

# Vliv procesních parametrů na zatékavost polymerní taveniny

Bc. Martin Zehnal

---

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 ZEHNAL**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv procesních parametrů na zatékavost polymerní taveniny**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte literární rešerži na dané téma
- 2) Vyberte vhodné druhy polymerů
- 3) Navrhněte experiment a hodnocení výsledků
- 4) Vyhodnoťte výsledky experimentu

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.**  
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 práce se zabývá tokem polymerní taveniny a podmínkami, které mají na její tok vliv. V teoretické části jsou podrobně rozděleny druhy polymerů. Dále je popsáno reologické chování a zkoušení tokových vlastností polymerní taveniny.

Praktická část je rozdělena na dvě části. V té první se práce zabývá vlivem tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti taveniny. Druhá část obsahuje návrh vstřikovací formy pro elastomery a analýzy vlivu geometrie tokových kanálů na zahřívání taveniny.

Klíčová slova: Zatékavost, polymerní tavenina, analýza, měření

## **ABSTRACT**

This work deals with flow of polymeric melt and terms which have influence to the flow. Theoretical part contain review of the kind of polymers and description of reologic behaviour and examination of the flow attributes.

Sensible part has two section. The first section deals with influence of the pressure and roughness to the fluidity. The second one contain design of the enjection mould for the elastomers and analyses of the temperature of the melt during the injection.

Keywords: Fluidity, polymeric melt, analyse, measurement

Tímto děkuji svému vedoucímu panu doc.Ing.Miroslavu Maňasovi, Csc. za cenné rady, náměty a vedení mé diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat panu Ing.Michalu Staňkovi, PhD. za rady při návrhu vstříkovací formy a panu Ing. Vladimíru Šumberovi za pomoc při obsluze vstříkovacího stroje.

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, 18.5.2008

---

podpis

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POLYMERY</b> .....	<b>11</b>
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ .....	11
1.2 STRUKTURA POLYMERŮ .....	12
1.3 ZÁKLADNÍ SKUPINY POLYMERŮ .....	14
1.3.1 Polyolefiny .....	14
1.3.2 Styrenové plasty .....	15
1.3.3 Vinylové polymery.....	15
1.3.4 Akrylové polymery .....	16
1.3.5 Polyacetyly .....	16
1.3.6 Polyestery .....	16
1.3.7 Polyamidy .....	16
1.3.8 Polyuretany .....	17
1.3.9 Fenoplasty .....	17
1.3.10 Aminoplasty .....	18
1.3.11 Epoxidové pryskyřice.....	18
1.3.12 Elastomery.....	18
<b>2 REOLOGIE POLYMERŮ</b> .....	<b>20</b>
2.1 CHOVÁNÍ POLYMERNÍ TAVENINY .....	20
2.2 NORMÁLOVÁ NAPĚTÍ.....	23
2.3 PŘEKMIT NAPĚTÍ .....	24
2.4 ELONGAČNÍ VISKOZITA .....	24
<b>3 VISKOZITA A TOK TAVENINY KANÁLY</b> .....	<b>26</b>
3.1 VISKOZITA .....	26
3.2 TEPLOTNÍ VLIV NA VISKOZITU .....	27
3.3 TOK TAVENINY KANÁLY.....	28
<b>4 ZKOUŠENÍ POLYMERŮ</b> .....	<b>30</b>
4.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY MĚŘENÍ VISKOZITY A TOKOVÝCH VLASTNOSTÍ .....	30
4.1.1 Rotační viskozimetr válec – válec.....	30
4.1.2 Rotační viskozimetr kužel – deska.....	32
4.1.3 Kapilární viskozimetry.....	34
4.1.4 Viskozimetry s padající kuličkou.....	36
4.2 HODNOCENÍ TEKUTOSTI PLASTŮ.....	37
4.3 HODNOCENÍ TEKUTOSTI REAKTOPLASTŮ.....	38
<b>5 VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>41</b>

5.1	TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	41
5.2	VSTŘIKOVACÍ CYKLUS .....	41
5.3	VSTŘIKOVÁNÍ ELEASTOMERŮ.....	42
5.4	TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ VSTŘIKOVACÍ CYKLUS .....	42
5.5	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	43
5.5.1	Uzavírací jednotka .....	44
5.5.2	Vstřikovací jednotka .....	45
5.5.3	Řídící jednotka .....	47
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>VSTŘIKOVÁNÍ ELASTOMERŮ .....</b>	<b>50</b>
6.1	ZKUŠEBNÍ MATERIÁL.....	50
6.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	50
6.2.1	Stručný popis.....	50
6.2.2	Parametry vstřikovacího stroje.....	51
6.3	VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	52
6.3.1	Spodní díl formy .....	52
6.3.2	Horní díl formy .....	52
6.3.3	Drsnosti povrchů jednotlivých desek.....	53
6.4	PROCES VSTŘIKOVÁNÍ .....	54
6.4.1	Parametry procesu vstřikování.....	54
6.4.2	Zkušební vzorek.....	55
6.5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	55
6.5.1	Závislost zatékavost na tlaku u směsi 165 .....	56
6.5.2	Závislost drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 165 .....	58
6.5.3	Porovnání závislostí tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 165.....	61
6.5.4	Závislost zatékavosti na tlaku u směsi 162.....	62
6.5.5	Závislost zatékavosti na drsnosti povrchu u směsi 162 .....	64
6.5.6	Porovnání závislosti tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 162.....	67
6.5.7	Závislost zatékavosti na tlaku u směsi 188 .....	68
6.5.8	Závislost zatékavosti na drsnosti povrchu u směsi 188 .....	70
6.5.9	Porovnání závislostí tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 188.....	72
6.5.10	Závislost zatékavost na tlaku u směsi 116 .....	73
6.5.11	Závislost zatékavosti na drsnosti povrchu u směsi 116 .....	76
6.5.12	Porovnání závislostí tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 116.....	78
<b>7</b>	<b>KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY .....</b>	<b>79</b>
7.1	VSTŘIKOVANÉ TĚLÍSKO.....	79
7.2	HORNÍ DÍL FORMY .....	80
7.2.1	Rozvodný kanál.....	80
7.2.2	Vtoková vložka .....	81

7.3	SPODNÍ DÍL FORMY .....	82
7.3.1	Spodní upínací deska.....	82
7.3.2	Usazení čidla .....	83
7.4	FORMA .....	85
<b>8</b>	<b>ANALÝZY TEPLŮT V ROZVODNÝCH KANÁLECH.....</b>	<b>86</b>
8.1	ROVNÝ KANÁL (Ø4MM) .....	86
8.2	KANÁL S PŘEPADY .....	88
8.3	KASKÁDOVÝ KANÁL .....	91
8.4	ROVNÝ KANÁL (Ø2 MM) .....	94
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>98</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>99</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>101</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>105</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>106</b>



## ÚVOD

S polymerními materiály se běžně setkáváme v každodenním životě. Dalo by se říct, že výroba polymerů a užívání výrobků z polymerů je fenoménem poslední doby.

Historie polymerních materiálů sahá do 20. let 19. století, kdy byl definován pojem polymer jako látka, jejíž molekuly obsahují více než 1000 atomů. Velký zlom ve výrobě polymerů nastal během 2. světové války, kdy se hledaly alternativní řešení náhrady původních materiálů jako ocel a dřevo za materiály syntetické. Tento trend pokračuje dodnes. Výhodou polymerů je velký počet způsobů zpracování jako jsou vstřikování, vytlačování, vyfukování, tváření, lisování, svařování a další. Další velkou výhodou jsou přijatelné mechanické vlastnosti jako je pevnost a tvrdost při velmi nízké hmotnosti. Konečně poslední velkou výhodou je cena.

Využitelnost polymerů je obrovská. Můžeme se s nimi setkat v elektrotechnice, ve stavebnictví, ve zdravotnictví, v potravinářství atd. Největší rozsah použití je však v automobilovém průmyslu. Je to dáno hlavně trendem vyrábět automobily s co nejnižší spotřebou pohonných hmot, což nahrává polymerům díky jejich nízké hmotnosti.

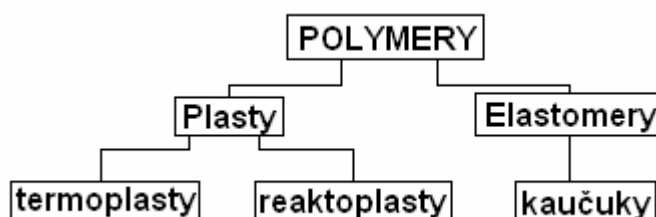
Zatékavost je jev, se kterým se potká každý člověk pohybující se v oblasti zpracování polymerních materiálů. Mám-li být konkrétní, je to schopnost polymeru zatéct do velmi úzkých štěrbin nebo otvorů dutiny formy. Tato schopnost polymeru je velmi důležitá při návrhu dutiny vstřikovací formy a v neposlední řadě má vliv na kvalitu vstřikovaných výrobků. Proto je důležité zabývat se zatékavostí a zkoumat jevy a podmínky, které ji ovlivňují.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 POLYMERY

Slovo polymer pochází z řečtiny a znamená mnoho (poly) částic (mer). Polymery jsou chemické látky obsahující ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku. Za normálních teplot jsou v tuhém stavu. Za zvýšené teploty přechází do stavu taveniny schopné téct, což umožňuje udělit polymerní tavenině tvar budoucího výrobku.[5]

### 1.1 Základní rozdělení



Polymery je možno dělit podle různých hledisek. Podle základních technických vlastností se polymery dělí na:

**Eleastomery** jsou vysoce elastické polymery, které lze za běžných podmínek, i při zatěžování malou silou, značně deformovat bez porušení. Tyto deformace mají převážně vratný charakter. Nejpočetnější podmnožinou eleastomerů tvoří kaučuky, z nichž se vyrábí pryž. [5]

**Plasty** jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, houževnaté nebo křehké. Zahřátím mohou být taveny. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu opakovatelná, nazýváme je termoplasty. Přejít do tuhého stavu se u nich děje ochlazením. Pokud je změna neopakovatelná, mluvíme o reaktoplastech, které tvrdnou vlivem síťování, obvykle za působení tepla a tlaku. [5]

Čisté polymery nemají obvykle nejvýhodnější vlastnosti a proto jsou kombinovány s jinými materiály, obvykle pomocí mechanického míchání v pevném nebo roztaveném stavu. Takto jsou vytvářeny směsi, které jsou dodávány ve formě granulí, prášku, past nebo kapalin. Směs je tvořena přísadami vhodných typů přísad, plniv, výztužných materiálů nebo jiných polymerů. Účelem je zlepšit zpracovatelnost a získat výrobek lepších vlastností.[5]

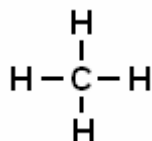
Podle struktury dělíme polymery na:

**Amorfni polymery** – polymery jejíž úseky řetězců makromolekul jsou uspořádány zcela náhodně a na sobě nezávisle; jsou průhledné, tvrdé, křehké, s vysokou pevností, dobře rozpustné v organických rozpouštědlech [4]

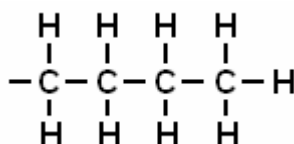
**Semikrystalické polymery** – za vhodných podmínek může dojít ke spontánnímu pravidelnému 3D uspořádání úseků řetězců – krystalizaci; jsou mléčně zakalené, houževnaté a jejich pevnost se zvyšuje s rostoucí krystalinitou [4]

## 1.2 Struktura polymerů

Za svůj vznik vděčí polymery ojedinělé vlastnosti atomu uhlíku, který je schopen vytvářet ve spojení s vodíkem neomezeně dlouhé řetězce. Základní formou této struktury je nejjednodušší uhlovodík, methan CH<sub>4</sub>: [1]

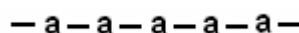


Spojením velkého počtu těchto základních skupin vzniká dlouhý uhlíkový řetězec, který představuje strukturu lineárního polyethylenu: [1]

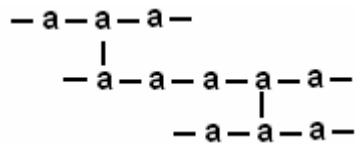


Polymer může vytvářet řetězce:

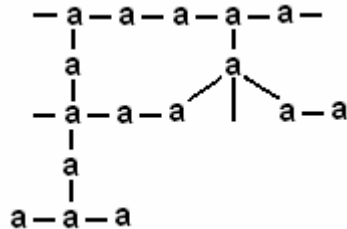
### 1. Lineární



### 2. Rozvětvené



## 3. Zesíťované, trojrozměrné řetězce



Základní stavební molekuly však nemusejí být vždy téhož druhu. Monomer může kopolymerovat i s jiným monomerem. základní skupina, označená prve písmenem a, je potom kombinována s další skupinou, kterou označíme jako b. Pak vznikají struktury polymerů vyjádřené těmito schématy [1]:

## 1. Nepravidelný (statistický) polymer



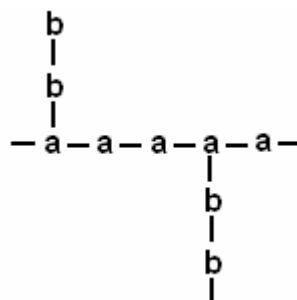
## 2. Pravidelný (alternující) polymer



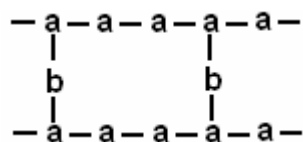
## 3. Sledový polymer



## 4. Roubovaný polymer



## 5. Zesíťovaný polymer



Až dosud byly uváděny přímé vazby mezi atomy – primární chemické vazby. Významnou úlohu však mají také sekundární vazby, tj. vazby mezi jednotlivými řetězci polymerů, ke kterým patří polární vazby včetně vodíkových vazeb a indukovaných dipólů, které se označují jako van der Walsovy síly. U dostatečně velkých molekul mají zásadní vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti polymerů. [1]

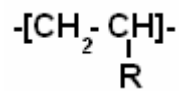
Například dlouhé a ohebné řetězce polyethylenu se k sobě vzájemně přibližují a vytvářejí tak pravidelné uspořádání molekul. V takovém uspořádání vzniká tzv. krystalická struktura, která nemusí být vůbec patrná opticky podle vzhledu povrchu. Krystalické uspořádání řetězců snižuje jejich pohybové možnosti a hmota je tím vnitřně vyztužena, takže je mnohem pevnější a houževnatější. Krystalický podíl má také vliv na chování za vyšších teplot. Je příčinou ostrého bodu tání, kdežto molekuly v neuspořádané amorfní struktuře zaručují ohebnost i při nízkých teplotách. Proto se slabé van der Walsovy síly velmi výrazně projevují ve vlastnostech polymeru. Z technické praxe lze uvést jako typický příklad technologii výroby polyethylenu, kde podle podmínek vznikají dva rozdílné typy produktů. Lineární, silně krystalický polyethylen vzniká při nízkotlaké syntéze a méně krystalický polyethylen s rozvětvenou strukturou vzniká při syntéze za vysokých tlaků. [1]

### 1.3 Základní skupiny polymerů

#### 1.3.1 Polyolefiny

Polyolefiny představují kvantitativně největší skupinu syntetických polymerů, což je způsobeno hlavně snadnou dostupností surovin pro výrobu monomerů a tím, že jde o výrobu poměrně levnou. Polyolefiny jsou tedy cenově nejvýhodnější polymery. Dalším důvodem pro jejich široké rozšíření je dobrá zpracovatelnost nejproduktivnějšími technologickými postupy i velmi dobré a široce využitelné výsledné vlastnosti. Největší význam mají polyethylen a polypropylen.[3]

základní vzorec:

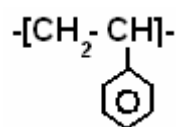


### 1.3.2 Styrenové plasty

Skupina polystyrénových plastů zaujímá objemem výroby třetí místo na světě za polyolefiny a polvinylchloridem. Do této skupiny patří tyto typy plastů:

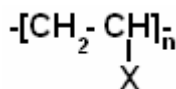
- standardní plasty, tj. homopolymery styrenu s vynikající pružností a leskem, ale dosti křehké (PS)
- zpěňované plasty s obsahem nadouvadla, které umožňuje vypěnění materiálu do různých forem pro výrobu lehčených produktů s nízkou hustotou a s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi (lehčený PS)
- houževnaté plasty se sníženou křehkostí, ale neprůhledné a s nižším leskem (HIPS)
- kopolymery styrenu s akrylonitrilem nebo dalšími monomery, určené pro aplikace vyžadující lepší odolnost vůči teplu, rozpouštědlům nebo mechanickému namáhání (SAN)
- polymery ABS, tj. houževnaté typy, při jejichž výrobě se vychází z akrylonitrilu, butadienu a styrenu jako monomerů [3]

základní vzorec:



### 1.3.3 Vinylové polymery

Řadíme zde polymery mající v hlavním řetězci skupinu :



Jsou buď zcela amorfní nebo mírně syndiotaktické s náznakem krystalické struktury.

Patří sem PVC, PVAI, PVB.[4]





- polyamid 6 je polyamid z kyseliny 6-aminokapronové nebo 6-kaprolaktanu
- polyamid 66 je polyamid z hexamethyldiamnu a kyseliny adipové
- polyamid 610 je polyamid z hexamethyldiaminu a kyseliny sebakové

Vlastnosti PA se mění podle výchozích monomerů, všechny jsou z 30 až 50 % krystalické a neprůhledné, řetězce jsou provázány vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami, jejichž množství ovlivňuje krystalickou strukturu, bod tání a teplotu přechodu. [4].

Kromě výše uvedených polyamidů sem patří také PA11 a PA12

### 1.3.8 Polyuretany

Pod pojmem polyuretany rozumíme skupinu polymerů vznikajících reakcí izokyanátů s alkoholy. [3]

Můžeme je rozdělit na:

1. lehčené hmoty
2. vlákna a filmy z lineárního PUR
3. PUR elastomery
4. lepidla
5. licí pryskyřice
6. PUR nátěrové hmoty
7. PUR pojiva

### 1.3.9 Fenoplasty

Jsou to nejstarší a nejrozšířenější reaktoplasty (bakelity). Jedná se o fenolické pryskyřice tzn. syntetické pryskyřice z fenolů s aldehydy. [4]

Obecně se používají jako lisovací hmoty, lepidla, pojiva na dřevo, brzdové materiály a antikoroziční materiály.[4]

### 1.3.10 Aminoplasty

Kondenzáty formaldehydu s látkami obsahující aminové nebo amidové skupiny - močoviny a melamin.[4]

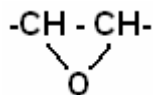
Jsou to:

**Močovinoformaldehydové pryskyřice (UF)** používané jako lisovací hmoty lepidla, lehké hmoty a pojiva pro dřevěné výrobky[4]

**Melaminoformaldehydové pryskyřice (MF)** používané rovněž jako lisovací hmoty, lepidla, pomocné prostředky pro textil a lakařské pryskyřice[4]

### 1.3.11 Epoxidové pryskyřice

Jsou to sloučeniny obsahující v řetězci epoxidovou skupinu:



Jsou bezbarvé až nažloutlé. Mají výbornou přilnavost na kovy, sklo, keramiku a dřevo. Dále vynikající izolační vlastnosti a odolnost vůči vodě a chemikáliím.

### 1.3.12 Elastomery

Eleastomery jsou polymery s mimořádně vysokou elastickou deformací. Tato deformace může být až 1000% z jejich původního rozměru. Jsou tedy vysokoelastické a relativně měkké. Jsou odolné vůči povětrnostním podmínkám, vysokým teplotám a určitým skupinám rozpouštědel. [4]

Mezi eleastomery patří celá řada typů kaučuků jako jsou přírodní, butadienový, polyisopren, chloroprenový kaučuk, butadienstyrenový kaučuk, fluoruhlíkové kaučuky a další.

Teplota  $T_g$  se u elastomerů pohybuje od  $-16$  do  $-50^\circ\text{C}$  a závisí na typu elastomeru. Pokud teplota klesne pod uvedené teploty, elastomer se stává křehkým a při zatížení praská.

Oblast použití elastomerů je velmi široká. Používají se k výrobě obuvi, hadic, pneumatik, sportovních potřeb, dopravních pásů, ochranných prostředků a nátěrů, rukavic, koupacích čepic apod.

## 2 REOLOGIE POLYMERŮ

Reologie je v širokém smyslu slova věda, která studuje tvarové změny látek při působení vnějších sil. V užším slova smyslu se reologií rozumí nauka o toku látek.[6]

V roce 1929 byla založena v USA Reologická společnost a přijala Herakleitovo heslo „Panta rei“, což znamená „Všechno teče“.[5]

Voda je nepochybně kapalina, protože teče bezprostředně. V evropských katedrálách bylo zaznamenáno, že u okenních tabulí je jejich spodní část silnější než část horní. Znamená to, že sklo skutečně teklo, ale po dobu víc než 100 let. Pro tečení je to skutečně otázkou času.[5]

- časová konstanta pro vodu  $\lambda = 10^{-12}$ s
- časová konstanta pro sklo  $\lambda = 100$  let
- časová konstanta pro polymerní taveniny  $\lambda = 10^{-2} - 10^2$  s

Reiner použil biblický výraz, že „hory tekly před bohem“. DEBORAH-ino číslo je definováno jako [5]

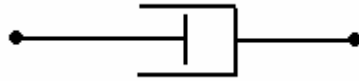
$$De = \frac{\lambda}{\theta} \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je časová konstanta a  $\theta$  je doba zpracování.

### 2.1 Chování polymerní taveniny

Vyberme si typický polymer s  $\lambda = 1$ s, kdy doba zpracování je velká ( $\theta \rightarrow \infty$ ), tj.  $De \rightarrow 0$ , materiál se chová jako kapalina. Je-li doba zpracování krátká ( $\theta \rightarrow 0$ ), tj.  $De \rightarrow \infty$  a polymer se bude chovat jako tuhá látka. V mnoha postupech zpracování polymerů může průchod hlavou nebo formou trvat 0,1–1s a  $De = 1-10$ . Proto má chování polymerní taveniny charakter jak kapaliny, tak tuhé látky a je nazýváno viskoelastické. Pro popis viskoelastického chování byly vypracovány modely, které je popisují.[5]

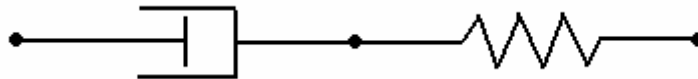
- Nejjednodušší viskózní model kapaliny je Newtonský  $\dot{\tau} = \mu\dot{\gamma}$ , který můžeme představit mechanickým analogem.



- Nejjednodušší elastický model tuhé látky je Hookův  $\tau = G\gamma$ , který může být znázorněn mechanickým analogem.



Vytvořme mechanický model složený z Newtonského tlumiče a Hookovy pružiny

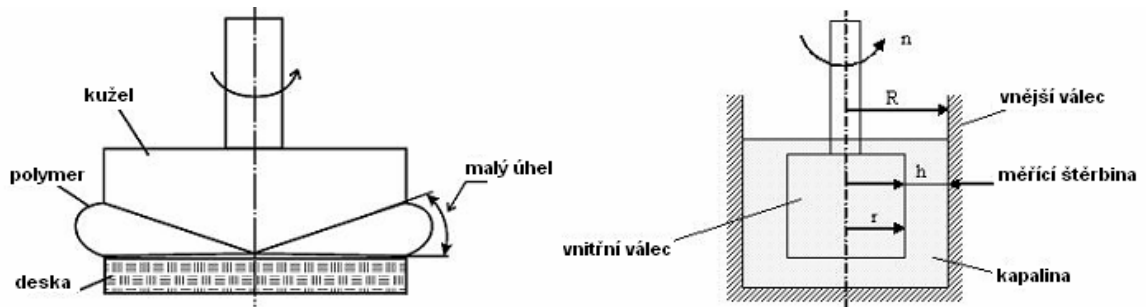


Obrázek představuje Maxwellův model tekutosti, který vznikne při sériové kombinaci elastického a viskózního modelu.[5]

Rovnice popisující maxwellův model má tvar:

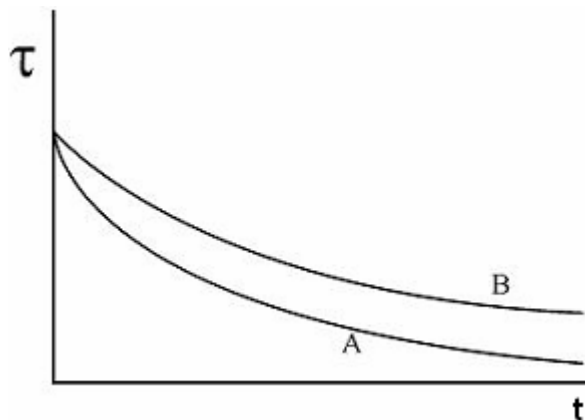
$$\tau + \lambda \dot{\tau} = 0 \quad (2)$$

$\lambda$  představuje čas pro rozložení napětí a nazývá se RELAXAČNÍ DOBA. Fyzikální význam této veličiny může být lépe pochopen opět odvoláním se na mechanický analog. Pokud vyvodíme náhlé protažení, pružina bude okamžitě reagovat. Ovšem napětí se uvolní postupně (exponenciálně), jak se tlumič začne pohybovat a pohybuje se. Je-li dostatek času, napětí bude nakonec nulové. To platí pro polymerní taveninu namáhanou smykem ve viskozimetru.[5]



Obr. 1. Viskozimetr kužel-deska a válec-válec

Je-li rotace náhle zastavena, tj.  $\dot{\gamma} = 0$ , měřené napětí nebude okamžitě nulové, ale bude se uvolňovat exponenciálně.[5]

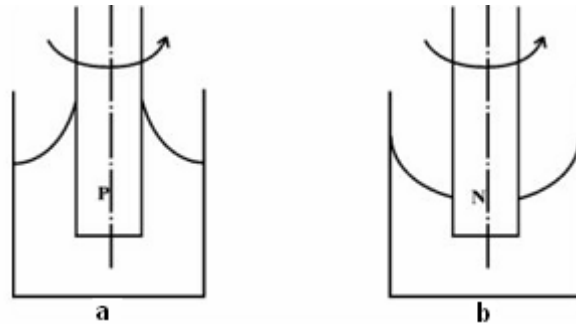


Obr. 2. Relaxace polymerů

Polymer B má delší relaxační dobu než polymer A. Průběhy relaxace napětí polymeru mohou tak být použity pro účely charakterizace. Z toho vyplývá, že není dostačující charakterizovat polymery pouze jejich viskozitou, ale také pomocí jejich relaxačních dob. Má-li materiál dlouhé doby relaxace, je možné, že během zpracování ztuhne dříve, než napětí úplně zrelaxovalo. Takto můžeme vyrábět výrobky, které mají značné množství zamrzlých napětí. Tato napětí mohou být nakonec uvolněna a mohou vést k nežádoucím jevům smrštění a deformace nebo předčasnému vzniku trhlin nebo stárnutí. Relaxační charakteristiky jsou ovlivněny velikostí a pružností polymeru. Kapaliny s malými molekulami jako voda, mají velmi krátké relaxační doby, řádově  $10^{-12}$  sekund podle teoretických odhadů, zatímco charakteristické doby relaxace polymeru jsou  $10^{-2} - 10^2$  sekund.[5]

## 2.2 Normálová napětí

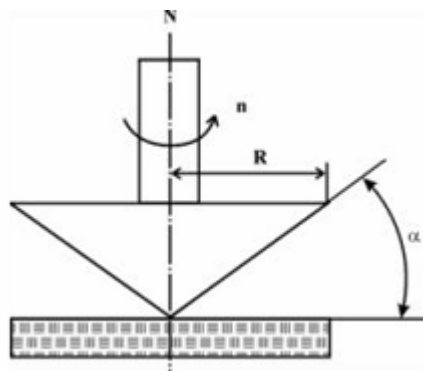
Dlouhé řetězce molekul mohou být zviditelněny jako chování pryžových pásků nebo pružin. Při natahování jsou pružiny natahovány kolem rotující hřídele a vykazují sílu kontrakce směrem k ose rotace jako zaškrcení, což nutí kapalinu téci ve směru k ose. Výsledkem je stoupání po tyči, tzv. Weissenbergův efekt. Opak, povrchová prohlubeň vlivem odstředivých sil, je pozorován u newtoských kapalin.[5]



Obr. 3. Chování kapalin při rotaci: (a)polymer, (b)newtonská kapalina

Stoupání po tyči může být použito pro měření rozdílu normálových napětí. Pomocí zařízení kužel deska můžeme měřit normálovou sílu  $N$ . Může být ukázáno, že tato síla se vyvíjí ve štěrbině mezi kuželem a deskou vlivem rozdílu napětí.[5]

$$N_1 = \tau_{11} - \tau_{22} = \frac{2N}{\pi R^2} \quad (3)$$

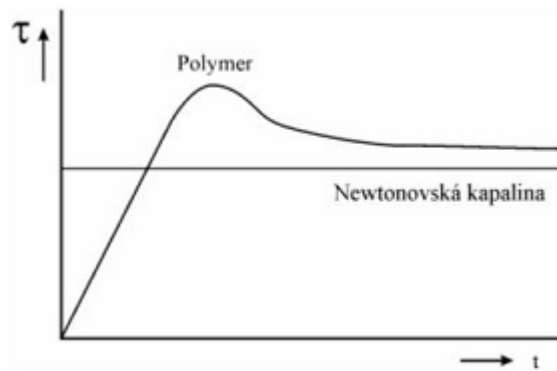


Obr. 4. Viskozimetr kužel-deska

Rozdíl normálového napětí  $N_1$  je primární příčinou narůstání taveniny, když polymery opouštějí hlavu nebo hubici.[5]

### 2.3 Překmit napětí

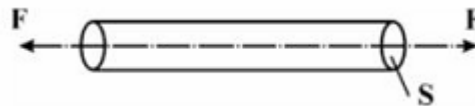
Při zahájení toku, např. ve viskozimetru kužel-deska, newtonské kapaliny dosáhnou úrovně vyvozeného napětí okamžitě, zatímco polymerní kapaliny vykazují jev překmitu.[5]



Obr. 5. Překmit napětí

### 2.4 Elongační viskozita

Uvažujme jednoosé protažení válce kapaliny.



