly působící na jádra v kavitě 13.....</i>	59
<i>Graf 12. Zobrazení snížení vstřikovacího tlaku .....</i>	59
<i>Graf 13. Síla působící na jádra v kavitě č. 20 .....</i>	61
<i>Graf 14. Průběh vstřikovacího tlaku.....</i>	61

## SEZNAM PŘÍLOH

## **PŘÍLOHA P I:**