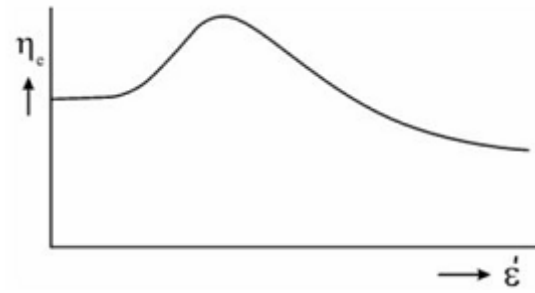
Obr. 6. Jednoosé protažení válce

Samozřejmě, natahování sloupce jako je voda je obtížné zviditelnit. Ovšem roztažené polymery mají značnou pevnost taveniny a mohou být hodně natahovány, aniž by došlo k porušení. Ve skutečnosti tato vlastnost umožňuje výrobu syntetických vláken pro oděvy a jiné spotřební výrobky. Tato vlastnost polymerů je umožněna tzv. elongační viskozitou definovanou vztahem[5]:

$$\eta_e = \frac{\sigma_{11}}{\dot{\epsilon}} \quad (4)$$

kde  $\sigma_{11}$  je napětí při protažení a  $\dot{\epsilon}$  je rychlost protažení





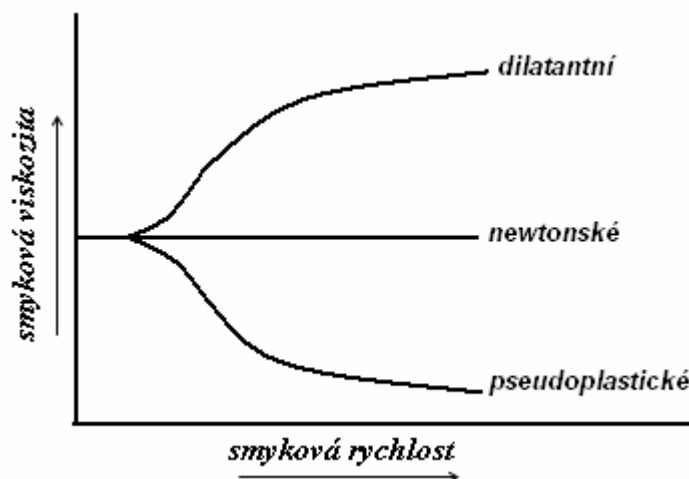
Obr. 7. Elongační viskozita

### 3 VIZKOZITA A TOK TAVENINY KANÁLY

Určení tokových vlastností a znalost reologického chování jsou velmi důležité jak pro výrobce surovin tak pro výrobce strojů a zpracovatele. Dodavatelé surovin využívají výsledky měření viskozity k zjištění stejnoměrné kvality a kontroly provozních parametrů při výrobě. Výrobci strojů potřebují tyto údaje pro návrh šneků, ozubených čerpadel, vstříkovaných trysek a forem a zároveň taky pro výpočet pohonů, uzavíracích sil atd. Zpracovatelé využívají naměřených dat pro řízení zpracovatelského procesu.[5]

#### 3.1 Viskozita

Viskozita je definována jako odpor proti tečení a je stanovena jako smykové napětí ku smykové rychlosti. Čím je viskozita nižší, tím je nižší i odpor proti toku. Viskozita obyčejných tekutin jako voda nebo olej je ovlivňována teplotou, ale je konstantní s měnící se smykovou rychlostí. Tekutina, jejíž viskozita se nemění s měnící se smykovou rychlostí, se nazývá Newtonovská. Viskozita polymerních materiálů resp. její průběh je obecně mnohem složitější. Při velmi nízké smykové rychlosti se polymerní materiál v podstatě chová jako by byl Newtonovský. Se stoupající smykovou rychlostí se polymerní materiál stává ne-Newtonovským s charakteristickým exponenciální profilem, kde se snižující viskozitou stoupá smyková rychlost. Naproti tomu viskozita u dilatantních ne-Newtonovských tekutin stoupá se vzrůstající smykovou rychlostí.[2]

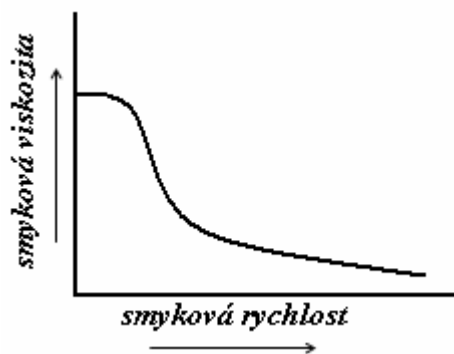


Obr. 8. Porovnání vlivu smykové rychlosti na viskozitu u dilatantních, newtonských a pseudoplastických materiálů

Snížení resp. zvýšení viskozity u pseudoplastických materiálů je důsledkem orientace polymerních řetězců. S orientací řetězců klesá jejich zapletení. Tohle usnadňuje vzájemné smýkání řetězců. Zásadou této charakteristiky viskozita klesá s rychlostí vstřikování. V případě vstřikování může vstřikovací čas obvykle redukovat tlak potřebný k plnění formy.[2]



Obr. 9. Vliv smykové rychlosti na viskozitu a orientaci

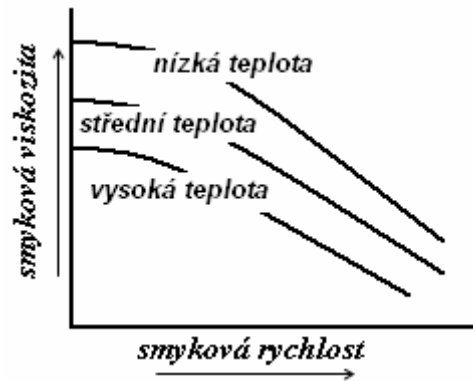


Obr. 10. Vliv smykové rychlosti na viskozitu

### 3.2 Teplotní vliv na viskozitu

Tak jako zvyšující se smyková rychlost i zvyšující se teplota snižuje hodnotu smykové viskozity polymerních materiálů. Plasty se v roztaveném stavu skládají z dlouhých molekulových řetězců. Páteř těchto řetězců obvykle tvoří uhlíkové atomy. Uhlíkové atomy podél těchto řetězců jsou drženy silnými kovalentními a chemickými vazbami. Tyhle oddělené řetězce jsou drženy při sobě poměrně slabými silami, kterým se říká van der Waalsovy. Jakmile se materiál během procesu zahřeje, primární vazby se oslabí a jejich délky se prodlouží. Při normálním teplotním procesu tyhle oslabené vazby umožní volnější pohyb – tok, aniž by se porušily. Jestliže teplota přesáhne určitou mez, tyhle vazby se přeruší, což zapříčiní degradaci polymeru.[2]

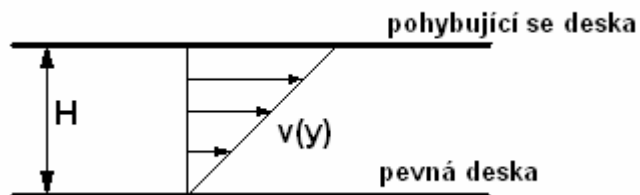
Sekundární vazby se chovají během teplotního procesu odlišně. Teplotním účinkem se značně oslabí a poskytnou malou soudržnost mezi molekulami. Výsledkem je oddělení řetězců jeden od druhého. Na obrázku vidíme vliv teploty a smykové rychlosti na smykovou viskozitu.[2]



Obr. 11. Vliv teploty a smykové rychlosti na viskozitu

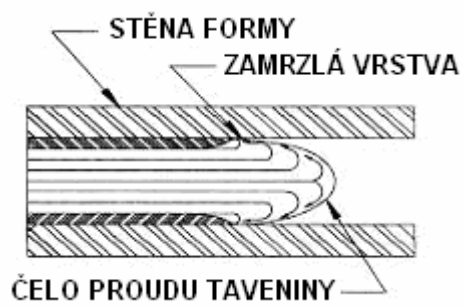
### 3.3 Tok taveniny kanály

Díky relativně vysoké viskozitě komerčních polymerů můžeme očekávat, že jejich tok kanály vstřikovací formy bude téměř vždy laminární.[2]



Obr. 12. Dvoudeskový model laminárního toku

Tento způsob toku materiálu kanálem je přirovnáván k rozvinujícímu se koberci. Materiál tekoucí středem kanálu je neustále tlačěn k jeho obvodu kde tuhne a nový materiál tekoucí za ním proteče dál mezi ztuhlými vrstvami dopředu. Jakmile se dostane na samotnou špičku toku je rovněž zatlačen ke stěně kde ztuhne. Pohyb taveniny na špičce toku se podobá tryskání vody ve fontáně, proto se tomuto toku říká fontánový tok.[2]



*Obr. 13. Fontánový tok*

## 4 ZKOUŠENÍ POLYMERŮ

### 4.1 Základní principy měření viskozity a tokových vlastností

K stanovení viskozity nebo průběhu tokové křivky je třeba zjistit hodnoty smykového napětí a smykové rychlosti. Tyto základní reologické veličiny nejsou přímo měřitelné. K jejich nepřímému měření je třeba zajistit přesnou geometrii měřícího systému, která umožní zjistit potřebné veličiny smykové rychlosti a napětí výpočtem z měřitelných veličin jako síla, kroutící moment, výtoková rychlost,...atd. Pro kvalitativní stanovení tokových vlastností se hodí pouze systémy, které zaručují laminární tok kapaliny [7].

Nejčastěji používané přístroje pro absolutní stanovení viskozity nebo tokových křivek jsou založeny na těchto principech [7]:

- a) tok kapaliny ve štěrbině mezi rotujícími sousými válci
- b) tok kapaliny ve štěrbině mezi rotujícím kuželem a deskou
- c) tok kapaliny kapilárou
- d) volný pád kuličky kapalinou

Měřicí přístroje založené na jmenovaných principech umožňují stanovit smykové napětí i smykovou rychlost. Mimo tyto přístroje se v průmyslu zpracování a výroby polymerů používají různé měřicí zařízení pro stanovení konzistence i tokového chování, které sice nezaručují přesnou geometrii toku a laminární proudění, ale slouží jako zdroj informací o tokovém chování polymerních materiálů [7].

#### 4.1.1 Rotační viskozimetr válec – válec

Měřená kapalina vyplňuje štěrbinu mezi dvěma sousými válci, z nichž jeden se otáčí úhlovou rychlostí  $\omega$  ustáleným rotačním pohybem. Na druhý válec se kapalinou přenáší kroutící moment  $M_t$ , indikovaný obvykle úhlem zkrutu  $\varphi$  torzního drátu nebo torzní pružiny o známé torzní tuhosti, na které je indikační válec zavěšen [7].

Měříme tedy úhlovou rychlost otáčení  $\omega$  jednoho válce a úhel zkrutu  $\varphi$  druhého válce unášeného kapalinou. V oblasti hookovského chování torzní pružiny nebo drátu je

kroutící moment  $M_t$  přímo úměrný úhlu zkrutu  $\varphi$  a lze jej snadno vypočítat při definovaném torzním průřezovém modulu torzního snímacího elementu  $W_t$ . Máme-li k dispozici tyto přímo měřitelné veličiny a známe-li geometrii přístroje, můžeme vypočítat velikost smykového napětí  $\tau$  a smykové rychlosti  $D$  [7].

1) *síla působící* na válec se rovná násobku smykového napětí a plochy válce [7]:

$$F = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot \tau_r \quad (5)$$

$$M_t = F \cdot r \quad (6)$$

$$\tau_r = \frac{M_t}{2\pi \cdot r^2 h} \quad (7)$$

2) Výpočet smykové rychlosti  $\gamma$  ve vzdálenosti od osy otáčení  $r$  vychází z obecného výrazu pro smykovou rychlost [7]:

$$D = \frac{dv_r}{dr} = \frac{r \cdot d\omega_r}{dr} \quad (8)$$

3) Pro newtonskou kapalinu dosadíme výrazy (7) a (8) do Newtonova zákona a po úpravě dostaneme [7]:

$$d\omega_r = \frac{M_t}{2\pi \cdot h \cdot \eta} \frac{dr}{r^3} \quad (9)$$

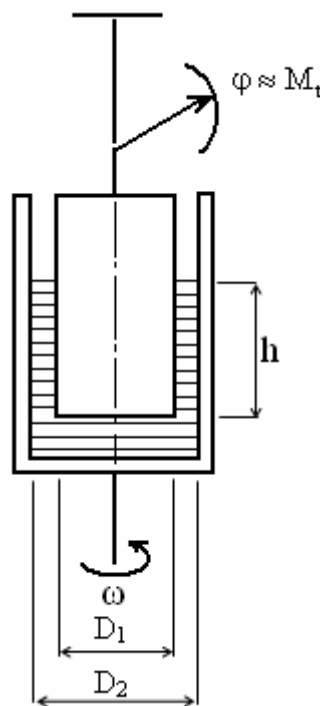
integrací rovnice (9) pro okrajové podmínky:

$$r = R_1 \dots \dots \dots \omega = 0$$

$$r = R_2 \dots \dots \dots \omega = \omega$$

získáme vztah, který umožňuje výpočet viskozity z hodnot kroučícího momentu a úhlové rychlosti [7]:

$$M_t = \eta \cdot \omega \cdot \frac{4\pi h \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (10)$$



Obr. 14. Viskozimetr válec – válec

#### 4.1.2 Rotační viskozimetr kužel – deska

Kruhová deska se otáčí úhlovou rychlostí  $\omega$  a unáší kapalinu, která vyplňuje prostor mezi kuželem o poloměru  $R$  a deskou. Pohyb desky se přenáší viskózní kapalinou a vyvolává kroučící moment  $M_t$  na kužel, který je zavěšen na torzním elementu, podobně jako snímací válec u viskozimetru válec – válec. Ze známého úhlu zkrutu  $\varphi$  kužele a známé torzní tuhosti drátu nebo pružiny můžeme snadno vypočítat hodnotu kroučícího momentu



$M_t$ . Úhel, který svírá kužel s deskou, označíme  $\psi$ . Z těchto známých veličin můžeme opět vypočítat viskozitu měřené kapaliny [7].

1) uvažujeme-li kroužek materiálu a poloměru  $r \leq R$  a šířce  $dr$ , pak síla  $dF$  působící na tento elementární kroužek kapaliny je dána součinem smykového napětí  $\tau$  a plochy kroužku. Síla  $dF$  vyvolá kroutící moment  $dM_t = dF \cdot r$ . pak platí [7]:

$$dF = 2\pi \cdot r \cdot \tau_r \cdot dr = \frac{dM_t}{r} \quad (11)$$

integrací rovnice (11) pro okrajové podmínky

$$r = 0 \dots \dots \dots M_t = 0$$

$$r = R \dots \dots \dots M_t = M_t$$

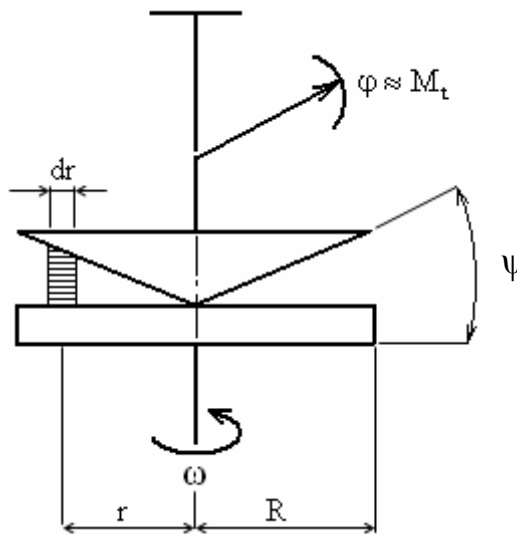
$$\tau_r = \frac{3M_t}{2\pi \cdot R^3} \quad (12)$$

2) **smyková deformace**  $d\gamma_r$  elementárního kroužku kapaliny o výšce  $y$  ve vzdálenosti  $r$  od osy rotace vyvolaná diferenciální úhlovou rotací  $d\theta$  [7]:

$$d\gamma_r = \frac{r \cdot d\theta}{y} = \frac{r \cdot d\theta}{r \cdot \operatorname{tg}\psi} = \frac{r \cdot d\theta}{r\psi} = \frac{d\theta}{\psi} \quad (13)$$

3) **zdánlivá viskozita** pro všechny typy kapalin je dána:

$$\eta_z = \frac{\tau_r}{D} \quad (14)$$



Obr. 15. Viskozimetr kužel – deska

Hlavní výhodou a důvodem obliby viskozimetru kužel – deska je nezávislost hodnot smykové rychlosti a napětí na vzdálenosti od osy otáčení. Pro malé úhly  $\psi$  je smyková rychlost a smykové napětí konstantní v celém objemu štěrbin. Úhel  $\psi$  bývá menší než  $3^\circ$ . Z tohoto důvodu je daný typ viskozimetru velmi výhodný pro měření tokových křivek newtonských kapalin.[7]

#### 4.1.3 Kapilární viskozimetry

Kapilární viskozimetr patří k nejrozšířenějším měřicím přístrojům. Měřicí princip spočívá v průtoku kapaliny působením hydrostatického tlaku vlastní tíhy nebo vnějšího tlaku kapilárou o poloměru  $R$  a délce  $L$ . Měřitelné veličiny při tomto postupu jsou[7]:

- průtoková rychlost  $Q$
- tlakový spád v kapiláře, daný rozdílem tlaků na vtokové a výtokové straně kapiláry, vztažený na jednotkovou délku kapiláry

Vztah mezi smykovým napětím a tlakovým spádem v kapiláře vyplývá z rovnice rovnováhy sil, působící na váleček kapaliny o délce  $L$  a poloměru  $r$ , na jehož čelní plochu působí tlakový rozdíl  $\Delta p$ . Při ustáleném laminárním toku viskózní síla  $F_V$ , která se snaží

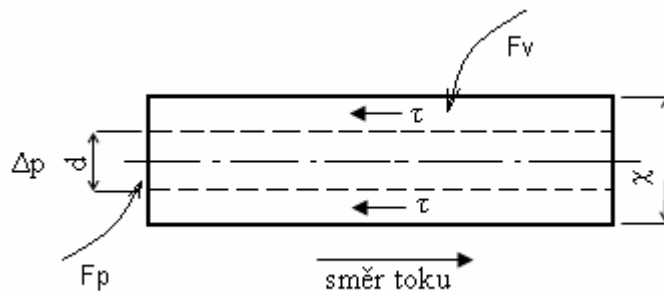
brzdit pohyb myšleného válce, bude stejná jako hnací síla  $F_p$ , plynoucí z rozdílu tlaků na protilehlých koncích válce. Proto platí [7]:

$$F_p = \Delta p \cdot \pi \cdot r^2 = \tau_r \cdot 2\pi \cdot r \cdot L = F_v \quad (15)$$

a tedy

$$\tau_r = \frac{\Delta p \cdot r}{2L} \quad (16)$$

Podle rovnice (16) je smykové napětí v kapiláře lineární funkcí vzdálenosti od osy bez ohledu na charakter kapaliny. Smykové napětí dosahuje své maximální hodnoty na stěnách kapiláry.[7]



Obr. 16. Rovnováha sil při ustáleném toku válce kapaliny kapilárou

Smyková deformace ve vzdálenosti  $r$  od osy kapiláry pro diferenciální posunutí  $dx$  ve směru toku se rovná [7]:

$$\gamma_r = -\frac{dx}{dr} \quad (17)$$

Smyková rychlost pak přechází na výraz pro gradient postupné rychlosti, neboť postupná rychlost toku  $v_r = (dx/dt)_r$  [7]:

$$D_r = \frac{dy_r}{dt} = -\frac{d^2x}{dtdr} = -\left(\frac{dv}{dr}\right)_r \quad (18)$$

Dosažením obecné rovnice toku pro daný typ kapaliny  $D = f(\tau)$  do rovnice (16) za použití rovnice (18) a integrací v mezích  $v = 0$  při  $r = R$  a  $v = v_r$  pro  $r = r$  dostaneme vztah charakterizující distribuci postupné rychlosti toku v kapiláře [7]:

$$-\left(\frac{dv}{dr}\right)_r = \frac{\Delta p r}{2\eta L} \quad (19)$$

Smykové napětí i smyková rychlost jsou při toku kapilárou závislé na vzdálenosti místa toku od osy kapiláry  $r$ . Tokovou křivku můžeme však konstruovat pouze z hodnot  $\tau$  a  $D$  ze stejného místa kapiláry [7].

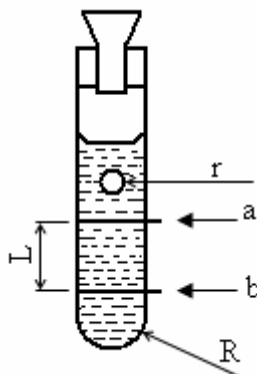
Běžně se měří a srovnávají hodnoty  $\tau$  a  $D$  na stěně kapiláry, tedy ve vzdálenosti od osy  $r = R$ . Tyto hodnoty se označují indexem  $w$ , jako  $\tau_w$  a  $D_w$ . Platí [7]:

$$\tau_w = \frac{\Delta p \cdot R}{2L} \quad (20)$$

$$D_w = \frac{\Delta p \cdot R}{2\eta \cdot L} \quad (21)$$

#### 4.1.4 Viskozimetry s padající kuličkou

Tok kapaliny kolem tuhé koule poskytuje jednoduchý princip měření viskozity, který je snadno konstrukčně dostupný. Princip viskozimetru s padající kuličkou je na obr.[7]



Obr. 17. Princip viskozimetru s padající kuličkou

Při měření získáme dobu průchodu měrné kuličky o poloměru  $r$  mezi dvěma značkami na měrné trubici  $a, b$ , které vymezují dráhu kuličky kapalinou  $L$ . Za předpokladu, že poloměr trubice  $R$  je dostatečně velký oproti poloměru kuličky  $r$  lze uvažovat situaci ve viskozimetru za pád kuličky nekonečně rozprostřenou kapalinou a použít pro výpočet viskozity Stokesova zákona. Odvození tohoto zákona vychází z rovnováhy gravitačních a viskózních sil, působících na kuličku při ustáleném pohybu [7]:

$$\eta = \left(\frac{2}{9}\right) \cdot \frac{(d_k - d) \cdot g \cdot r^2}{v} \quad (22)$$

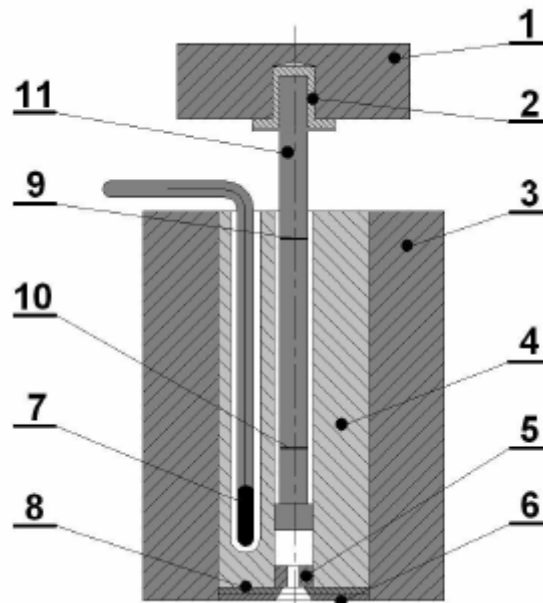
kde  $d_k$  je hustota kuličky,  $d$  je hustota kapaliny,  $g$  je gravitační zrychlení a  $v = L/t$  je rychlost pádu kuličky.[7]

## 4.2 Hodnocení tekutosti plastů

Zpracovatelské technologie plastů jsou založeny na tváření polymeru při teplotách dostatečně nad  $T_g$ , tedy ve stavu taveniny.[7]

Nejvýznamnější veličinou pro posouzení chování tavenin termoplastů a pro volbu technologie zpracování je ITT – index toku taveniny. Zkouška ITT je jedním z nejrozšířenějších testů v oblasti zpracování polymerů. Metoda pro stanovení ITT je založena na principu tlakového kapilárního viskozimetru při konstantním zatížení pístu. Přesné uspořá-

dání metody stanovení ITT je normalizováno a podmínky zkoušky se liší podle typu polymerní taveniny.[7]



Obr. 18. Zkušební zařízení pro stanovení ITT

1 – snímatelné závaží, 2,3 – izolace, 4 – válec, 5 - tryska  
6 – izolační deska, 7 – kontrolní teploměr, 8 – deska přidržující trysku, 9 – kontrolní referenční značka, 10 – spodní referenční značka, 11 – píst

Index toku je definován jako hmotnost materiálu v gramech, vytlačeného popsáním výtlačným kapilárním viskozimetrem za určitou časovou jednotku při předepsané teplotě, tlaku a rozměru kapiláry. Na ITT můžeme pohlížet jako na jeden bod tokové křivky polymeru při konstantním smykovém napětí při poměrně malé smykové rychlosti.[7]

### 4.3 Hodnocení tekutosti reaktoplastů

Lisovacím teplem tvrditelné pryskyřice jsou poměrně nízkomolekulární látky, které samy o sobě mají při zahřátí velmi dobré tokové vlastnosti. Lisovacím teplem tvrditelné

látky však obsahují velké množství práškových nebo vláknitých plniv, která ovlivňují tokové chování pryskyřic při zpracování lisováním na konečné výrobky. Během lisování a vytvrzování reaktoplastů za vysokých tlaků a teplot dochází v materiálu ke změnám teploty, rychlosti a složení. Tokové vlastnosti pryskyřic jsou ovlivňovány zvyšováním molekulové hmotnosti pryskyřic, větvením a síťováním.[7]

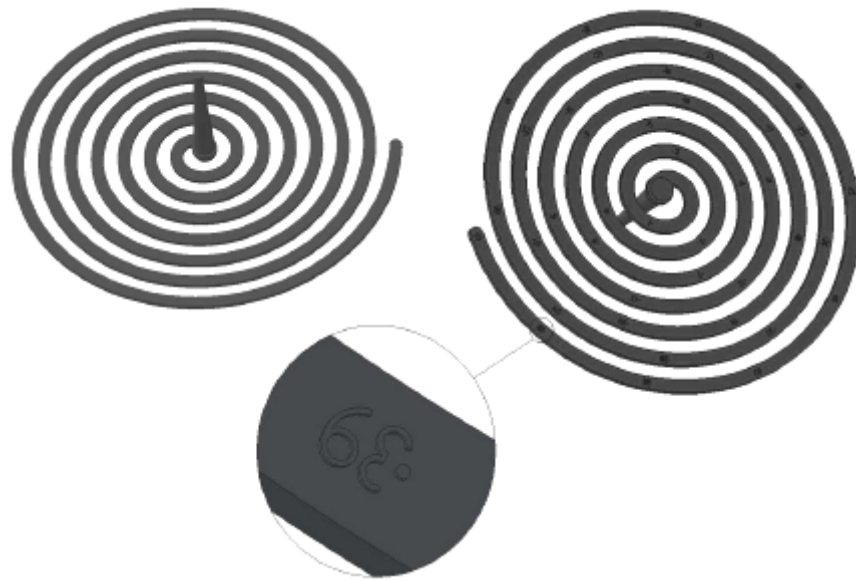
Základním měřítkem tokových vlastností reaktoplastů při lisování je tekutost, definovaná v tomto případě jako schopnost lisovací hmoty vyplňovat tvarovou dutinu formy za určitých podmínek, tj. tlaku, teplotě a době. K hodnocení tekutosti se používá metod modelových lisovacích cyklů, lisování lisovacích hmot do kruhových nebo obdélníkových kanálků a nejnověji se sleduje celý lisovací proces na speciálních rotačních viskozimetrech.[7]

Modelové lisovací cykly jsou nejrozšířenější a používají lisovacích nebo přetlačovacích forem na pohárky, spirály nebo kotouče, do kterých se zalisuje zkoušený materiál za smluvních podmínek. Z tvaru výlisku, doby uzavírání formy, síly přetoků nebo vlastního výlisku se usuzuje na tekutost hmoty.[7]

Lisování pohárků je u nás normováno hlavně pro lisování aminových pryskyřic. Mírou tekutosti je zde doba potřebná k uzavření předepsaného přístroje s přesně odváženým množstvím lisovací hmoty při teplotě  $145 \pm 3$  °C do pohárkové formy o průměru dna 62 mm, výšce 95 mm a tloušťce 1,5 mm. Po zalisování se sleduje manometr lisu a měří se doba, za kterou se forma úplně uzavře.[7]

Lisování do spirály je další metoda hodnocení tekutosti lisovacích hmot. Lisování se provádí za konstantních podmínek v přetlačování formě na zkušební spirálu. Lisovací podmínky se volí podle typu polymeru, neboť spirálový test tekutosti lze použít i pro termoplasty. Vtok ústí do středu spirály a délka spirály udává přímo míru tekutosti hmoty za

daných zkušebních podmínek. Ve formě jsou vyryty dělicí značky a čísla, takže zjištění délky toku ve spirále je velmi jednoduché.[7]



*Obr. 19. Spirálová metoda stanovení tekutosti při vstřikování*



## 5 VSTŘIKOVÁNÍ

### 5.1 Technologie vstřikování

Vstřikování je nejrozšířenějším způsobem výroby dílů z polymerů. Vyznačuje se poměrně složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj i forma.[9]

Vstřikováním se zpracovávají plasty i kaučukové směsi. Technologie vstřikování umožňuje vyrábět výrobky velmi složitých tvarů pro aplikace v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, v elektrotechnice a optice, ve zdravotnictví, v přístrojích pro domácnost, sport a volný čas.[9]

Vstřikováním se označuje takový způsob tváření polymerních materiálů, při kterém se plastikovaný materiál plní vysokou rychlostí do uzavřené dutiny formy, která je temperovaná.[9]

Výhody vstřikování jsou následující:

- přímá cesta ze suroviny v konečnou součást
- žádné nebo v malé míře prováděné dokončovací operace na výstřiku
- plně automatizovaný proces
- vysoká reprodukovatelnost
- nízké náklady na kus při velkém objemu výroby

### 5.2 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je založen na vstříknutí taveniny polymeru do formy, chlazené při zpracování termoplastů a vyhřívané při zpracování kaučukových směsí. Forma je po ztuhnutí taveniny, resp. po zvučkanizování kaučukové směsi otevřena, výstřik vyjmut a stroj připraven k dalšímu cyklu.[9]

Vstřikovacím cyklem nazýváme sled operací souvisejících s výrobou výstřiku. Vstřikovací cyklus začíná uzavřením formy. Ve vstřikovací jednotce dochází k plastikaci.

Poté je vstřikovací jednotka přisunuta k formě a po dosednutí vstřikovací trysky nastává vstřikování taveniny. po naplnění dutiny formy taveninou dochází k postupnému tuhnutí, což je provázáno objemovými změnami. Aby byl zachován dokonalý tvar a rozměry budoucího výrobku, je nutné doplnit další polymer, což se děje ve fázi nazývané dotlak. Po zatuhnutí vtokového systému dochází k tuhnutí ve formě. Následující odsun vstřikovací jednotky a po ztuhnutí taveniny se forma otevírá a výrobek je vyhozen. Ve vstřikovací jednotce mezitím probíhá příprava taveniny a celý cyklus se opakuje.[9]

### 5.3 Vstřikování elastomerů

Při vstřikování elastomerních směsí, na rozdíl od termoplastů, dochází uvnitř dutiny formy k vulkanizaci. Vulkanizací je označován proces, při kterém dochází v důsledku vytvoření chemických vazeb mezi polymerními řetězci ke změně plastických vlastností směsi na elastické vlastnosti finálního výrobku. Dutina formy je proto temperována na vulkanizační teplotu, která je závislá na druhu elastomerní směsi.[9]

Při vulkanizaci kaučuků je důležité dosáhnout kontrolované množství síťových vazeb. Při menším množství síťových vazeb by měl kaučuk trvalou deformaci, při vysoké hustotě síťových vazeb by byl rozsah elastické deformace malý.[9]

Během vstřikování jsou elastomerní směsi namáhány vyšší teplotou, tlakem a smykovým napětím než při lisování nebo přetlačování. Nejvyšší produktivity je dosahováno, když je směs vstřikována při teplotě blízké vulkanizační do formy s mírně vyšší teplotou, neboť tyto podmínky minimalizují vstřikovací i vulkanizační čas.[9]

### 5.4 Technologické parametry ovlivňující vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je ovlivňován řadou technologických parametrů, které mají vliv především na délku a kvalitu výstřiku. Mezi tyto parametry řadíme[9]:

- velikost dávky – musí být zvolena tak, aby došlo k naplnění tvarových dutin formy i vtokového rozvodu a doplnění objemové změny, vyvolané ochlazením plastu a jeho zhuštěním způsobené dotlakem

- teplotu taveniny – měří se při výstupu ze vstřikovací trysky stroje. Její výše i rozsah je dán druhem plastu a je třeba zvolit její optimální hodnotu. Nízká teplota zhoršuje zatékavost a vysoká může vést k degradaci materiálu a prodloužení cyklu
- velikost a doba působení vstřikovacího tlaku musí umožnit spolehlivé zaplnění dutiny formy taveninou. Jeho velikost je dána typem polymeru i formou
- vstřikovací rychlost je ovlivněna vstřikovacím tlakem a časem. Musí být taková, aby byla dutina formy naplněna a přitom nedošlo k předčasnému zchlazení taveniny. Závisí na viskozitě taveniny a odporech ve formě, především ve vtokové soustavě
- chladící čas je doba, po kterou je tavenina v dutině formy ochlazována bez působení vstřikovacího tlaku. Závisí na teplotě zpracovaného plastu, tloušťce stěny výstřiku, temperaci nástroje apod. Podstatně ovlivňuje celkovou dobu vstřikovacího cyklu.

## 5.5 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj slouží k výrobě plastových popř. pryžových dílů. Převádí materiál ve formě granulí nebo tablet, u gumárenských směsí ve formě pásků nebo drtě na taveninu, kterou poté vstřikuje do dutiny formy. Po zafixování tvaru je hotový výrobek vyhozen z formy. Aby byl vstřikovací stroj schopen vykonat všechny zmíněné operace, musí obsahovat následující části[9]:

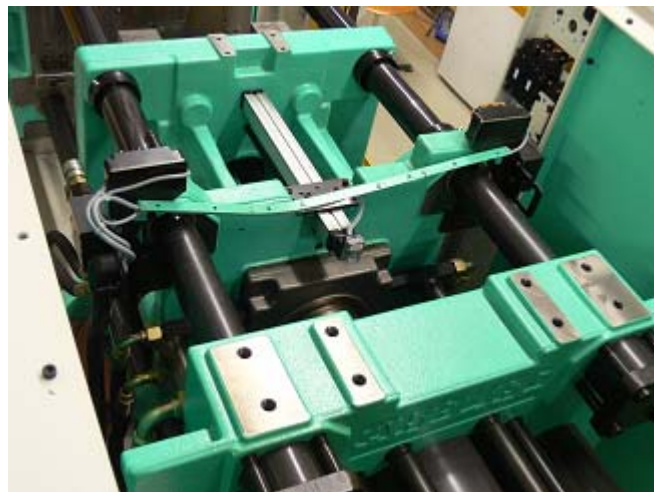
- uzavírací jednotku
- vstřikovací jednotku
- řídicí jednotku



*Obr. 20. Vstřikovací stroj*

### 5.5.1 Uzavírací jednotka

Otevření a bezpečné zavření formy zajišťuje uzavírací ústrojí. Potřebná uzavírací síla je závislá na velikosti stroje, resp. na velikosti plochy průřezu výstřiku v dělicí rovině a na velikosti vstřikovacího tlaku. Uspořádání uzavírací jednotky a tuhost uzavíracího mechanismu má rozhodující vliv na těsnost formy.[9]



*Obr. 21. Uzavírací jednotka*

Druhy uzavíracího ústrojí:

#### ***Hydraulické***

Výhodou hydraulického uzavíracího ústrojí je poměrná jednoduchost a jednoduchá regulace velikosti uzavírací síly a rychlosti pohyblivé upínací desky v jednotlivých fázích

uzavírání. Určitou nevýhodou je obtížnější těsnění pístů, které musí mít pro dosažení velkých uzavíracích sil veliký průměr.[9]

### ***Hydraulicko – mechanické***

Uzavírací síla je vyvozována malým hydraulickým válcem přes vhodný systém pákových převodů. Kinematickým uspořádáním mechanismu se docílí velmi příznivých jak silových, tak i rychlostních poměrů. Nejčastěji používanou skupinou uzavíracích mechanismů jsou tzv. kloubové uzávěry.[9]

### ***Elektromechanické***

Jedná se o nahrazení přímočarého hydraulického motoru elektromotorem s klikovým mechanismem, eventuelně o využití řady pozitivních zkušeností z oblasti obráběcích strojů. K výhodám elektromechanických uzavíracích ústrojí patří jejich konstrukční jednoduchost, vysoká uzavírací rychlost a snadná automatizace celého pracovního cyklu. Další výhodou je nižší energetická náročnost. Nevýhodou jsou vyšší náklady než u předchozích typů.[9]

## **5.5.2 Vstřikovací jednotka**

Vstřikovací jednotka převádí tuhý materiál do formy taveniny, kterou následně vstříkne do formy.[9]

Vstřikovací jednotky musí zajistit dokonalou plastikaci a homogenizaci taveniny a dostatečně vysoký vstřikovací tlak Vstřikovací jednotky se dělí dle způsobu plastikace[9]:



Obr. 22. Vstřikovací jednotka

### *Vstřikovací jednotky bez předplastikace*

Plastikace probíhá v tavicí komoře (pístová plastikace) nebo pracovním válci (šneková plastikace).[9]

#### *Pístová plastikace*

V tavicí komoře se materiál roztaví a tavenina se vstříkne vstřikovacím pístem do formy. Teplo potřebné k ohřátí materiálu z počáteční teploty na teplotu vstřikování dodávají pásová topná tělesa. Výhodou je jednoduchá konstrukce a snadné docílení poměrně vysokých vstřikovacích tlaků. Nevýhodou je horší homogenizace a velmi dlouhá doba plastikace.[9]

#### *Šneková plastikace*

U vstřikovací jednotky se šnekovou dochází k plastikaci pomocí šneku. Šnek se otáčí a posouvá směrem dozadu, čímž vytváří prostor pro taveninu. Po zplastikování potřebného množství se materiál axiálním pohybem šneku vstříkne přes vstřikovací trysku do dutiny formy. Šneková plastikace dává větší výkony než pístová. Také rovnoměrnost ohřevu a homogenizace taveniny je lepší.[9]

### *Vstřikovací jednotky s předplastikací*

Zpracovávaný materiál se plastikuje v oddělené plastikační jednotce a takto připravená tavenina je dopravována do vstřikovacího válce, odkud se pak vstříkne pístem do formy.[9]

#### *Pístová předplastikace*

Tavenina se připravuje v tavící komoře opatřené torpédem a topením. Následně je dopravena před vstřikovací píst a je vstříknuta do formy. Aby nedocházelo k přetlačování taveniny za vstřikovacího válce zpět do tavící komory, je zařazen mezi vstřikovací válec a hlavu tavící komory zpětný ventil.[9]

#### *Šneková předplastikace*

Toto uspořádání umožňuje spojit výhody šnekové plastikace a výhodami vstřikování pístem. Dosahuje se tím rychlé a dokonalé plastikace materiálu a vysokých vstřikovacích tlaků. Nevýhodou je složitost a vyšší nároky na seřizování a údržbu. Uplatnění nacházejí zejména při vstřikování objemových výrobků.[9]

### **5.5.3 Řídící jednotka**

Řízení a regulaci je nutno považovat za neoddelitelnou součást funkce vstřikovacího stroje. Na strojích se obvykle nastavuje teplota jednotlivých zón vstřikovacího válce a formy, vstřikovací tlak, dotlak, časové úseky pracovního cyklu, otáčky plastikačního šneku, vstřikovací rychlost, vstříknutý objem, uzavírací a dosedací rychlost formy. Stav plastu a podmínky vstřikování jsou určeny technologickými parametry. Z nichž mezi nejdůležitější můžeme zařadit zejména teplotu a tlak taveniny ve válci vstřikovací jednotky, teplotu a tlak ve vstřikovací formě, dobu vstřiku, dobu chlazení aj. Regulace vstřikovaného procesu umožňuje využít naměřených hodnot pro korekci případných odchylek od nastavených hodnot. Snahou je omezit lidský faktor v procesu vstřikování na nejmenší míru. U běžných vstřikovacích strojů je zajištěn automatický sled operací.[9]

Stupeň řízení a snadná obsluha stroje je charakteristickým znakem jeho kvality. Stálá reprodukovatelnost technologických parametrů je význačným a nutným faktorem.

Pokud tyto parametry nepřiměřeně kolísají, projeví se to negativně na přesnosti a kvalitě výstřiku.[9]



*Obr. 23. Řídící jednotka*



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 VSTŘIKOVÁNÍ ELASTOMERŮ

Na zatékavost polymerní taveniny, ať už se jedná o termoplast, reaktoplast nebo elastomer, mají vliv nejen procesní parametry jako jsou teplota a tlak, ale i povrch vstřikovací formy resp. jeho drsnost. Abychom mohli stanovit vliv drsnosti na zatékavost, je nutné provést řadu měření a následných statistických vyhodnocení.

### 6.1 Zkušební materiál

Pro porovnání byly použity čtyři různé materiály. Jedná se o směsy používané na výrobu běhounů u pneumatik. Jedná se o směsi 165, 162, 188 a 116. Směsi byly podrobeny RPA testu. Výsledky jsou uvedeny v příloze.

### 6.2 Vstřikovací stroj

#### 6.2.1 Stručný popis

Měření probíhalo na vertikálním vstřikovacím stroji značky REP V27/Y125. Jedná se o stroj pro vstřikování elastomerů. Stroj je vybaven pístovou vstřikovací jednotkou se šnekovou předplastikací. Materiál je do plastikační jednotky vkládán ve formě nařezaných pásků úzkým otvorem.

Horní díl formy je nepohyblivý, spodní díl je napojen na uzavírací jednotku a pohybuje se ve vertikálním směru.

Stroj je vybaven topnými tělesy, které vyhřívají formu a také snímači pro kontrolu nastavené teploty.

Stroj může pracovat v automatickém, poloautomatickém nebo ručním režimu.



Obr. 24. Vstřikovací stroj REP

### 6.2.2 Parametry vstřikovacího stroje

Uzavírací síla	57 kN
Rozměry upínacích desek	300 x 300 mm
Vzdálenost mezi deskami	430 mm
Maximální otevření	495 mm
Vstřikovací tlak	250 MPa
Maximální vstřikovací objem	125 cm <sup>3</sup>
Průměr pístu	40 mm
Průměr šneku	20 mm

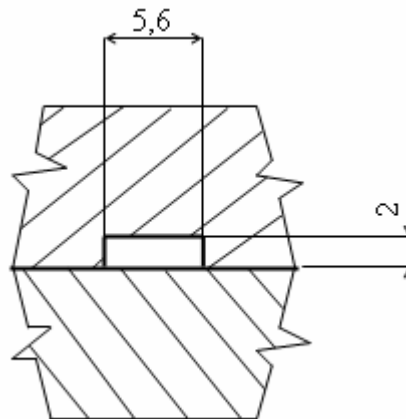
## 6.3 Vstřikovací forma

### 6.3.1 Spodní díl formy

Spodní část formy tvoří deska s dutinou ve tvaru spirály. Uvnitř spirály jsou vyraženy značky s číslicemi pro snazší měření délky zatečení. Vzdálenost mezi značkami je 50 mm. Celková délka spirály je 2000 mm. Výška spirály je  $h = 2$  mm. Šířka spirály je  $t = 5,6$  mm.



Obr. 25. Spodní část formy

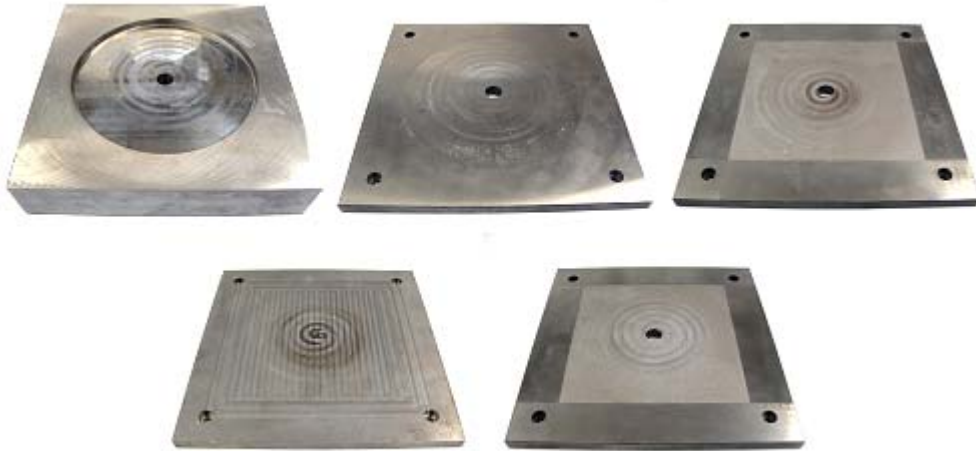


Obr. 26. Geometrie průřezu spirály

### 6.3.2 Horní díl formy

Horní díl formy tvoří upínací deska a vyměnitelné tvarové desky. Pro měření zatékavosti bylo použito pět desek s různými povrchy. Tyto desky se upnou k desce upínací a

během měření se mění. Pouze deska s leštěným povrchem tvoří jak zkušební desku tak desku upínací.



*Obr. 27. Zkušební desky*

*zleva – leštěná, broušená, jemný dezén, frézovaná, hrubý dezén*

### 6.3.3 Drsnosti povrchů jednotlivých desek

Jak už bylo řečeno výše, horní díl formy tvoří desky s různými povrchy a tedy i s odlišnými hodnotami drsností. Jedná se o povrch leštěný, broušený, povrch s jemným dezénem, frézovaný a povrch s hrubým dezénem.

Ke zjištění charakteristických hodnot drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  byl použit přístroj Mitutoyo SJ-301. Jedná se o drsnoměr jehož funkční částí je diamantový hrot snímající povrch.



*Obr. 28. Povrchy desek (leštěný, broušený, jemný dezén, frézovaný, hrubý dezén)*

Výsledky měření jsou uvedeny v tab.1.

Tab. 1. Tabulka hodnot Ra a Rz pro jednotlivé povrchy

	Leštěná		Broušená		Jemný dezén		Frézovaná		Hrubý dezén	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0,04	0,26	0,29	1,62	3,65	30,27	8,79	46,97	17,49	102,1
2	0,05	0,66	0,35	2,35	4,63	28,31	7,94	45,86	13,70	86,91
3	0,04	0,85	0,33	2,13	3,99	23,45	8,72	56,34	16,96	88,98
4	0,07	0,52	0,39	2,05	3,94	27,33	7,75	39,76	15,51	108,8
5	0,05	0,43	0,37	2,13	3,51	21,85	7,66	39,89	12,37	75,89
6	0,07	0,72	0,38	2,45	4,41	27,52	5,05	33,89	14,97	93,97
7	0,04	0,26	0,38	2,17	3,33	24,51	7,86	43,62	15,90	90,26
8	0,04	0,69	0,39	2,74	3,43	17,62	6,44	37,73	19,65	105,7
9	0,03	0,40	0,36	2,64	4,04	23,54	4,69	23,69	14,35	80,16
10	0,04	0,46	0,28	2,06	4,51	26,85	6,35	32,26	15,69	102,7
$\bar{x}$	<b>0,05</b>	<b>0,53</b>	<b>0,35</b>	<b>2,23</b>	<b>3,95</b>	<b>25,13</b>	<b>7,13</b>	<b>40,00</b>	<b>15,66</b>	<b>93,55</b>
$\sigma$	<b>0,01</b>	<b>0,18</b>	<b>0,04</b>	<b>0,31</b>	<b>0,44</b>	<b>3,51</b>	<b>1,36</b>	<b>8,55</b>	<b>1,95</b>	<b>10,51</b>

## 6.4 Proces vstřikování

### 6.4.1 Parametry procesu vstřikování

Doba vstřikovacího cyklu  $t = 200s$

plnění  $t_1 = 35s$

vulkanizace  $t_2 = 150s$

otevírání a zavírání formy  $t_3 = 15s$

Teplota formy	$T_1 = 170^\circ\text{C}$
Teplota pracovního válce	$T_2 = 80^\circ\text{C}$
Teplota vstřikovací komory	$T_3 = 85^\circ\text{C}$

#### 6.4.2 Zkušební vzorek

Materiál se ve formě pásků vkládal otvorem do vstřikovací jednotky tvořené šnekem určeným pro plastikaci a homogenizaci taveniny a pístem, pomocí něhož je tavenina vstřikována do formy. Výsledkem vstřikovacího procesu byl zkušební vzorek ve tvaru spirály. Po vyjmutí se nechal vzorek vychladnout a následně došlo k přeměření délky spirály na jejímž základě se vyhodnocovala zatékavost elastomerní taveniny.



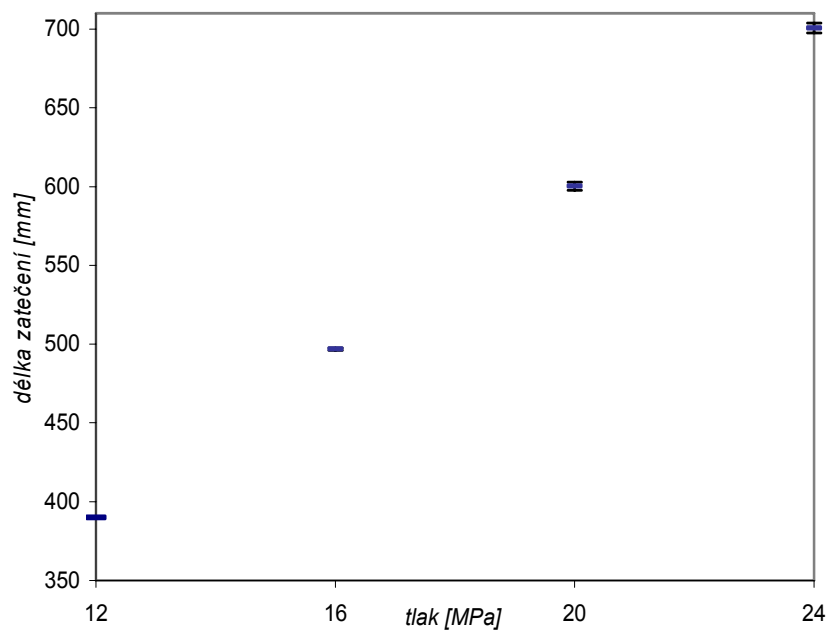
Obr. 29. Zkušební vzorek

#### 6.5 Výsledky měření

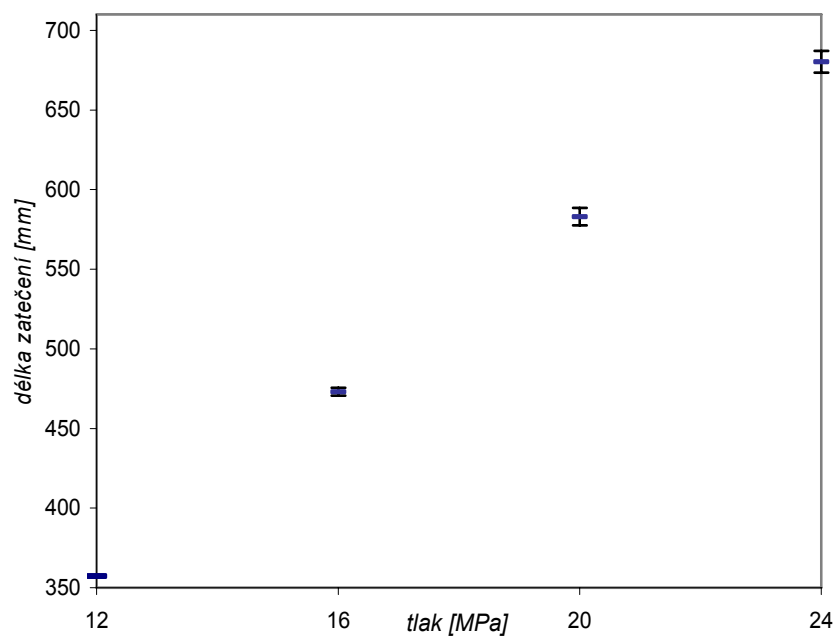
**Legenda:**

- střední hodnota
- ┌ směřodatná odchylka

## 6.5.1 Závislost zatékavost na tlaku u směsi 165

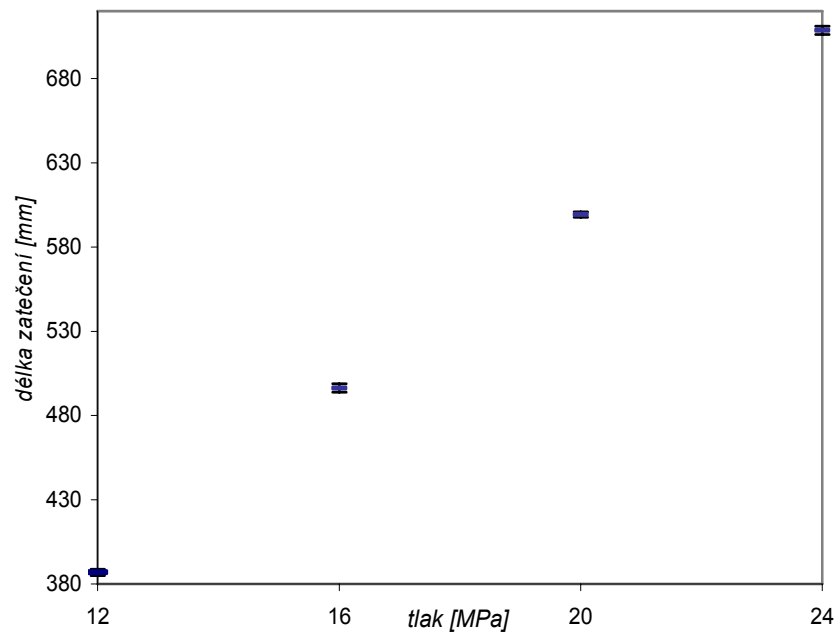


Obr. 30. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, leštěná deska)

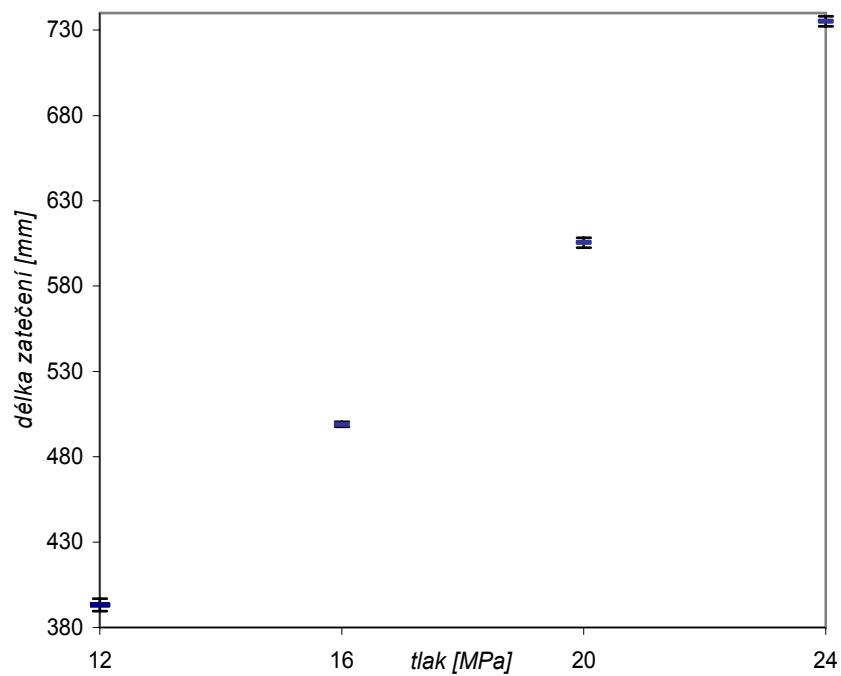


Obr. 31. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, broušená deska)

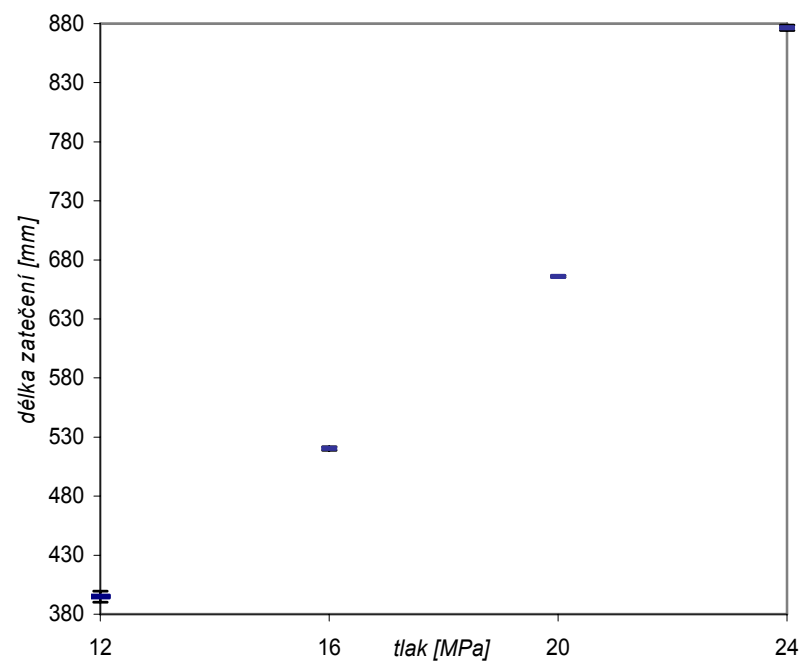




Obr. 32. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, deska s jemným dezénem)

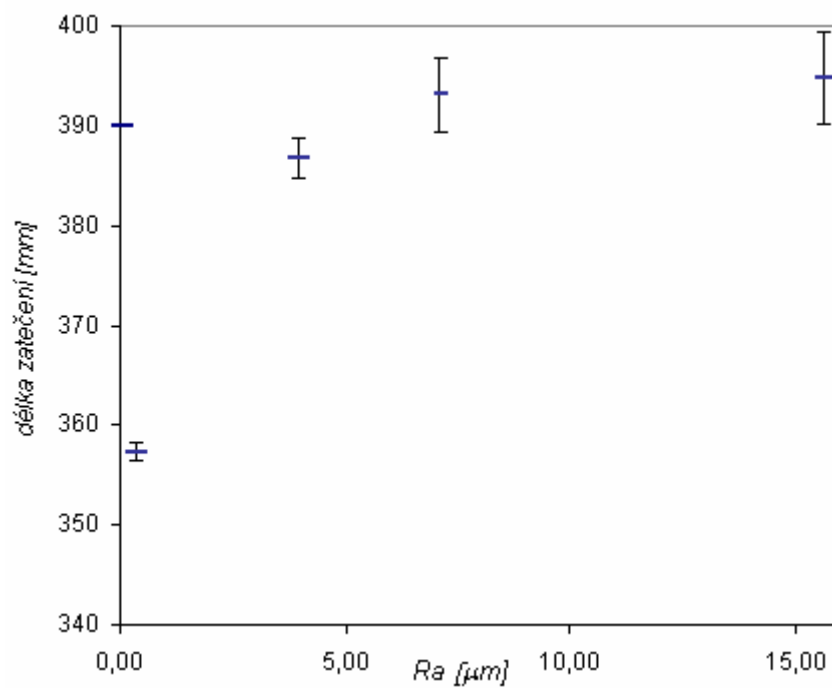


Obr. 33. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, frézovaná deska)

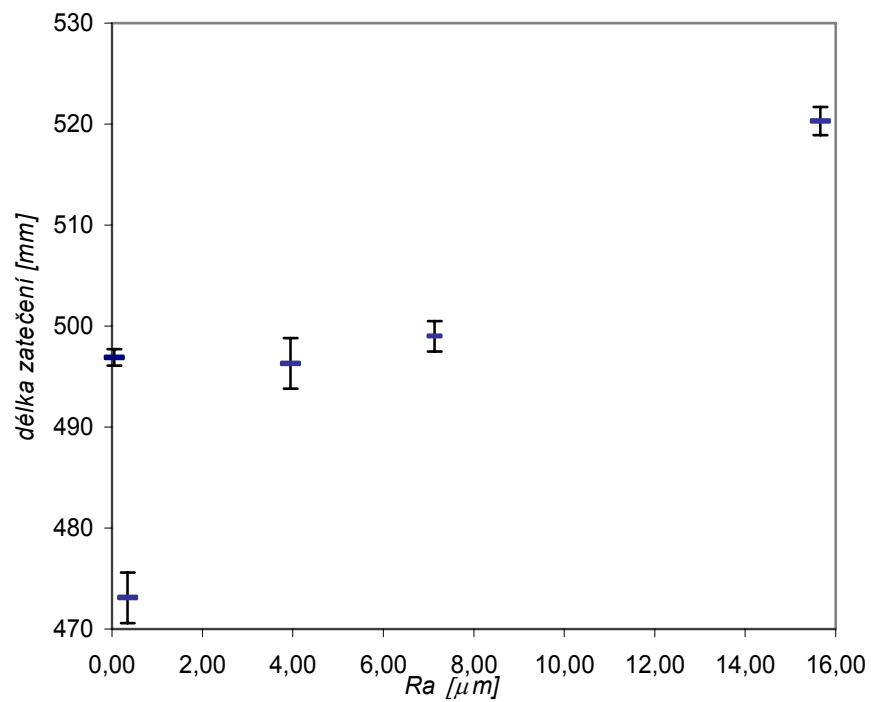


Obr. 34. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, deska s hrubým dezénem)

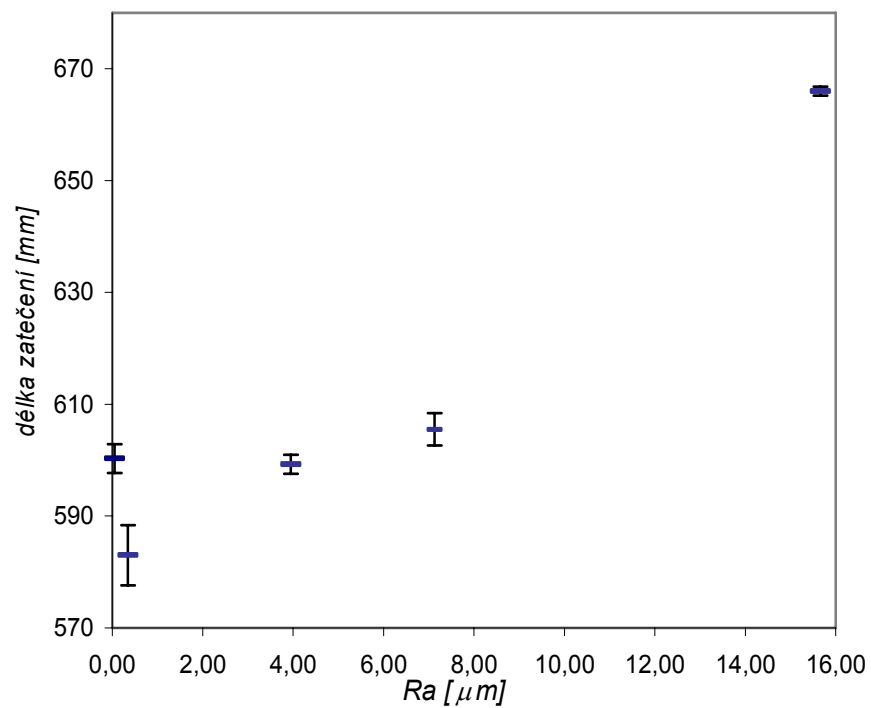
### 6.5.2 Závislost drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 165



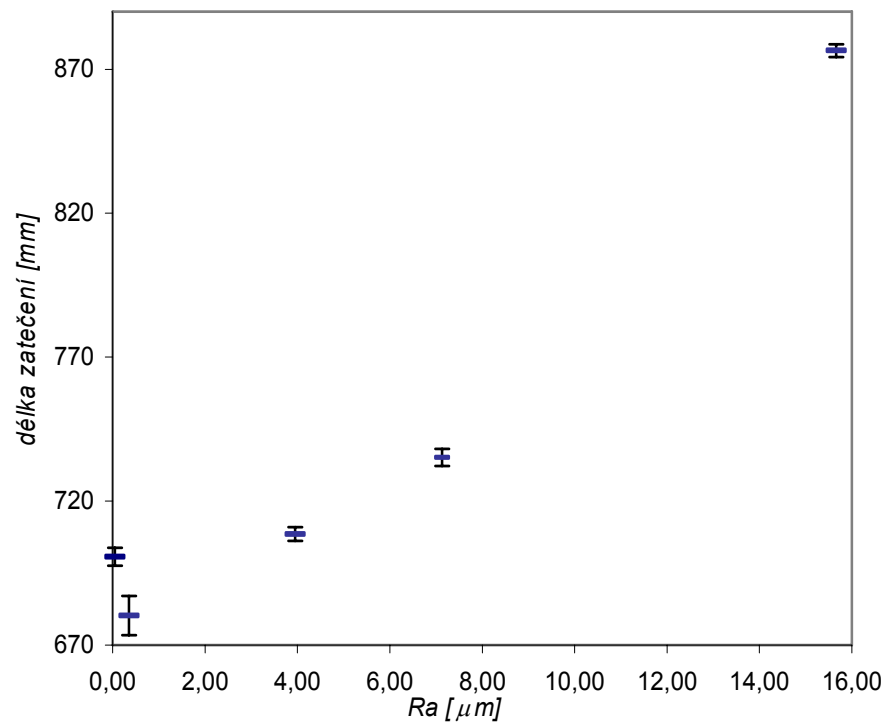
Obr. 35. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 12MPa)



Obr. 36. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 16MPa)

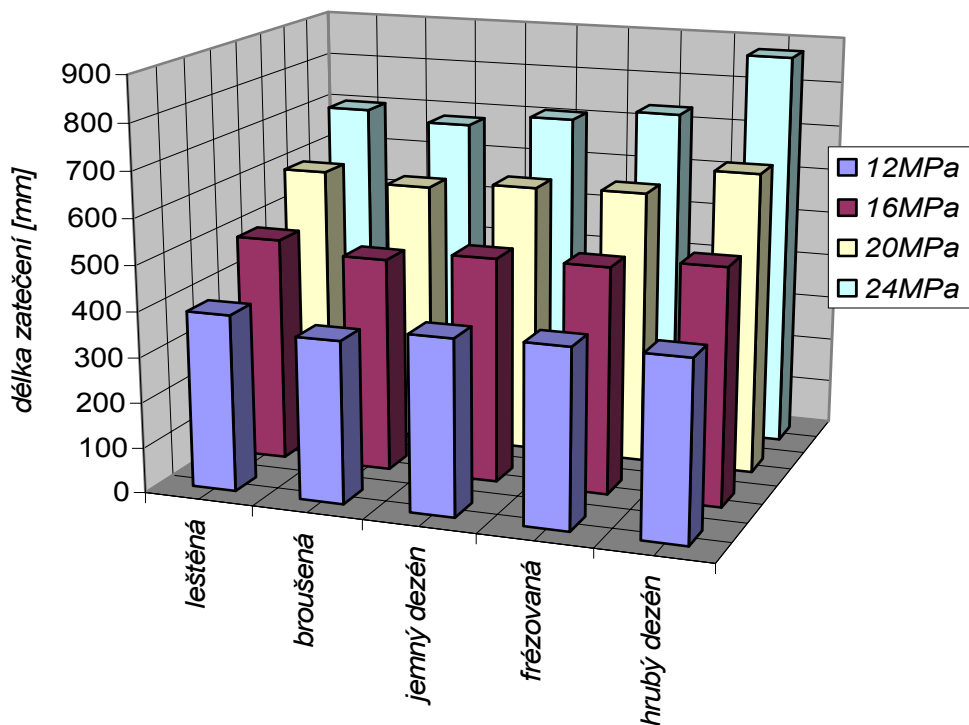


Obr. 37. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 20MPa)



Obr. 38. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 24MPa)

## 6.5.3 Porovnání závislosti tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 165



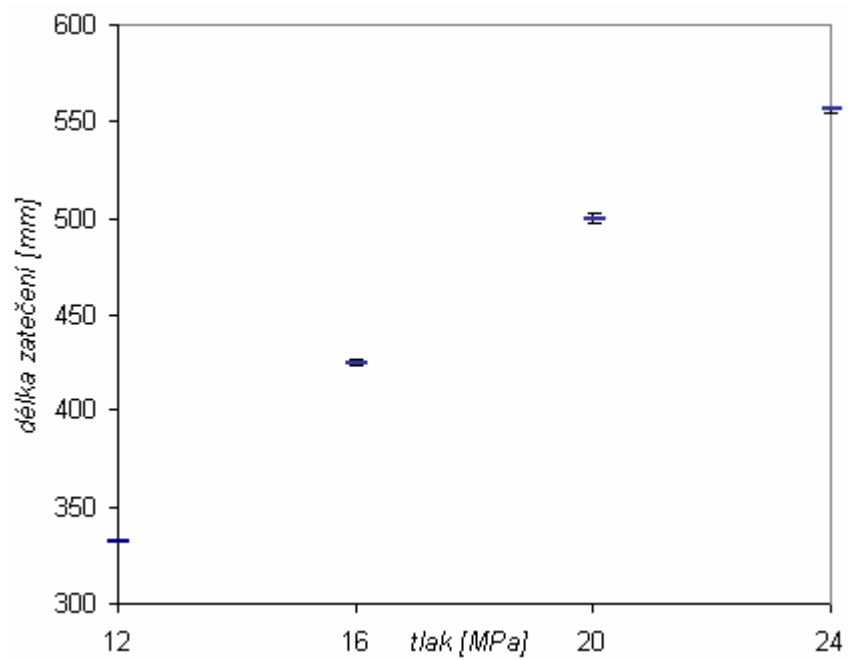
Obr. 39. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

Tab. 2. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

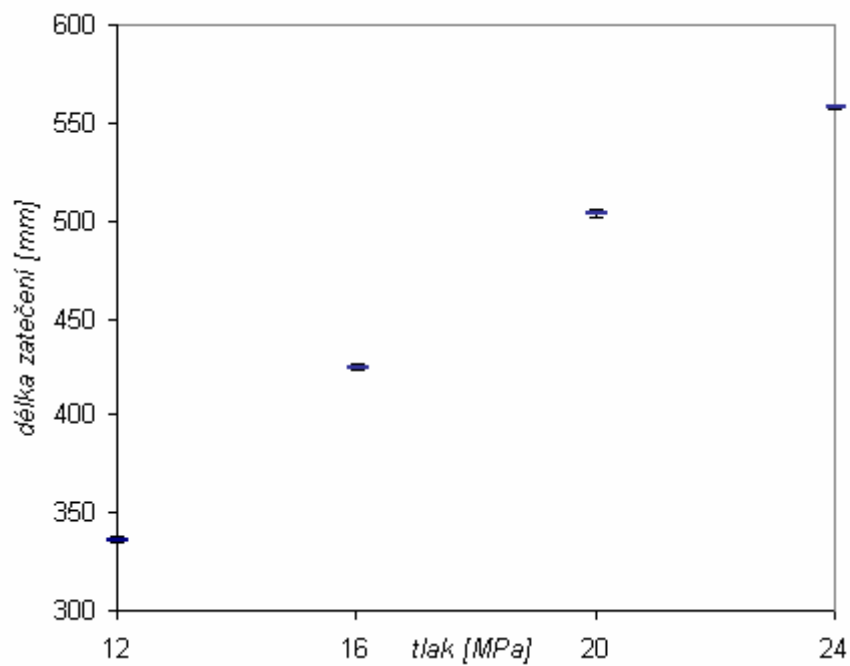
	leštěná (Ra 0,05)	broušená (Ra 0,35)	jemný dezén (Ra 3,95)	frézovaná (Ra 7,13)	hrubý dezén (Ra 15,66)
12MPa	390,0±0,0	357,3±0,9	386,8±2,0	393,2±3,7	394,8±4,7
16MPa	496,9±0,8	473,1±2,5	496,3±2,5	499,0±1,5	520,3±1,4
20MPa	600,3±2,6	583,0±5,4	599,3±1,7	605,5±2,9	666,0±0,8
24MPa	700,7±3,1	680,3±6,8	708,6±2,4	735,2±3,0	876,5±2,2

U směsi 165 má zatékavost vzestupnou tendenci jak se zvyšujícím se tlakem, tak se zvyšující se drsností povrchu. Z tabulky je patrné, že závislost zatékavosti na drsnosti povrchu se projevuje hlavně při vyšších tlacích. U tlaku 12MPa je rozdíl délky zatečení mezi leštěným povrchem a hrubým dezénem 1,2%, zatímco u tlaku 24MPa je to vzestup o 25,1%.

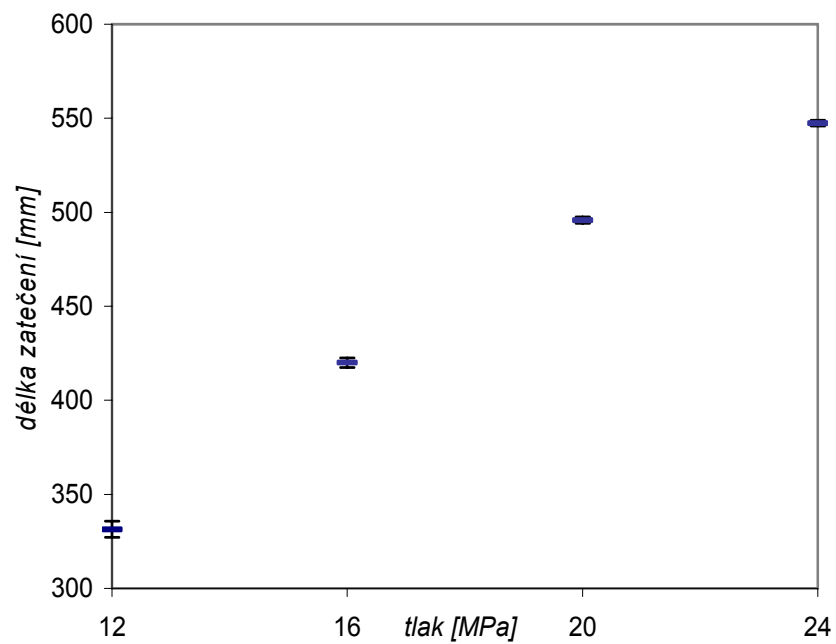
#### 6.5.4 Závislost zatékavosti na tlaku u směsi 162



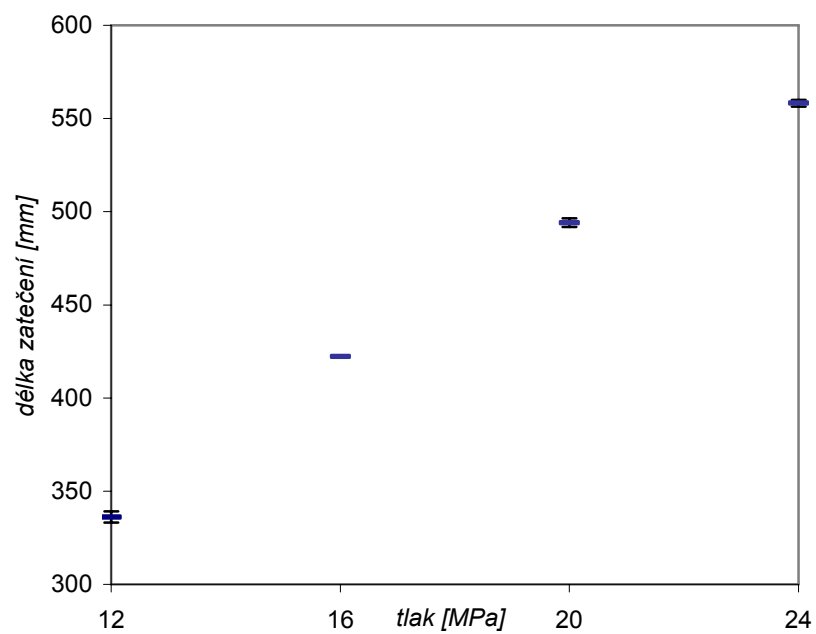
Obr. 40. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, leštěná deska)



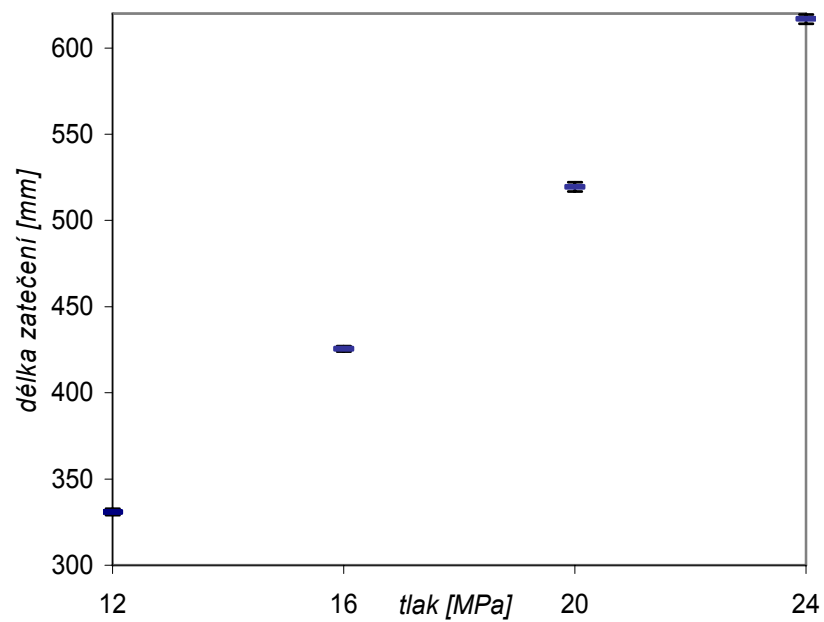
Obr. 41. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, broušená deska)



Obr. 42. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, deska s jemným dezénem)

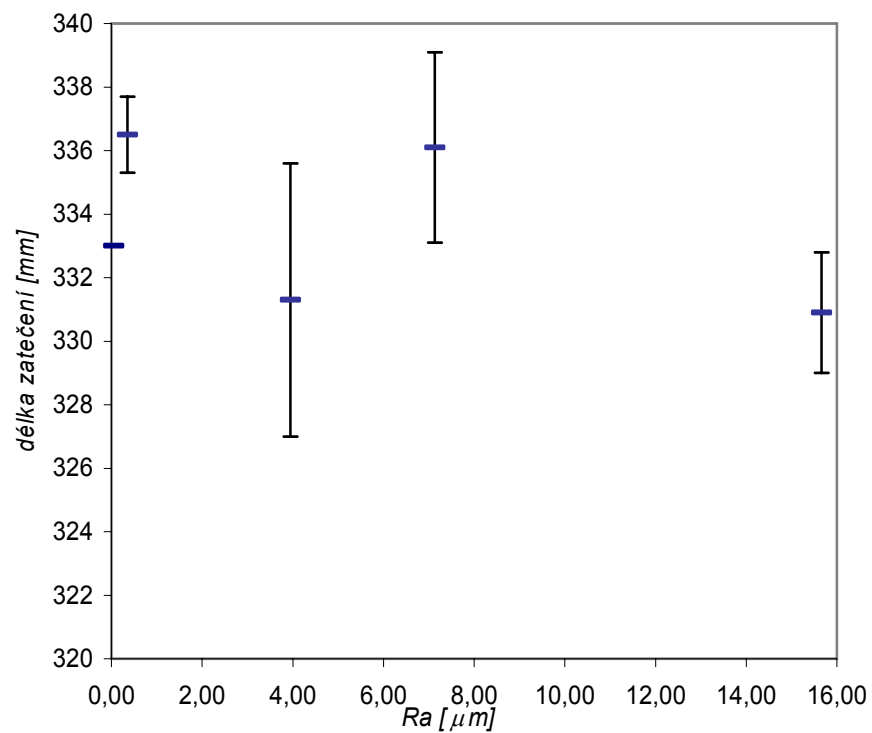


Obr. 43. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, frézovaná deska)



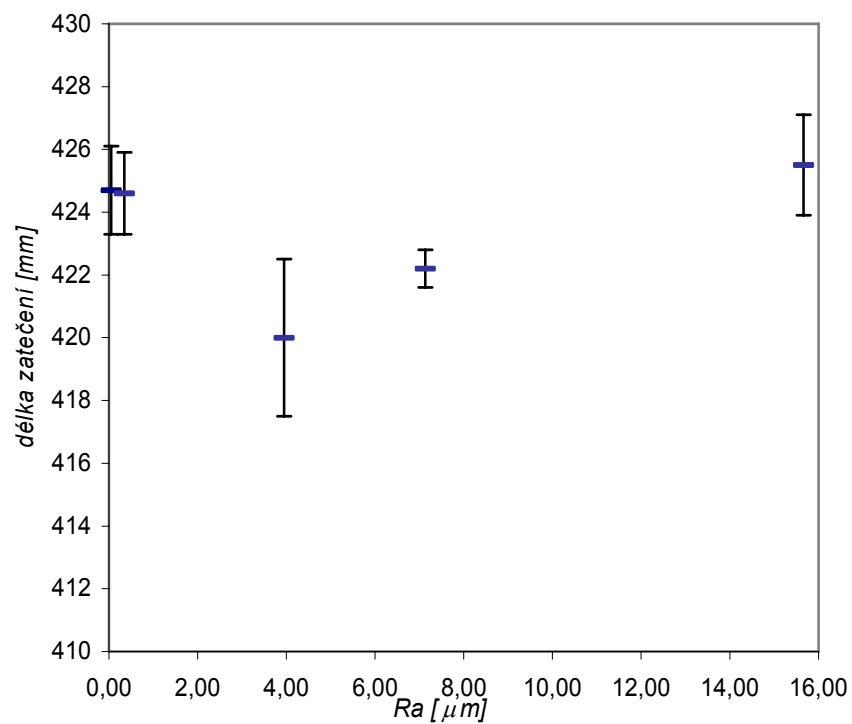
Obr. 44. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, deska s hrubým dezénem)

### 6.5.5 Závislost zatékavosti na drsnosti povrchu u směsi 162

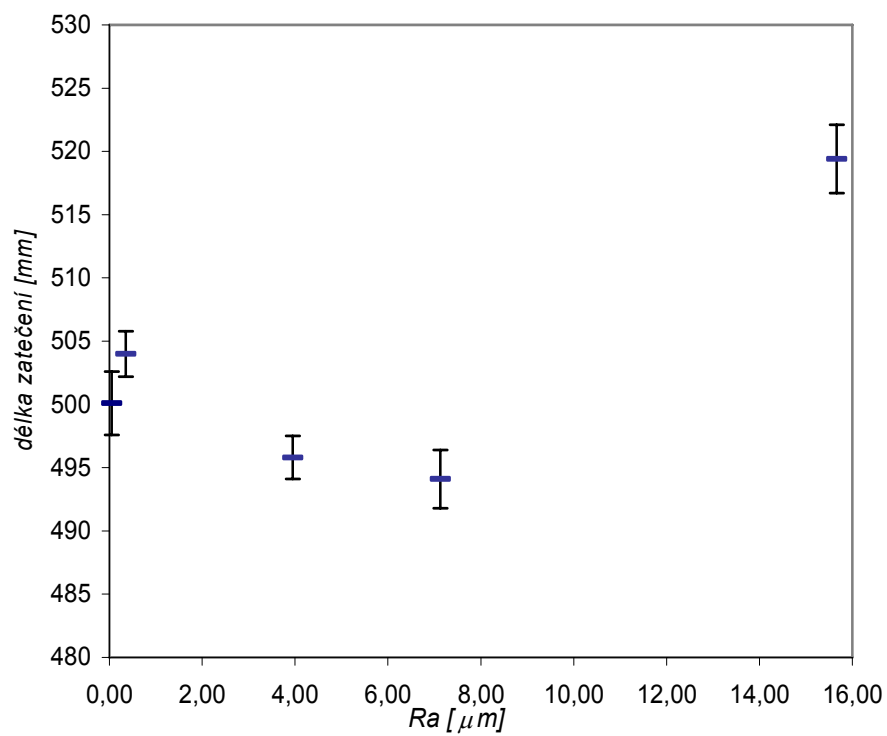


Obr. 45. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 12MPa)

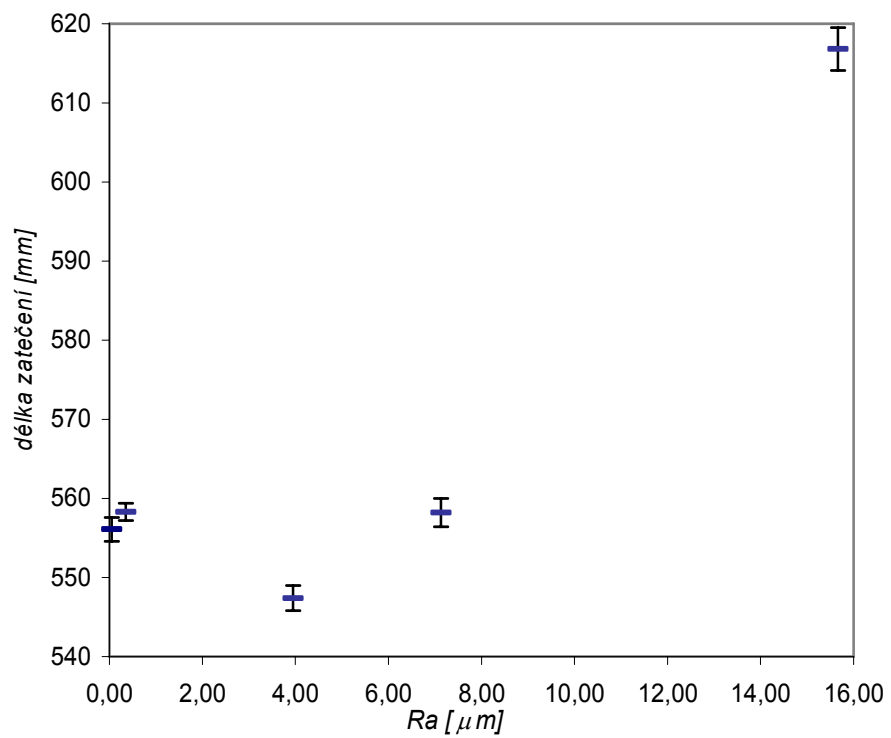




Obr. 46. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 16MPa)

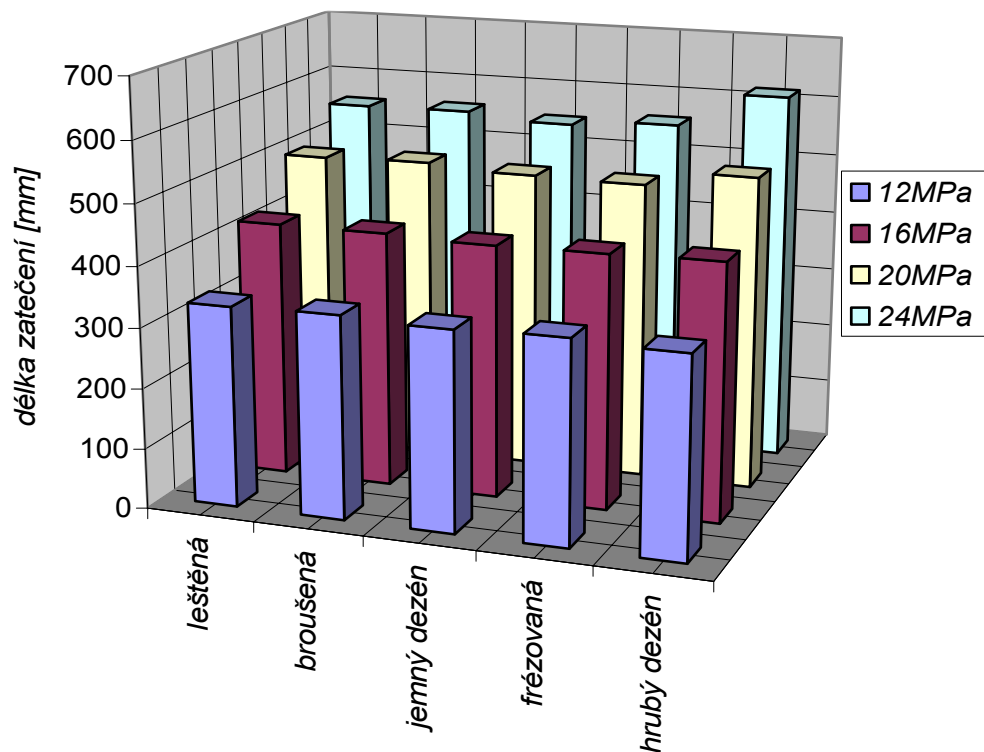


Obr. 47. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 20MPa)



Obr. 48. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 24MPa)

## 6.5.6 Porovnání závislosti tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 162



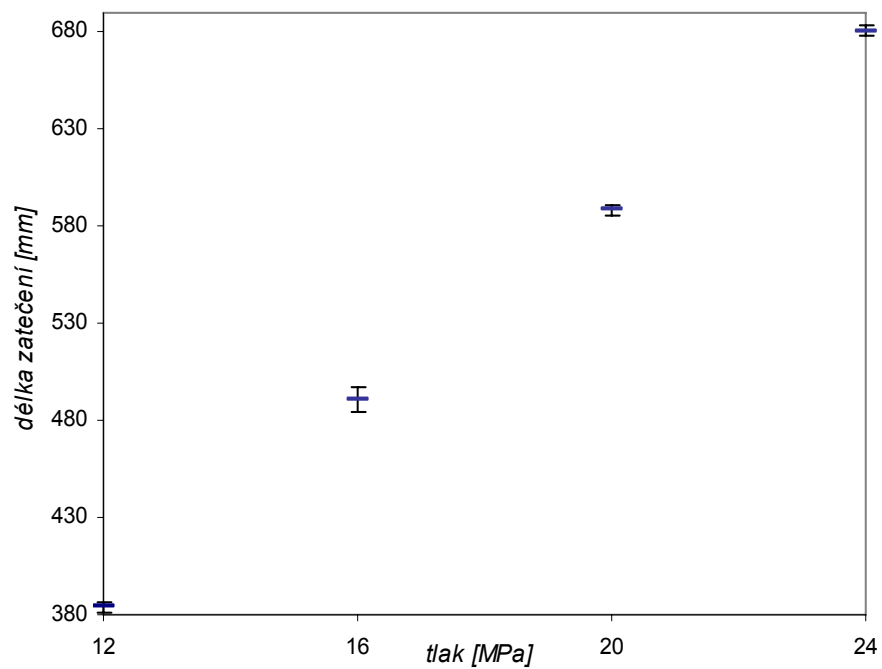
Obr. 49. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

Tab. 3. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

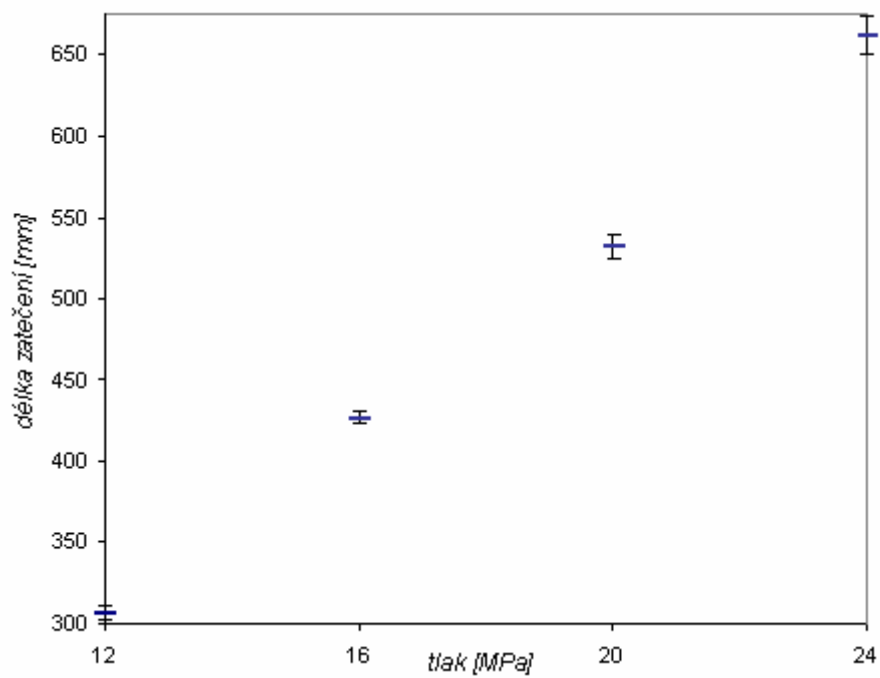
	leštěná (Ra 0,05)	broušená (Ra 0,35)	jemný dezén (Ra 3,95)	frézovaná (Ra 7,13)	hrubý dezén (Ra 15,66)
12MPa	333,0±0,0	336,5±1,2	331,3±4,3	336,1±3,0	330,9±1,9
16MPa	424,7±1,4	424,6±2,3	420,0±2,5	422,2±0,6	425,5±1,6
20MPa	500,1±2,5	504,0±1,8	495,8±1,7	494,1±2,3	519,4±2,7
24MPa	556,1±1,5	558,3±1,1	547,4±1,6	558,2±1,8	616,8±2,7

I zde roste délka zatečení s rostoucí drsností povrchu. Opět se rozdíly projevují více při vyšších tlacích. Zatímco u tlaku 12MPa zatékavost u hrubého dezénu v porovnání s leštěným povrchem dokonce klesla o 0,6%, u tlaku 16MPa už vzrostla o 0,2%, u tlaku 20MPa o 3,9% a konečně u tlaku 24MPa byl nárůst o 10,9%.

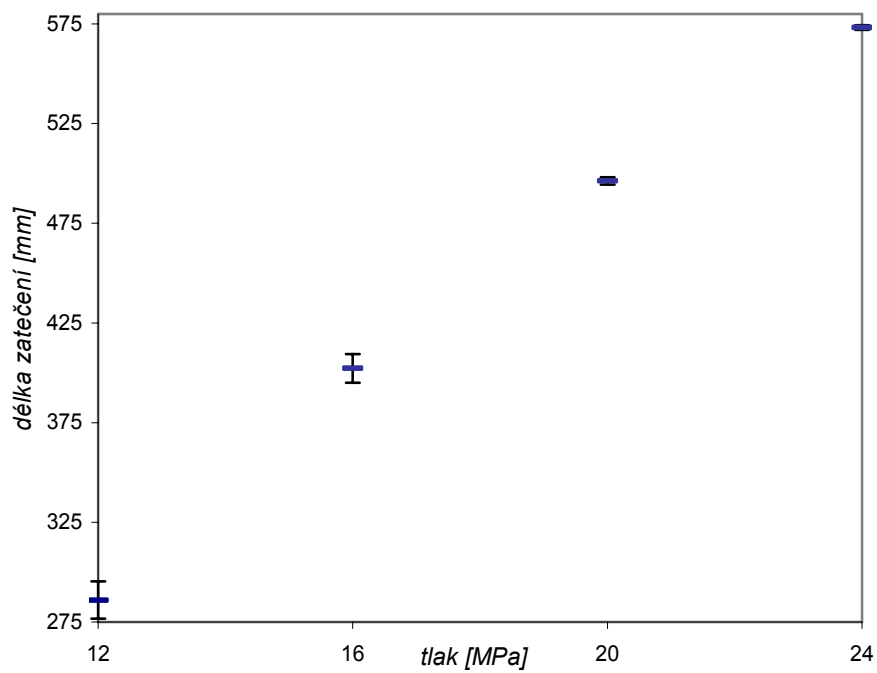
## 6.5.7 Závislost zatékavosti na tlaku u směsi 188



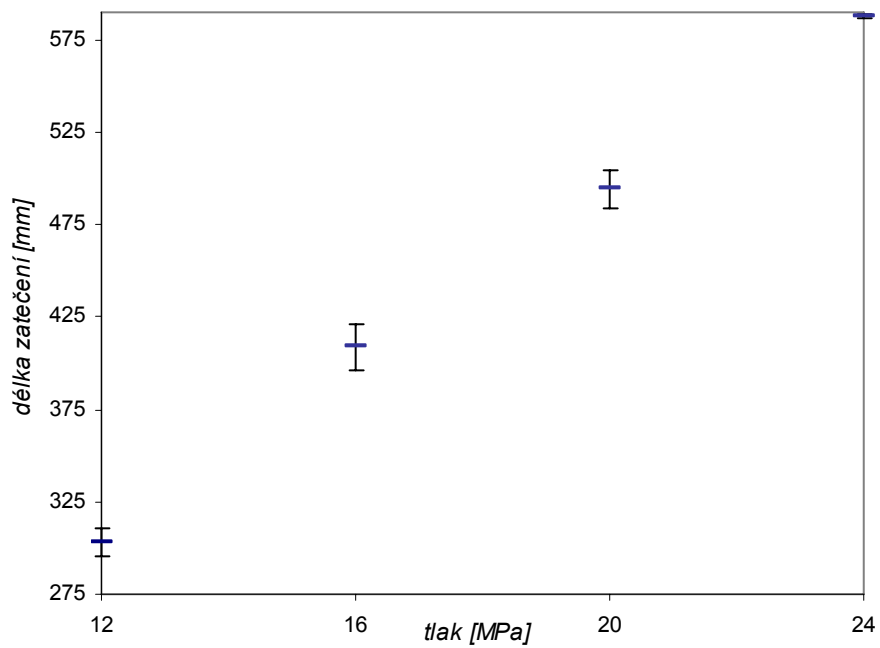
Obr. 50. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, leštěná deska)



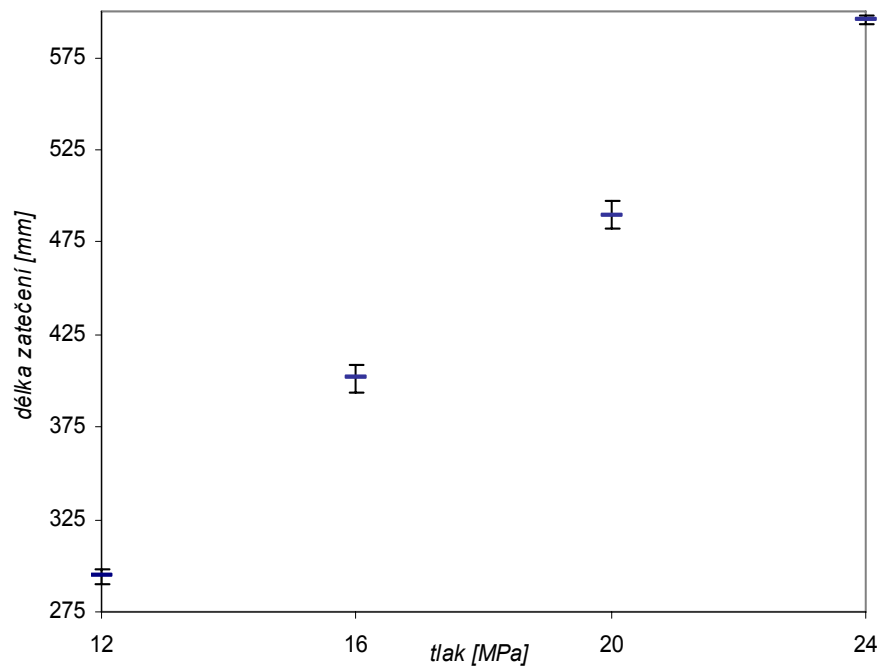
Obr. 51. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, broušená deska)



Obr. 52. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, deska s jemným dezénem)

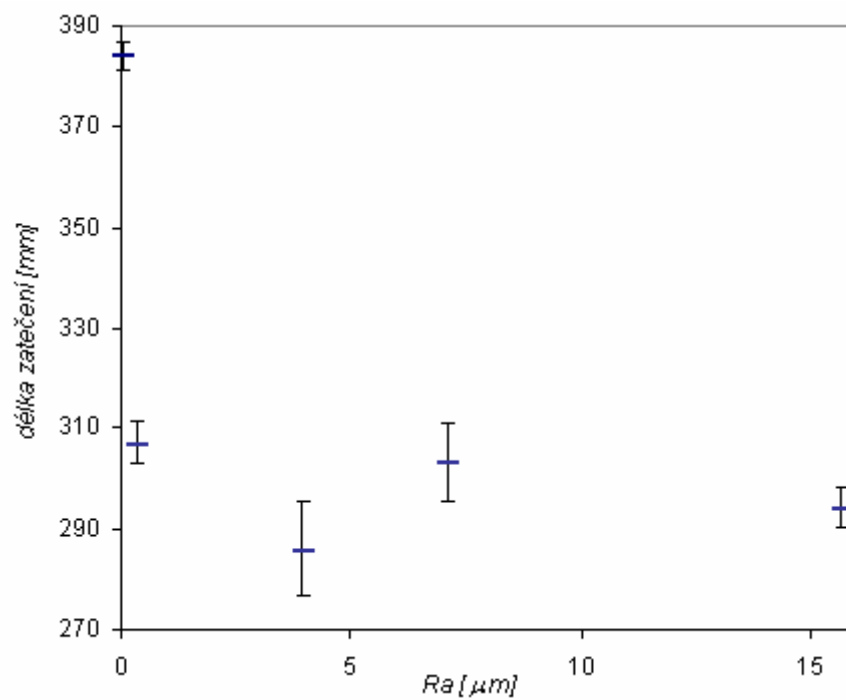


Obr. 53. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, frézovaná deska)

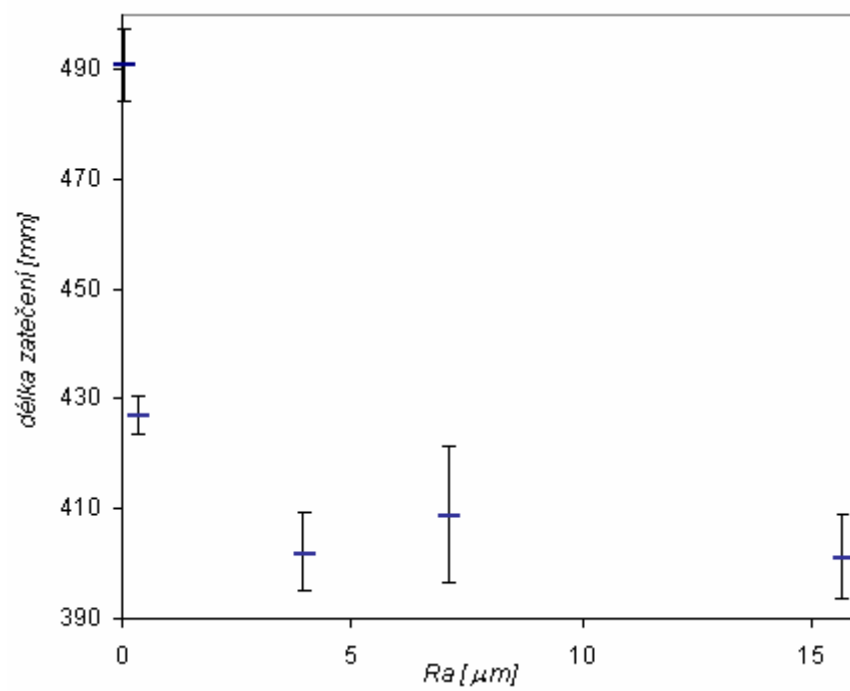


Obr. 54. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, deska s hrubým dezénem)

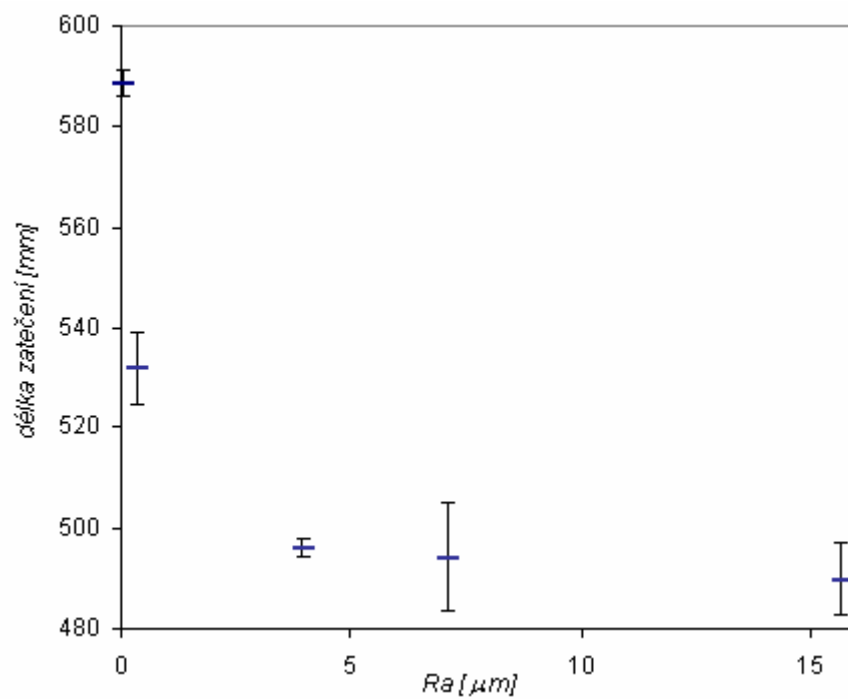
### 6.5.8 Závislost zatékavosti na drsnosti povrchu u směsi 188



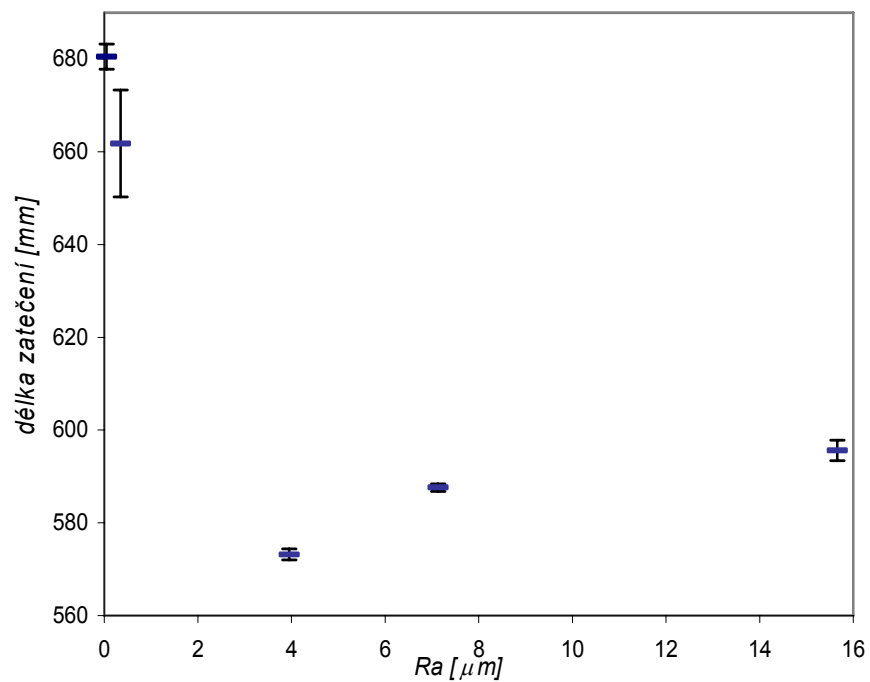
Obr. 55. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 12MPa)



Obr. 56. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 16MPa)

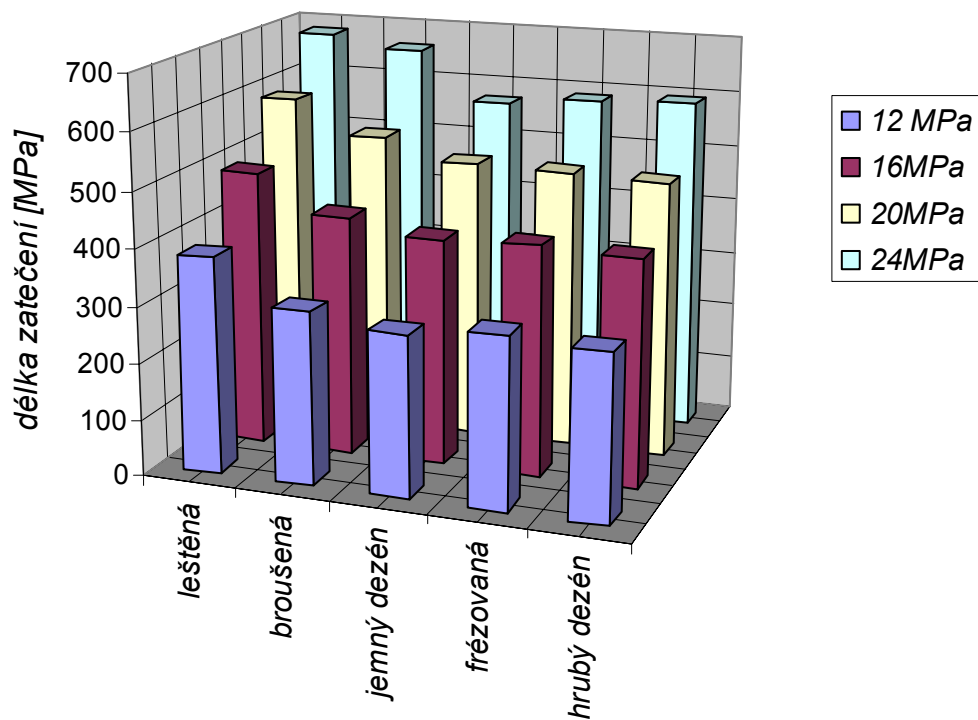


Obr. 57. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 20MPa)



Obr. 58. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 24MPa)

### 6.5.9 Porovnání závislostí tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 188



Obr. 59. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

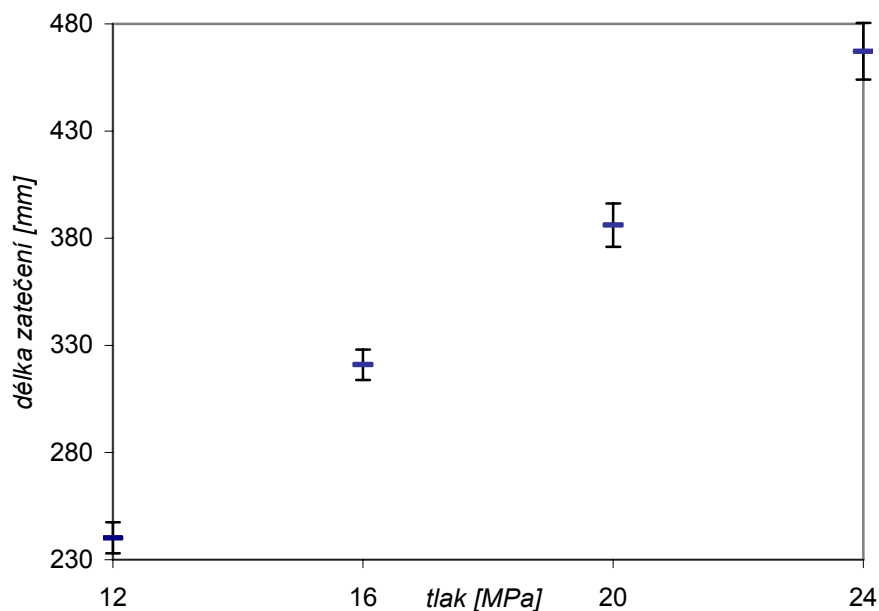


Tab. 4. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

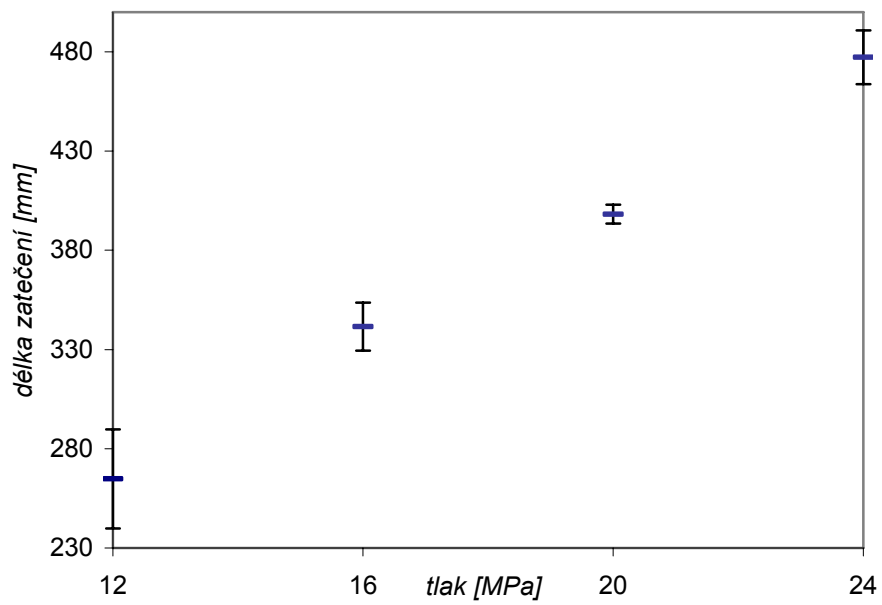
	leštěná (Ra 0,05)	broušená (Ra 0,35)	jemný dezén (Ra 3,95)	frézovaná (Ra 7,13)	hrubý dezén (Ra 15,66)
12 MPa	384,1±2,7	307,0±4,2	286,0±9,3	303,2±7,8	294,2±3,9
16MPa	491,0±6,6	427,0±3,5	402,2±7,2	408,8±12,4	401,2±7,7
20MPa	588,6±2,7	532,0±7,3	496,2±1,8	494,3±10,7	489,9±7,1
24MPa	680,5±2,7	661,8±11,5	573,2±1,2	587,6±0,8	595,6±2,2

Jak ve výsledném grafu, tak v tabulce hodnot můžeme vidět, že směs 188 se chová naprosto odlišně od předchozích směsí. Zatekavost má tendenci růst s klesající drsností povrchu. Může to být vlivem odlišného složení směsí. Bohužel však nemám k dispozici složení směsí, takže nemůžu posoudit vliv jednotlivých složek na chování taveniny při toku.

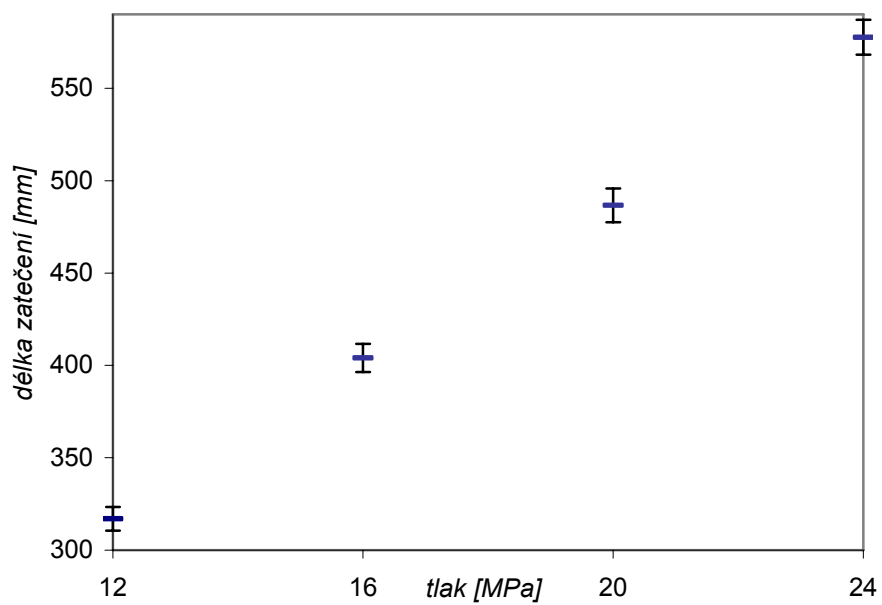
#### 6.5.10 Závislost zatekavost na tlaku u směsi 116



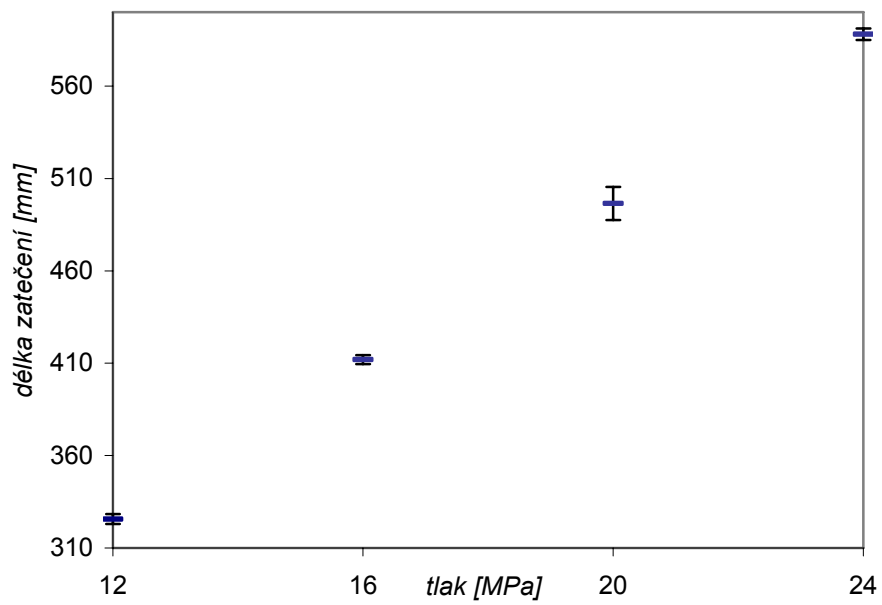
Obr. 60. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, leštěná deska)



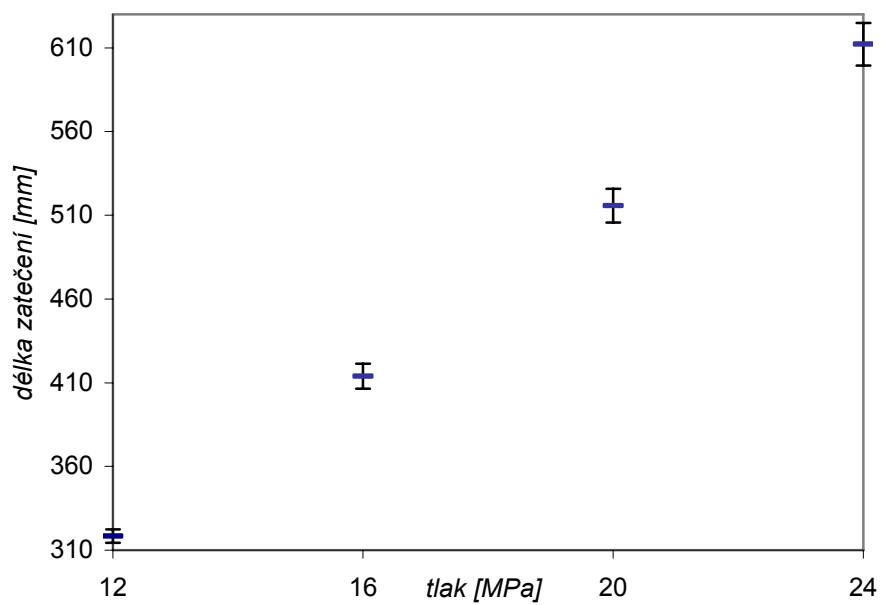
Obr. 61. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, broušená deska)



Obr. 62. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, deska s jemným dezénem)

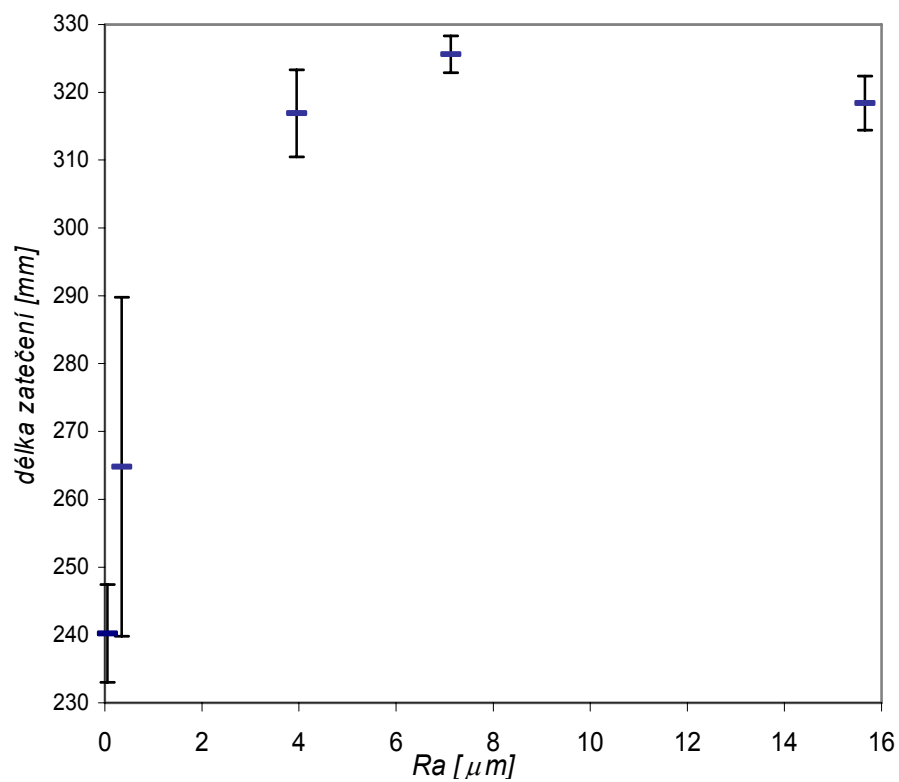


Obr. 63. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, frézovaná deska)

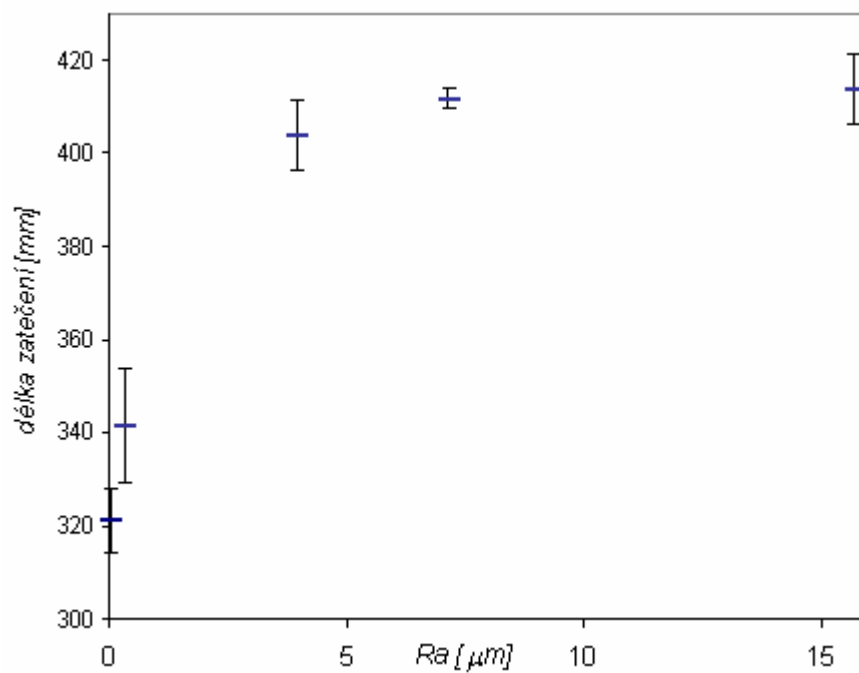


Obr. 64. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, deska s hrubým dezénem)

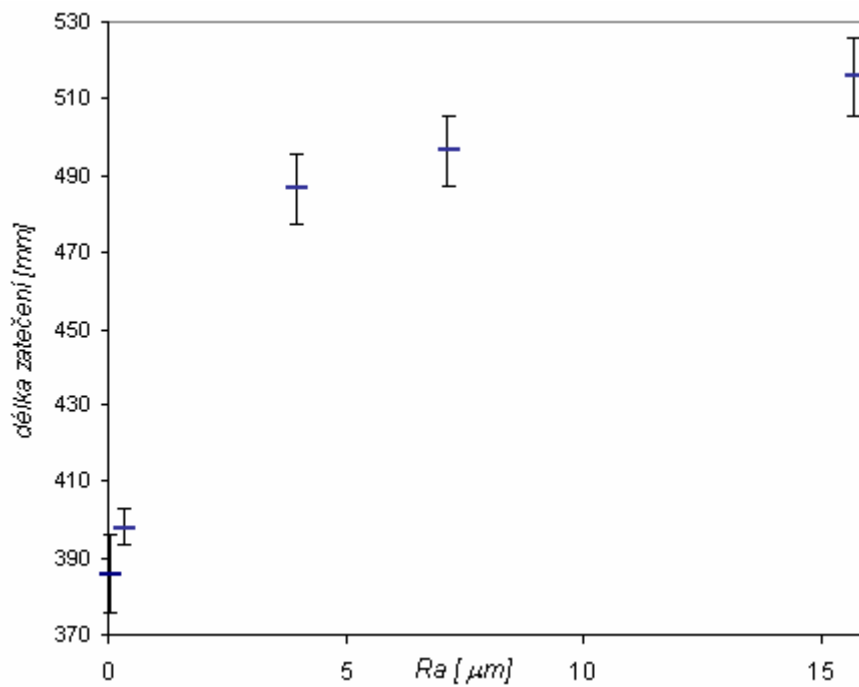
## 6.5.11 Závislost zatékavosti na drsnosti povrchu u směsi 116



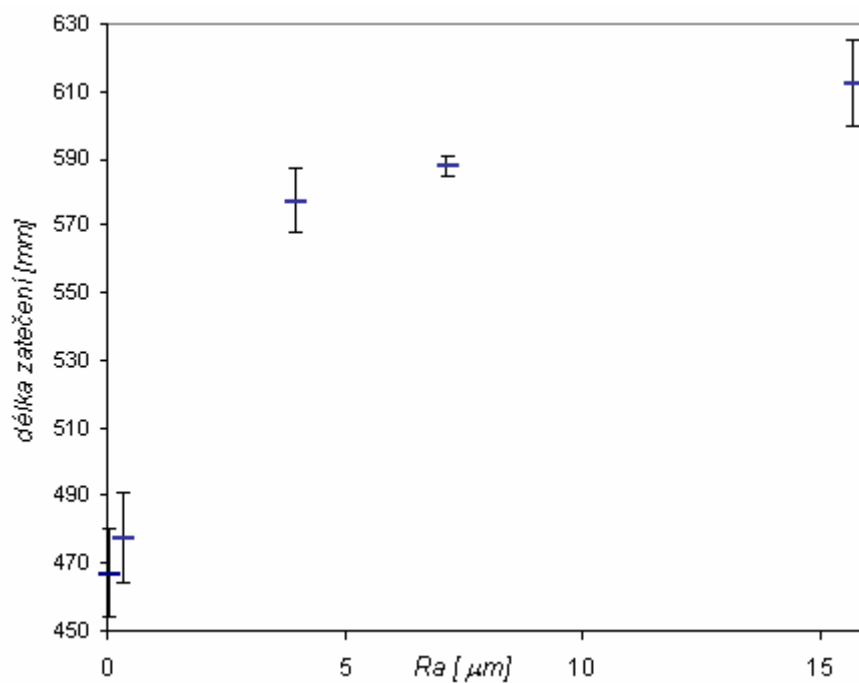
Obr. 65. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 12MPa)



Obr. 66. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 16MPa)

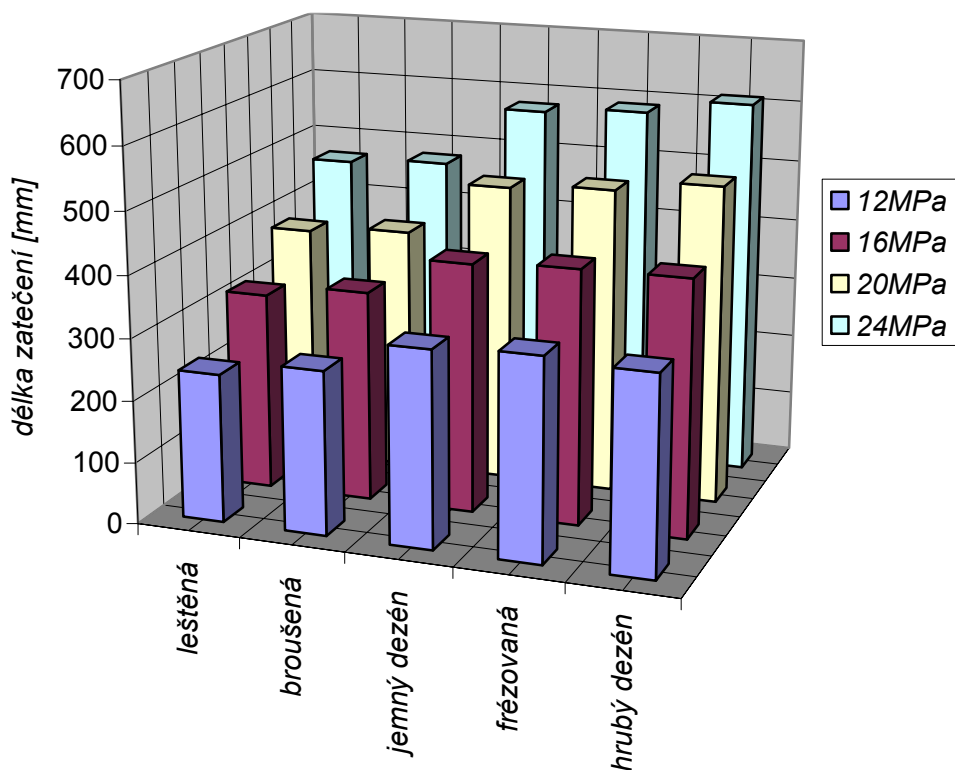


Obr. 67. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 20MPa)



Obr. 68. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 24MPa)

## 6.5.12 Porovnání závislosti tlaku a drsnosti povrchu na zatékavosti u směsi 116



Obr. 69. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

Tab. 5. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích

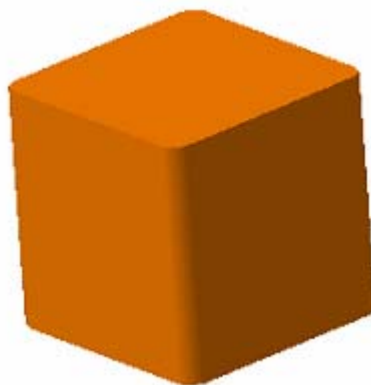
	leštěná (Ra 0,05)	broušená (Ra 0,35)	jemný dezén (Ra 3,95)	frézovaná (Ra 7,13)	hrubý dezén (Ra 15,66)
12MPa	240,2±7,2	264,8±25,0	316,9±6,4	325,6±2,7	318,4±4,0
16MPa	321,0±7,1	341,5±12,1	404,0±7,6	412,0±2,4	413,9±7,4
20MPa	386,1±10,2	398,2±4,8	486,6±9,2	496,4±9,0	515,8±10,1
24MPa	467,2±13,2	477,3±13,5	577,6±9,4	588,1±3,1	612,2±12,7

Stejně jako u prvních dvou směsí i zde zatékavost roste s rostoucí drsností povrchu. Procentuelní rozdíl zatečení mezi leštěnou deskou a deskou s hrubým povrchem je téměř stejný u všech tlaků (u 12MPa 32,5%, u 16MPa 28,9%, u 20MPa 33,5% a u 24MPa 31%).

## 7 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

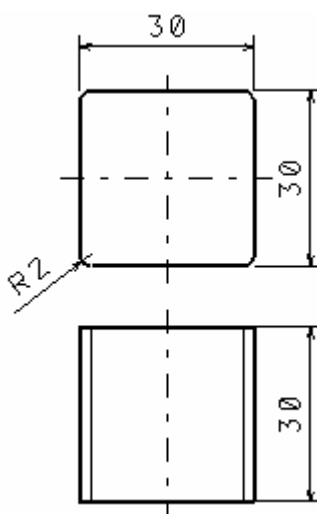
Ve druhé části mé diplomové práce jsem se zabýval konstrukcí vstřikovací formy pro tělíska z elastomeru. Hlavním úkolem této části diplomové práce bylo navrhnout geometrii vtokového kanálu tak, aby se při průchodu tavenina co možná nejvíce ohřála.

### 7.1 Vstřikované tělísko



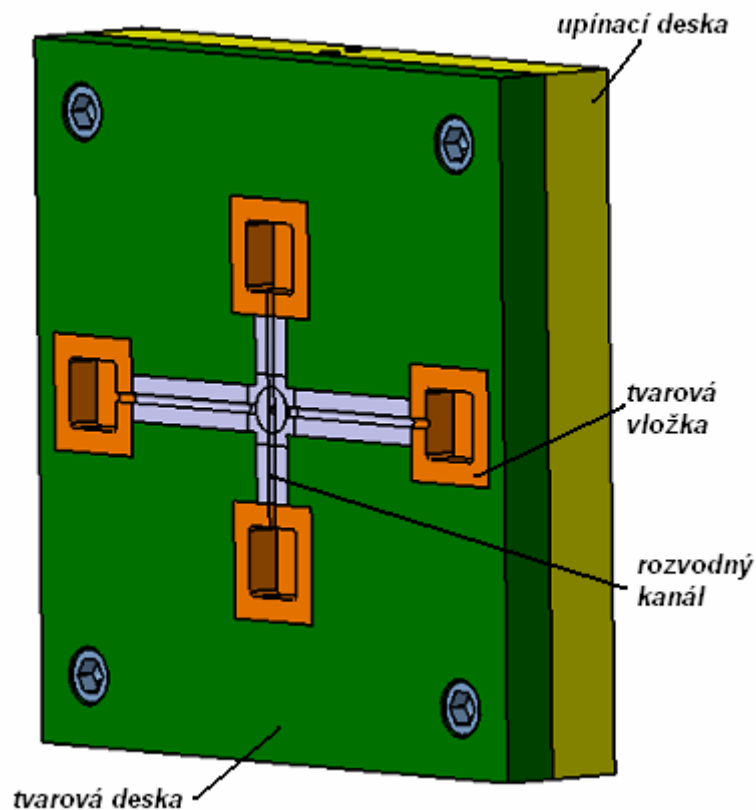
Obr. 70. Vstřikované tělísko

Jedná se o pryžovou krychli o rozměrech 30x30x30mm se zaoblenými hranami s rádiusem 2 mm.



Obr. 71. Rozměry tělíska

## 7.2 Horní díl formy



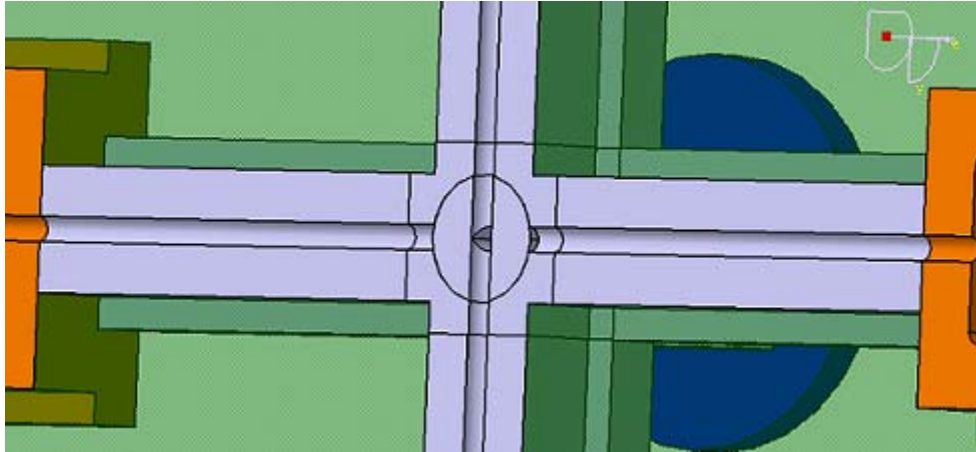
Obr. 72. Horní díl formy

Horní díl formy tvoří tvarová a upínací deska. Forma je čtyřnásobná, má tedy čtyři dutiny formy, ke kterým vedou rozvodné kanály. Ty jsou tvořeny vložkami. Vložky jsou vyměnitelné, lze tedy vstříkovat s různými geometriemi rozvodných kanálů. Jelikož jde o formu pro zkušební účely, kanály spojující protilehlé dutiny mají různou délku.

### 7.2.1 Rozvodný kanál

Jak už bylo řečeno výše, rozvodný kanál je sestaven z vložek viz obr.71. Do vložky na středu je vsunuta otočná vtoková vložka, která nám umožní vstříkování pouze do protilehlých dutin. Tím ušetříme materiál a zároveň můžeme porovnávat vliv délky kanálů na vstříkování nezávisle na sobě.

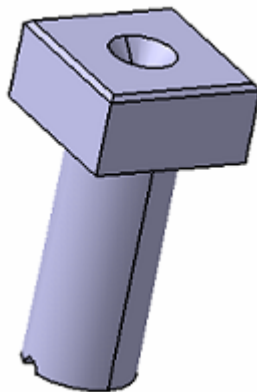




*Obr. 73. Rozvodný kanál*

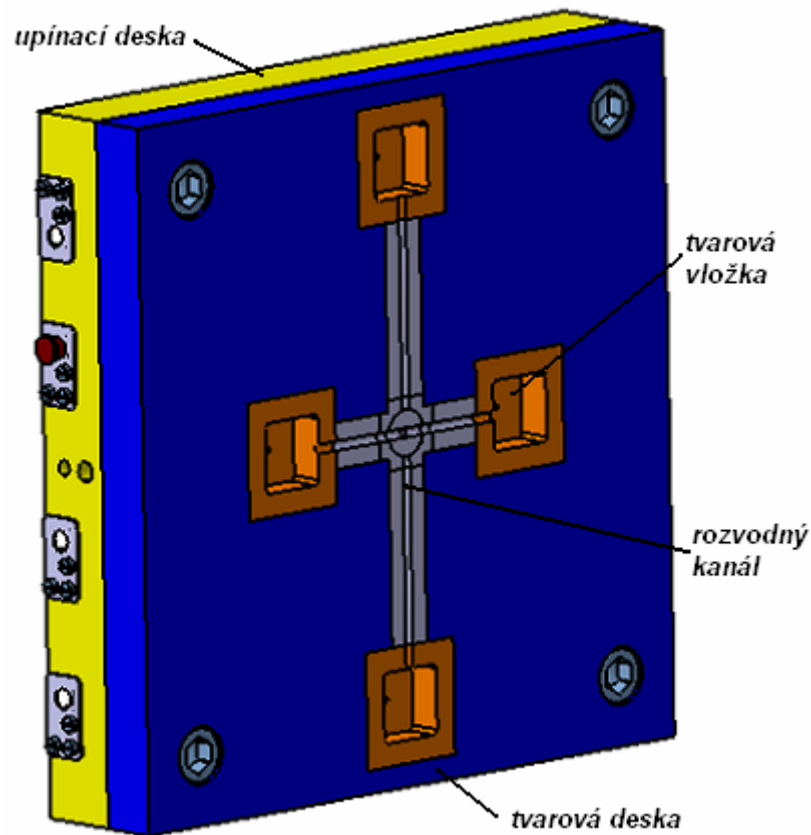
### 7.2.2 Vtoková vložka

Vzhledem k tomu, že se bude muset s vložkou otáčet, je tedy praktičtější když má vložka horní část ve tvaru čtverce a ne kruhu. Mohu tak vložku bez větších problémů otočit přesně o požadovaných  $90^\circ$ .



*Obr. 74. Vtoková vložka*

### 7.3 Spodní díl formy



Obr. 75. Spodní díl formy

Stejně jako horní díl i spodní díl se skládá za dvou desek – upínací a tvarové. Tvarová deska spodního dílu je stejná jako tvarová deska horního dílu. Naproti tomu spodní upínací deska oproti té horní má na jedné své straně dutiny pro teplotní čidla a jejich přívodní kabely viz. obr.74.

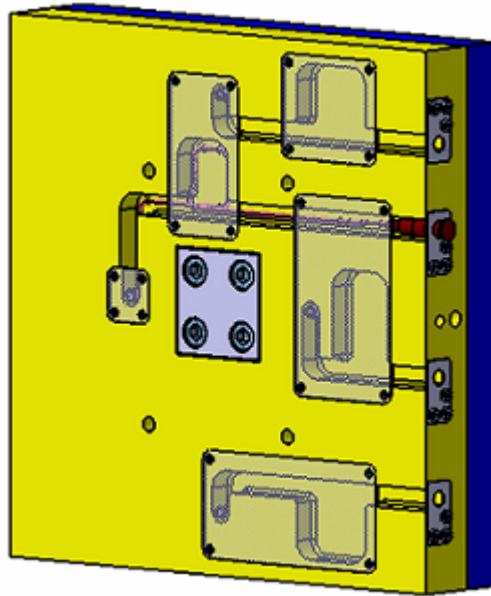
Rovněž i zde jsou čtyři dutiny formy s dvěma různými délkami rozvodných kanálů. Rozdíl je pouze v tom, že místo vtokové vložky je zde trn, který se rovněž otáčí o 90° čímž stejně jako vložka uzavírá jeden kanál a druhý otevírá. Zároveň slouží jako vytrhovač vtoku.

#### 7.3.1 Spodní upínací deska

Jak už bylo řečeno, spodní upínací deska je opatřena dutinami pro teplotní čidla. Jsou to takové vyfrézované kanály s kapsami pro stočení přebytečného kabelu. Každá

kapsa je uzavřena ocelovým plíškem čímž se zamezí vyčnívání kabele z kapes nebo kanálů.

Na straně desky jsou upevněny plechy s dírami pro konektor čidla.



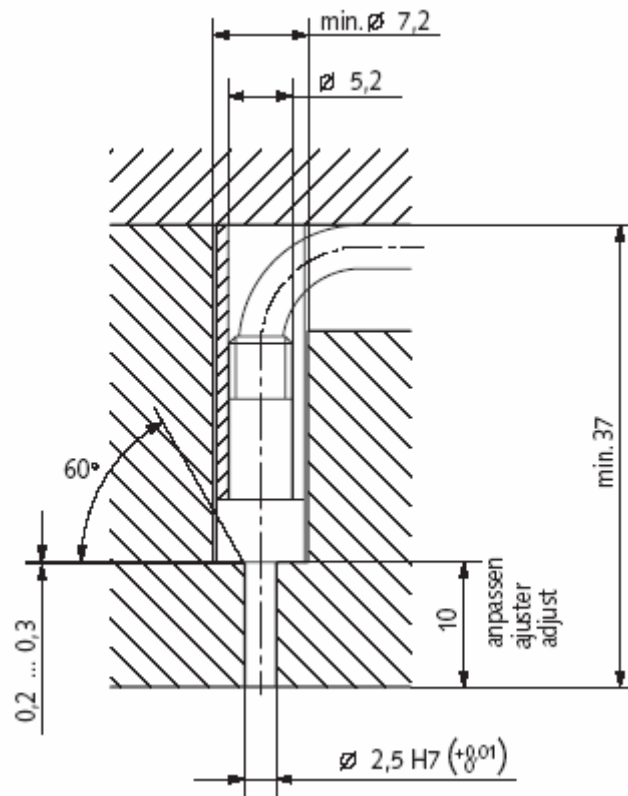
*Obr. 76. Spodní díl formy – pohled zezadu*

### 7.3.2 Usazení čidla

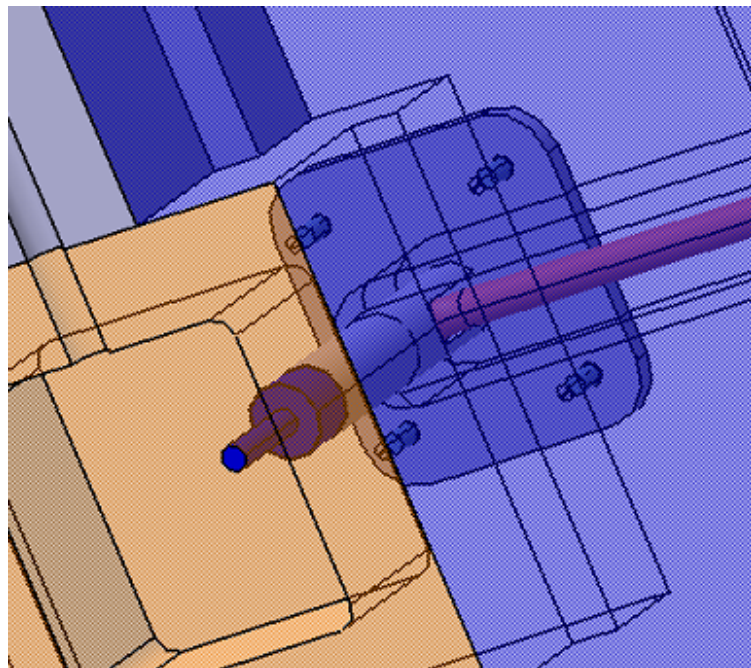
V mém případě je použito čidlo typu 6194A od firmy Kistler (obr.75). Čidlo je vhodné pro měření a kontrolu teploty během vstřikování s okamžitou odezvou. Čidlo přichází do přímého kontaktu s taveninou. Jeho usazení do dutiny formy je znázorněno nejprve schematicky na obr.76 a dále na obr.77 jako model v programu Catia V5.



*Obr. 77. Čidlo*

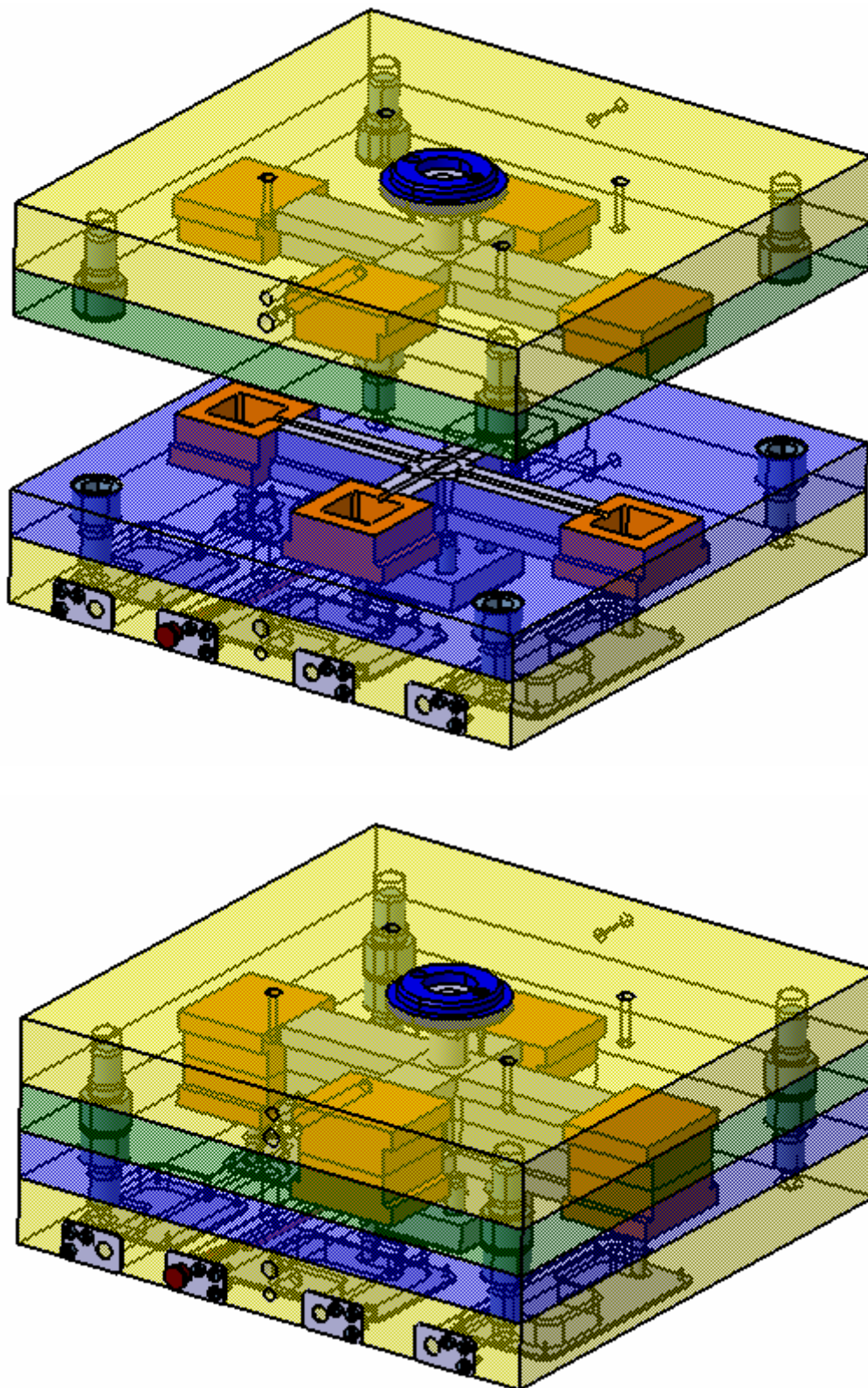


Obr. 78. Čidlo zavedené do dutiny formy



Obr. 79. Čidlo ve formě - schéma

## 7.4 Forma



Obr. 80. Forma - otevřená a uzavřená

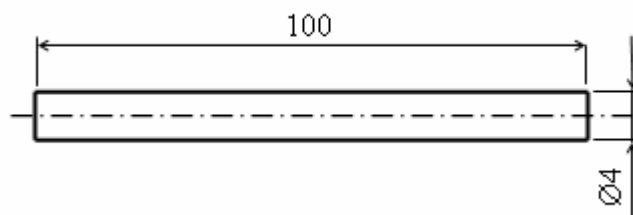
## 8 ANALÝZY TEPLŮT V ROZVODNÝCH KANÁLECH

Analýzy byly provedeny v programu Cadmould. Zajímalo nás, jak se zvýší teplota elastomerní taveniny při průchodu kanálem od vstříkovací trysky přes čidlo č.2 po čidlo č.1 resp. č.3. Zároveň jsem se snažil navrhnout geometrii kanálu tak, aby byl nárůst teploty co největší.

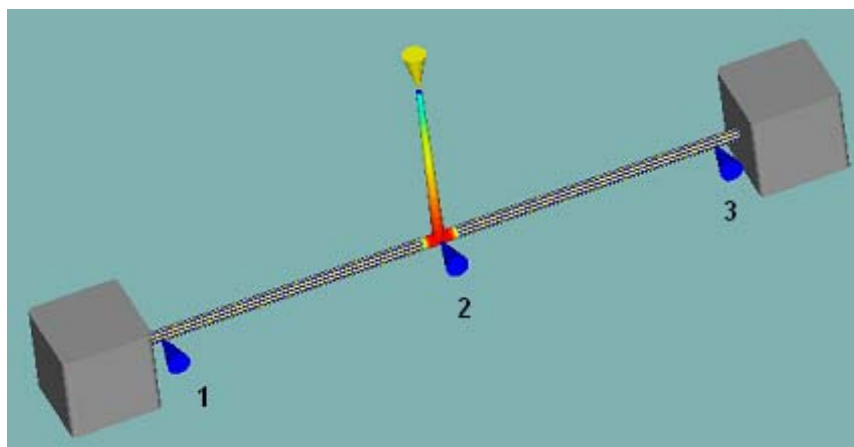
Jako zkušební materiál jsem zvolil elastomer EPDM 55 Shore. Teplota taveniny byla nastavena na  $T = 100^{\circ}\text{C}$ . Teplotu formy jsem nastavil na  $T = 180^{\circ}\text{C}$ .

### 8.1 Rovný kanál ( $\text{Ø}4\text{mm}$ )

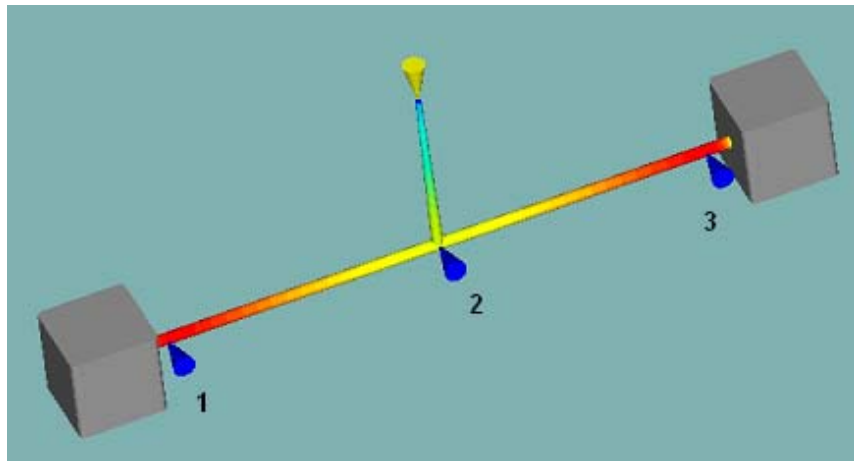
Nejprve byly zanalyzovány teploty taveniny v rovném rozvodném kanále, který byl použit ve vstříkovací formě dle mého návrhu. Pro analýzu jsem vybral rozvodný kanál o délce 200mm. Na obr.80 je zobrazena polovina rozvodného kanálu včetně jeho rozměrů.



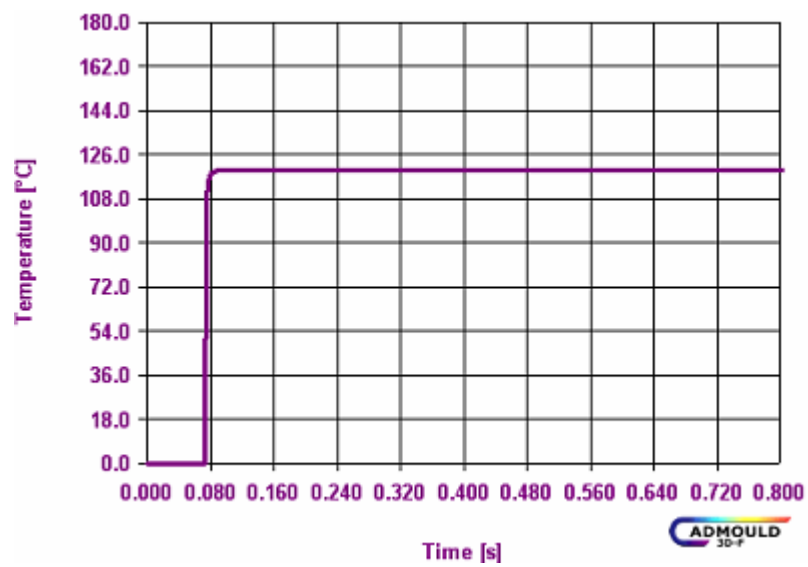
Obr. 81. Rozměry rovného kanálu s  $\text{Ø}4\text{mm}$



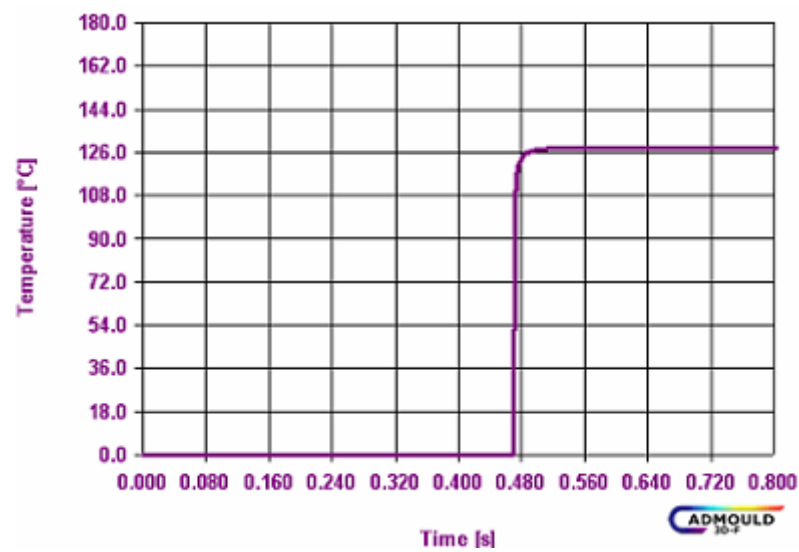
Obr. 82. Teplota taveniny po 0,07s plnění



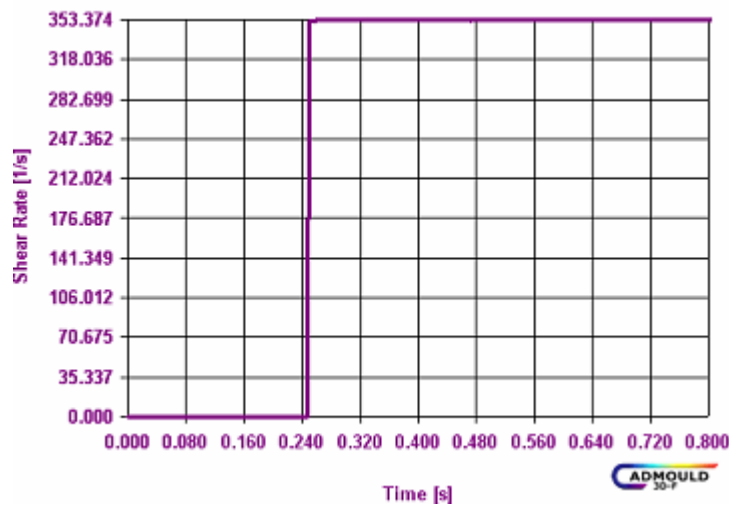
Obr. 83. Teplota taveniny po 0,47s plnění



Obr. 84. Průběh teploty (senzor 2)



Obr. 85. Průběh teploty (senzor 1,3)



Obr. 86. Smyková rychlost mezi senzory 1 a 2

Tab. 6. Teploty na čele taveniny během plnění u rovného kanálu s  $\varnothing 4\text{mm}$

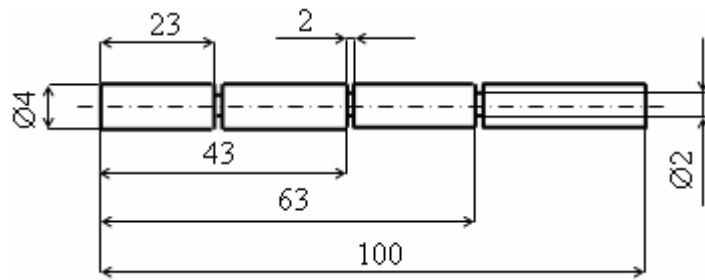
t [s] (senzor)	T [°C]
0	100
0,07(2)	119,6
0,47(1)	127,7
0,47(3)	127,5

Jak je vidět na obrázcích a následně i v tab.6, tavenina se při průchodu rovným kanálem ohřeje z původních  $100^{\circ}\text{C}$  na  $127,5^{\circ}\text{C}$  ( $127,7^{\circ}\text{C}$ ) a to za 0,47s.

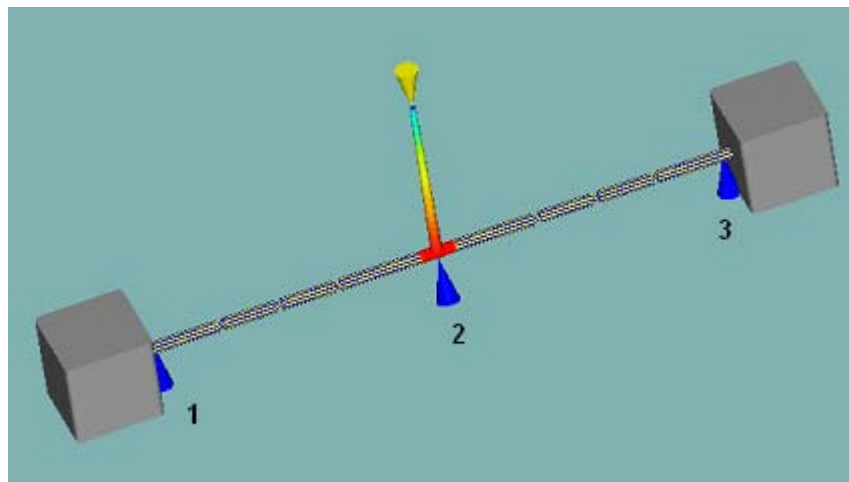
## 8.2 Kanál s přepady

První kanál s atypickou geometrií (obr.83) byl kanál s přepady. U tohoto typu kanálu musí tavenina na své cestě překonat celkem tři překážky v podobě zúžených průměrů. Tyto přepady mohou částečně fungovat jako míchací elementy a mohlo by tedy dojít k většímu zvýšení teploty než jak tomu bylo u rovného kanálu.

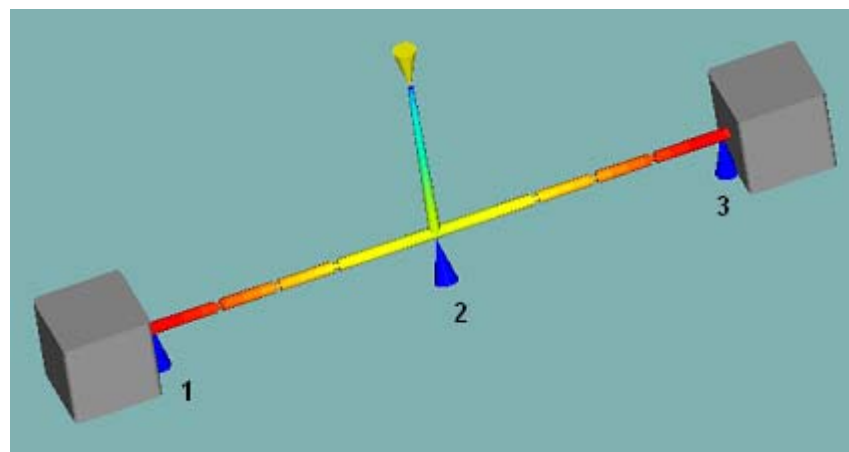




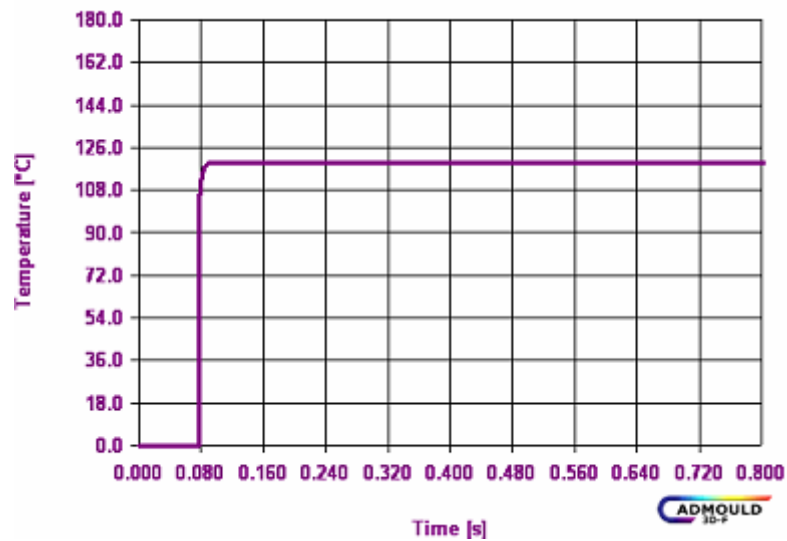
Obr. 87. Rozměry kanálu s přepady



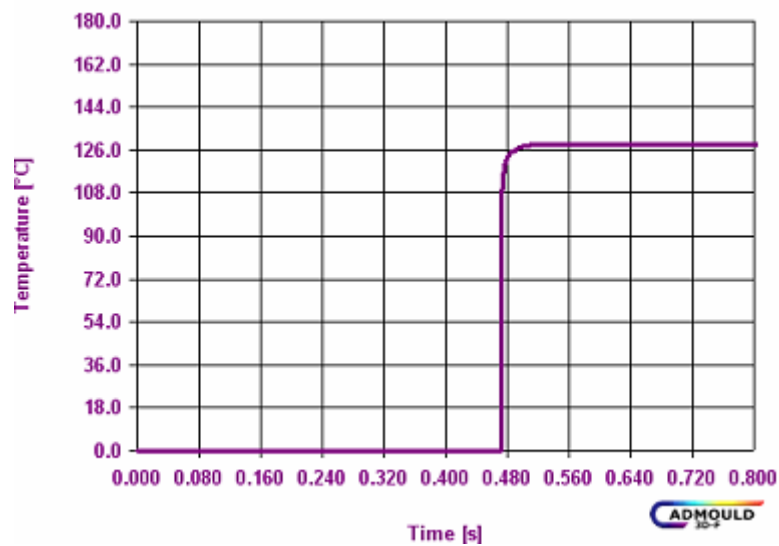
Obr. 88. Teplota taveniny po 0,1s plnění



Obr. 89. Teplota taveniny po 0,5s plnění



Obr. 90. Průběh teploty (senzor 2)



Obr. 91. Průběh teploty (senzor 1,3)

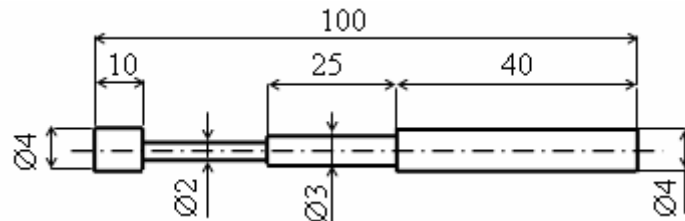
Tab. 7. Teploty na čele taveniny během plnění u kanálu s přepady

t [s] (senzor)	T [°C]
0	100
0,08(2)	119,7
0,48(3)	128,3
0,46(1)	128,2

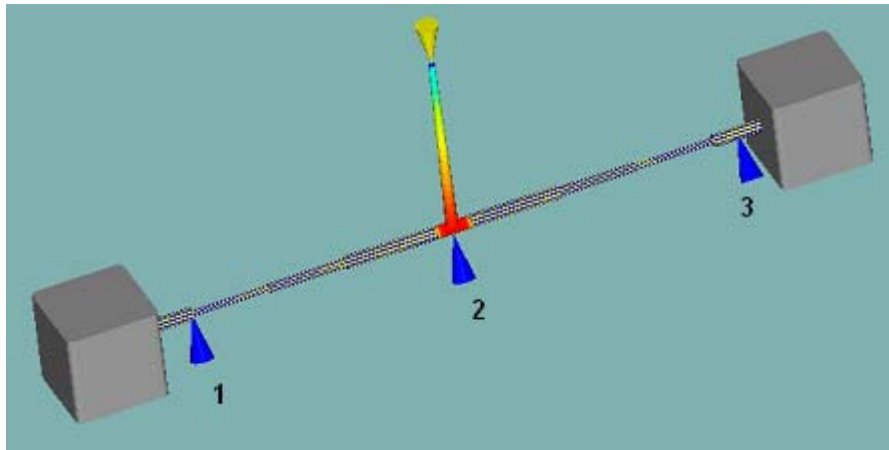
V tab. 7 je vidíme, že díky brzdícím elementům se nám teplota taveniny zvedla na  $T=128,3^{\circ}\text{C}$  ( $128,2^{\circ}\text{C}$ ), což je v průměru o  $0,65^{\circ}\text{C}$  více než u rovného kanálu.

### 8.3 Kaskádový kanál

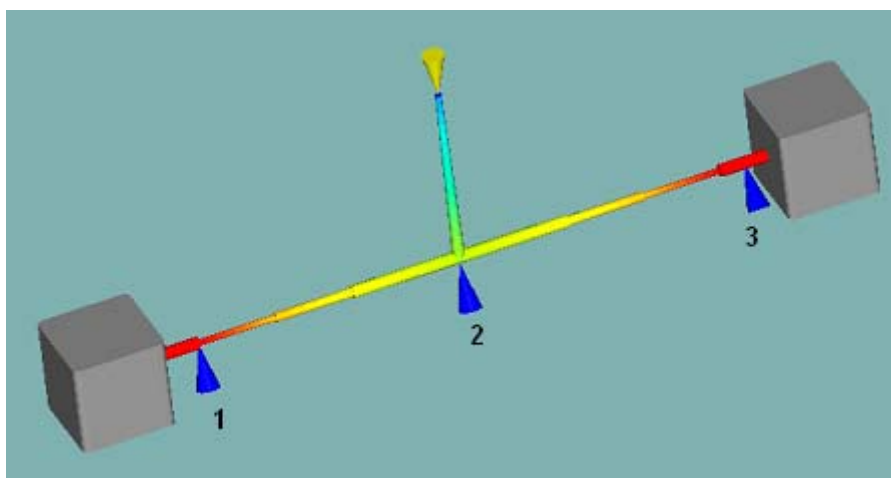
Dalším kanálem, který byl podroben analýze byl kanál kaskádový s postupně se zmenšujícími průměry viz. obr.86. Toto řešení by mělo mít za následek postupné zvyšování smykové rychlosti a tím i zvyšování podílu disipačního tepla na ohřevu taveniny.



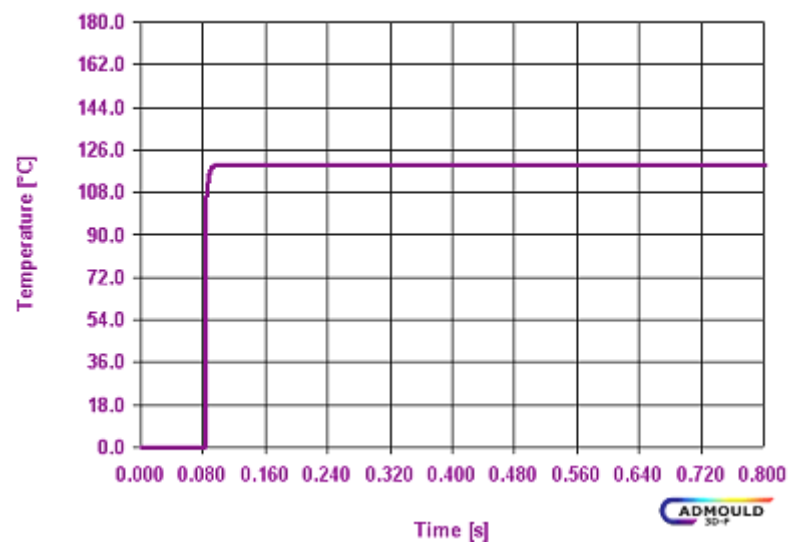
Obr. 92. Rozměry kaskádového kanálu



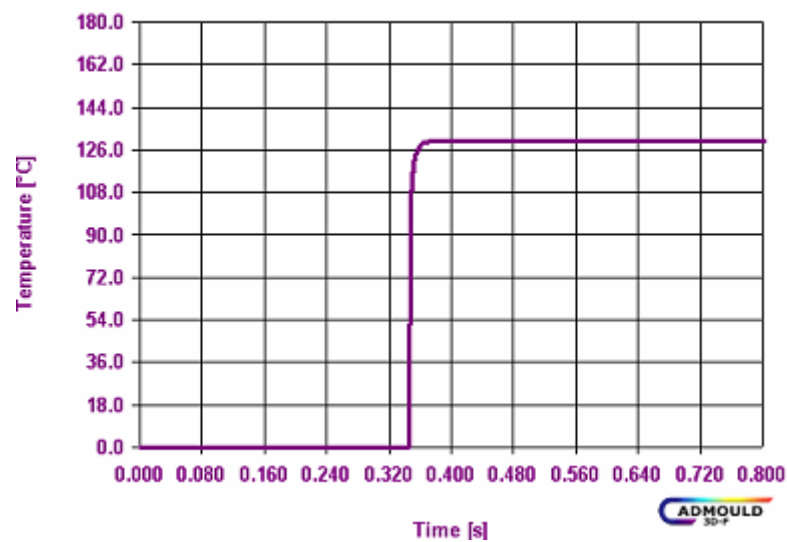
Obr. 93. Teplota taveniny po 0,08s plnění



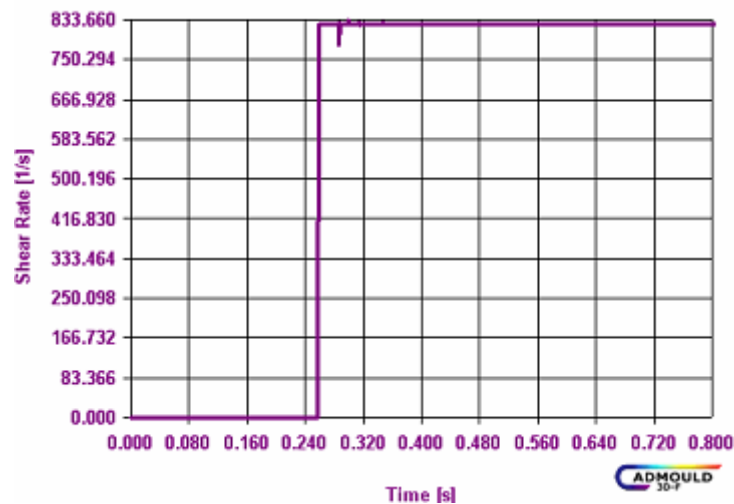
Obr. 94. Teplota taveniny po 0,47s plnění



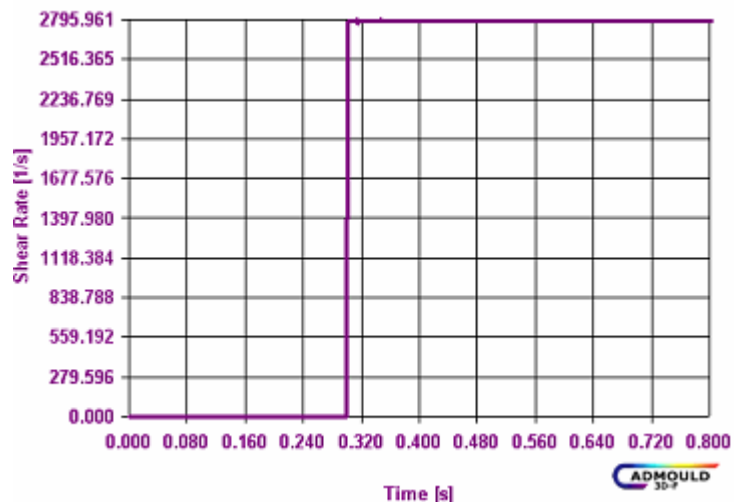
Obr. 95. Průběh teploty (senzor 2)



Obr. 96. Průběh teploty (senzor 1,3)



Obr. 97. Smyková rychlost v prvním zúžení



Obr. 98. Smyková rychlost ve druhém zúžení

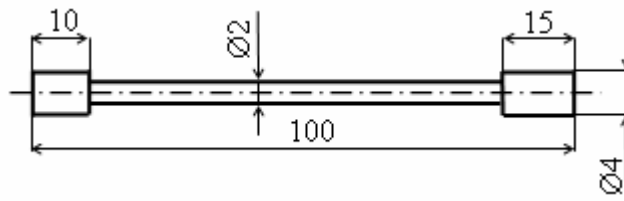
Tab. 8. Teploty na čele taveniny během plnění u kaskádového kanálu

t [s] (senzor)	T [°C]
0	100,0
0,07(2)	119,8
0,34(1)	130,0
0,34(3)	130,0

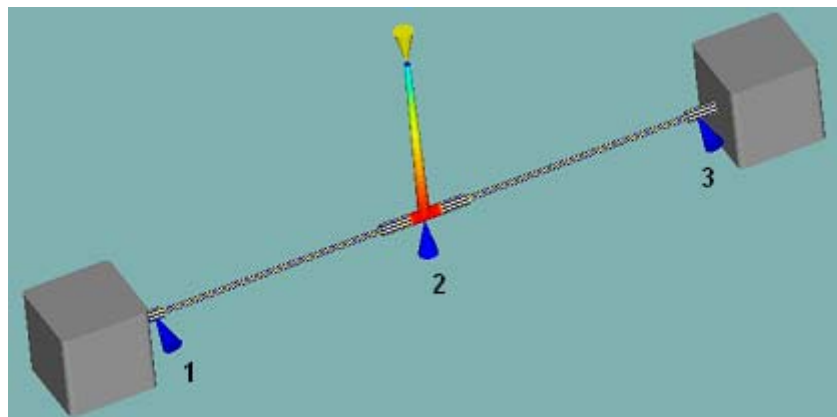
Z výsledků je patrné že se projevil vliv zmenšujících se průměrů. Zvyšující se smyková rychlost má za následek zahřívání taveniny, jejíž teplota se zvýší z původních 100°C až na 130°C.

#### 8.4 Rovný kanál ( $\text{Ø}2 \text{ mm}$ )

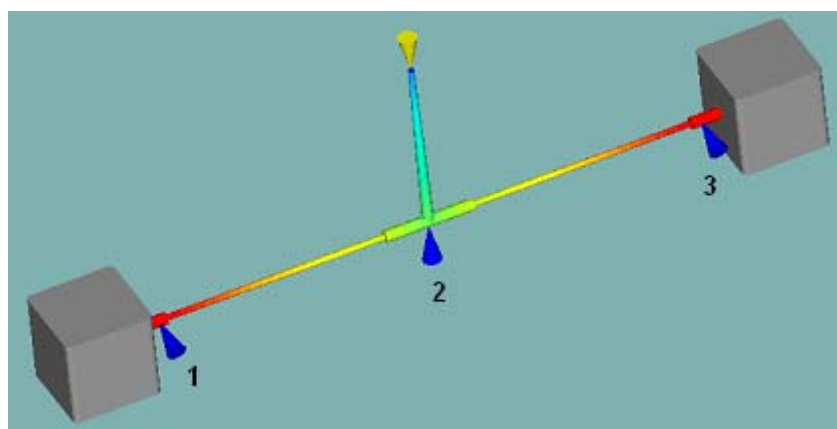
Vliv smykové rychlosti na zahřátí taveniny se kladně projevil v předešlých případech. Proto je v posledním případě použit kanál s jednoduchou geometrií s průměrem 2mm, kde by se měl tento vliv projevit ve větší míře.



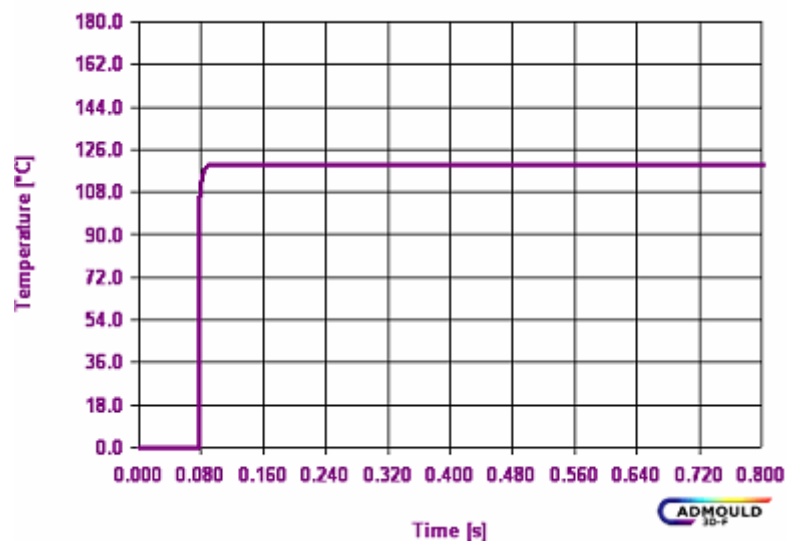
Obr. 99. Rozměry rovného kanálu s průměrem  $\text{Ø}2\text{mm}$



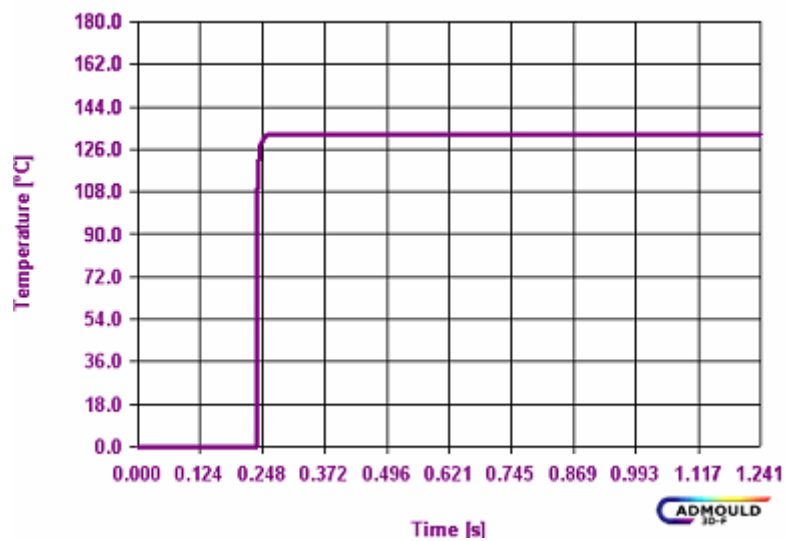
Obr. 100. Teplota taveniny po 0,08s plnění



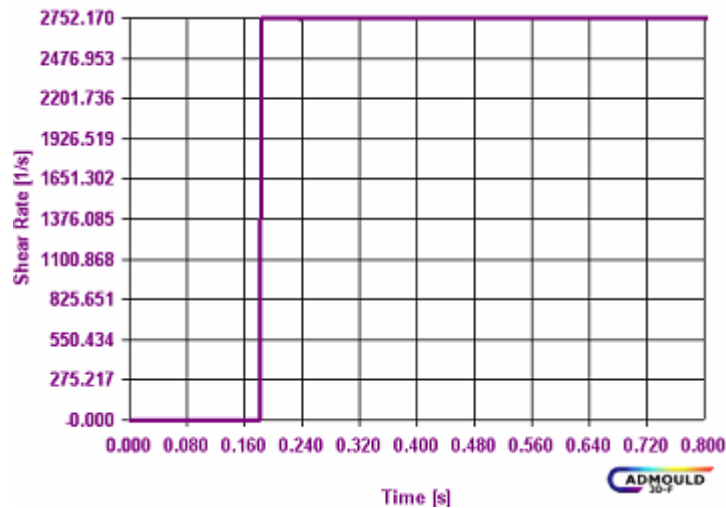
Obr. 101. Teplota taveniny po 0,25s plnění



Obr. 102. Průběh teploty (senzor 2)



Obr. 103. Průběh teploty (senzor 1,3)

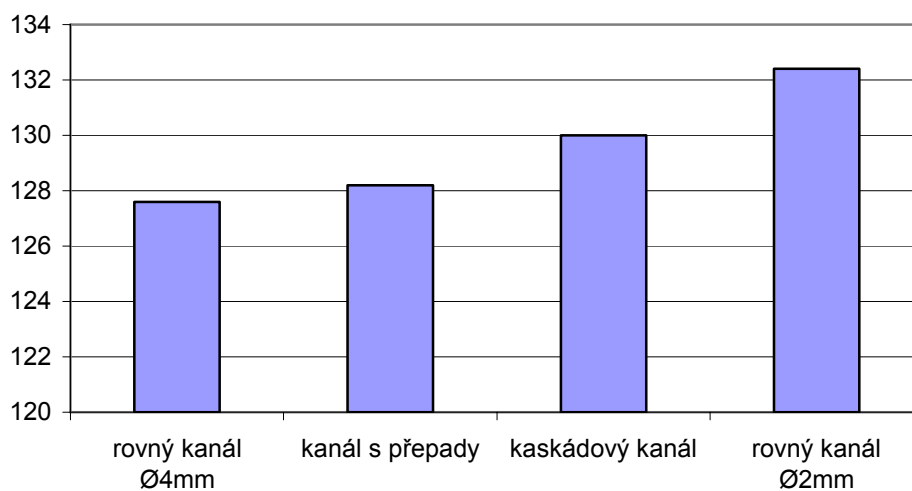


Obr. 104. Smyková rychlost mezi senzory 1 a 2

Tab. 9. Teploty na čele taveniny během plnění u rovného kanálu s Ø2 mm

t [s] (senzor)	T [°C]
0	100,0
0,08(2)	119,8
0,25(1)	132,4
0,25(3)	132,4

Jak je vidět, toto řešení se z hlediska růstu teploty taveniny při průchodu kanálem jeví jako neoptimálnější.



Obr. 105. Porovnání teplot u jednotlivých kanálů



## ZÁVĚR

Prvním cílem této práce bylo experimentálně zjistit vliv procesních a jiných parametrů na zatékavost polymerní taveniny. Pro experiment byly vybrány čtyři elastomerní směsi, které byly podrobeny testu na vstřikovacím stroji REP. Během tohoto testu byl zjišťován vliv tlaku a drsnosti povrchu dutiny formy na již zmiňovanou zatékavost.

Bylo zjištěno, že tlak resp. velikost vstřikovacího tlaku má jednoznačně vliv na zatečení polymeru a to u všech zkoušených směsí a u všech typů povrchů formy. Lze říct že čím je větší vstřikovací tlak, tím je větší schopnost zatečení polymeru.

Naproti tomu vliv povrchu resp. drsnosti povrchu na zatékavost nebyl jednoznačně prokázán. U směsí č.162, 165 a 116 měla délka zatečení stoupající tendenci se zvyšující se drsností povrchu. Naproti tomu u směsi č.188 byl tento jev opačný, tzn. že se zvyšující se drsností zatékavost klesala. Částečně lze tedy říct, že zvyšující se drsnost povrchu má příznivý vliv na zatékavost. Toto tvrzení ale neplatí vždy a proto jej nelze brát jako závazné.

Co ale můžeme říct je, že provádět náročné a nákladné operace jako jsou broušení nebo leštění za účelem lepší zatékavosti je v mnoha případech zbytečné a neekonomické.

Druhým úkolem diplomové práce bylo navrhnout a zkonstruovat vstřikovací formu pro tělíska z eleastomeru a pomocí analýz zjistit, jaký vliv má geometrie rozvodného kanálu na růst teploty taveniny při toku.

Vstřikovací forma byla navržena v programu CATIA V5. Výkresová dokumentace včetně kusovníku je uvedena v příloze.

Analýzy teplot byly provedeny v programu Cadmould. Testu byly podrobeny čtyři různé kanály s odlišnými tvary a rozměry. Bylo vycházeno z toho, že pokud chceme zvýšit teplotu taveniny aniž by jsme museli zvyšovat teplotu vyhřívání formy nebo plastikační jednotky, musíme zvolit takový tvar kanálu, aby se zvýšil podíl disipačního tepla. To se nakonec projevilo i ve výsledcích, které nám jednoznačně ukazují, že čím je kanál užší nebo čím více se mění průměry jednotlivých úseků, tím nám roste smyková rychlost a tavenina se v důsledku disipace zahřívá.

Změnou geometrie kanálu lze příznivě ovlivnit rychlost zahřívání taveniny a tím i ekonomicky zdokonalit výrobní proces.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] PECH, J.: *Výroba plastů*, Praha SNTL, 1961, ISBN 04-624-77
- [2] BEAUMONT, J.P.: *Successful Injection molding*, Munchen, Hansen, 2002, ISBN 3-446-19433-9
- [3] MLEZIVA, J.: *Polymery*, Praha, Sobotáles, 1993, ISBN 80-901570-4-1
- [4] OBADAL, M.: *Konstrukční materiály*, Zlín, UTB, 2005
- [5] MAŇAS, M., VLČEK, J.: *Aplikovaná reologie*, Zlín, UTB-Academia centrum, 2001, ISBN 80-7318-039-1
- [6] ZILVAR, V., MEISSBER, B.: *Fyzika polymerů*, Praha, SNTL, 1987, ISBN 04-634-87
- [7] SCHATZ, M., VONDRÁČEK, P.: *Zkoušení polymerů*, Praha, SNTL, 1979
- [8] VESELÝ, K.: *Polymery*, Brno, 1992, ISBN 80-02-00951-7
- [9] DRGA, T.: *Technologické řešení vstřikovacích nástrojů s orientací na polymerní materiály*, UTB - Disertační práce, 2007
- [10] GASTROW, H.: *Injection molds*, Munchen, Hansen, 2002, ISBN 3-446-21448-8
- [11] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*, Praha, Scientia, 1999, ISBN 80-7183-164-6

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
PS		Polystyren
HIPS		houževnatý polystyren
SAN		Styren-akrylonitril
ABS		Akrylonitrilbutadienstyren
PVC		Polyvinylchlorid
PVAL		Polyvinylalkohol
PVB		Polyvinylbutyral
PMMA		Polymetylmetykrylát
PAN		Polyakrilonitril
PVDF		Polyvinylidenfluorid
PET		Polyethyltereftylat
PBT		Polybutyltereftalát
PA		Polyamid
POM		Polyoxymetylén
PC		Polykarbonát
PUR		Polyuretan
UF		Močovinoformaldehydové pryskyřice
MF		Melaminoformaldehydové pryskyřice
T <sub>g</sub>	[°C]	Teplota skelného přechodu
λ	[s]	Časová konstanta
De	[-]	Debořino číslo
θ	[s]	Doba zpracování
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku

$\dot{\gamma}$	[1/s]	Rychlost smykové deformace
$\tau$	[MPa]	Smykové napětí
N	[N]	Normálová síla
$\tau_{11}$	[MPa]	Normálové napětí
$\tau_{12}$	[MPa]	Normálové napětí
R	[mm]	Poloměr
F	[N]	Síla
$\sigma_{11}$	[MPa]	Napětí při protažení
$\dot{\epsilon}$	[1/s]	Rychlost protažení
M <sub>k</sub>	[Nm]	Kroutící moment
W <sub>t</sub>	$[\pi d^3/16]$	Modul torzního snímacího elementu
r	[mm]	Poloměr
$\eta$	[Pa.s]	Smyková viskozita
$\omega$	[rad/s]	Úhlová rychlost
$\psi$	[°]	Úhel mezi kuželem a deskou
$\eta_z$	[Pa.s]	Zdánlivá viskozita
Q	[m <sup>3</sup> /s]	Průtoková rychlost
p	[MPa]	Tlak
F <sub>v</sub>	[N]	Viskózní síla
L	[mm]	Délka kapiláry
F <sub>p</sub>	[N]	Hnací síla
$\tau_w$	[MPa]	Napětí na stěně kapiláry
D <sub>w</sub>	[1/s]	Rychlost deformace na stěně kapiláry

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Viskozimetr kužel-deska a válec-válec</i> .....	22
<i>Obr. 2. Relaxace polymerů</i> .....	22
<i>Obr. 3. Chování kapalin při totaci: (a)polymer, (b)newtonská kapalina</i> .....	23
<i>Obr. 4. Viskozimetr kužel-deska</i> .....	23
<i>Obr. 5. Překmit napětí</i> .....	24
<i>Obr. 6. Jednoosé protažení válce</i> .....	24
<i>Obr. 7. Elongační viskozita</i> .....	25
<i>Obr. 8. Porovnání vlivu smykové rychlosti na viskozitu u dilatntních, newtonských a pseudoplastických materiálů</i> .....	26
<i>Obr. 9. Vliv smykové rychlosti na viskozitu a orientaci</i> .....	27
<i>Obr. 10. Vliv smykové rychlosti na viskozitu</i> .....	27
<i>Obr. 11. Vliv teploty a smykové rychlosti na viskozitu</i> .....	28
<i>Obr. 12. Dvoudeskový model laminárního toku</i> .....	28
<i>Obr. 13. Fontánový tok</i> .....	29
<i>Obr. 14. Viskozimetr válec – válec</i> .....	32
<i>Obr. 15. Viskozimetr kužel – deska</i> .....	34
<i>Obr. 16. Rovnováha sil při ustáleném toku válce kapaliny kapilárou</i> .....	35
<i>Obr. 17. Princip viskozimetru s padající kuličkou</i> .....	37
<i>Obr. 18. Zkušební zařízení pro stanovení ITT</i> .....	38
<i>Obr. 19. Spirálová metoda stanovení tekutosti při vstřikování</i> .....	40
<i>Obr. 20. Vstřikovací stroj</i> .....	44
<i>Obr. 21. Uzavírací jednotka</i> .....	44
<i>Obr. 22. Vstřikovací jednotka</i> .....	46
<i>Obr. 23. Řídící jednotka</i> .....	48
<i>Obr. 24. Vstřikovací stroj REP</i> .....	51
<i>Obr. 25. Spodní část formy</i> .....	52
<i>Obr. 26. Geometrie průřezu spirály</i> .....	52
<i>Obr. 27. Zkušební desky</i> .....	53
<i>Obr. 28. Povrchy desek (leštěný, broušený, jemný dezén, frézovaný, hrubý dezén)</i> .....	53
<i>Obr. 29. Zkušební vzorek</i> .....	55
<i>Obr. 30. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165,leštěná deska)</i> .....	56

<i>Obr. 31. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, broušená deska)</i> .....	56
<i>Obr. 32. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, deska s jemným dezénem)</i> .....	57
<i>Obr. 33. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, frézovaná deska)</i> .....	57
<i>Obr. 34. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 165, deska s hrubým dezénem)</i> .....	58
<i>Obr. 35. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 12MPa)</i> .....	58
<i>Obr. 36. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 16MPa)</i> .....	59
<i>Obr. 37. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 20MPa)</i> .....	59
<i>Obr. 38. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 165, tlak 24MPa)</i> .....	60
<i>Obr. 39. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích</i> .....	61
<i>Obr. 40. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, leštěná deska)</i> .....	62
<i>Obr. 41. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, broušená deska)</i> .....	62
<i>Obr. 42. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, deska s jemným dezénem)</i> .....	63
<i>Obr. 43. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, frézovaná deska)</i> .....	63
<i>Obr. 44. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 162, deska s hrubým dezénem)</i> .....	64
<i>Obr. 45. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 12MPa)</i> .....	64
<i>Obr. 46. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 16MPa)</i> .....	65
<i>Obr. 47. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 20MPa)</i> .....	65
<i>Obr. 48. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 162, tlak 24MPa)</i> .....	66
<i>Obr. 49. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích</i> .....	67
<i>Obr. 50. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, leštěná deska)</i> .....	68
<i>Obr. 51. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, broušená deska)</i> .....	68
<i>Obr. 52. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, deska s jemným dezénem)</i> .....	69
<i>Obr. 53. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, frézovaná deska)</i> .....	69
<i>Obr. 54. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 188, deska s hrubým dezénem)</i> .....	70
<i>Obr. 55. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 12MPa)</i> .....	70
<i>Obr. 56. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 16MPa)</i> .....	71
<i>Obr. 57. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 20MPa)</i> .....	71
<i>Obr. 58. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 188, tlak 24MPa)</i> .....	72
<i>Obr. 59. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích</i> .....	72
<i>Obr. 60. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, leštěná deska)</i> .....	73
<i>Obr. 61. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, broušená deska)</i> .....	74
<i>Obr. 62. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, deska s jemným dezénem)</i> .....	74
<i>Obr. 63. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, frézovaná deska)</i> .....	75

<i>Obr. 64. Závislost délky zatečení na tlaku (směs 116, deska s hrubým dezénem)</i> .....	75
<i>Obr. 65. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 12MPa)</i> .....	76
<i>Obr. 66. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 16MPa)</i> .....	76
<i>Obr. 67. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 20MPa)</i> .....	77
<i>Obr. 68. Závislost délky zatečení na drsnosti povrchu (směs 116, tlak 24MPa)</i> .....	77
<i>Obr. 69. Porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích</i> .....	78
<i>Obr. 70. Vstříkované tělísko</i> .....	79
<i>Obr. 71. Rozměry tělíška</i> .....	79
<i>Obr. 72. Horní díl formy</i> .....	80
<i>Obr. 73. Rozvodný kanál</i> .....	81
<i>Obr. 74. Vtoková vložka</i> .....	81
<i>Obr. 75. Spodní díl formy</i> .....	82
<i>Obr. 76. Spodní díl formy – pohled zezadu</i> .....	83
<i>Obr. 77. Čidlo</i> .....	83
<i>Obr. 78. Čidlo zavedené do dutiny formy</i> .....	84
<i>Obr. 79. Čidlo ve formě - schéma</i> .....	84
<i>Obr. 80. Forma - otevřená a uzavřená</i> .....	85
<i>Obr. 81. Rozměry rovného kanálu s <math>\varnothing 4\text{mm}</math></i> .....	86
<i>Obr. 82. Teplota taveniny po 0,07s plnění</i> .....	86
<i>Obr. 83. Teplota taveniny po 0,47s plnění</i> .....	87
<i>Obr. 84. Průběh teploty ( senzor 2)</i> .....	87
<i>Obr. 85. Průběh teploty (senzor 1,3)</i> .....	87
<i>Obr. 86. Smyková rychlost mezi senzory 1 a 2</i> .....	88
<i>Obr. 87. Rozměry kanálu s přepady</i> .....	89
<i>Obr. 88. Teplota taveniny po 0,1s plnění</i> .....	89
<i>Obr. 89. Teplota taveniny po 0,5s plnění</i> .....	89
<i>Obr. 90. Průběh teploty (senzor 2)</i> .....	90
<i>Obr. 91. Průběh teploty (senzor 1,3)</i> .....	90
<i>Obr. 92. Rozměry kaskádového kanálu</i> .....	91
<i>Obr. 93. Teplota taveniny po 0,08s plnění</i> .....	91
<i>Obr. 94. Teplota taveniny po 0,47s plnění</i> .....	91
<i>Obr. 95. Průběh teploty (senzor 2)</i> .....	92
<i>Obr. 96. Průběh teploty (senzor 1,3)</i> .....	92

---

<i>Obr. 97. Smyková rychlost v prvním zúžení.....</i>	93
<i>Obr. 98. Smyková rychlost ve druhém zúžení .....</i>	93
<i>Obr. 99. Rozměry rovného kanálu s průměrem Ø2mm .....</i>	94
<i>Obr. 100. Teplota taveniny po 0,08s plnění.....</i>	94
<i>Obr. 101. Teplota taveniny po 0,25s plnění.....</i>	94
<i>Obr. 102. Průběh teploty (senzor 2) .....</i>	95
<i>Obr. 103. Průběh teploty (senzor 1,3) .....</i>	95
<i>Obr. 104. Smyková rychlost mezi senzory 1 a 2 .....</i>	96
<i>Obr. 105. Porovnání teplot u jednotlivých kanálů .....</i>	96



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Tabulka hodnot Ra a Rz pro jednotlivé povrchy .....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 2. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích .....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 3. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích .....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 4. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 5. Zdrojová data porovnání vlivu typu desky na délku zatečení při různých tlacích .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 6. Teploty na čele taveniny během plnění u rovného kanálu s Ø4mm .....</i>	<i>88</i>
<i>Tab. 7. Teploty na čele taveniny během plnění u kanálu s přepady .....</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 8. Teploty na čele taveniny během plnění u kaskádového kanálu .....</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 9. Teploty na čele taveniny během plnění u rovného kanálu s Ø2 mm .....</i>	<i>96</i>

**SEZNAM PŘÍLOH**

P I	CD disk obsahující	-	textovou část Diplomové práce
		-	výkresovou dokumentaci vstříkovací formy
P II	RPA test - směs 165 (smykové moduly)		
P III	RPA test - směs 165 (dynamické viskozity)		
P IV	RPA test - směs 162 (smykové moduly)		
P V	RPA test - směs 162 (dynamické viskozity)		
P VI	RPA test - směs 188 (smykové moduly)		
P VII	RPA test - směs 188 (dynamické viskozity)		
P VIII	Forma - sestava		výkres č. UTB-2008-S00
P IX	Kusovník		

## **PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY**