

# **Vliv změny procesních parametrů vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti plněných polymerů**

Lukáš Skovajsa

---

Bakalářská práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

**Ústav výrobního inženýrství**

**akademický rok: 2010/2011**

# **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Lukáš SKOVAJSA**

**Osobní číslo: T07385**

**Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství**

**Studijní obor: Technologická zařízení**

**Téma práce: Vliv změny procesních parametrů vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti plněných polymerů**

**Zásady pro vypracování:**

- 1. Vypracujte literární rešerži na dané téma**
- 2. Připravte zkušební vzorky pro test mechanických vlastností**
- 3. Provedte mechanické zkoušky**
- 4. Vyhodnoťte naměřené výsledky zkoušek**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**14. února 2011**

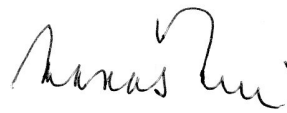
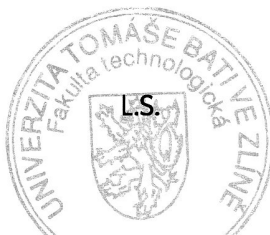
Termín odevzdání bakalářské práce:

**3. června 2011**

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



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



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá vlivem změny procesních parametrů vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti plněných polymerů. Teoretická část popisuje polymerní materiály, jejich vlastnosti, plniva, zkoušky mechanických vlastností a technologii vstřikování. Praktická část je zaměřena na měření mechanických vlastností.

Klíčová slova: polymer, plnivo, mechanické vlastnosti, technologie vstřikování

## **ABSTRACT**

This work deals with the changes procedural parameters of injection on resulting mechanical properties of filled polymers. The theoretical part describes polymer materials, it's properties, loadings, test methods for mechanical properties and injection technology. The practical part is oriented on measurement of mechanical properties.

Keywords: polymer, loading, mechanical properties, injection technology

*Motto:*

„Dum spiro, spero“

„Dokud dýchám, doufám“

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D. za odborné vedení při psaní této bakalářské práce a rodičům za podporu ve studiu.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 POLYMERY</b> .....	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY, STRUKTURA POLYMERŮ .....	13
1.2 VÝROBA SYNTETICKÝCH POLYMERŮ .....	15
1.3 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	16
1.3.1 Rozdělení podle chemické struktury .....	16
1.3.2 Rozdělení podle ČSN .....	17
1.3.3 Termoplasty.....	18
1.3.4 Reaktoplasty .....	20
1.3.5 Elastomery.....	20
1.3.6 Rozdělení podle postavení na trhu .....	22
1.3.7 Rozdělení podle nejvhodnějšího použití .....	23
1.4 ZPRACOVATELNOST POLYMERŮ .....	23
1.5 PŘÍSADY DO POLYMERŮ .....	23
<b>2 VLASTNOSTI A CHOVÁNÍ POLYMERŮ</b> .....	<b>26</b>
2.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI .....	26
2.2 MOLÁRNÍ HMOTNOST A VLASTNOSTI POLYMERŮ .....	27
2.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ .....	28
2.4 TERMOMECHANICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ .....	29
2.5 REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ.....	31
2.6 TOK TAVENINY VE FORMĚ .....	33
2.7 ZPRACOVATELSKÁ OBLAST PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ (MOLDING AREA DIAGRAM).....	35
2.8 TLAK, TEPLOTA A MĚRNÝ OBJEM V PRŮBĚHU VSTŘIKOVÁNÍ.....	35
<b>3 PLNIVA</b> .....	<b>38</b>
3.1 PROSTOROVÉ ROZMÍSTĚNÍ PLNIV, VELIKOST PLNIV .....	39
3.2 ROZDĚLENÍ PLNIV .....	40
3.3 DRUHY PLNIV .....	41
3.3.1 Uhlíkové saze .....	41
3.3.2 Duté skleněné kulové částice .....	42
3.3.3 Plné skleněné kulové částice .....	43
3.3.4 Nesférická plniva.....	43
3.3.5 Vločky a destičky .....	43
3.3.6 Slídové vločky.....	43
3.3.7 Whiskery .....	44
3.3.8 Skleněná vlákna.....	45
3.3.9 Aramidy (Kevlar) .....	46



3.3.10	Uhlíková vlákna .....	46
3.3.11	Přírodní vlákna .....	47
3.3.12	Čedičová (bazaltová) vlákna .....	48
<b>4</b>	<b>ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....</b>	<b>49</b>
4.1	FYZIKÁLNÍ PODSTATA DEFORMACE A PORUŠENÍ .....	49
4.2	ZKOUŠKA TAHEM .....	50
4.3	HOUŽEVNATOST .....	52
4.4	RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST .....	54
4.5	ZKOUŠKA TLAKEM.....	56
4.6	ZKOUŠKA OHYBEM .....	56
4.7	ZKOUŠKY TVRDOSTI .....	57
4.7.1	Zkoušky tvrdosti – měření podle Brinella.....	58
4.7.2	Zkoušky vtlačováním kuličky .....	58
4.7.3	Zkoušky tvrdosti podle Vickerse.....	58
4.7.4	Zkoušky tvrdosti podle Shoreho.....	58
4.7.5	Stanovení tvrdosti IHRD .....	59
<b>5</b>	<b>VSTŘIKOVÁNÍ .....</b>	<b>60</b>
5.1	ZPŮSOBY VSTŘIKOVÁNÍ.....	60
5.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ .....	63
5.2.1	Rozdělení vstřikovacích strojů .....	64
5.2.2	Uzavírací jednotka.....	64
5.2.3	Plastikační jednotka .....	66
5.2.4	Řídící jednotka .....	67
5.2.5	Výběr vstřikovacího stroje .....	68
5.2.6	Arburg Allrounder 420 C .....	68
5.3	VSTŘIKOVACÍ FORMA .....	70
5.3.1	Postup při konstrukci formy .....	71
5.4	VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	72
5.5	VLIVY NA JAKOST PLASTOVÝCH SOUČÁSTÍ.....	73
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....</b>	<b>76</b>
7.1	PROCESNÍ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ.....	78
<b>8</b>	<b>MECHANICKÉ ZKOUŠKY A VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>81</b>
8.1	PP + 40% MASTEK.....	81
8.1.1	Zkouška tvrdosti ShoreD.....	81
8.1.2	Tahová zkouška.....	82
8.2	PP + 10% SKLO .....	88
8.2.1	Zkouška tvrdosti ShoreD.....	88
8.2.2	Tahová zkouška.....	89

<b>9 DISKUZE VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>95</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>98</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>99</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>102</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>104</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>106</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>107</b>

## ÚVOD

Vstřikování plastů patří mezi nejrozšířenější technologie výroby plastových dílů téměř pro všechna průmyslová odvětví. Svými výhodami plně automatizovaného procesu, vysoké reprodukovatelnosti, přímého převedení suroviny na konečný výrobek bez nutnosti dalších dokončovacích operací neustále roste význam a uplatnění vstřikování a nemalou měrou k tomu přispívá i rozvoj automobilového průmyslu, elektroniky, telekomunikační techniky a výroby domácích spotřebičů. Vstřikované plastové výrobky je tak dnes možno najít ve většině oborů lidské činnosti. [1]

Jednotlivé technologie vstřikování umožňují vstřikovat jak termoplasty, tak i reaktoplasty a elastomery. To přispívá k variabilitě mechanických, chemických a fyzikálních vlastností, které jsou už tak velmi široké. Základní spotřebu plastů ve světě pokrývají standartní termoplasty, pro vstřikování má největší význam skupina konstrukčních plastů a na vrcholu spotřební pyramidy plastů je možno nalézt plasty speciální, které jsou svými jedinečnými vlastnostmi určeny do nejnáročnějších podmínek. [1]

Pokud chceme dosáhnout lepších vlastností i u těch nejrozšířenějších plastů, je zapotřebí zvolit správnou kombinaci polymeru a plniva. Na světě existuje mnoho různých druhů plniv, které mají vliv na různé vlastnosti jako např. tvarovou a rozměrovou stabilitu, mechanické vlastnosti nebo jen ekonomickou stránku věci. Přidáním plniv se ušetří polymer při stejné spotřebě základní suroviny.

Pokud chceme dosahovat maximálních zisků výroby při minimálních nákladech, snížit počet neshodných kusů a stabilizovat vstřikovací proces za současného zvýšení kvality vyrobených dílů, je potřeba provést optimalizaci celého vstřikovacího procesu, analyzovat jednotlivé faktory a z těchto zjištěných procesních podmínek optimálně nastavit vstřikovací proces tak, aby vyhovoval všem výše uvedeným požadavkům správné optimalizace a tak celkově přispěl ke vzájemné spokojenosti zákazníka i výrobce. [1]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERY

Polymery jsou makromolekulární látky, které jsou charakterizovány specifickými vlastnostmi příslušejícím molekulám s dlouhou řetězcovou strukturou. V této řetězcové struktuře se mnohonásobně opakuje jedna nebo více základních jednotek – merů. Surovinou pro výrobu polymerů jsou tedy monomery, látky o nízké molekulové hmotnosti a vhodné chemické struktuře. [1]

Makromolekulární látky se podle původu výchozích látek rozdělují na přírodní a syntetické. V přírodě se makromolekulární látky nacházejí v obrovské rozmanitosti a to jak mezi sloučeninami anorganickými, tak organickými. Z anorganických sem například patří  $\text{SiO}_2$ , křemičitany, diamant, grafit, apod. Tendence tvořit makromolekuly vzájemnou vazbou jednodušších molekul se projevuje zvláště významně u sloučenin organických díky výjimečné schopnosti uhlíku vytvářet řetězcové struktury skládající se z velkého počtu atomů vzájemně vázaných chemickými vazbami. Z přírodních organických polymerů je možno zmínit např. celulózu, škrob, bílkoviny, nukleové kyseliny nebo přírodní kaučuk. [2]

### 1.1 Základní pojmy, struktura polymerů

Polymery jsou tvořeny řetězcem makromolekul a každá tato makromolekula obsahuje několik stovek až tisíce atomů. Taková makromolekula vznikne tehdy, když jsou primárními kovalentními vazbami spojeny stejné nebo rozdílné základní jednotky. Tyto základní stavební jednotky, které se v řetězci opakují, nazýváme mery. Mer v kombinaci s dalšími tvoří základní část struktury polymeru. [1]

Počet merů v celém řetězci se označuje jako polymerační stupeň (P) a charakterizuje délku řetězce podobně jako relativní molekulová hmotnost  $M_r$ , mezi nimiž platí při chemické shodnosti merů jednoduchý vztah  $P = M_r / M_o$ , kde  $M_o$  je molekulová hmotnost meru. Mer je v úzkém vztahu s monomerem a nemusí představovat nejjednodušší chemickou opakující se jednotku (strukturní jednotku). Např. u polyethylenu je mer  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$  a strukturní jednotka  $-\text{CH}_2-$ . Mezi strukturou meru a monomeru je rozdíl, mer má buď méně atomů nebo jinak uspořádané vazby. [1]

Jednotlivé molekuly polymeru mohou být lineární, rozvětvené nebo zesíťované.



Obr. 1. Polymerní řetězce. [1]

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

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

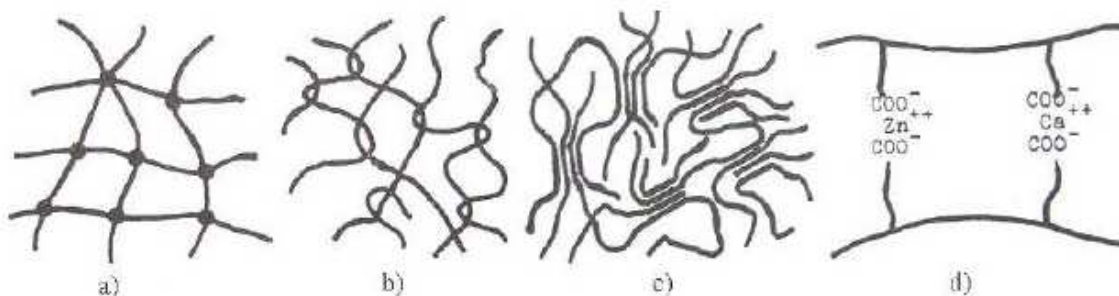
- kopolymer statický – A – B – A – B – B – B – A – A – B – A – B – B – A –
  - kopolymer alternující – A – B – A – B – A – B – A – B – A – B – A – B – A –
  - kopolymer sledový – A – A – A – A – B – B – B – B – A – A – A – A – B –
  - kopolymer roubovaný – A – A – A – Y – A – A – A – Y – A – A – A –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

Struktura polymeru určuje nejen mechanické chování materiálu, ale i fyzikální a chemické vlastnosti. Tyto užité vlastnosti polymerů nejsou však ovlivňovány jen chemickou strukturou, ale také nadmolekulární fázovou strukturou, tj. vzájemným uspořádáním řetězců makromolekul v daném polymerním materiálu. [1]

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

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

- síťování primárními vazbami,
- fyzikálním zauzlením řetězců,
- krystality,
- elektrostatickým přitahováním iontových párů. [1]



Obr. 2. Způsoby zesíťování polymerních řetězců. [3]

Velikost mezimolekulárních sil hraje důležitou roli ve výsledných vlastnostech polymeru. Pokud jsou tyto síly malé, makromolekuly polymerů tvoří relativně ohybné, pružné řetězce. Po protáhnutí má materiál zřetelnou tendenci vrátit se do původní rovnovážné polohy, což je typická vlastnost pro elastomery. Jakmile je soudržná energie vysoká, polymer vyniká vysokou odolností proti deformacím, má vysokou pevnost. [3]

## 1.2 Výroba syntetických polymerů

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

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

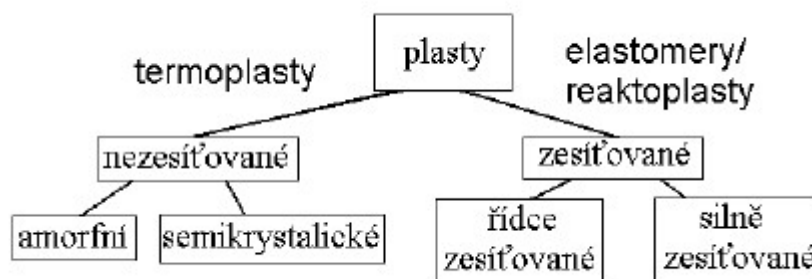
lární zplodiny, proto mají polykondenzáty jiné složení než látky, ze kterých byly připraveny;

- polymerace – je podmíněna přítomností nenasycených vazeb, všechny polymerace probíhají řetězovým mechanismem, jsou tedy výsledkem několika elementárních reakčních dějů – iniciace, růst (propagace), končení (terminace), a velmi často přenos (transfer);
- polyadice – je podobná polykondenzaci s tím rozdílem, že se při těchto reakcích neuvolňují malé molekuly. [1]

### 1.3 Rozdělení polymerů

#### 1.3.1 Rozdělení podle chemické struktury

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

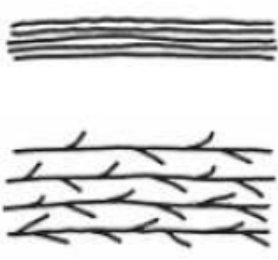
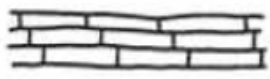



Obr. 3. Rozdělení polymerů. [4]

Termoplasty nemají své lineární a rozvětvené řetězce zesíťovány, elastomery jsou slabě zesíťované a reaktoplasty silně zesíťované materiály. Mezi těmito typy však existuje mnoho přechodných typů s různým typem větvení nebo zesíťování. [1]



Tab. 1. Schematické znázornění uspořádání dlouhých makromolekulárních řetězců v různých polymerech a jejich vlastnosti. [4]

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

Výraz plast se obvykle používá pro všechny polymery, které nejsou elastomery nebo vlákny. V technologickém významu se pak plastem rozumí i směs obsahující jeden nebo více polymerů spolu s plnivý, změkčovadly, mazivy, barvivy, atd. [5]

### 1.3.2 Rozdělení podle ČSN

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

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

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

Názvoslovná norma též rozlišuje dvě velké skupiny plastů: termoplasty a reaktoplasty. [5]

### 1.3.3 Termoplasty

Termoplasty jsou složeny z jednotlivých makromolekul, které jsou vzájemně poutány jen fyzikálními vazbami (molekuly jsou k sobě přitahovány mezimolekulárními silami). Proto při zvýšené teplotě měknou a přecházejí do taveniny, při následním ochlazení tvrdnou a mohou být několikrát opětovně použity, jedná se o materiály tvárné teplem. [1]

Během vstřikovacího procesu za působení tlaku a teploty dojde v termoplastech k uvolnění mezimolekulárních sil, molekuly se volně pohybují a mění své vzájemné pozice, nastává tečení termoplastu. Během fáze dotlaku a chlazení jsou molekuly ochlazovány ve svých nových lokacích. Mezimolekulární vazby jsou znovu obnoveny, tentokrát však v novém tvaru výstřiku. [1]

Termoplasty jsou ideální pro opětovné použití právě díky jejich schopnosti přetvoření vazeb mnohokrát za sebou. Nevýhodou je chemická rozpustnost těchto materiálů. [1]

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

- amorfní termoplasty mají náhodnou nepravidelnou molekulární strukturu. Protože amorfní termoplasty neobsahují žádné krystaly, které zabraňují průchodu světla, jsou většinou transparentní (pokud ovšem neobsahují plniva nebo jiné materiály, které nepropustí světlo);
- semikrystalické termoplasty obsahují místa pravidelné struktury, kde jsou makromolekuly formovány v krystaly. V závislosti na chemické struktuře polymerů geometrické stavbě řetězců a termodynamických podmínkách krystalizace může krystalický polymer dosáhnout většího či menšího stupně krystalického uspořádání (stupně krystalinity), který je rozhodující pro mechanické a jiné vlastnosti. [1]

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

měrnou strukturou nevytvářejí krystalickou strukturu vůbec pro jejich tuhou prostorovou síť zabraňující volnému pohybu jednotlivých segmentů makromolekul. [1]

Při krystalizaci polymerů obvykle dochází k tvorbě sférolitů, které v závislosti na molekulární struktuře řetězců a na krystalizačních podmínkách dosahují různé velikosti od 0,001 do několika mm. Sférolity jsou komplexní anizotropní polykrystalické útvary složené z lamelárních, páskových nebo fibrilárních krystalů. Bývají navzájem odděleny většími či menšími oblastmi méně uspořádaného nebo amorfního polymeru. Protože makromolekuly jsou různě zapleteny, nemůže dojít ke kompletní krystalizaci. Některé termoplasty krystalizují rychle, jiné pomalu a tak je nemolekulární struktura ovlivněna rychlostí ochlazování během tvarovacího procesu. Proto tok taveniny a teplota ve výstřiku ovlivňují nadmolekulární strukturu výrobku, což se výrazně odrazí v jeho konečných vlastnostech. Rovnoměrnost a velikost sférolitů ovlivňuje významným způsobem užitek vlastnosti polymerů, např. houževnatost, odolnost proti opotřebením, kluzné vlastnosti, rozměrovou stálost apod. [1]

Tab. 2. Vlastnosti amorfních a semikrystalických polymerů. [6]

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

nebo rozpouštědly	(vysoká povrchová energie)	(nízká povrch. energie)
-------------------	----------------------------	-------------------------

### 1.3.4 Reaktoplasty

Makromolekuly reaktoplastů, na rozdíl od termoplastů, jsou propojeny do husté souvislé sítě, takže s růstem teploty se nemohou roztavit a obvykle zvyšují svoji tuhost a tvrdost (proto jim také dříve říkalo termosety). Při dostatečně vysoké teplotě pak reaktoplasty degradují nebo dokonce hoří. [1]

Během vstřikovacího procesu reaktoplasty nejprve teplem měknou, účinkem tlaku pak vyplňují prostor formy a dostávají její tvar. Důsledkem probíhajících chemických reakcí, kdy dochází k zesíťování molekulárních řetězců, je reaktoplast vytvrzován a přechází v tuhý, netavitelný výrobek. Reaktoplasty jsou tedy teplem tvrditelné. [1]

### 1.3.5 Elastomery

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

Pro elastomery je společná schopnost vulkanizace, tj. řídkého, případně i hustého síťování řetězců. Tím se dociluje především zamezení viskózního toku, protože zesíťované makromolekuly jsou chemickými příčnými vazbami fixovány na stejném místě v polymerní hmotě a nemohou měnit těžiště. To vede k rozměrové stabilitě výrobku ve značném rozsahu teplot (teoreticky je výrobek jediná obří molekula). [1]

Existuje velké množství druhů kaučuků, mezi nejznámější je možno zařadit: přírodní kaučuk, polybutadienový kaučuk, butadien-styrenový kaučuk, nitrilové kaučuky, izoprenový kaučuk, chloroprenový kaučuk, butylkaučuk, ethylenpropylenový kaučuk, silikonový kaučuk, polysulfidový kaučuk, polyuretanové kaučuky, fluorkaučuky a další. [1]

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

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

- kaučuk se převede ze stavu převážně plastického do stavu převážně elastického,
- nevulkanizovaný kaučuk je rozpustný některých rozpouštědlech, vulkanizovaný jen botná,
- vulkanizací se kaučuk stává méně citlivý ke změnám teploty, zachovává si ohebnost a tuhost ve značném teplotním rozsahu. [1]

Pro vulkanizované kaučuky, u nichž je zesíťování provedeno jen velmi řídkce, jsou charakteristické tyto vlastnosti: velká elasticita, schopnost zadržet velké množství energie, odolnost proti opakovaným deformacím, houževnatost a dobrá odolnost proti opotřebení, relativně malá propustnost pro vodu a plyny, značná chemická odolnost, dobré elektroizolační vlastnosti, malá závislost vlastností na teplotě. [1]

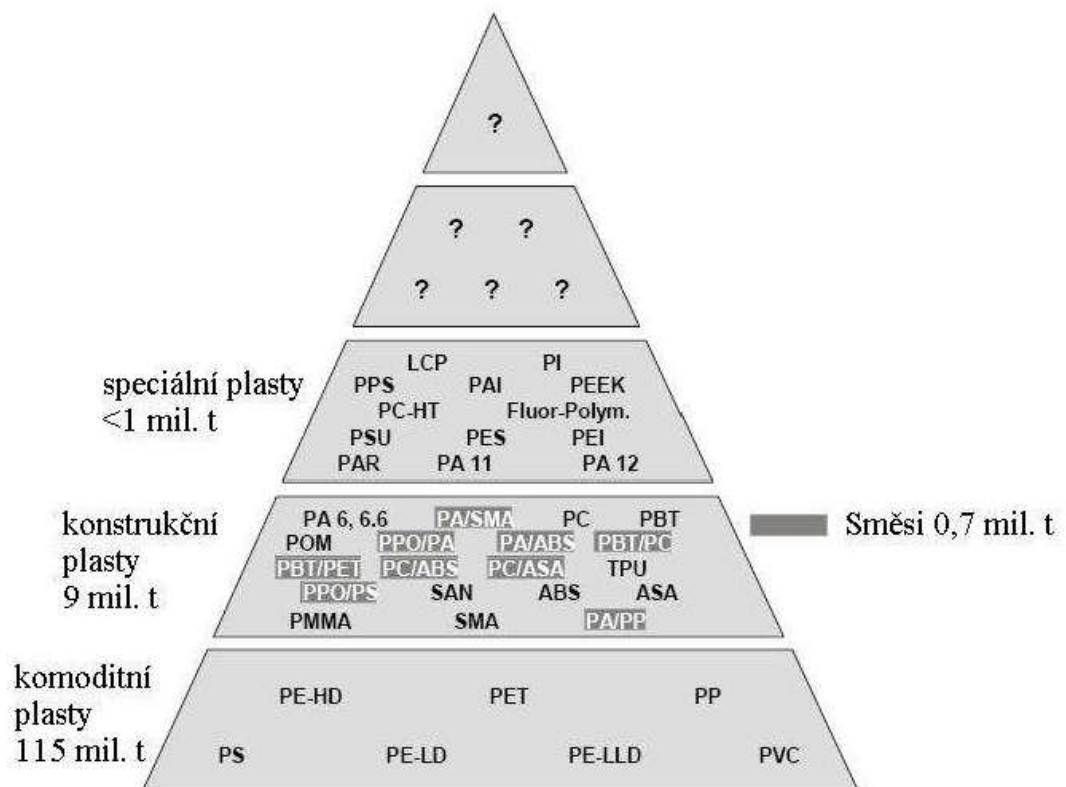
Vlastnosti vulkanizátů je možno měnit složením kaučukové směsi ve velmi širokém rozsahu. Mezi nejdůležitějšími přísadami hrají hlavní roli tzv. aktivní plniva. Při jejich přidavku do kaučukové směsi se výrazně zlepší pevnost v tahu, strukturální pevnost, odolnost proti opotřebení a další vlastnosti.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

### 1.3.6 Rozdělení podle postavení na trhu

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

- tzv. komoditní plasty představují největší objem výroby i spotřeby, ale současně jsou ze všech polymerů nejlevnější. Do této třídy patří v podstatě jen čtyři základní skupiny polymerů a sice polyethyleny, izotaktický polypropylen včetně svých modifikací a kopolymerů, polystyren a polyvinylchlorid;
- konstrukční plasty jsou proti komoditním zřetelně dražší, ale nabízejí mnohem lepší užité vlastnosti a často také zřetelně vyšší teplotní odolnost. Do této třídy patří polyamidy, kopolymery ABS, polyethyltereftalát (PET) a různé kompozity a směsi;
- speciální polymery nabízejí unikátní užité vlastnosti, ale jsou velmi drahé. Sem patří polysulfony, polyimidy, polyether-ether-keton (PEEK), kapalně krystalické polymery a materiály pro lékařské aplikace. [5]

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



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

### 1.3.7 Rozdělení podle nejvhodnějšího použití

Rozdělení plastů podle nejvhodnějšího použití je následující:

- plasty používané na výrobu běžných spotřebních předmětů různé tuhosti včetně konstrukčních dílů, mohou mít různou strukturu – krystalické, amorfní, lineární i zesíťované polymery;
- elastomerní kaučuky k výrobě vysoce elastických předmětů v teplotním rozsahu -80 až +140°C. Kaučukovité látky v nevulkanizovaném stavu mají zpravidla lineární nebo mírně rozvětvenou a značně nepravidelnou strukturu, která je právě příčinou toho, že elastická deformace těchto látek je možná ve velké teplotní oblasti;
- materiály vláknotvorné, které mají přísně lineární strukturu, bývají krystalické, mají velkou pevnost a v orientovaném stavu mají vysokou anizotropii vlastností;
- polymery pro výrobu nátěrových hmot, jde o přechod mezi kaučuky a plastomery;
- polymery pro speciální účely. [2]

### 1.4 Zpracovatelnost polymerů

Zpracovatelnost polymerů je především ovlivněna:

- polymerními přísadami,
- šarží polymeru,
- navlhavostí polymeru,
- molekulární homogenitou, která je určena distribuční křivkou,
- nadmolekulární homogenitou (pravidelnost krystalické struktury ve výstřiku). [1]

### 1.5 Přísady do polymerů

Polymery jsou zřídka používány samotně, ale za účelem zlepšení vlastností se do nich přidávají různé přísady. Pojem přísady zahrnuje látky, které jsou dispergovány v polymerní matici a ovlivňují fyzikální strukturu polymeru (obzvláště jeho morfologii) a tím i jeho chování při zpracovatelském procesu a výsledné vlastnosti výrobků (viz Tab. 3). O účinku, resp. účinnosti jednotlivých přísad rozhoduje kromě jejich vlastností a poměrného zastou-

pení v polymerní směsi především stupeň jejich rozptýlení. Přísady se rozdělují podle svého účinku na základní vlastnosti polymerů na:

- přísady modifikující fyzikální vlastnosti polymerů (změkčovadla, maziva a separační činidla, vysokomolekulární modifikátory, plniva, výztuže a vazebné prostředky, pigmenty a optické zjasňovací látky, nadouvadla, antistatika a síťovací prostředky),
- přísady mající ochranný účinek vůči degradačním procesům (stabilizátory termooxidace, tj. antioxidanty, tepelné stabilizátory, světelné stabilizátory, zhašedla a biocidní látky). [7]



Tab. 3. Možnosti zlepšení vlastností polymerů přísadami. [8]

Požadovaná vlastnost	Potřebná přísada
<i>Při zpracování</i>	
Optimální a konstantní viskozita taveniny (výkon, používání nižších teplot)	Maziva, stabilizátory, změkčovadla
Odolnost proti degradaci při teplotě zpracování	Tepelné stabilizátory, antioxidanty
Dobré a ekonomické vmíchání přísad do polymerů	Změkčovadla, dispergační činidla
Zabránění nalepování polymeru na stěny forem (ulehčení vybírání)	Maziva, separační činidla
Zabránění obroušení zařízení	Maziva
Dobrá manipulace s výrobky (další zpracování)	Kluzná a protikluzná činidla, antiblokovací činidla
<i>Při používání</i>	
Optické a povrchové vlastnosti (vzhled, lesk, barva, průhlednost, hladkost, malá špinivost, elektrická vodivost)	Plniva, barviva, nukleací činidla, změkčovadla, antistatika, stabilizátory, antiblokovací činidla, optické zjasňovače
Mechanické vlastnosti (tvrdost, pevnost v tahu a ohybu, modul pružnosti, odolnost proti únavě, tvarová a rozměrová stálost, odolnost proti otěru, rázová houževnatost)	Plniva a výztuže, změkčovadla, síťovací a vytvrzovací činidla (často se tyto vlastnosti modifikují vhodnými polymery)
Odolnost proti degradaci (tepelné, světelné, biochemické a chemické)	Antioxidanty, světelné stabilizátory, pigmenty, vhodná plniva, biocidy
Regulovaná degradace (urychlená degradace)	Stabilizátory, degradační činidla
Odolnost proti hoření a tvorbě dýmu	Retardéry hoření, anorganické plniva
Nižší hmotnost a nižší cena	Nadouvadla a plniva

## 2 VLASTNOSTI A CHOVÁNÍ POLYMERŮ

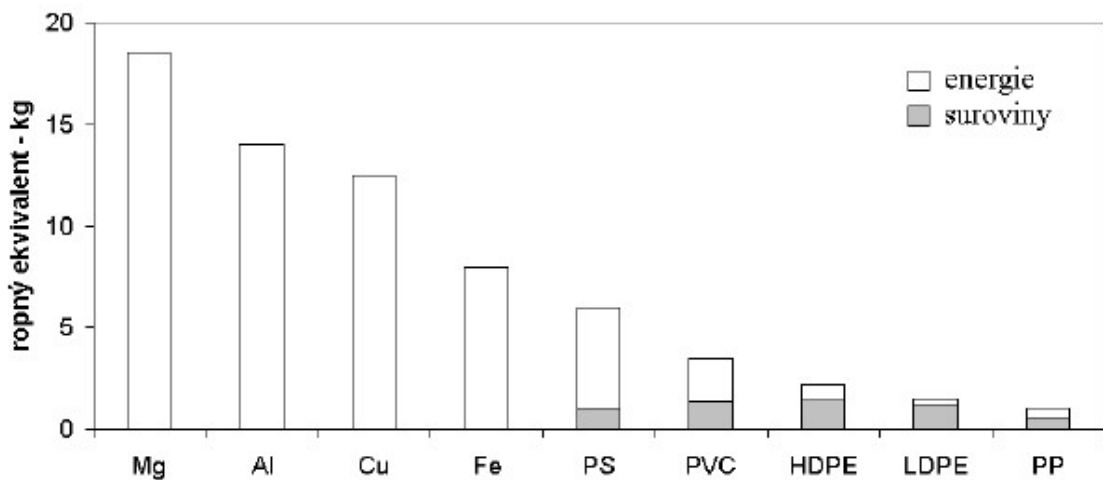
### 2.1 Základní vlastnosti

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

Typické vlastnosti jsou:

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

- dobrá chemická odolnost – plasty nejsou tak náchylné ke korozi jako kovy. Jsou odolné vůči velkému množství chemických sloučenin, už jen tato vlastnost je tak rozšířila na trhu. Pro příklad je možno zmínit plasty odolné vůči palivům v automobilových dílech nebo domácí prostředky a plasty pro balení jídla a kosmetiky. Nicméně plasty jsou rozpustné v organických rozpouštědlech, proto při každé plánované aplikaci plastu a daného kontaktního média musí být vše řádně zváženo;
- recyklovatelnost – plasty se dají znovu použít. Můžou být recyklovány mnoha metodami;
- nízká spotřeba energie při výrobě surovin – výroba surovin pro plasty vyžaduje velmi málo energie. Obr. 5 ukazuje relativní spotřebu energie na výrobu různých kovů ve srovnání s některými plasty. Je evidentní, že většina plastů spotřebuje méně než 25% energie, kterou spotřebují klasické kovové materiály. [9]

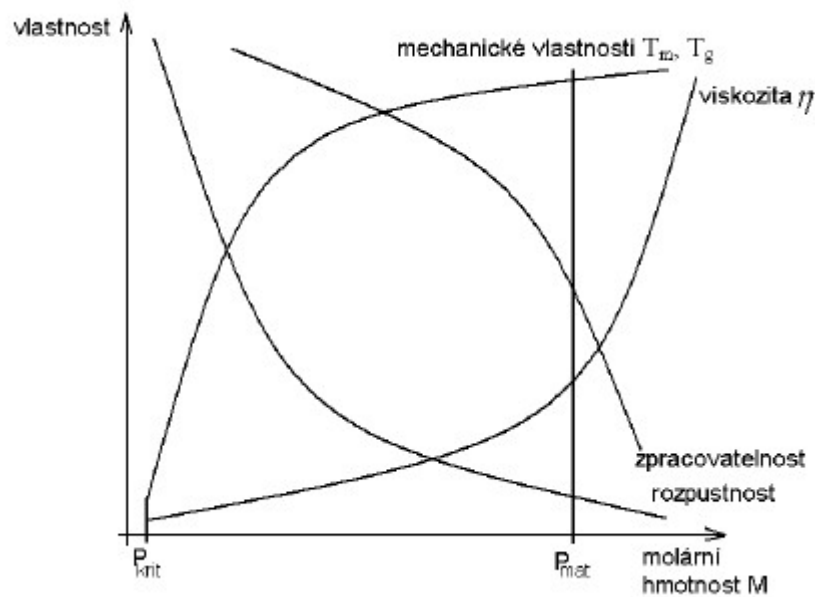


Obr. 5. Energetická spotřeba pro výrobu různých druhů materiálů. [6]

Plasty se staly surovinovou základnou téměř pro všechna průmyslová odvětví. V některých oblastech jsou díky svým specifickým vlastnostem nenahraditelné. Mezi nejdůležitější oblasti patří např. automobilový a letecký průmysl, elektronika, zdravotnictví apod. [1]

## 2.2 Molární hmotnost a vlastnosti polymerů

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



Obr. 6. Závislost některých polymerů na  $P$ . [3]

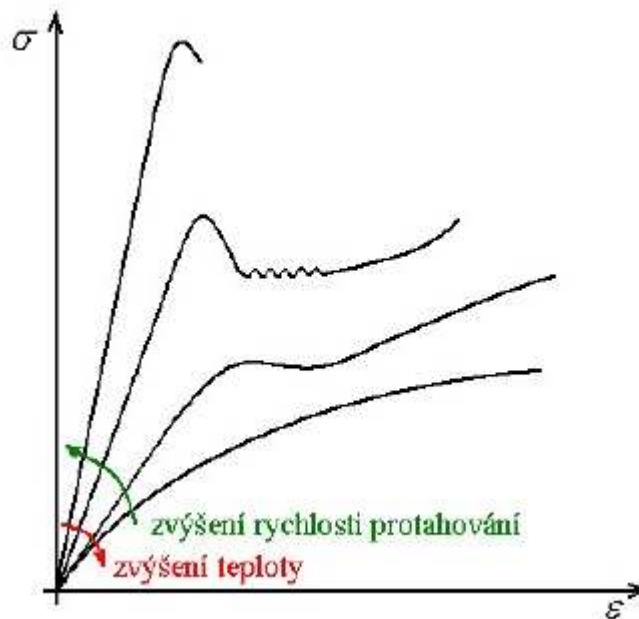
Tak např. některé užité mechanické a termické vlastnosti polymerů začínají až od určité hodnoty polymeračního stupně  $P$ , která je pro různé polymery rozdílná a pak se s rostoucím  $P$  zlepšují jen zvolna. Proto mají v praxi používané polymery polymerační stupeň  $P$  takový, který představuje kompromis mezi dobrými mechanickými vlastnostmi a snadnou zpracovatelností. [10]

### 2.3 Mechanické vlastnosti polymerů

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

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

Na průběh tahové zkoušky má vliv kromě tvaru a rozměru zkušebního tělesa také rychlost protahování a teplota (Obr. 7). Polymery je nutno také zkoušet z hlediska jejich dlouhodobých vlastností, protože plasty zatížené konstantním napětím mají po určité době sklon k tečení materiálu (tzv. creep), kdy deformace roste s časem. Pro konstruování s plasty je potom potřeba znát nejen výše uvedené veličiny, ale také modul v ohybu, pevnost v tlaku, rázovou houževnatost aj. [4]

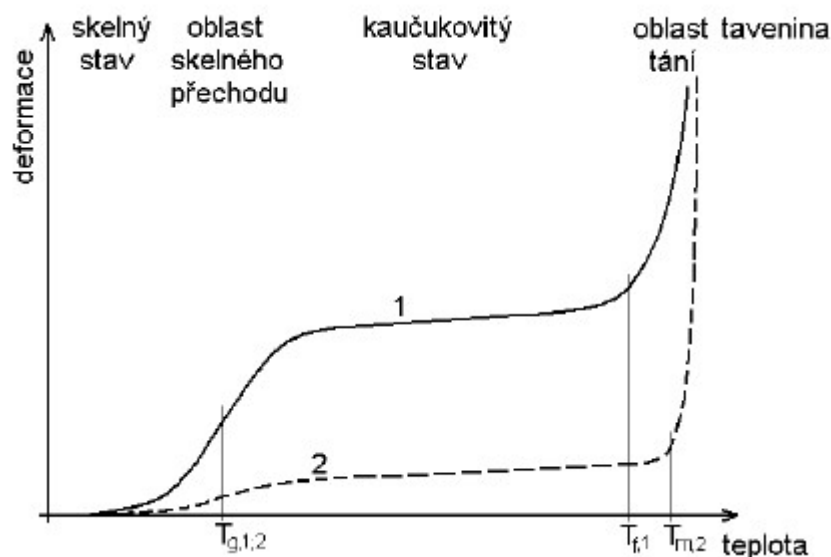


Obr. 7. Deformační křivka. [11]

## 2.4 Termomechanické chování polymerů

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

- skelný stav,
- oblast skelného přechodu,
- kaučukovitý stav,
- oblast tání,
- tavenina. [1]



Obr. 8. Termomechanická křivka amorfního (1) a semikrystalického (2) polymeru. [12]

Z hlediska chování za různých teplot lze amorfní polymer charakterizovat teplotou skelného přechodu  $T_g$  a teplotou tečení  $T_f$  (tyto teploty nemají ostrý přechod), semikrystalický polymer pak teplotou  $T_g$  a teplotou tání  $T_m$ . Teplota  $T_g$  vymezuje skelný stav polymeru, s této oblasti skelného přechodu nastává poměrně náhlá změna mechanických, optických a tepelných vlastností. Polymer je v této oblasti tvrdý a křehký, chová se jako organické sklo. Využití amorfních polymerů spadá právě do této skelné oblasti. Mezi teplotou  $T_g$  a  $T_m$  ( $T_f$ ) se polymer nachází v kaučukovitém (viskoelastickém) stavu, tato teplotní oblast je charakteristická při využívání semikrystalických polymerů v praxi. Za teplotami  $T_m$  ( $T_f$ ) pak polymer přechází v taveninu. [1]

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

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

## 2.5 Reologické chování polymerů

Vědní obor reologie se zabývá deformací a tokem látek. Chování taveniny při jejím tečení a znalost reologických vlastností jsou důležité informace nejen pro zvolení vhodného materiálu do procesu, kontrolu požadovaných vlastností materiálu a kontrolu průběhu procesu, ale také pro navrhování strojních součástí jako jsou např. šneky, vstřikovací trysky, formy apod. k dosažení ekonomického a funkčního optima. [1]

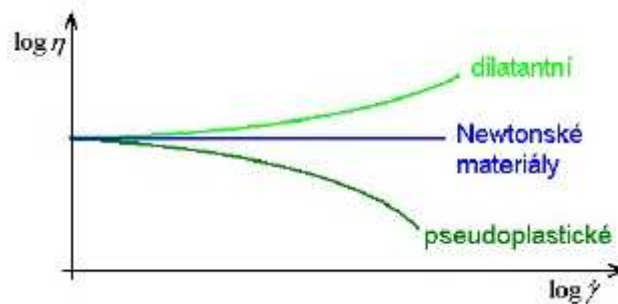
Reologické chování polymerní taveniny je viskoelastické. Znamená to, že polymerní tavenina se chová viskózně (jako kapalina), ale také elasticky (jako tuhá látka). Pro popis viskoelastického chování polymerní taveniny slouží Maxwellův model, jedná se o mechanický model sériového zapojení pružiny a pístu, který dobře popisuje některé charakteristické veličiny viskoelastického chování. Ve většině případů však dominují u polymerních tavenin viskózní vlastnosti. [1]

Tyto viskózní vlastnosti jsou charakterizovány viskozitou, což je míra odporu taveniny proti tečení. Prakticky se viskozita měří rotačními nebo kapilárními viskozimetry. Při toku taveniny do dutiny formy během vstřikování se tavenina lepí na přilehlý povrch a dochází tak ke smykovému toku (jednotlivé vrstvy taveniny se po sobě smýkají). Mezi základní charakteristiky smykového toku patří smyková viskozita  $\eta$ , rychlost smykové deformace  $\dot{\gamma}$ , normálové napětí  $\sigma$  a smykové napětí  $\tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma}$ . [1]

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

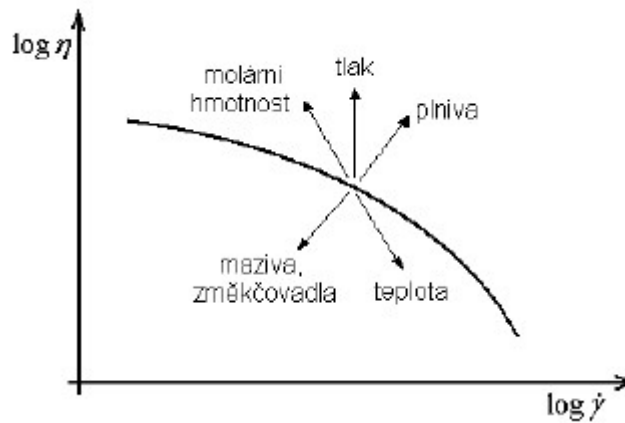
- dilatantní – viskozita roste s rychlostí smykové deformace (vysoce plněné materiály),
- Newtonské – viskozita zůstává konstantní (např. voda),
- pseudoplastické – viskozita klesá s rychlostí smykové deformace (většina plastů).

[1]



Obr. 9. Tokové křivky různých materiálů. [1]

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

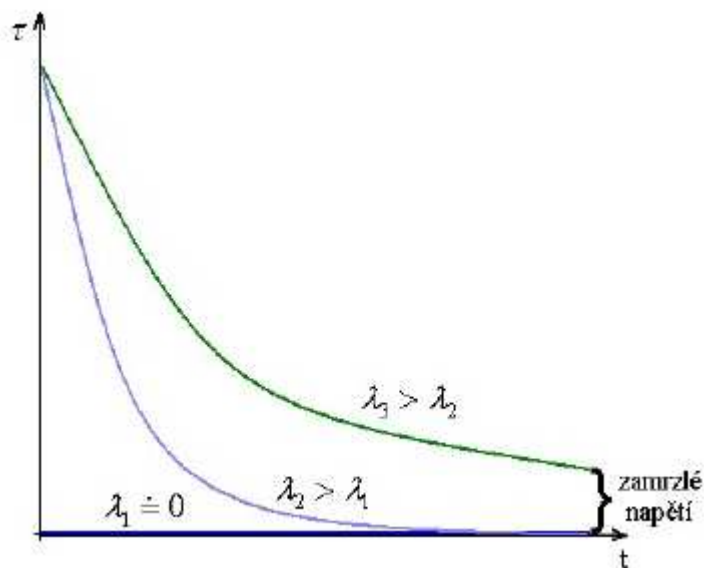


Obr. 10. Toková křivka v závislosti na různých parametrech. [6]

Pro další reologickou charakterizaci polymerů je obvykle potřeba znát elongační viskozitu (odpor taveniny proti protahování), skluz na stěně, rozdíl normálových napětí relaxační čas, překmit napětí a další. [1]

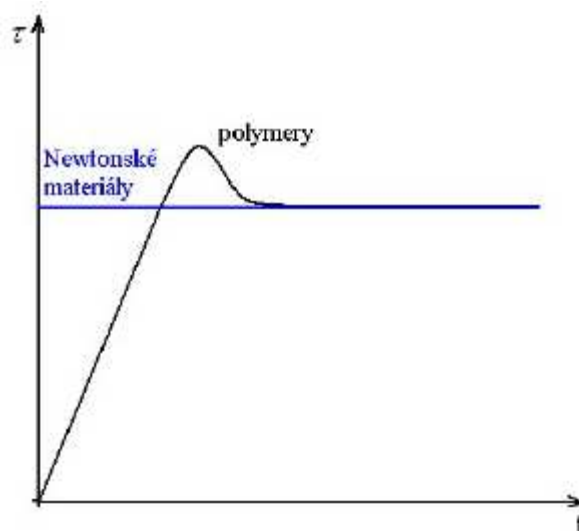
Má-li materiál dlouhé doby relaxace  $\lambda$ , je možné, že během zpracování ztuhne dříve, než napětí úplně relaxovalo (Obr. 11). Tato zamrzlá napětí mohou být nakonec uvolněna a mohou vést k jevům smrštění a (nežádoucí) deformaci nebo předčasnému vzniku trhlin a stárnutí. [1]





Obr. 11. Relaxace napětí [1]

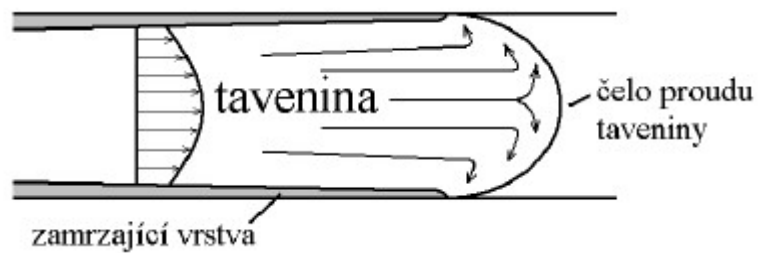
Překmit napětí je třeba znát kdykoliv se jedná o diskontinuální proces. Jak je patrné z obrázku (Obr. 12), při zahájení toku dosáhnou Newtonské materiály úrovně vyvozeného napětí okamžitě, zatímco polymerní kapaliny vykazují překmit napětí, který je výsledkem ustalování rovnováhy mezi zapletenými polymerními řetězci. [1]



Obr. 12. Překmit napětí. [1]

## 2.6 Tok taveniny ve formě

Při zaplňování dutiny formy nenastává skluz taveniny po stěně, ale dochází k „valení“ taveniny. Tento laminární tok je také označován jako fontánový tok (Obr. 13). [1]



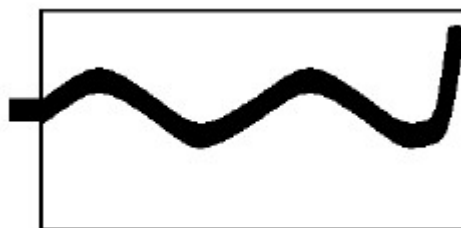
Obr. 13. Fontánový tok. [1]

Tavenina uprostřed kanálu nejprve zpomalí, jakmile dosáhne čela proudu taveniny a následně se začne pohybovat kolmo ke stěně vtokového kanálu. Tato stěna je chladná a tak je za postupujícím čelem proudu taveniny formována zamrzající vrstva. Jednotlivé částice taveniny jsou natahovány, jak se postupně pohybují ze středu taveninového proudu ke stěně kanálu (elongační tok). [1]

Biaxiální orientace (způsobená kombinací smykového a elongačního toku) při fontánovém toku vede ke vzniku anizotropních vlastností. Tato orientace je velmi žádaná u polymerů plněných skleněnými vlákny. [1]

Problémem, který může výrazně ovlivnit kvalitu výstřiku je styk dvou proudů taveniny, např. v důsledku obtoku překážky ve dráze toku. V místě spojení dvou proudů taveniny vzniká studený spoj známý pod pojmem „weld line“, který má za následek zhoršení mechanických vlastností. Problém se obvykle řeší vhodným uspořádáním vtoků nebo jejich umístěním tak, aby studený spoj vznikl v místě ovlivňující funkci budoucího výstřiku co nejméně (v místě nejmenšího mechanického namáhání). [4]

Pokud tavenina vykazuje nedostatečné narůstání k vytvoření kontaktu se stěnou formy, dojde k jevu zvanému „jetting“ – tryskový tok (Obr. 14). Je typickým jevem pro vysoce plněné materiály, protože mají sníženou elasticitu taveniny a tedy vykazují menší narůstání. Výsledkem je nekvalitní povrch a vytvoření několikanásobného počtu studených spojů vede ke snížení mechanických vlastností. [1]

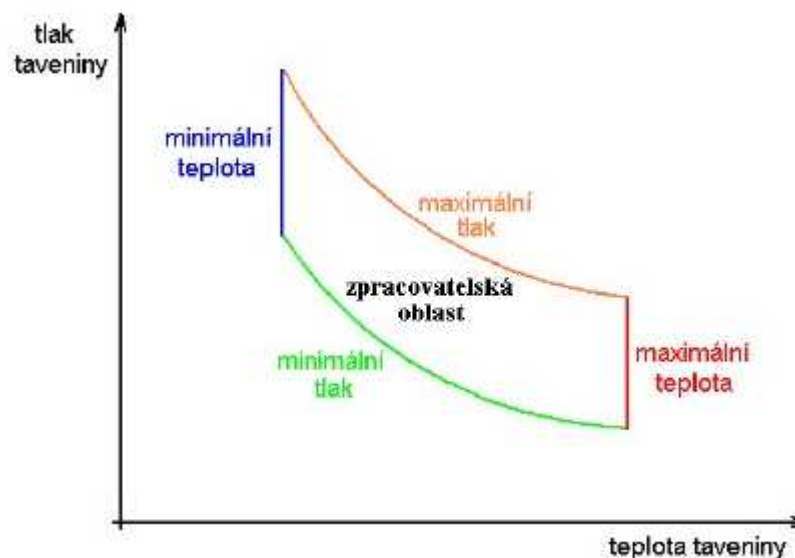


Obr. 14. Jev „jetting“ [1]

## 2.7 Zpracovatelská oblast procesu vstřikování (Molding Area Diagram)

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

- teplota taveniny:
  - pokud je teplota příliš nízká, dojde k rychlému zatuhnutí taveniny a nedostatečnému vyplnění dutiny formy,
  - naopak při vysoké teplotě může dojít k degradaci polymerního materiálu,
- tlaku taveniny:
  - při použití příliš vysokého tlaku by mohlo dojít k otevírání formy,
  - při malém tlaku je forma nedostatečně vyplněna taveninou, mohou se vyskytnout staženiny apod. [1]

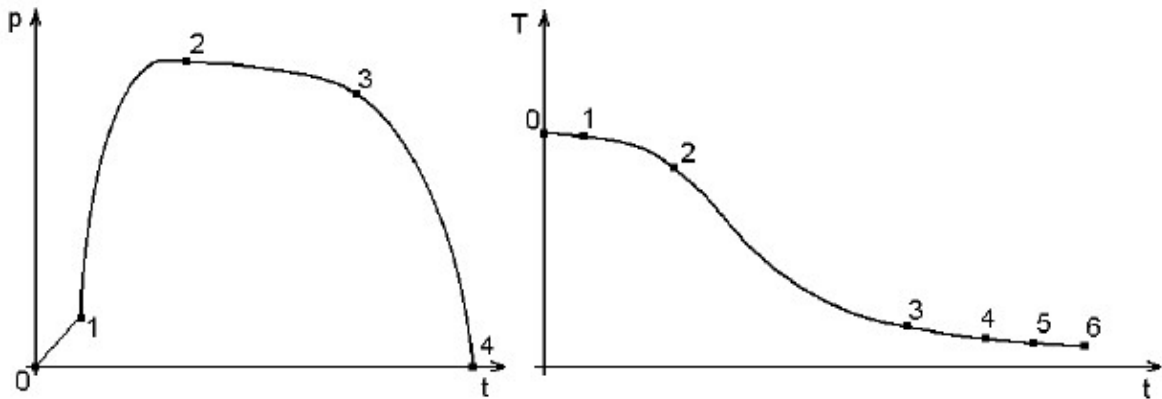


Obr. 15. Zpracovatelská oblast procesu vstřikování [1]

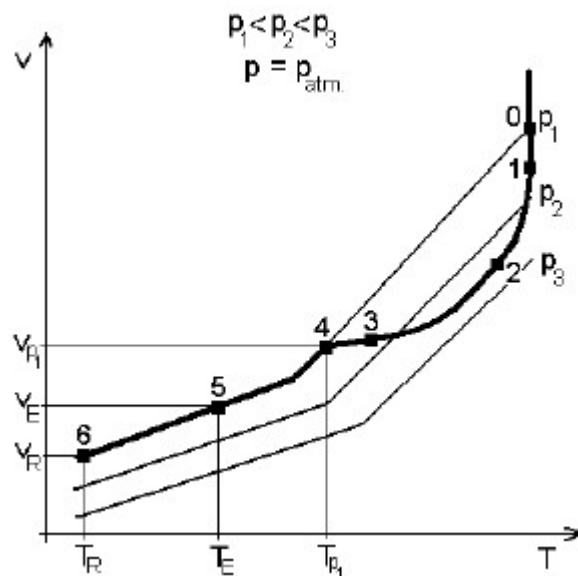
## 2.8 Tlak, teplota a měrný objem v průběhu vstřikování

Znalost termodynamických charakteristik polymerů jako jsou hustota, měrné teplo, tepelná a teplotní vodivost a zejména pV diagram (závislost specifického objemu na teplotě při různých tlacích) umožňuje teoretické pochopení fyzikálních procesů probíhajících v dutině formy. To přispívá nejen k teoretickému objasnění procesu vstřikování, ale také k přesnějšímu nastavení optimálních podmínek vstřikovacího procesu. [1]

Na obrázku (Obr. 16) je znázorněn průběh tlaku a teploty v závislosti na čase a na obrázku (Obr. 17) je zobrazena závislost specifického objemu na teplotě při různých tlacích během vstřikovacího procesu, kde index R značí pokojovou (Room) a index E vyhadzovací (Ejection) teplotu. [1]



Obr. 16. Průběh tlaku a teploty během procesu vstřikování. [4]



Obr. 17. Diagram  $p-v-T$  během procesu vstřikování. [4]

Jednotlivé fáze vstřikovacího procesu pak jsou:

- 0 – 1: objemové plnění,
- 1 – 2: stlačování taveniny,
- 2 – 3: izobarické chlazení,
- 3 – 4: izochorické chlazení,

- 4 – 5: ochlazování na teplotu vyhazování,
- 5 – 6: ochlazování na pokojovou teplotu. [4]

### 3 PLNIVA

Plniva jsou nejčastěji nízkomolekulární látky, které jsou přidávány do polymerních matric. [13]

Jsou to pevné částice inertních materiálů různých tvarů a velikostí, které se přidávají do pojiva s cílem zvýšit pevnost, tvrdost, tvarovou stálost, zlepšit zpracovatelnost, snížit hořlavost a smrštění, získání speciálních vlastností výsledného materiálu, např. elektrickou vodivost, magnetické vlastnosti nebo se přidávají také pro zlevnění produktu. Nejužívanějšími plnivy jsou uhličitan vápenatý (křída), mastek, kaolin, křemenná moučka, písek aluminiumtrihydrát (snížení hořlavosti), kysličník hořečnatý (zahušťování SMC prepregů), vločky kysličníku hlinitého (estetické efekty), oxid křemičitý, kameninová drť, dřevěné piliny, saze, shungite, uhlíková vlákna, grafit, ferity, hliníko-skleněná vlákna a kuličky, celulózová vlákna atd. [14,15]

Zavedeme-li do polymerní matrice plnivo, mění se výsledné vlastnosti celého systému. Plnivo snižuje zpravidla deformační možnosti, ovlivňuje disipaci energie a strukturní pevnost. Důležitým faktorem jsou povrchové síly mezi plnivem a polymerní matricí, jakož i tvar částic. Ztužující plniva zvyšují strukturní pevnost a snižují tažnost. Mezi reálnými plnivy jsou rozdíly, které závisí na velikosti částic, vzdálenosti mezi jednotlivými částicemi a snášivosti. [16]

Plniva nejsou nezbytné pro každou polymerní směs, ale některé jsou životně důležité pro konkrétní koncové uživatele.

Základní požadavky na plniva:

- nízké náklady,
- nízká specifická hmotnost,
- tepelná stabilita,
- lehce dostupné,
- neutrální (ani kyselé ani alkalické),
- snadná manipulace,
- nízká vodní a olejová absorpce (nasákavost),

- nesmějí absorbovat polymer,
- nesmějí zabraňovat toku polymeru.

Důležité parametry plniv – ovlivňující strukturu a vlastnosti polymerního kompozitu:

- složení plniva,
- velikost plniva,
- distribuce velikostí,
- průměrná mezičásticová vzdálenost,
- aspektní poměr tedy i tvar (sférický, vláknitý, destičkovitý, ...),
- povrch částic (typ vazby, navlhavost, nukleární a katalytická aktivita),
- tvrdost, abrazivní chování během zpracování směsi,
- disperzní chování,
- závislost na zpracování. [17]

### 3.1 Prostorové rozmístění plniv, velikost plniv

Plniva mohou být v kompozitu dispergovány či agregovány. Pro praktické účely je žádoucí, aby plnivo bylo co nejrovnoměrněji dispergováno, čímž se omezí tzv. koncentrátoři napětí, které jsou velmi pravděpodobnou příčinou defektů v kompozitu, způsobující snížení lomu-ové houževnatosti. Koncentrátoři napětí mohou být velké primární částice plniva nebo agregáty malých částic. Kritická hranice velikosti částic nebo agregáty malých částic. Kritická hranice velikosti částic nebo agregátů je individuální pro konkrétní polymer a je určena morfologií polymeru. K prudkému růstu agregátu dochází při překročení tzv. kritické objemové koncentrace plniva. Shlukování částic významně zvyšuje vnitřní lokální koncentraci napětí. [18] Překročení kritické lokální koncentrace plniv dochází k prudkým změnám fyzikálních vlastností kompozitu, např. elektrické vodivosti, modulu pružnosti apod. Napěťový koncentrační faktor nemá přímou souvislost s objemovým podílem. Napětí kolem sledované částice je ovlivněno nejbližším susedem – částicí. Vlastní proces dispergace závisí na velikosti částic a na viskozitě polymeru, tedy při nízkých viskozitách a malých částicích bude dispergace obtížná. Dále závisí na interakci mezi plnivem a polymerem a v neposlední řadě na dokonalé homogenizaci částic. [13,18]

## 3.2 Rozdělení plniv

Existuje mnoho typů plniv, které mohou být rozděleny následovně:

### 1. Dle geometrické konfirmace:

Koule, krychle – křída, dolomit, skleněné kuličky

Vlákna – skleněná vlákna, uhlíková, grafitová, aramit

Destičky – kaolín, živec, mastek slída. [19]

### 2. Dle typu materiálu:

Organické:

- celulózní – bavlněné tkaniny, dřevěný prach, lignin, sisal, papír
- necelulózní – vlna, korkový prach

Anorganické:

- kovové nebo keramické, skleněno-vláknové, uhlíko-vápenaté, kaolinit, živec, mastek, jíł
- elektrovedivé (saze, uhlíková vlákna, kovový prach, grafit, různé elektrovedivé polymery, hliníkový prach)

Různé: sójová moučka, nadrcené skořápky (moučka) z ořechů, nadrcené skořápky (moučka) z kokosů. [19]

### 3. Dle funkce:

Plniva můžeme v podstatě rozdělit do 2 skupin dle jejich efektu na vlastnosti:

- NEVYZTUŽUJÍCÍ
- VYZTUŽUJÍCÍ –
  - izomerická (sférická) – vyznačují se rozměry stejnými zhruba ve všech směrech, jsou charakterizována průměrnou velikostí  $d$ , maximální velikostí nebo velikostí, pod kterou je 97% částic  $d_{97}$ . Příkladem je  $\text{CaCO}_3$
  - neizometrická (nesférická)
    - vrstevnatá – např. slída, mastek. Poměr průměru k tloušťce  $d/h > 10$



- vláknitá – př. skleněná, uhlíková vlákna, whiskery, charakterizována poměrem délky k průřezu  $l/d$
- částice nepravidelného tvaru atd. [20]

### 3.3 Druhy plniv

#### 3.3.1 Uhlíkové saze

Mají největší význam z používaných plniv kaučukových směsí. Saze vznikají nedokonalým spalováním uhlovodíkových surovin. Skládají se z uhlíku (96 – 99%) s menším obsahem kyslíku (0,5 – 2,5%) a vodíku (0,1 – 1%). Kromě toho obsahují ještě vlhkost a popel. Uhlík tvoří grafické vrstvy, které vytvářejí krystality. Ty jsou uspořádány k sobě pod různými úhly a tvoří tak sazové částice. Tyto částice různé velikosti se spojují v kratší nebo delší řetězce, popřípadě agregáty. Jednotlivé částice jsou k sobě vázány společnou grafitickou slupkou, která je v průběhu zpracování narušitelná. Na velikost vznikajících částic a jejich strukturu má vliv jednak způsob výroby, jednak použitá surovina. Saze mají v kaučuku ztužující účinek, který je tím větší, čím menší jsou částice a čím větší je povrch sazí. S rostoucí koncentrací sazí roste spojitě tuhost materiálu. Tažnost s plněním klesá. [13,21]

#### Výroba a rozdělení sazí:

Saze se vyrábějí neúplným spalováním nebo tepelným rozkladem uhlovodíkových sloučenin. Největší technický význam mají procesy využívající neúplného spalování. Nejdůležitější suroviny jsou – oleje ropného původu, kapalné produkty odpadající při zpracování uhlí, zemní plyn a acetylen. Neúplným spalováním vznikají saze **lampové, kanálové a retortové**. Termickým rozkladem zemního plynu vznikají saze **termické**, z acetyleny saze **acetylenové**. Největší význam má výrobní způsob retortový. [22]

Při vzniku sazí probíhají tyto základní děje:

- rozklad uhlovodíku a jeho dehydrogenace,
- tvorba grafitických vrstev, jejich srůstání za vzniku částic složitějšího tvaru a aglomerace těchto částic.

Sazové částice se získávají usazováním nebo filtrací. [13]

Hlavní faktory, jimiž lze regulovat vlastnosti sazí, jsou velikost a tvar plamene, typ paliva a poměr vzduchu k uhlovodíku. Čím více vzduchu je při nedokonalém spalování přítomno, tím jsou zpravidla saze jemnější, výtěžek menší a cena vyšší. [13]

Vlastnosti sazí ovlivňují významně průběh dispergace i vlastnosti sazí, obzvláště jejich měrný povrch a struktura. Částice sazí s velkým měrným povrchem jsou navzájem vázány většími kohezními silami a k rozrušení jejich aglomerátů je nutná větší energie. [13]

Nejobtížněji se dispergují saze s velkým měrným povrchem a malou strukturou, protože nízkostрукturní saze dávají kaučukové směsi s poměrně nízkou viskozitou a smykové síly ve směsi pak nestačí zajistit důkladný rozpad aglomerátů. To znamená, že z důvodu dobré dispergace je nutno volit saze, u kterých s rostoucím měrným povrchem roste i jejich struktura. [22]

#### Saze a míchání:

Při konvenčním postupu míchání se nejprve míchá polymer a teprve pak se přidávají saze v jedné nebo více dávkách. Nesprávný typ sazí může vést k prodloužení doby míchání, aniž by se dosáhlo požadované úrovně disperze. [13]

Kaučukové směsi se špatně dispergovanými sazemi obsahují oblasti, kde koncentrace sazí je příliš vysoká a oblasti, kde koncentrace sazí je příliš nízká. Výsledná směs se pak obtížně zpracovává a vulkanizát má poměrně špatnou odolnost proti oděru, nízkou pevnost, špatnou odolnost proti dalšímu trhání a může mít sníženou odolnost proti dynamické únavě. [13,21]

Saze byly užívány jako černé barvivo v barvách a inkoustech již od prehistorických časů a jsou ještě široce používány v tiskařských inkoustech, tonerech pro xerografii, laserových tiskárnách a v chemickém průmyslu. Jsou také využívány jako potravinářské barvivo, například lékořicové bonbóny. Nejdůležitějším způsobem využití je vulkanizace kaučukových pneumatik. Toto využití spotřebuje 85% na trhu uplatněných sazí. [21]

### **3.3.2 Duté skleněné kulové částice**

Jejich výhodou je jejich nízká hustota, která zvyšuje specifický modul plněné pryskyřice a zároveň snižuje hustotu celého kompozitu, dále jako plněná pryskyřice vykazuje lepší chování pod tlakem, např. při lisování. [23]

### 3.3.3 Plné skleněné kulové částice

Mají sice vyšší hustotu než duté, ale umožňují pracovat s pryskyřicemi za většího tlaku. [23]

### 3.3.4 Nesférická plniva

Jsou nejčastěji jehlicovitého či destičkovitého příp. nepravidelného tvaru – tzv. acikulární částice, ty mohou polymer nejen vyztužovat, ale i zpevňovat. Jsou to tzv. aktivní částice. Z nich se nejčastěji používají pro polymery syntetické nebo přírodní minerály jako např. destičky (vločky) slídy, dále mastek, kaolin (i do termosetů), karbonáty,  $Mg(OH)_3$ , dále uhlíkové částice, např. speciální saze jako vodivé plnivo. Patří mezi ně i krátká vlákna a whiskery. [24]

Zajímavé možnosti nabízejí „tenké vločky“, díky svému tvaru účinně zpevňují matici ve všech směrech ve své rovině. U acikulárních částic se udává tzv. aspektivní poměr. Obvykle se nesférické částice přidávají do termosetů a termoplastů pro elektrické a elektronické aplikace (slídové, stříbrné vločky), některé na laky, povlaky (hliníkové vločky). [13]

Z nanočástic se používají např. destičky jílu do fólií na potraviny. [13,24]

### 3.3.5 Vločky a destičky

Jejich výhodou je jejich velmi hladký povrch, neorientují se ve směru toku jako whiskery. Jsou méně anizotropické než whiskery, kompozity z nich mají nižší tendenci k deformaci než kompozity s whiskery. Také umožňují dosáhnout relativně vyššího objemového podílu u keramické matrice, díky nižšímu útlumu zhutňování matrice. [25]

### 3.3.6 Slídové vločky

Do polymerních maticí se nejčastěji používají slídové vločky jako levná a přitom výborná výtěž. Zvláště efektní je v polárních termoplastech, ale taky je účinná v nepolárních termoplastech a v termosetech. Může zaujmout až 80% objemového podílu. Slídové vločky mívají vrstevnatou strukturu, vyznačují se vysokou pevností a tuhostí, tepelnou vodivostí, nízkým koeficientem teplotní roztažnosti, dobrou teplotní a chemickou odolností, nízkým koeficientem tření, výbornou dielektrickou konstantou. [24]

### 3.3.7 Whiskery

Whiskery obvykle dosahují rozměrů 0,01 – 10 $\mu$ m, mají velký povrch, často mají nekruhový průřez – tvar bývá dle konkrétní krystalické struktury, může být trojúhelníkový, šestiúhelníkový, rhombický i jiného tvaru. Průměr monokrystalu je definován jako odmocnina plochy nekruhového průřezu. Tvar whiskeru ovlivňuje mezifázovou oblast, což má vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti kompozitu. I u whiskeru se udává aspektní poměr. Obvykle dosahují poměru více než 10, stejně jako u destiček. [13]

Whiskery mohou v kompozitu existovat jako samotná výztuž nebo se používá v kombinaci s vlákny, nejvíce na zlepšení houževnatosti. [24]

Nejčastější mechanismy porušení jsou: vytažení whiskerů z matrice a vytváření můstků. Nedávné výzkumy objevily, že whiskery mohou fungovat jako dokonce supervodivé plnivo. Výroba whiskerů se bohužel potýká s potížemi. Často je riskantní pro zdraví, další potíží je v dosažení rovnoměrné distribuce, proto probíhají výzkumy na syntézu whiskerů in situ. [24]

Whiskerů existuje mnoho druhů, zde jsou uvedeny jen nejznámější, či nejvíce používané:

- C-whiskery – mají nejvyšší specifickou pevnost a modul E mezi ostatními existujícími výztužemi. Vyznačují se též vysokou elektrickou vodivostí, nevodivý polymer se po přidání C-whiskerů stane vodivým až dokonce supervodivým. Jeden ze způsobů výroby C-whiskerů je depozice par obsahující C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, s katalyzátorem Cu-Ni při 400-330°C. Stupeň grafitizace stoupá s teplotou, při 330°C má whisker lepší vlastnosti jako např. větší průměr, větší aspektní poměr, je méně zkroucen než při grafitizaci při 400°C.
- Keramické whiskery – existují ve více krystalických formách, často se používají do keramických maticí, např. SiC. Jako další příklad lze uvést Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.
- Al, mullite whiskers – vyznačují se nízkou tepelnou vodivostí, používají se tedy jako izolátory tepla.
- Ti whiskery – používají se na bílou oxidovou keramiku, do hliníkových maticí. Např. TiC, TiN whiskery.

- Další whiskery mohou být Al-B whiskery, SiO<sub>2</sub> whiskery – jsou amorfní, pro polymerní matrice. Mají vysokou vyztužovací schopnost díky jejich extrémně vysoké pevnosti vzhledem k jejich velikosti. [24]

### 3.3.8 Skleněná vlákna

Jsou nejrozšířenějšími (asi 80%) vyztužujícími vlákny pro kompozitní materiály. [13]

Vyrábějí se tavením tzv. sklářského kmene, což je směs křemenného písku (cca 70%), vápence, potaše a collemanitu (obsahuje bór). Chemické složení sklářského kmene se liší podle typu skla, pro polymerní kompozity se užívá převážně typ E, tzv. bezalkalické sklo II. hydro-lytické třídy. Sklářský kmen se taví přibližně při 1400°C a z taveniny se v jednostupňovém procesu přímo vytahují tzv. elementární vlákna – tavenina vytéká dnem pece a platino-iridiové slitiny malými otvory o  $\varnothing$  1-2 mm. Průměr vláken je 5-25  $\mu$ m (mikromilimetru) v závislosti na rychlosti odtahu. [13,15]

Přímo pod pecí se ještě za horka nanáší na nanovlákna tzv. přímá apretace, obsahující lubrikační složku, která vlákna „maže“ a tak uskutečňuje jejich další textilní zpracování a zároveň chrání jejich povrch před mechanickým poškozením a ze složky apretační, která obsahuje vazebné prostředky zvyšující adhezi mezi vlákny a maticí. [13]

Vlákna se druzí do pramenů, které se navíjejí na kolony, které jsou pak výchozí jednotkou pro další zpracování jednak pramence (roving), které se užívají přímo např. pro technologii stříkání, tažení, navíjení nebo pro výrobu pramencových tkanin popřípadě vícesměrných výztuží a jednak se zpracovávají na příze se zákrutem, používané při výrobě tenkých tkanin a speciálních hustých tkanin např. pro elektroizolační účely. Část pramenců se zpracovává sekáním na délku 50 mm a výrobu pramencových rohoží – plošný útvar s náhodně orientovanými vlákny. Další část pramenců se seká na délky 2-6 mm a tato krátká vlákna se používají pro výrobu premixů a vyztužování termoplastů. [26]

Typické vlastnosti vláken z E-skla:

- $\varnothing$  11  $\mu$
- hustota 2,6 g/cm<sup>3</sup>
- pevnost v tahu 3400 MPa
- E modul 73GPa

Pro zvýšení tuhosti a snížení váhy se pro některé aplikace jako plnivo používají duté skleněné mikrokuličky (mikrobalony) o  $\varnothing$  20 – 100  $\mu$ . [13]

### 3.3.9 Aramidy (Kevlar)

Jedná se o výtzuže na bázi aromatických polyamidů, základní nanovlákná mají  $\varnothing$  10-13  $\mu$ . Používají se ve formě rovingu o různé jemnosti nebo tkanin v gramážích 36-500 g/m<sup>2</sup> a to samostatně nebo jako hybridní v kombinaci se skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Číslo tex je jednotka charakterizující jemnost vlákna, je to váha 1 km vlákna v gramech. [27]

Typické vlastnosti aramidových vláken:

- nízkomodulová vysokomodulová
- hustota 1,4 – 1,5 g/cm<sup>3</sup>
- pevnost v tahu 2850 – 3500 MPa
- E modul 70 – 130 GPa
- protažení 2,7 – 4 %

U aramidových vláken se poměrně často uvádí místo označení v Tex označení Dtex, umazáním poslední nuly dostanete tex. [13]

Oproti skleněným vláknům jsou aramidy mnohem lehčí, to znamená, že jejich pevnost v poměru k váze (specifická pevnost) je několikanásobně větší. Mají rovněž dvojnásobně větší modul a vynikající schopnost absorbovat energii. Kompozity vyztužené aramidovými vlákny se proto používají pro dynamicky namáhané aplikace zejména v dopravních prostředcích a jako ochranné vrstvy proti střelám v prostředí osobní ochrany i ochraně vojenské techniky. [13,26]

### 3.3.10 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyrábějí ze dvou výchozích surovin (prekurzorů):

- 1) polyakrylonitrilových (PAN) vláken
- 2) pyrolyzních olejů a smol (pitch), vznikajících při destilaci ropy.

V případě PAN vláken je již výchozí materiál ve formě vláken, která se v kontinuálním procesu přeoxidují a následně karbonizují při teplotách 1200 – 1400°C v inertní atmosféře

(vysokopevné typy) nebo podstupují další operaci při teplotách 2200 – 3000°C za vzniku grafitické struktury (vysokomodulové typy). [24]

V případě pitche jako výchozího materiálu je třeba surovinu nejprve zvláknit, další postup – karbonizace nebo grafitizace je obdobný, jako u PAN prekurzoru. [13]

Uhlíková vlákna se používají ve formě pramenců o různé jemnosti od 67 do 4300 tex (rovněž je udává jemnost v počtu nanovláken – tzv. družení, např. 3K nebo 12K znamená 3000 nebo 12000 monovláken v pramenci) nebo jako tkaniny s různou vazbou a gramážích od 80 do 800 g/m<sup>2</sup> buď jako celouhlíkové nebo hybridní v kombinaci s vlákny skleněnými resp. aramidovými. [27]

Typické vlastnosti C vláken:

#### **Vysokopevná**

- hustota 1,7 g/cm<sup>3</sup>
- pevnost v tahu 3000 – 6000 MPa
- E modul 250 – 300 GPa
- protažení 1,0 %

#### **Vysokomodulová**

- hustota 1,9 g/cm<sup>3</sup>
- pevnost v tahu 3000 – 4500 MPa
- E modul 400 – 700 GPa
- protažení 0,5 %

Vzhledem k jejich vysokému modulu a pevnosti a relativně nízké váze a také ale vysoké ceně se uhlíková vlákna používají na špičkové aplikace, převážně v kombinaci s epoxidovými pryskyřicemi jako maticí pro lodě, sportovní potřeby, závodní automobily, v letectví a kosmických aplikacích. [27]

#### **3.3.11 Přírodní vlákna**

Vlákna z obnovitelných zdrojů, zejména na bázi celulózy – sisal, len, konopí, bavlna, juta nalézají uplatnění jako levnější alternativa skleněných vláken zejména v tzv. třetím světě,

ale v poslední době jsou stále více využívána při výrobě pevnostně méně náročných a přitom lehkých dílců např. v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředků. Používají se ve formě pramenců a nití, netkaných materiálů – rohoží nebo tkanin. [25]

### **3.3.12 Čedičová (bazaltová) vlákna**

K přírodním vláknům lze řadit i minerální vlákna, kde se zatím nejvíce rozšířila vlákna čedičová (bazaltová), která se vyznačují vysokými mechanickými pevnostmi a chemickou a teplotní odolností. [26]



## 4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

### 4.1 Fyzikální podstata deformace a porušení

Veškeré pozorované makroskopické deformační vlastnosti plastů jsou výsledkem jejich molekulární a nadmolekulární struktury a jejich změn v průběhu silového zatížení. [13]

Polymery jsou tvořeny dlouhými řetězci, atomy uvnitř řetězců jsou mezi sebou propojeny silnými kovalentními vazbami. Elastická deformace těchto vazeb ve smyslu jejich natažení je velmi obtížná. [28]

Poněkud nižší tuhost řetězců ve směru podélném mají polymery, u nichž sousední vazby svírají úhel menší než  $180^\circ$  a deformace se uskutečňuje elastickou změnou vazebních úhlů. Meziřetězcové vazby jsou většinou van der Waalsova typu. Jsou řádově slabší než kovalentní vazby. Vnější silovým působením či zvýšenou teplotou je lze snadno překonat. [13]

**Skelné polymery** – jsou amorfní polymery pod teplotou skelného přechodu a tvoří jednu z nejrozsáhlejších skupin mezi prakticky používanými plasty (např. PS, PVC, PMMA). Atomy se nacházejí v relativně stabilních polohách. [29]

Mechanické vlastnosti jsou řízeny především mezimolekulárními vazbami. [17]

Při krátkodobém působení malých sil za nízkých teplot se viskózní vlastnosti skelných polymerů nemohou projevit, polymery se chovají elasticky. Základními mechanickými charakteristikami materiálu jsou elastické konstanty, například Youngův modul a Poissonova konstanta. [13]

Podrobíme-li skelné polymery větším deformacím, stále více se uplatňuje nelineární chování a plasticita. Základní zkouškou popisující chování látek v širokém rozsahu deformací je tahová zkouška. [29]

**Krystalické polymery** – čistě krystalické polymery neexistují. Výstižněji by jejich strukturu popisoval název semikrystalické či parakrystalické. Jejich deformační vlastnosti se dají dosti dobře odvodit z představy dvoufázové struktury. K vysvětlení mechanických vlastností se proto velmi dobře hodí modely převzaté z mechaniky kompozitů. Výsledné mechanické vlastnosti v sobě nesou jak znaky amorfních plastů, tak čistě krystalických látek. Mechanické vlastnosti polymerů jsou odrazem jejich chemického složení, velikosti a tvaru

makromolekul, nadmolekulární struktury (amorfní, krystalické), ale také závislosti na teplotě a čase. [13,17]

#### Příprava zkušebních těles:

- přímo ze zkoušených materiálů – příprava vulkanizací, lisováním, vstřikováním, odléváním v příslušných formách s tvarem zkušebního tělesa
- z hotových výrobků nebo polotovarů vysekáváním nebo frézováním.

Povrch zkušebních těles musí být hladký, bez vrubů, defektů, vzduchových bublin, trhli, vrásek, cizích těles apod. [13]

Zkušební tělesa, která budou podrobena fyzikálním či mechanickým zkouškám nesmí být předem vystavena mechanickému, fyzikálnímu či chemickému namáhání, které by mohlo výsledky zkoušek ovlivnit. [28]

Před provedením vlastní zkoušky je nutné materiál (vzorky) nechat určitou dobu odležet v klimatizovaných prostorách za podmínek smluvní teploty a relativní vlhkosti. Délka kondicionování je předepsána v normě pro daný materiál. Pokud není uvedeno jinak, musí se zkušební tělesa zkoušet ve stejném prostředí, ve kterém byla kondicionována. [13]

Podle způsobu stanovení vlastnosti a podle účelu se mechanické vlastnosti dělí na:

- krátkodobé (zkouška tahem, zkouška tvrdosti)
- dlouhodobé – ty se dále dělí podle charakteru působící síly na:
  - a) statistické (relaxace napětí, kríповé deformační zkoušky)
  - b) dynamické (rázová a vrubová houževnatost, cyklické zkoušky). [17]

## **4.2 Zkouška tahem**

Zkouška tahem při pomalém zatěžování a za tzv. okolní teploty (10 – 35°C) je zcela základní a nejběžněji prováděnou zkouškou mechanických vlastností u většiny konstrukčních materiálů. Výsledky zkoušky tahem do lomu představují tzv. základní mechanické vlastnosti. [28]

Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhnou předem zvolené hodnoty. [13]

Měří se zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení nebo se přímo v průběhu zkoušky trvale zaznamenává síla a prodloužení tělesa. [28]



*Obr. 18. Trhací stroje. [13]*

Příslušné normy uvádí:

Tvar zkušebních těles:

- oboustranné lopatky, pásy – plasty
- lopatky oboustranné, kroužky (vnitřní průměr 44,6 mm, tloušťka stěny 4 mm nebo vnitřní průměr 8 mm, tloušťka stěny 1 mm) – pryže

Počet zkušebních těles (anizotropie)

Způsob měření rozměrů

Podmínky kondicionování

Upínání zkušebních těles

Rychlost provádění zkoušky. [30]



Obr. 19. Zkušební tělesa. [13]

### 4.3 Houževnatost

Houževnatý materiál se vyznačuje vyšší hodnotou lomové energie, lom materiálu je postupný, „houževnatý“. Hodnota lomové houževnatosti závisí na soudržnosti fází, na objemovém podílu, ale i na průměru a vzdálenosti částic. U termoplastů je snaha zlepšovat houževnatost podporováním mikroplastických deformací. K tomu je ale potřeba dobré adheze mezi plnivem a matricí, dále zachování optimální velikosti částic a objemového podílu. Nelze říci, že čím pevnější spojení mezi fázemi, tím houževnatější materiál. Naopak např. u výše zmíněných epoxidových matricí s tuhými částicemi dochází ke křehkému lomu. První příznaky poškození se vyskytují, když kompozit obsahuje slabě nebo vůbec vázané částice, pak dochází k odtržení od matrice vedoucí, buď k tvorbě relativně stabilních dutin, nebo přímo k lomu. [16]

Pokud jsou dutiny vytvořeny od větších částic nebo agregátů, je velká pravděpodobnost vytvoření kritické velikosti trhliny. Větší částice působí jako defektory, nastává křehký lom za mnohem většího napětí než u nevázaných částic. Také malé částice, zejména agregáty mají možnost zamezit tvorbě dutin, tím se nahromadí napětí, až se poruší vazba s matricí a nastává křehký lom. Na druhé straně velké množství malých, rovnoměrně rozptýlených a slabě vázaných částic iniciuje vznik většího množství malých stabilních dutin, které umožní matrici se dále deformovat. Obecně nejhouževnatější materiál získáme z kompozitu obsahujícím téměř monodispergované rozptýlené částice střední velikosti. Malé částice s dobrou adhezí se také podílí na procesu zlepšování houževnatosti. Při zátěži v kompozitu nejprve nastane deformace matrice na mikroskopické úrovni (připomíná strukturu elastomeru v termoplastu) pak nastane deformace ve větším objemu matrice. Nevázané částice v

houževnaté matrici mají vliv na mez kluzu a lomové chování. Tvorba dutin u dobře vázaných částic vyžaduje větší napětí a energii na deformaci a chování při lomu. Je sice jednoznačné, že např. při zvyšování deformační rychlosti při rázové zkoušce hodnocený parameter - energie klesá, ale zatím nelze vyvodit jednoznačný závěr při zkoumání účinku zátěžové rychlosti na houževnatost, na rozdíl od zjištěného účinku teploty a napětí. Toto jednoznačné stanovení komplikuje někdy značný rozsah změn lomových charakteristik během času. [26]

Příčinou zdrojů defektu mohou být:

- Dutiny na fázovém rozhraní a kolmo působící k síle. Velikost a způsob deformace závisí na rychlosti deformace.
- Při rychlé deformaci se získá rychle dostatek energie na propojení malých defektů v makroskopickou trhlinu.
- Při pomalé deformaci roste omezený počet defektů do značné až kritické velikosti. Při procesu porušování vzniká buď dilatace objemu, což zapříčiňuje tvorbu některých dutin a puklin nebo vznikají lokální smykové deformace. [31]

Chování plněných termoplastů je určováno lomovým chováním matrice, hlavně její houževnatostí. Zhruba lze říci, že závislost na rychlosti deformace u kompozitu je určena závislostí na rychlosti deformace matrice. Při středních rychlostech deformace a nižších teplot převládá tvorba dutin a trhlin. Tvorba dutin se ale většinou dá potlačit buď snížením rychlosti deformace a vyšší teploty (přichází smykové deformace) nebo za působení rázové rychlosti i za pokojové teploty, při rázu se předá dostatečnou energii na tvorbu nestabilní trhliny s vyústěním v křehký makroskopický lom. [31,32]

Za přechod mezi křehkým a houževnatým chováním je zodpovědná kritická vzdálenost částic. Tato vzdálenost je pro danou matrici specifická. Při nadkritických hodnotách objemového podílu částic (např. oblasti agregovaných částic), kde jsou částice blízko sebe, dochází k poklesu houževnatosti, což se vysvětluje vzájemným překrýváním napěťových polí v okolí částic a zvýšením napětí nad kritickou mez. Při optimalizaci houževnatostních charakteristik je nutno znát vzájemné korelace mezi morfologií a houževnatostí. S rostoucí koncentrací částic přitom klesá, to ovšem záleží, o jaký typ částic se jedná (tuhé versus  $\sigma$  modul E a mez kluzu kaučukovité), ale na druhou stranu roste i odpor vůči iniciaci trhliny, také i množství energie spotřebované na růst trhliny. Klesající teplota mění přechod mezi

křehkým a houževnatým chováním a to především u samotné matrice. Řízením podmínek při syntéze lze měnit vzdálenost mezi částicemi a tím ovlivňovat výsledné vlastnosti kompozitu. [33]

Tzv. aktivní plniva – částice velmi malých rozměrů, ale s velkým povrchem též zvyšují pevnost a houževnatost polymeru. Jsou to např. saze,  $\text{SiO}_2$ . Houževnatost můžeme ovlivnit buď vhodně zvolenými parametry při skladbě kompozitu nebo modifikací matrice přidáním vhodného elastomeru nebo použitím vhodného kopolymeru. [34]

#### 4.4 Rázová houževnatost

Houževnatost patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým zkouškám. Je to schopnost materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny. Houževnatost představuje energii, kterou je materiál schopen lokálně absorbovat, než se poruší. [13]

Patří mezi zkoušky, které poskytují určité informace o chování plastů při nárazu. Výsledky stanovení závisí na druhu plastu, jeho složení, teplotě, zkušební metodě, podmínkách provedení, tvaru zkušebního tělesa. [28]

Houževnatost lze ovlivnit volbou aditiv. [13]

Rázová houževnatost je energie spotřebovaná na porušení zkušebního tělesa vztažená na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa za předepsaných podmínek, označuje se  $a_n$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). [35]

Vrubová houževnatost je plocha kritického průřezu v místě vrubu, označuje se  $a_k$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). [35]

Rázová a vrubová houževnatost se dá měřit různými metodami např. Charpy, Izod, Dynstat, rázové zkoušky tahem a rázové zkoušky padajícím závažím. [28]

#### **METODA CHARPY:**

Dle ČSN EN ISO 179 z 6/1998

Kyvadlové kladivo s rozsahem podle typu materiálu a rozměru zkušebních těles, bývá opatřeno stupnicí, na které se absorbovaná energie  $W$  (spotřebovaná práce) odečítá přímo. Odečtené hodnoty mají ležet mezi 10 a 80% celkového rozsahu stupnice. [13]

Vruby ve zkušebních tělesech mohou mít různé tvary (normováno). Při zkoušce se tělesa ukládají tak, aby vrub byl v tahové oblasti (opačná strana tělesa než je provedena deformace). Vliv vrubu je značný, vrubová houževnatost až 10 krát nižší než rázová. [36]



Obr. 20. Charpyho kladivo. [13]

Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu:

$$a_n = \left( \frac{W}{b \cdot h} \right) \cdot 10^3 \quad (\text{kJ/m}^2) \quad (1)$$

kde  $W$  je deformační energie spotřebovaná k přeražení tělesa v J,

$b$  – šířka střední části tělesa v mm,

$h$  – tloušťka střední části tělesa v mm.

Rázová houževnatost zkušebních těles opatřených vrubem, tj. vrubová houževnatost:

$$a_k = \left( \frac{W}{b_k \cdot h} \right) \cdot 10^3 \quad (\text{kJ/m}^2) \quad (2)$$

kde  $b_k$  je šířka střední části tělesa pod vrubem v mm. [13]

## 4.5 Zkouška tlakem

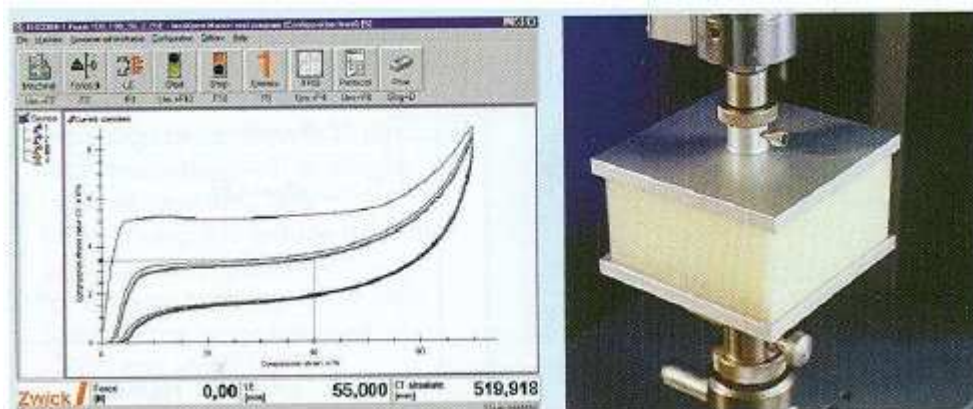
Při deformaci v tlaku nastává zkracování zkušební tělesa. [13]

U tuhých, tvrdých a křehkých plastů napětí v tlaku stoupá do meze pevnosti, která je destrukční mezí. Překročí-li napětí mez pevnosti, dojde k roztržení nebo pomalejšímu rozdrčení materiálu. Často dochází k výskytu trhlin na povrchu zkušební tělesa, aniž by došlo k velké deformaci a byla porušena celková soudržnost. [16]

Při stlačování houževnatých a měkčích plastů se těleso deformuje, aniž by docházelo k jeho viditelné destrukci. [13]

Zkušební tělesa mají tvar hranolu, válce nebo trubky – délka 10 až 50 mm, šířka 10 mm, tloušťka 4 mm. [13]

V průběhu zkoušky se stanovují síla (napětí) a odpovídající stlačení (poměrné stlačení) zkušební tělesa. [13,31]



Obr. 21. Zkouška tlakem. [13]

## 4.6 Zkouška ohybem

Při ohybové zkoušce se jedná o namáhání tlakem a tahem současně – v horních vrstvách je tlakové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tahové. [13]

Výsledkem zkoušky jsou ohybové křivky síla (napětí) – průhyb, z kterých se vyhodnocují potřebné charakteristické hodnoty. [13]

Zkouška dává konstrukční podklady pro plasty, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, je zvláště vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení zkoušky tahem obtížné. [13]



V průběhu zkoušky se zaznamenává síla (napětí) působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušebního tělesa. Napětí v ohybu je podílem ohybového momentu  $M$  při zatížení  $F$  k modulu průřezu zkušebního tělesa  $W$ . [28]



Obr. 22. Třítodový ohyb. [13]

#### 4.7 Zkoušky tvrdosti

Podstatou zkoušek je vtlačování tvrdých hrotů definovaných tvarů za stanovených podmínek do povrchu zkušebního tělesa. [13]

Principem měření je určení vztahu mezi silou, která vtlačuje tvrdý hrot a plochou otisku, která vtlačováním hrotu vznikne. [13,16]

Vzhledem k tomu, že plasty jsou materiály převážně houževnaté a jejich povrchy se vtlačováním více či méně deformují, vyvinuly se tyto zkoušky v měření odporu celého objemu proti vtlačování hrotu. Nelze tedy měřit stopu po vpichu tvrdoměru, ale měří se rovnovážná hloubka vniknutí hrotu při určité konstantní síle vtlačování. [28]

Tvrдость je vlastně vyjádřením tuhosti plastů.

Metody měření se dělí podle tvaru hrotu:

- kuličkou nebo tyčinkou s kulovým zakončením,
- kuželem nebo jehlanem,
- komolým kuželem.

Tvrдост (tuhost) může být silně ovlivněna teplotou, stupněm navlhnutí u polárních plastů, stupněm krystalinity. Proto je důležité kondicionování. [13,37]

#### **4.7.1 Zkoušky tvrdosti – měření podle Brinella**

- Konstantní průměr kuličky ( $5 \pm 0,1$ ) mm
- Konstantní zatížení
- Proměnnou je hloubka vtisku, která se po určité době odečítá pomocí hloubkového indikátoru. [13]

#### **4.7.2 Zkoušky vtlačováním kuličky**

- Průměr ocelové kuličky je konstantní ( $5 \pm 0,05$ ) mm
- Proměnnou je zatížení vybírané z řady hodnot (49, 132, 358, 961) N tak, aby hloubka vtisku byla po 30 s působení zatížení v rozmezí 0,15 až 0,35 mm
- Hloubka vtisku se měří pod zatížením, plocha povrchu vtlačení se vypočítává z jeho hloubky. [13]

#### **4.7.3 Zkoušky tvrdosti podle Vickerse**

- Vtlačuje se čtyřboký diamantový jehlan ( $136^\circ$ )
- Princip měření spočívá v tom, že po provedení vtisku určitou konstantní silou se měří úhlopříčky vzniklé stopy. [13]

#### **4.7.4 Zkoušky tvrdosti podle Shoreho**

- Pro měkčené plasty Shore A, pro houževnaté Shore D
- Hroty mají tvar kužele (typ D) nebo komolého kužele (typ A)

- Hodnota tvrdosti se odečítá se stupnice tvrdoměru za  $15 \pm 1$  sekund po jeho přiložení
- Výsledkem zkoušky je průměr z 5 měření. [13]

#### 4.7.5 Stanovení tvrdosti IHRD

- Měří se rozdíl mezi hloubkou vtačení kuličky při malé konstantní síle (5 s) a velké celkové síle (30 s)
- Stupnice tvrdosti byla stanovena tak, že 0 představuje tvrdost materiálu s nulovým Youngovým modulem a 100 představuje tvrdost materiálu s nekonečným Youngovým modulem
- Pro viskoelastické materiály jsou stupnice IHRD a Shore A srovnatelné. [13,37]



Obr. 23. Vtlačování kuličky [13]



Obr. 24. Tvrdoměr SHORE [13]

## 5 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování patří mezi nejvýznamnější technologie v plastikářském průmyslu. Vstřikovací proces se vyznačuje složitými fyzikálními procesy, na kterém se podílí polymer, forma a vstřikovací stroj a touto metodou se v dnešní době vyrábí plastové výrobky téměř pro všechna odvětví lidské činnosti. Během vstřikovacího procesu je polymer ve vstřikovacím stroji nejprve dopravován, taven a následně vstříknut do formy, odkud je zatuhnutý výrobek vyhozen. Tento nejdůležitější proces zpracování termoplastů je též využíván pro některé reaktoplasty a elastomery. Jedná se o cyklický proces. [1]

Hlavní výhody vstřikování:

- přímá cesta ze suroviny v konečný výrobek,
- žádné nebo malé dokončovací operace,
- proces je plně automatizovaný,
- vysoká reprodukovatelnost,
- při velkovýrobě jsou nízké náklady na jeden kus výrobku. [1]

### 5.1 Způsoby vstřikování

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

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

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

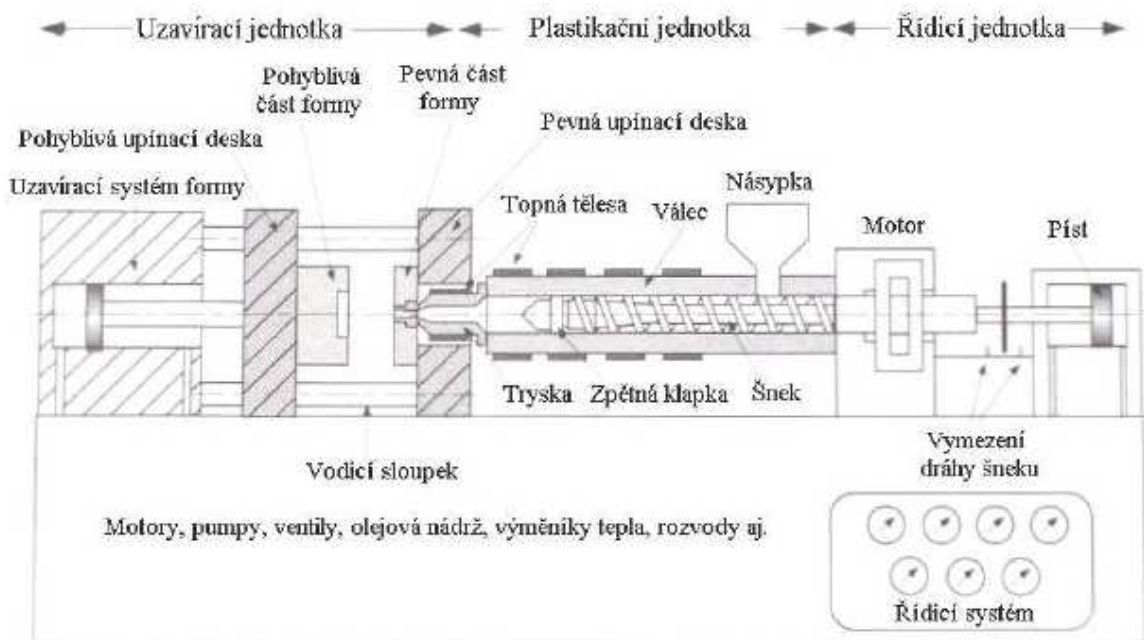
- 10) vstřikování elastomerů – stejně jako reaktoplasty a termoplasty lze vstřikovat i elastomery. A stejně jako reaktoplasty jsou i elastomery vstřikovány při relativně nízkých teplotách do elektricky vyhřívaných forem. Při dodání tepla dochází k vulkanizaci a k vytvoření zesíťované struktury;
- 11)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

plastů do dvou proudů, kdy jeden píst svůj proud dotlačuje a druhý vstříkuje, tak se cyklicky střídají, až v poslední fázi provádí dotlak oba písty najednou;

- 15) tandemové vstřikování – při tomto typu vstřikování vstřikovací formu tvoří dvě protilehlé dutiny s výrobky, které jsou v přesně stanovených cyklech plněny, dotlačovány a chlazeny, stejně jako u klasického vstřikování, ale pomocí samostatných vstřikovacích jednotek. Princip je tedy založen na tom, že zatímco v jedné dutině probíhá proces otevření, vyhození výrobku a zavření formy, plnění a dotlaku, tak ve druhé dutině probíhá proces chlazení. Tato technologie tak v podstatě zkrátí vstřikovací cyklus na polovinu (vyrobí se dva výrobky během jednoho cyklu), což při velkosériové výrobě přináší značné ekonomické výhody. [38]

## 5.2 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj má za úkol nejprve převést tuhý materiál v taveninu, tuto taveninu dále dopravovat a vstříknout do dutiny formy, kde je zafixován tvar budoucího výrobku, který je na konci procesu z formy vyhozen. Vstřikovací stroj se skládá z uzavírací jednotky, plastikační jednotky a řídicí jednotky (Obr. 25). [1]



Obr. 25. Schéma vstřikovacího stroje. [6]

### 5.2.1 Rozdělení vstřikovacích strojů

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

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

Šnekové vstřikovací stroje jsou z hlediska převodu tepla i toku polymerní směsi vyvážené a dovolují zpracovávat polymery, které se na pístových strojích vstřikovat nedají. [38]

### 5.2.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje:

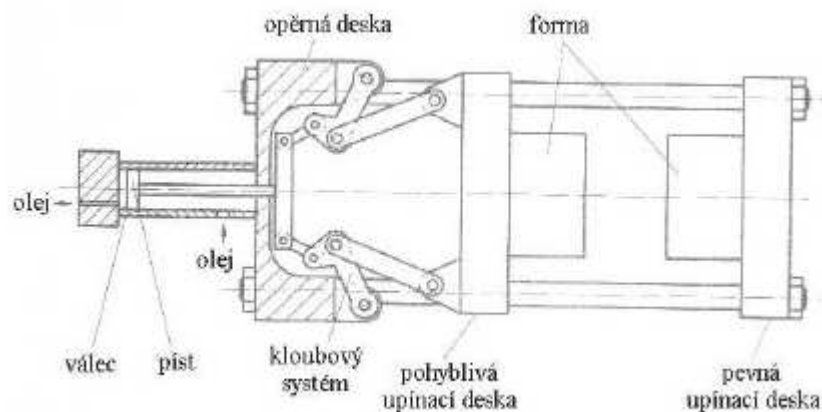
- uzavírá formu,
- drží ji pevně zavřenou proti působícímu vstřikovacímu tlaku,
- otevírá formu pro vyhození výstřiku.

Uzavírací jednotka se skládá z těchto hlavních částí: opěrné desky pevně spojené s ložem stroje, pohyblivé desky, na kterou je upnuta pohyblivá část formy, pevné upínací desky s otvorem pro trysku stroje, na kterou se připevní nepohyblivá část vstřikovací formy, vedení pro pohyblivou desku, a také uzavíracího a přidržovacího mechanismu. [1]

Existují tři hlavní typy uzavíracích jednotek:

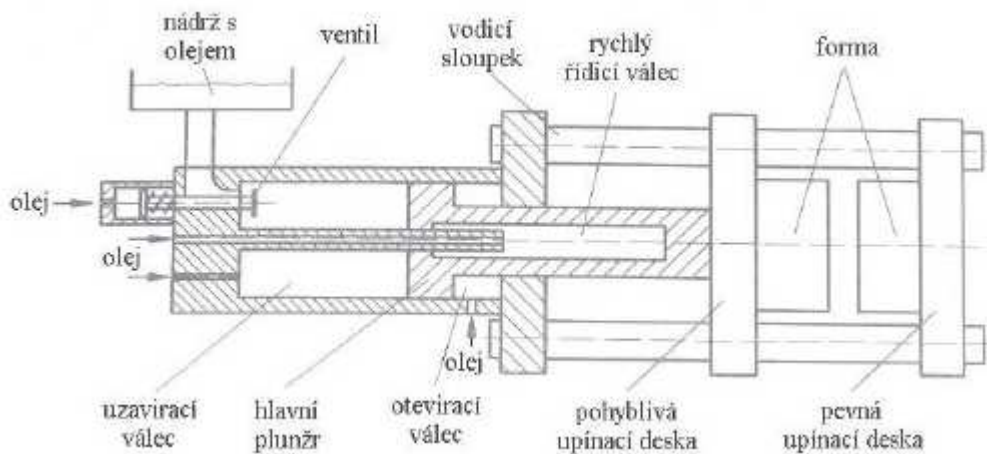
- mechanické – mechanické uzavírání je často tvořeno kloubovým systémem s hydraulickým ovládním pro otevírání a zavírání. Jednoduchý kloubový systém se většinou používá u menších vstřikovacích strojů s uzavírací silou do 50t. Dvojitý kloubový systém se používá u strojů s uzavírací silou mezi 250 až 1000t.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





Obr. 26. Schéma mechanického uzavíracího systému s pěti bodovou dvojitou kloubovou pákou s centrálním řídicím válcem. [9]

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



Obr. 27. Schéma hydraulického uzavíracího systému. [9]

- hydraulicko – mechanické – tento systém uzavírání využívá kombinaci kloubového a hydraulického systému, což spojuje některé výhody obou systémů jako rychlé otevírání a zavírání formy a přesná kontrola uzavírací síly. U hydraulicko – mechanického systému píst nebo jiné zařízení provádí rychlé počáteční zavírání formy, zatímco hydraulický systém je využit až při konečném uzavření formy. [1]

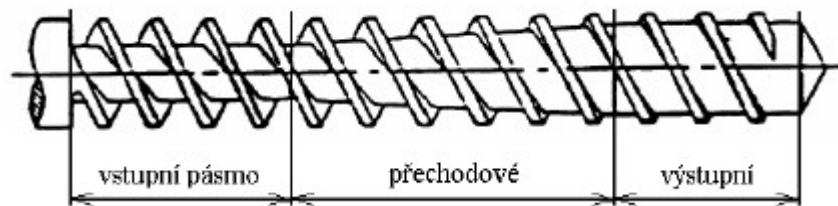
### 5.2.3 Plastikační jednotka

Plastikační jednotka zabezpečuje roztavení plastového materiálu a vstříknutí této taveniny do dutiny vstřikovací formy. Aby bylo možné vyrábět kvalitní shodné výstřiky, musí být do dutiny formy dopraveno konstantní množství plastikovaného materiálu stejné kvality při každém vstřikovacím cyklu. Proto musí plastikační jednotka produkovat homogenní taveninu s konstantní teplotou v požadovaném množství. [1]

Mezi nejčastější typy plastikačních jednotek u vstřikovacích strojů patří plastikační jednotky s jedním šnekem, který plastikuje materiál a provádí vstřikování taveniny. Dříve se používaly i plastikační jednotky s pístem, ty ale vytlačily šneky pro lepší plastikační výkon a kvalitu taveniny. [1]

Šnek se v plastikační jednotce otáčí a zároveň koná přímočarý zpětný pohyb, přitom bere materiál z násypky. Otáčením šneku je materiál posouván dopředu, dochází ke smýkání, disipaci (vlivem tření materiálu o vnější válec) a předávání tepla z topných těles skrze plášť válce a tím dochází k přeměně tuhého materiálu v taveninu. Tavenina je posouvána dopředu a shromažďuje se před čelem šneku. Prostor pro taveninu před čelem šneku je vytvářen zpětným pohybem šneku, dokud se neshromáždí dostatek taveniny potřebné k vyplnění dutiny formy. Po tom, co je plastikační fáze skončena, šnek pracuje jako píst a působením hydraulického válce se tento šnek posune rychle dopředu a vstříkne tak taveninu skrze vstřikovací trysku do dutiny formy. Aby při dopředném pohybu šneku nedocházelo ke zpětnému pohybu taveniny, je ve výstupním pásmu šneku zpětná klapka, která je při pohybu šneku vpřed zavřena a při natavování materiálu otevřena. [1]

Pro dobrou distribuci materiálu musí být povrch šneku leštěný a povrch válce zdrsněný, event. se může pod násypku přidat chlazení, které má stejný účinek jako zdrsnění válce. Intenzita dopředného pohybu materiálu je tedy určena třecími poměry mezi šnekem, materiálem a válcem. Šnek je rozdělen na tři pásma – vstupní, přechodové a výstupní, kdy ve vstupním pásmu dochází k dopravování materiálu a vytváří se zde potřebný tlak, v přechodovém pásmu se začíná materiál tavit, vyskytují se zde obě fáze, jak tuhé lože, tak polymerní tavenina, a nakonec ve výstupním pásmu probíhá doprava a míchání taveniny. Přitom hloubka kanálu se postupně zmenšuje, jak je patrné z obrázku (Obr. 28). [1]



Obr. 28. Schéma standardního šneku. [1]

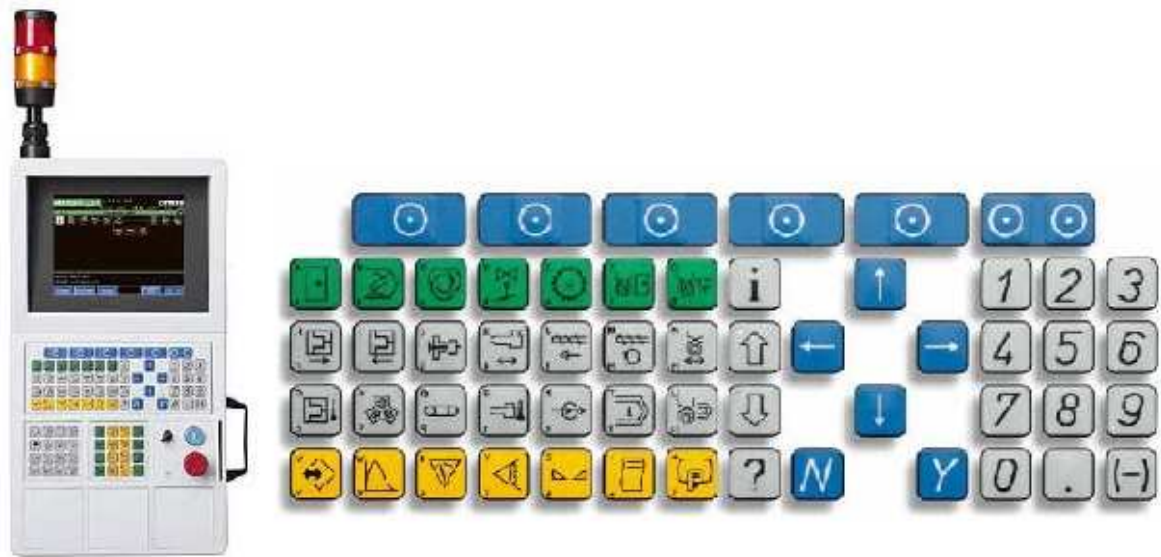
Existuje mnoho různých modifikací šneků určených pro specifické materiály a za účelem zlepšení požadovaných procesních vlastností. Tak lze např. vypustit některé ze šnekových pásem, přidat šroubovici nebo změnit její stoupání, přidat míchací elementy apod. Potom jsou rozlišovány šneky standardní jednochodé, modifikované jednochodé, a šneky vícechodé. Mezi základní charakteristiky šneku patří průměr šneku  $D$ , hloubka šnekového kanálu  $H$  a úhel stoupání šroubovice  $\theta$ . Přitom délka šneku se uvádí poměrem  $L/D$ . [1]

#### 5.2.4 Řídící jednotka

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

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

Řídící jednotka nejenže kontroluje tyto výše uvedené parametry, ale také musí koordinovat celý vstřikovací proces. Jednotlivá měření jsou tak prováděna pomocí speciálních senzorů, které odesílají naměřená data do centrálního počítače, který je zpracuje a popř. vyvolá potřebnou akci ke korekci určitého procesu. Komunikace s počítačem pak probíhá přes pracovní panel, který je vidět na obrázku (Obr. 29). [1]



Obr. 29. Systém Selogica – ovládací panel s tlačítky. [39]

### 5.2.5 Výběr vstřikovacího stroje

Počáteční výběr vstřikovacího stroje se řídí podle následujících kritérií:

- velikost uzavírací síly – aby nedošlo k otevření formy během vstřikování, musí být uzavírací síla větší než síla vstřikovací (tlak při vstřikování vztážený na plochu výstřiků a studeného vtokového systému v dělicí rovině:  $F = p \cdot S$ ),
- rozteč vodících sloupků – pokud má být vůbec forma umístěna do stroje, musí tato forma projít mezi vodícími sloupky vstřikovacího stroje,
- plastikační jednotka – důležité parametry jsou zejména maximální vstřikovaná dávka, maximální materiálový tok a také vstřikovací tlak. [1]

### 5.2.6 Arburg Allrounder 420 C

Zkušební tělesa pro praktickou část bakalářské práce budou vstřikována na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420 C 1000-350 od německé firmy Arburg (Obr. 30). V tabulce (Tab. 5) jsou pak uvedeny některé důležité technické parametry. Tento stroj je umístěn v dílně technologické fakulty. [1]



Obr. 30. Arburg Allrounder 420 C 1000-350. [1]

Tab. 5. Technické parametry vstřikovacího stroje. [1]

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

### 5.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací formy se používají nejen zvláště pro vstřikování termoplastů, ale i reaktoplastů a elastomerů. Při návrhu vstřikovací formy se vychází z tvaru výrobku, násobnosti formy, vlastností zpracovávaného materiálu, z možností vstřikovacího stroje a dále také z požadavků na kvalitu výroby, produktivitu práce a ekonomických možností. [1]

Hlavní funkce formy jsou:

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

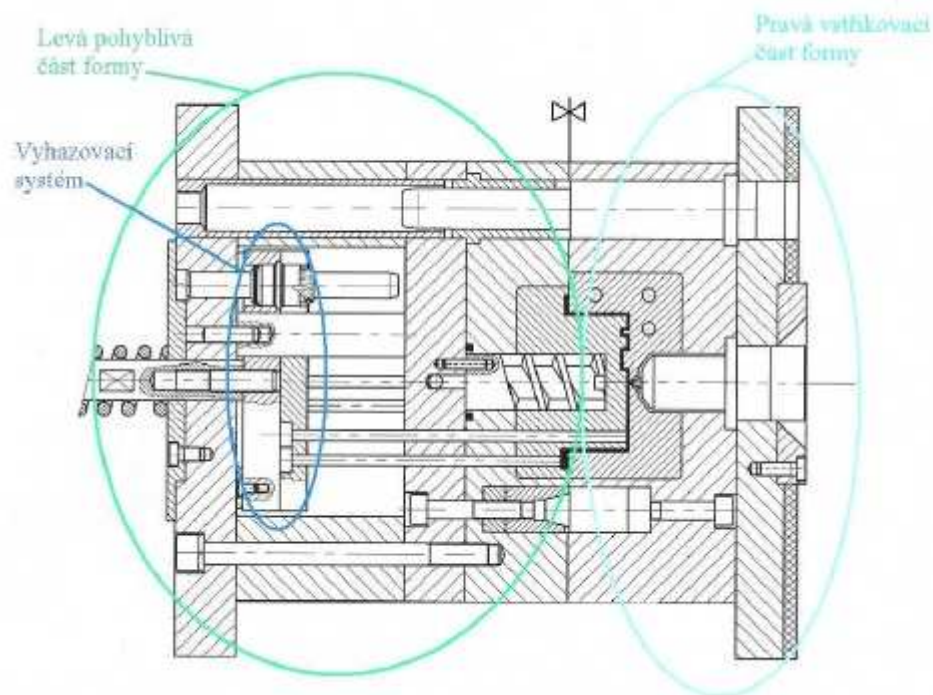
Mezi další úkoly formy patří vydržet vstřikovací tlak, převádět pohyb a vést ostatní pohyblivé části formy. [1]

Požadavky na formu:

- vysoká přesnost a požadovaná jakost funkčních ploch zhotovené dutiny formy a ostatních funkčních dílů,
- maximální tuhost a pevnost jednotlivých částí formy i celků pro zachycení potřebných tlaků,
- správná funkce formy, vhodný vtokový systém, vyhazování, odvzdušnění, temperování apod.,
- optimální životnost zaručená konstrukcí, materiálem i výrobou.

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

- tvarové díly vymežující dutinu formy,
- vtokový systém,
- temperanční systém,
- vyhazovací zařízení pro výstřik a vtokový zbytek,
- upínací a vodící systém. [40]



Obr. 31. Řez formou. [41]

Forma sestává většinou ze tří základních částí, jak ukazuje obrázek (Obr. 31). První částí se do formy vstříkují a rozvádí tavenina, jedná se o pravou vstřikovací část formy. Levá pohyblivá část formy pak umožňuje otevření a uzavření formy v dělicí rovině. Obě části spolu vytvářejí dutinu, která dává tvar budoucímu výrobku. Třetí, vyhazovací systém, pak při otevřené formě vyhazuje výrobek ven z formy. [1]

### 5.3.1 Postup při konstrukci formy

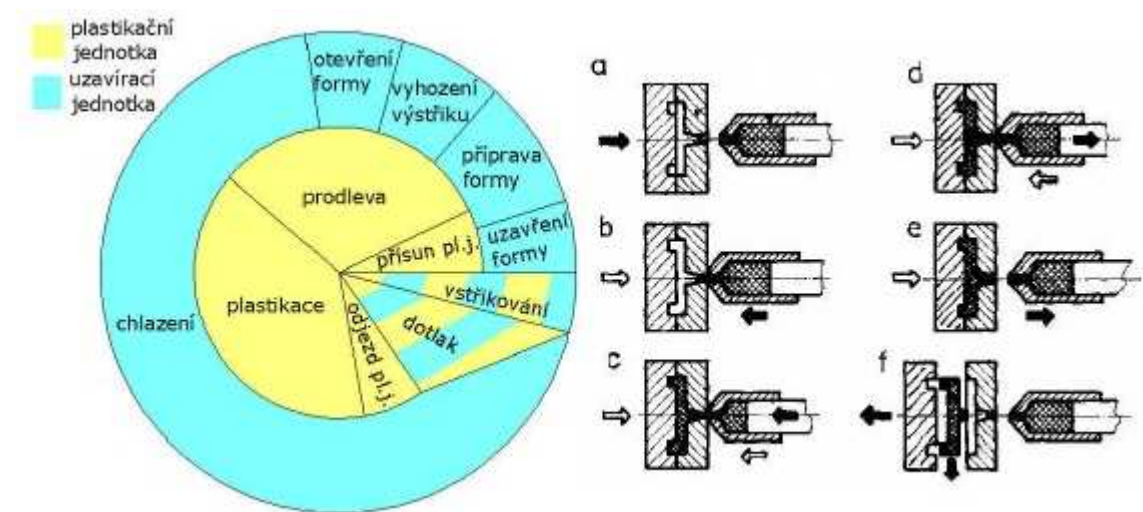
- Posouzení součásti z hlediska tvaru, rozměrů a tvářecích podmínek. Je třeba znovu zkontrolovat rozměry, jejich tolerance, rozdíly v tloušťce stěn s ohledem na propadliny. Nezanedbat ani úpravy ostrých hran a rohů, které vyvolávají velké pnutí a obtížné plnění dutiny formy;
- Určení, případně upřesnění dělicí roviny součásti a způsob zaformování s ohledem na funkci a vzhled. Respektovat také směr a velikost potřebných úkosů. Zaformování musí odpovídat vhodnému umístění ústí vtoků a vyhazování z dutiny formy;
- Dimenzování tvarových dutin a jejich uspořádání ve formě. Volba vhodného typu vtokového systému, velikost průřezů, tvaru a délky hlavního a rozváděcího kanálu i ústí vtoku;



- Stanovení koncepce vyhazovacího a temperačního systému i odvzdušnění dutin formy;
- Navržení rámu formy s ohledem na danou typizaci, počet i rozmístění dutin, systém vyhazování i temperace formy;
- Vhodné uspořádání středění a upínání formy na stroj s ohledem na využití dostupných prostředků;
- Zkontrolování funkčních parametrů formy, hmotnost výstřiku, jeho průměrnou plochu, vstřikovací a uzavírací tlak a další faktory vzhledem na doporučený stroj. [40]

## 5.4 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus lze rozdělit do několika fází, které jsou graficky znázorněny na obrázku (Obr. 32). Plastikační a uzavírací jednotky pak harmonicky vykonávají své jednotlivé kroky tak, aby nedocházelo v žádné části cyklu ke zbytečným prodlevám. [1]



Obr. 32. Schéma vstřikovacího cyklu. [4]

Nejprve je materiál převeden v taveninu v plastikační jednotce, přitom šnek koná rotační a přímočarý vratný pohyb, tavenina se shlukuje před čelem šneku (a). Plastikační jednotka se přisune k uzavírací jednotce (b) a pohybem hydraulického pístu působícího na šnek je tavenina vstříknuta do dutiny zavřené formy. Po naplnění dutiny stále působí dotlak (c), kterým eliminujeme smrštění výstřiku. Dotlak je většinou menší než vstřikovací tlak a působí do zatuhnutí vtokového ústí (d). Během dotlaku začíná chlazení výstřiku, po skončení dotlaku plastikační jednotka odjíždí (e) a plastikuje se v ní nový materiál. Po ochlazení vý-



stříku na vyhazovací teplotu je forma otevřena, výstřik vyhozen (f), provedena eventuální příprava nebo kontrola formy, forma je uzavřena a může dojít k novému vstřikování. [1]

## 5.5 Vlivy na jakost plastových součástí

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

Hlavní činitelé ovlivňující jakost:

- smrštění – jeho velikost závisí na druhu materiálu a tvaru součásti,
- dodatečné smrštění – vzniká při uvolňování vnitřních pnutí, je to též výsledek časově závislých změn ve výstřiku,
- tečení (creep) – dochází k němu při větším a dlouhodobějším zatížení součásti, vznik plastických deformací,
- teplotní roztažnost – je cca o řád větší než u kovů, jedná se o vratnou změnu,
- navlhání – sorpce vody z okolního prostředí. [1]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo porovnat mechanické vlastnosti plněného polypropylenu plněného 10% skla a PP plněného 40% mastku při různých rychlostech ochlazování. Rychlosti ochlazování byly měněny pomocí teploty vstřikovací formy (40°C, 60°C, 80°C, 100°C). Mechanické vlastnosti byly hodnoceny zkouškou tvrdosti (Shore D) a tahovou zkouškou, které byly realizovány v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cílem bakalářské práce bylo:

1. Vypracovat literární rešerši na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků pro test mechanických vlastností
3. Provedení mechanických zkoušek
4. Vyhodnocení výsledků mechanických zkoušek

## 7 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Podle normy ČSN EN ISO 527 – 1 jsem ve školních dílnách vyrobil na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420 C 1000-350 zkušební tělesa z PP – 10% a PP 40%, jehož základní vlastnosti jsou popsány výše v teoretické části práce, zkušební tělesa (Obr. 33).



*Obr. 33. Zkušební tělesa s vtokovým zbytkem*



*Obr. 34. Sada pěti zkušebních těles*

Zkušební tělesa byla dvojího druhu. Na obrázku (Obr. 34) je vyfocena sada pěti zkušebních těles, která jsou již oddělena od vtokového zbytku. Tělesa vlevo byla použita na zkoušku tvrdosti (ShoreD) a tělesa vpravo pak na zkoušku tahem na trhacím stroji.

Použité materiály:

- PP + 40% mastek
- PP + 10% sklo.

## 7.1 Procesní parametry vstřikování

Procesní parametry vstřikování byly nastaveny následovně:

Teplota:

- Teplota válce

$$T_{801} = 190^{\circ}\text{C}$$

$$T_{802} = 210^{\circ}\text{C}$$

$$T_{803} = 220^{\circ}\text{C}$$

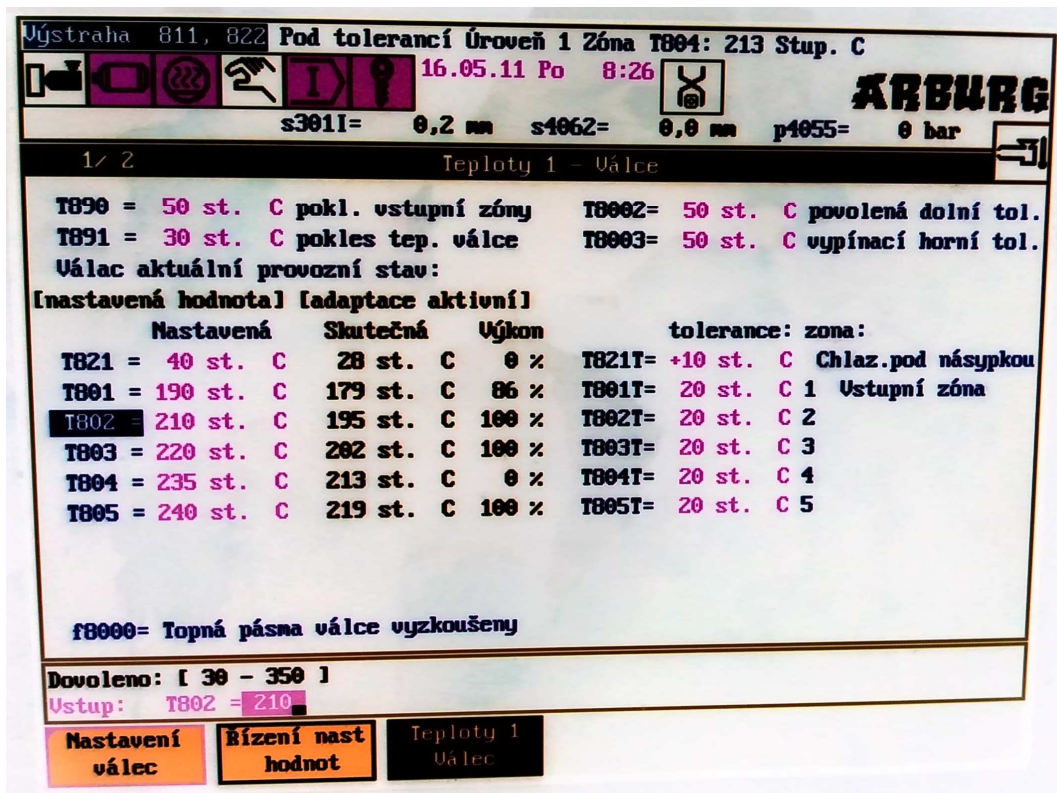
$$T_{804} = 235^{\circ}\text{C}$$

$$T_{805} = 240^{\circ}\text{C}$$

- Teplota formy

$$T_{821} = 40^{\circ}\text{C}$$

Teplota formy byla jediným proměnným parametrem, ostatní procesní parametry byly konstantní. Použity byly teploty 40°C, 60°C, 80°C a 100°C.



Obr. 35. Nastavení teplot na vstřikovacím stroji



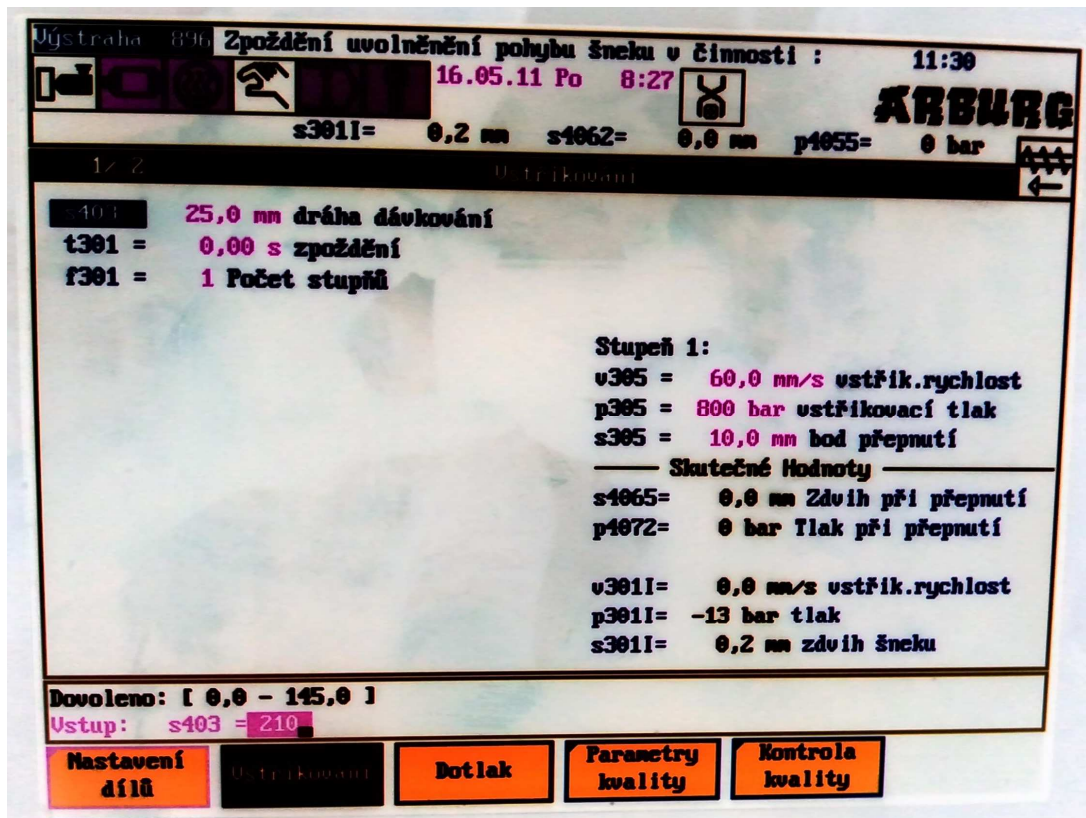
Vstřikování:

Dráha dávkování  $s_{403} = 25,0$  mm,

Vstřikovací rychlost  $v_{305} = 60,0$  mm/s,

Vstřikovací tlak  $p_{305} = 800$  bar,

Bod přepnutí  $s_{305} = 10,0$  mm.



Obr. 36. Nastavení vstřikování

Dotlak:

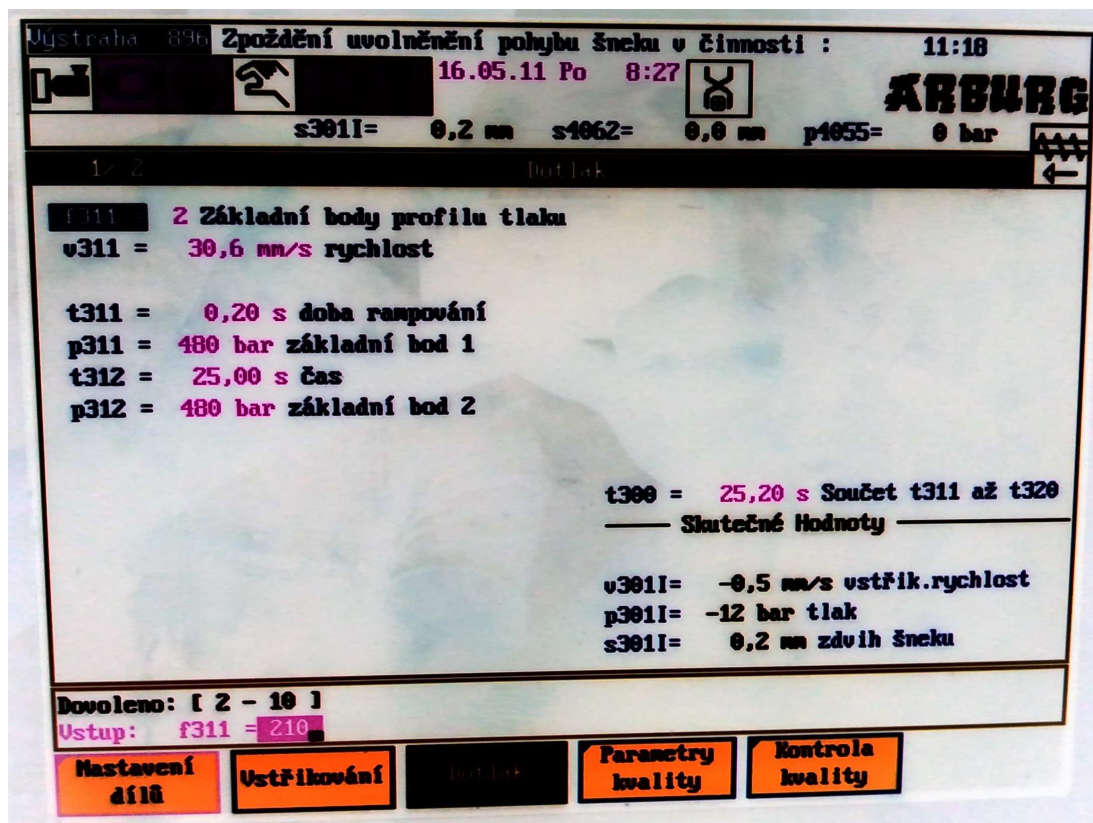
Rychlost  $v_{311} = 30,6$  mm/s,

Doba rampování  $t_{311} = 0,20$  s,

Základní bod 1  $p_{311} = 480$  bar,

Čas  $t_{312} = 25,00$  s,

Základní bod 2  $p_{312} = 480$  bar.



Obr. 37. Nastavení dotlaku



## 8 MECHANICKÉ ZKOUŠKY A VYHODNOCENÍ

Každého materiálu jsem vyrobil 15 kusů zkušebních těles pro každou teplotu formy. U zkoušky tvrdosti (ShoreD) jsem náhodně vybral 1 kus, na kterém jsem provedl 15 měření. U tahové zkoušky na trhacím stroji jsem vybral 10 zkušebních těles, na kterých jsem provedl zkoušku. Mechanismus jednotlivých zkoušek se zabývá teoretická část práce.

Naměřené hodnoty jsem zaznamenal do tabulky a vypočetl základní statistické veličiny: aritmetický průměr ( $\bar{x}$ ), směrodatná odchylka ( $\sigma$ ) a rozptyl ( $\sigma^2$ ).

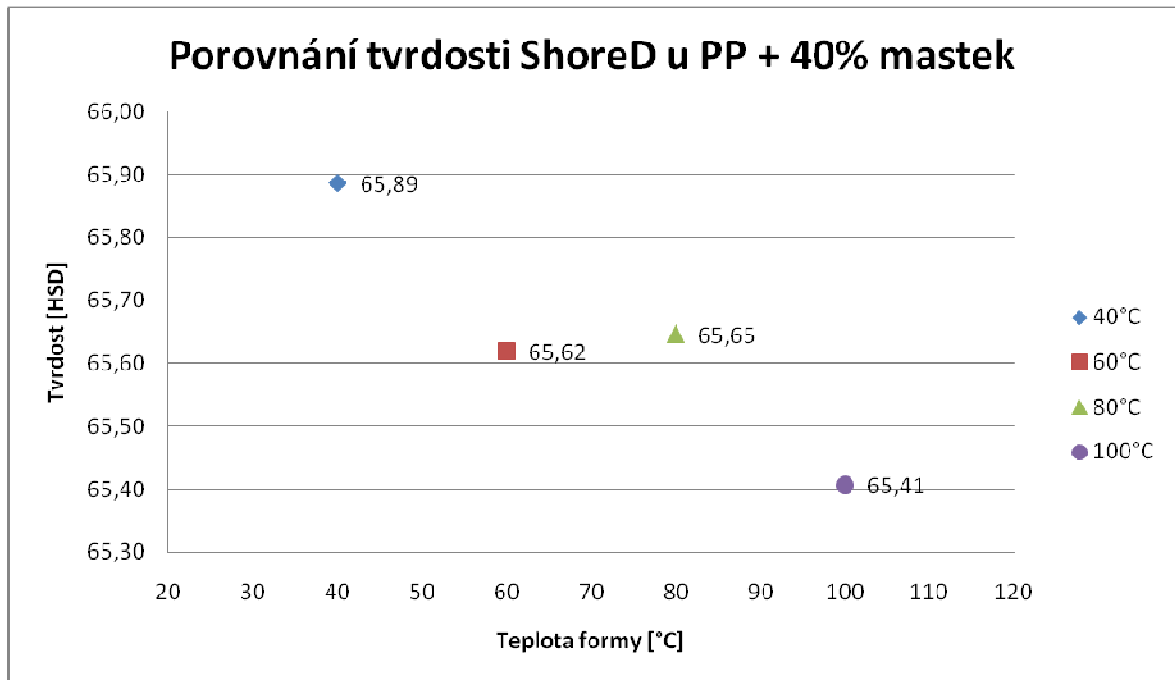
Průměrné hodnoty jednotlivých veličin jsem následně vynesl do grafu a porovnal.

### 8.1 PP + 40% mastek

#### 8.1.1 Zkouška tvrdosti ShoreD

Tab. 6. Naměřené hodnoty tvrdosti PP + 40% mastek

[HSD]	teplota formy			
	40°C	60°C	80°C	100°C
1	66,1	66,1	65,2	64,2
2	65,8	66,8	65,6	65,4
3	65,8	65,6	65,8	65,6
4	65,5	65,1	65,3	65,6
5	65,4	65,1	65,9	66,1
6	65,9	65,7	65,8	64,8
7	66,7	65,2	65,4	64,9
8	65,8	65,1	66,0	64,9
9	65,0	65,3	65,8	66,6
10	67,3	65,4	65,3	64,7
11	65,8	65,7	65,2	65,4
12	65,7	65,9	65,6	65,8
13	65,9	65,9	66,2	66,1
14	65,9	65,1	65,7	65,9
15	65,7	66,3	65,9	65,1
$\bar{x}$	<b>65,89</b>	<b>65,62</b>	<b>65,65</b>	<b>65,41</b>
$\sigma$	<b>0,53301</b>	<b>0,51158</b>	<b>0,30907</b>	<b>0,64306</b>
$\sigma^2$	<b>0,28410</b>	<b>0,26171</b>	<b>0,09552</b>	<b>0,41352</b>



Obr. 38. Porovnání tvrdosti ShoreD u PP + 40% mastek

Z výsledků zkoušek tvrdosti měřené metodou Shore D u testovaného materiálu PP + 40% mastku je patrné, že nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo při rychlosti ochlazování reprezentované teplotou vstřikovací formy 40°C (65,89 HSD). Naopak nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u rychlosti ochlazování reprezentované teplotou formy 100°C (65,41 HSD), jak je patrné z obrázku (Obr. 38).

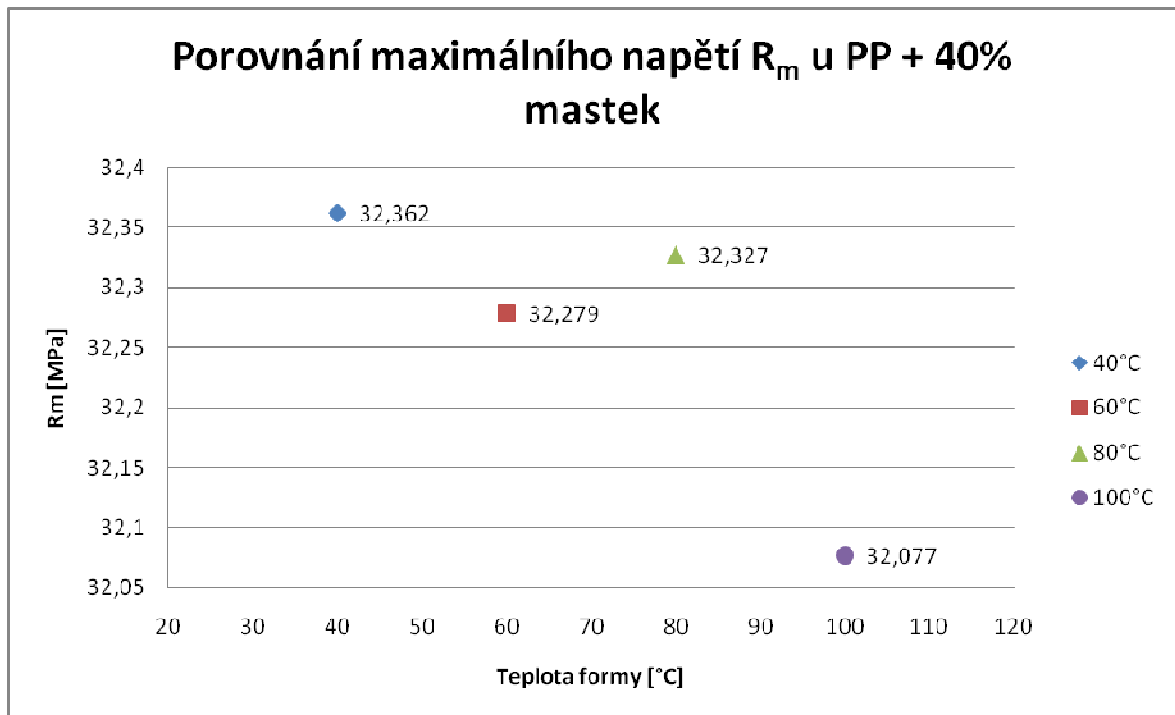
### 8.1.2 Tahová zkouška

Tab. 7. Naměřené hodnoty z tahové zkoušky PP + 40% mastek

	č. m.	Rm [MPa]	E [MPa]	ε [%]	Fmax [N]
Teplota formy 40°C	1	32,09	3928,73	6,11	1283,51
	2	32,46	4023,44	4,42	1298,29
	3	32,42	4113,33	6,16	1296,82
	4	32,42	3993	4,41	1296,68
	5	32,37	3941,41	6,09	1294,9
	6	32,56	3990,57	4,79	1302,24
	7	32,34	4009,86	6,66	1293,46
	8	32,33	3898,96	4,15	1293,25
	9	32,41	3863,09	4,83	1296,41
	10	32,22	4065,31	5,26	1288,62

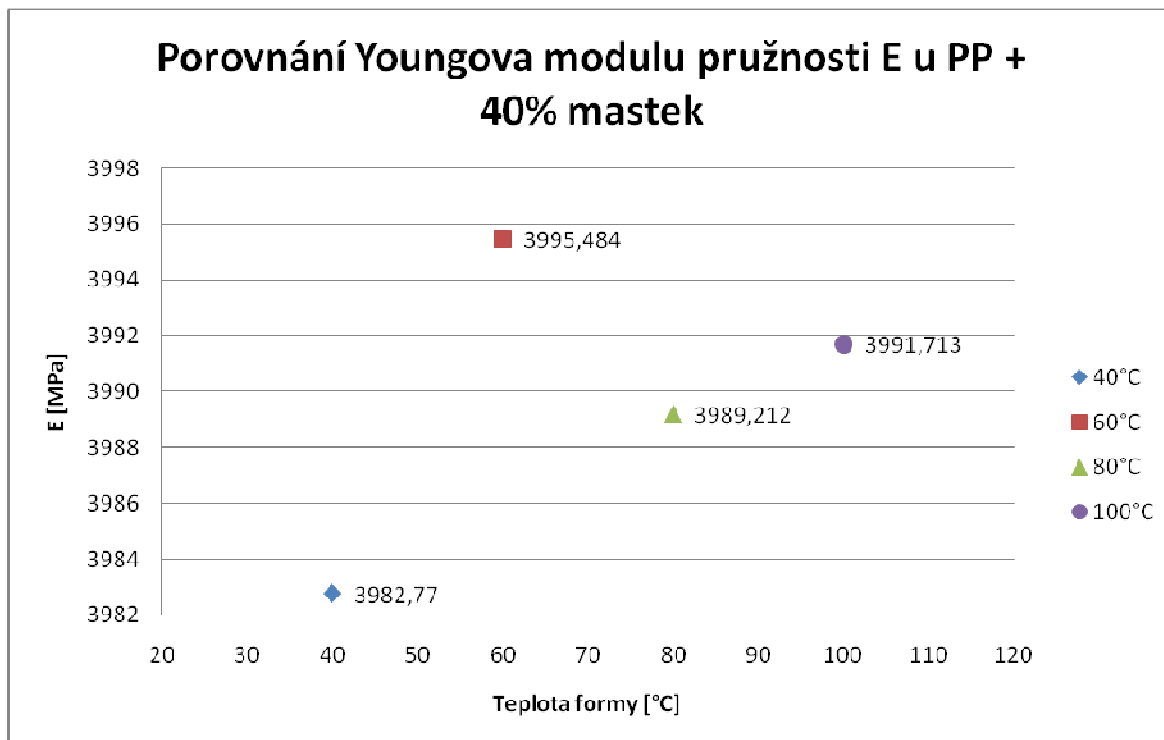
	$\bar{\phi}$	<b>32,362</b>	<b>3982,77</b>	<b>5,288</b>	<b>1294,418</b>
	$\sigma$	<b>0,13062</b>	<b>76,29662</b>	<b>0,89688</b>	<b>5,22968</b>
	$\sigma^2$	<b>0,01706</b>	<b>5821,17387</b>	<b>0,80440</b>	<b>27,34955</b>
Teplota formy 60°C	11	32,26	4065,74	3,49	1290,34
	12	32,37	4052,74	3,55	1294,69
	13	32,28	3923,26	3,87	1291,06
	14	32,12	3920,26	3,45	1284,78
	15	32,23	4007,54	3,88	1289,27
	16	32,22	3924,69	3,71	1288,62
	17	32,35	4018,3	3,26	1294,18
	18	32,27	4013,87	3,61	1290,95
	19	32,3	4022,01	3,65	1292,05
	20	32,39	4006,43	3,37	1295,55
	$\bar{\phi}$	<b>32,279</b>	<b>3995,484</b>	<b>3,584</b>	<b>1291,149</b>
	$\sigma$	<b>0,08006</b>	<b>53,67423</b>	<b>0,20250</b>	<b>3,21626</b>
	$\sigma^2$	<b>0,00641</b>	<b>2880,92305</b>	<b>0,04100</b>	<b>10,34432</b>
Teplota formy 80°C	21	32,28	3981,71	6,07	1291,3
	22	32,28	3993,71	5,18	1291,4
	23	32,38	4131,48	5,21	1295,14
	24	32,3	3957,41	3,68	1292,15
	25	32,32	3928,83	5,59	1292,7
	26	32,42	3958,13	6,89	1296,72
	27	32,39	3994,57	7,82	1295,62
	28	32,45	4068,46	5,85	1297,88
	29	32,34	3940,98	5,76	1293,63
	30	32,11	3936,84	4,23	1284,54
	$\bar{\phi}$	<b>32,327</b>	<b>3989,212</b>	<b>5,628</b>	<b>1293,108</b>
	$\sigma$	<b>0,09604</b>	<b>64,39310</b>	<b>1,19190</b>	<b>3,75960</b>
	$\sigma^2$	<b>0,00922</b>	<b>4146,47173</b>	<b>1,42062</b>	<b>14,13457</b>
Teplota formy 100°C	31	32,11	4042,88	6,76	1284,3
	32	32,09	4065,74	8,7	1283,44
	33	32,09	4038,3	5,65	1283,79
	34	32,17	3911,97	4,43	1286,84
	35	32,01	4055,17	3,97	1280,25
	36	32,07	4026,87	6,26	1282,72
	37	32,08	3890,1	5,93	1283,03
	38	32,02	4045,88	4,23	1280,97
	39	32,14	3962,34	5,2	1285,64
	40	31,99	3877,88	4,53	1279,46
	$\bar{\phi}$	<b>32,077</b>	<b>3991,713</b>	<b>5,566</b>	<b>1283,044</b>
	$\sigma$	<b>0,05716</b>	<b>73,76400</b>	<b>1,44140</b>	<b>2,32135</b>
	$\sigma^2$	<b>0,00327</b>	<b>5441,12771</b>	<b>2,07763</b>	<b>5,38865</b>

Z tahové zkoušky jsem vyhodnocoval hodnoty  $R_m$  (maximální napětí),  $E$  (Youngův modul pružnosti),  $\epsilon$  (tažnost) a  $F_{max}$  (maximální síla).



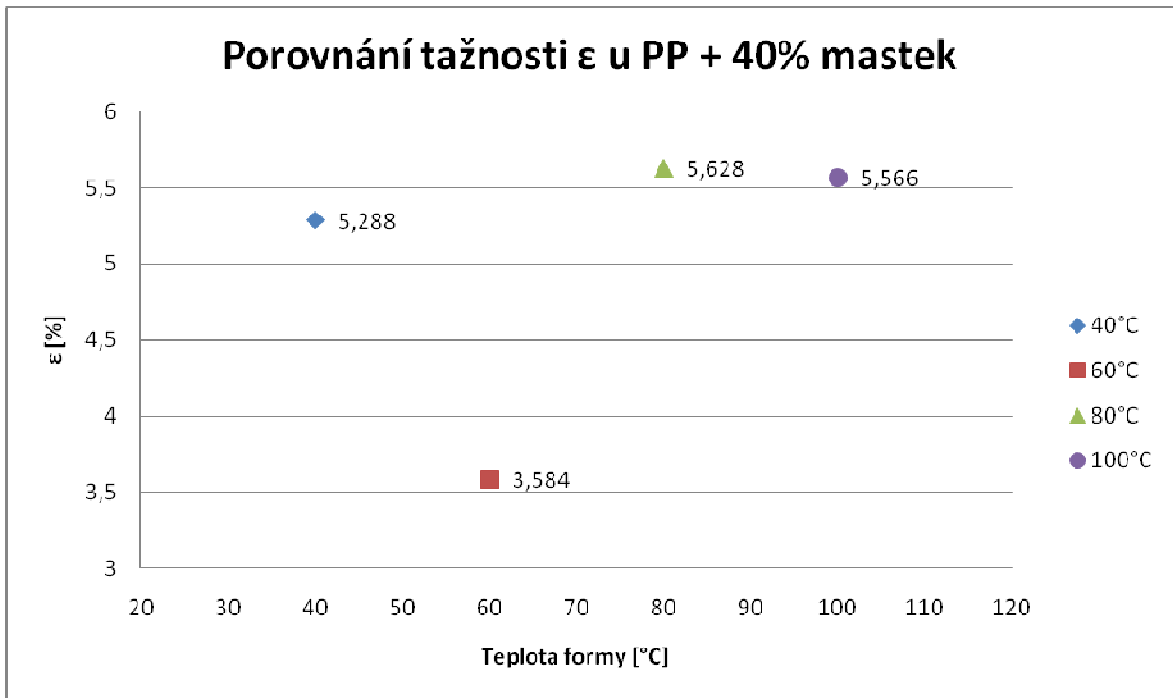
Obr. 39. Porovnání maximálního napětí  $R_m$  u PP + 40% mastek

Z výsledků tahové zkoušky z hlediska maximálního napětí  $R_m$  u testovaného materiálu PP + 40% mastku je patrné, že nejvyšších hodnot maximálního napětí bylo dosaženo při rychlosti ochlazování reprezentované teplotou vstřikovací formy 40°C (32,362 MPa). Naopak nejnižší hodnota maximálního napětí byla zjištěna při rychlosti ochlazování reprezentované teplotou formy 100°C (32,077 MPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 39).



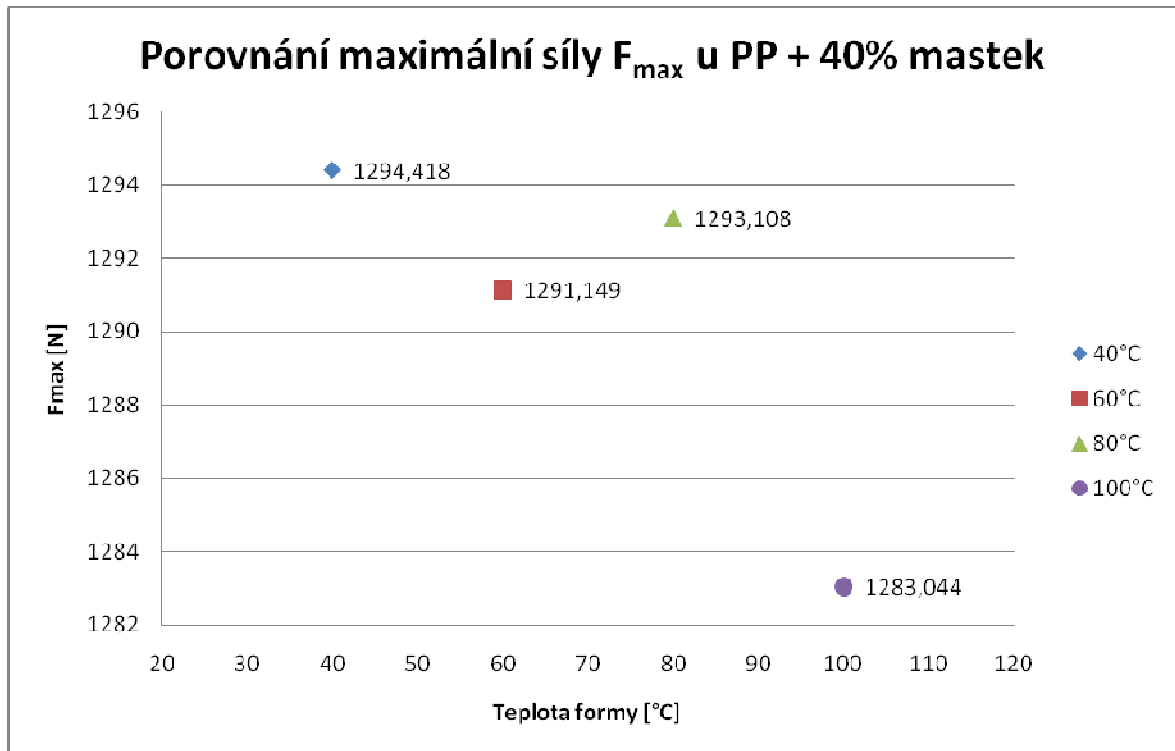
Obr. 40. Porovnání Youngova modulu pružnosti E u PP + 40% mastek

Z hlediska Youngova modulu pružnosti E z výsledků tahové zkoušky u testovaného materiálu PP + 40% mastku vyplývá, že nejvyšší hodnoty Youngova modulu pružnosti bylo dosaženo při rychlosti ochlazování představované teplotou vstřikovací formy 60°C (3995,484 MPa). Naopak nejmenší hodnota Youngova modulu pružnosti byla zjištěna při rychlosti ochlazování představované teplotou formy 40°C (3982,77 MPa), jak je patrné z obrázku (Obr. 40).



*Obr. 41. Porovnání tažnosti  $\epsilon$  u PP + 40% mastek*

Z hlediska tažnosti  $\epsilon$  z výsledků tahové zkoušky u testovaného materiálu PP + 40% mastku vyplývá, že nejvyšší hodnoty tažnosti bylo dosaženo při rychlosti ochlazování představované teplotou vstřikovací formy 80°C (5,628 %). Naopak nejnižší hodnota tažnosti byla zjištěna při rychlosti ochlazování představované teplotou formy 60°C (3,584 %), jak je patrné z obrázku (Obr. 41).



Obr. 42. Porovnání maximální síly  $F_{max}$  u PP + 40% mastek

Z hlediska tažnosti  $\epsilon$  z výsledků tahové zkoušky u testovaného materiálu PP + 40% mastku je patrné, že nejvyšší hodnoty maximální síly bylo dosaženo při rychlosti ochlazování reprezentované teplotou vstřikovací formy 40°C (1294,418 N). Nejnižší hodnota maximální síly byla naopak zjištěna při rychlosti ochlazování reprezentované teplotou formy 100°C (1283,044 N), jak je patrné z obrázku (Obr. 42).

Při analýze výsledků hlavně díky vytvoření srovnávacích grafů pro jednotlivé veličiny je vidět, že pro hodnoty maximálního napětí  $R_m$  (Obr. 39) a maximální síly  $F_{max}$  (Obr. 42) se zdá být závislost lineární, s rostoucí teplotou formy klesající, ovšem s výjimkou teploty formy 80°C. U porovnání Youngova modulu pružnosti  $E$  (Obr. 40) se zdá být závislost lineární, s rostoucí teplotou formy stoupající, ale opět je zde výjimka a to teplota formy 60°C. Ta se ukazuje jako výjimka i při porovnání tažnosti  $\epsilon$  (Obr. 41), kde hodnota pro tuto teplotu se zdá být značně odlišná od ostatních hodnot, které jsou si numericky velmi blízké.

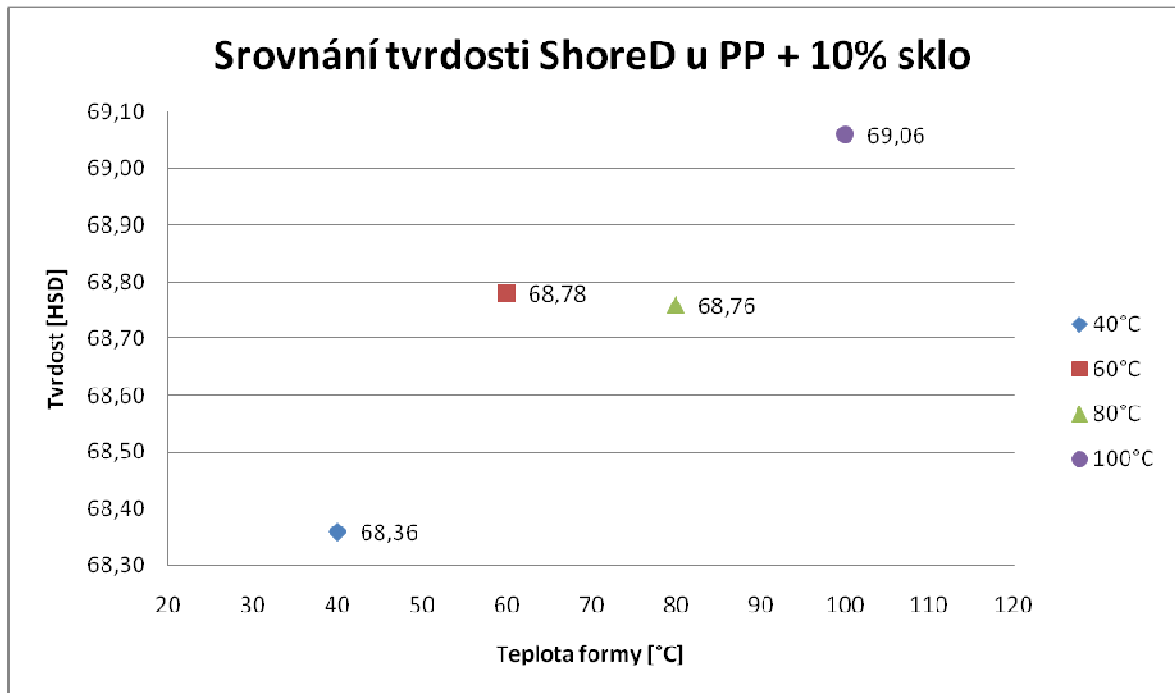
## 8.2 PP + 10% sklo

### 8.2.1 Zkouška tvrdosti ShoreD

Tab. 8. Naměřené hodnoty tvrdosti PP + 10% sklo

[HSD]	teplota formy			
	40°C	60°C	80°C	100°C
1	68,0	68,6	68,8	68,4
2	68,3	68,3	68,6	68,6
3	68,4	68,7	68,5	69,0
4	68,2	68,5	68,9	69,2
5	67,7	68,7	68,5	68,9
6	68,9	68,7	68,6	69,6
7	69,0	68,5	68,8	69,5
8	68,2	69,2	68,7	70,0
9	68,8	69,2	68,4	69,4
10	68,6	69,5	68,3	68,4
11	68,4	69,3	69,3	68,9
12	68,1	69,5	69,6	68,5
13	67,7	68,2	68,4	70,1
14	68,7	68,5	69,2	69,0
15	68,4	68,3	68,8	68,4
$\bar{\sigma}$	<b>68,36</b>	<b>68,78</b>	<b>68,76</b>	<b>69,06</b>
$\sigma$	<b>0,39605</b>	<b>0,44272</b>	<b>0,36606</b>	<b>0,56543</b>
$\sigma^2$	<b>0,15686</b>	<b>0,19600</b>	<b>0,13400</b>	<b>0,31971</b>





Obr. 43. Srovnání tvrdosti ShoreD u PP + 10% sklo

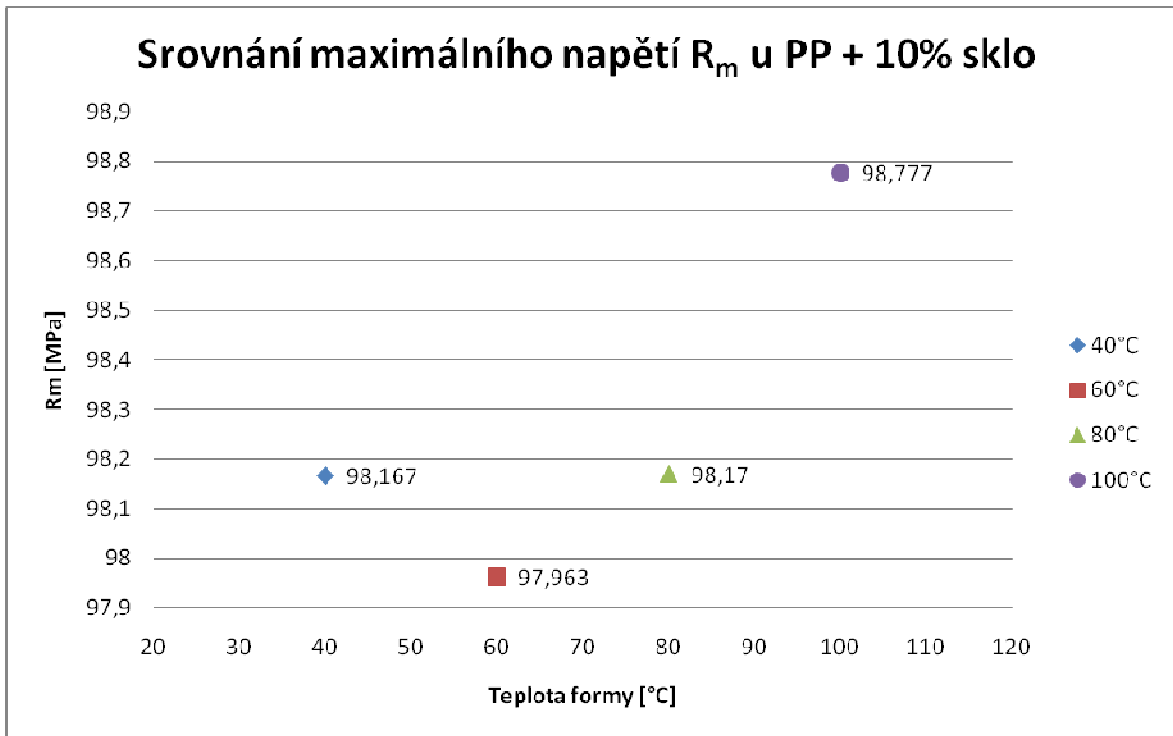
U testovaného materiálu PP + 10% skla z výsledků zkoušek tvrdosti měřené metodou Shore D je patrné, že nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo při rychlosti ochlazování reprezentované teplotou vstřikovací formy 100°C (69,06 HSD). Naopak nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u rychlosti ochlazování reprezentované teplotou vstřikovací formy 40°C (68,36 HSD), jak je vidět na obrázku (Obr. 43).

### 8.2.2 Tahová zkouška

Tab. 9. Naměřené hodnoty z tahové zkoušky PP + 10% sklo

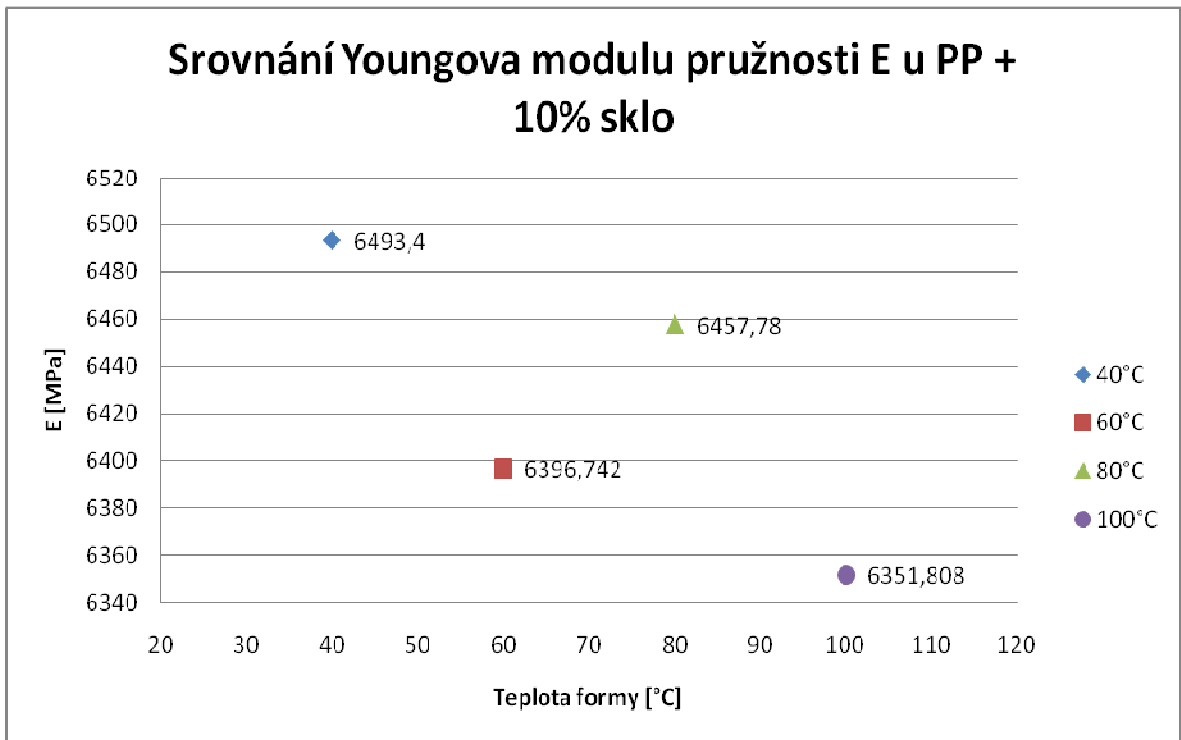
	č. m.	Rm [MPa]	E [MPa]	ε [%]	Fmax [N]
Teplota formy 40°C	1	98,16	6335,66	2,9	3926,23
	2	97,07	6299,47	3,01	3882,83
	3	99,05	6730,48	2,88	3961,9
	4	98,28	6597,15	2,77	3931,2
	5	98,39	6740,49	2,76	3935,67
	6	98,78	6418,49	2,79	3951,32
	7	99	6536,79	2,94	3960,08
	8	97,54	6516,47	2,8	3901,58
	9	97,84	6380,43	2,85	3913,63
	10	97,56	6378,57	2,76	3902,5

	$\bar{\phi}$	<b>98,167</b>	<b>6493,4</b>	<b>2,846</b>	<b>3926,694</b>
	$\sigma$	<b>0,66532</b>	<b>157,93451</b>	<b>0,08540</b>	<b>26,60910</b>
	$\sigma^2$	<b>0,44265</b>	<b>24943,30938</b>	<b>0,00729</b>	<b>708,04405</b>
Teplota formy 60°C	11	98,58	6271,86	2,95	3943,01
	12	97,48	6381,87	2,67	3899,38
	13	97,34	6297,18	2,71	3893,4
	14	98,32	6548,8	2,8	3932,85
	15	97,85	6532,93	2,82	3914,18
	16	97,84	6479,57	2,69	3913,52
	17	97,76	6289,45	2,9	3910,23
	18	98,14	6299,04	2,8	3925,5
	19	98,29	6570,4	2,91	3931,51
	20	98,03	6296,32	2,86	3921,18
	$\bar{\phi}$	<b>97,963</b>	<b>6396,742</b>	<b>2,811</b>	<b>3918,476</b>
	$\sigma$	<b>0,38606</b>	<b>122,72711</b>	<b>0,09689</b>	<b>15,41839</b>
	$\sigma^2$	<b>0,14905</b>	<b>15061,94440</b>	<b>0,00939</b>	<b>237,72660</b>
Teplota formy 80°C	21	98,43	6500,45	2,64	3937,18
	22	97,74	6936,61	2,37	3909,57
	23	98,57	6460,4	2,81	3942,95
	24	96,8	6137,11	2,71	3872,02
	25	97,47	6439,94	2,89	3898,86
	26	99,35	6437,22	2,84	3974,02
	27	99,11	6317,35	2,85	3964,51
	28	96,92	6609,31	2,73	3876,72
	29	99,33	6316,06	2,84	3973,19
	30	97,98	6423,35	2,73	3919,02
	$\bar{\phi}$	<b>98,17</b>	<b>6457,78</b>	<b>2,741</b>	<b>3926,804</b>
	$\sigma$	<b>0,94279</b>	<b>210,45662</b>	<b>0,15184</b>	<b>37,74074</b>
	$\sigma^2$	<b>0,88884</b>	<b>44291,98882</b>	<b>0,02305</b>	<b>1424,36345</b>
Teplota formy 100°C	31	98,29	6143,83	2,86	3931,41
	32	99,23	6497,02	2,85	3969,38
	33	98,3	6394,02	2,7	3931,86
	34	98,36	6131,67	2,71	3934,33
	35	98,99	6331,22	3,04	3959,7
	36	98,86	6259,27	2,76	3954,48
	37	98,92	6439,23	2,74	3956,88
	38	99,18	6444,23	2,87	3967,05
	39	98,69	6519,62	2,79	3947,72
	40	98,95	6357,97	2,82	3958,12
	$\bar{\phi}$	<b>98,777</b>	<b>6351,808</b>	<b>2,814</b>	<b>3951,093</b>
	$\sigma$	<b>0,35220</b>	<b>136,60746</b>	<b>0,10024</b>	<b>14,17025</b>
	$\sigma^2$	<b>0,12405</b>	<b>18661,59804</b>	<b>0,01005</b>	<b>200,79607</b>



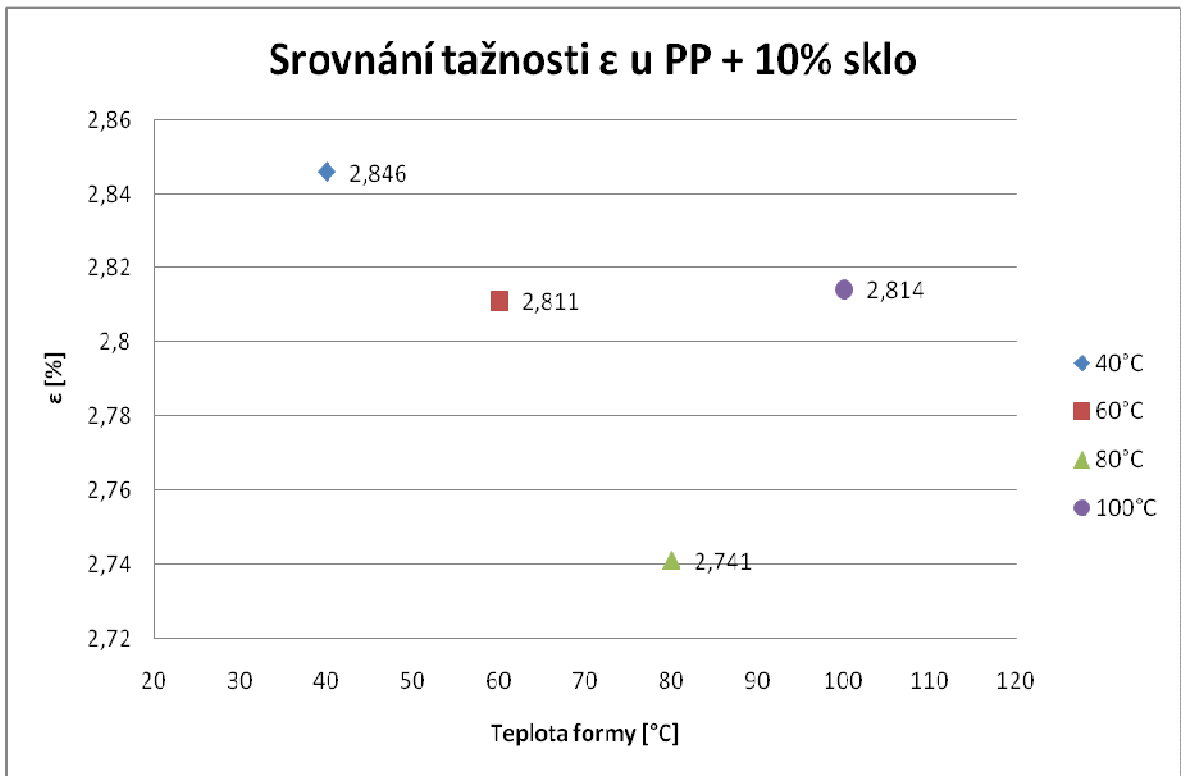
Obr. 44. Srovnání maximálního napětí  $R_m$  u PP + 10% sklo

U testovaného materiálu PP + 10% skla z výsledků tahové zkoušky z hlediska maximálního napětí  $R_m$  je patrné, že nejvyšších hodnot  $R_m$  bylo dosaženo při rychlosti ochlazování představované teplotou vstřikovací formy 100°C (98,777 MPa). Naopak nejmenší hodnota  $R_m$  byla zjištěna u rychlosti ochlazování představované teplotou vstřikovací formy 60°C (97,963 MPa), jak je vidět na obrázku (Obr. 44).



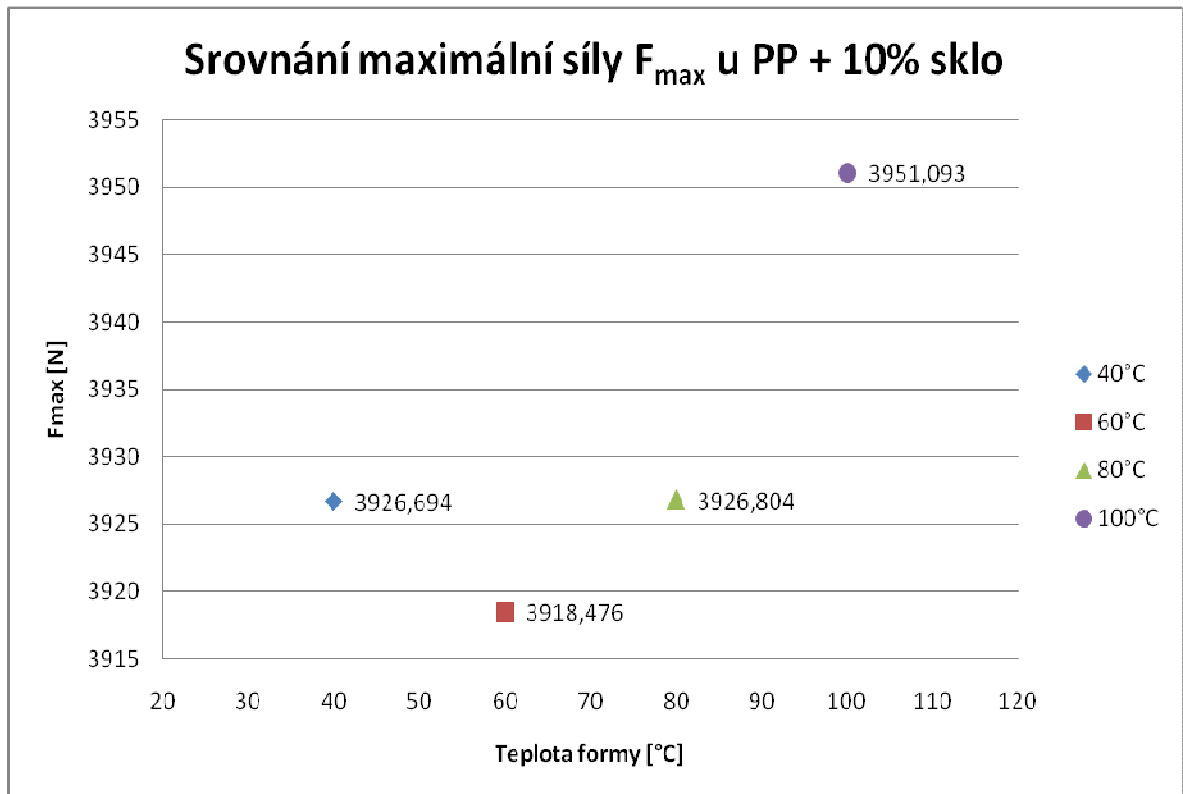
Obr. 45. Srovnání Youngova modulu pružnosti E u PP + 10% sklo

U testovaného materiálu PP + 10% skla z výsledků tahové zkoušky z hlediska Youngova modulu pružnosti E je patrné, že nejvyšších hodnot E bylo dosaženo při rychlosti ochlazení představované teplotou vstřikovací formy 40°C (6493,4 MPa). Nejnižší hodnota E byla naopak zjištěna u rychlosti ochlazení představované teplotou formy 100°C (6351,808 MPa), jak je vidět na obrázku (Obr. 45).



Obr. 46. Srovnání tažnosti  $\epsilon$  u PP + 10% sklo

U testovaného materiálu PP + 10% skla z výsledků tahové zkoušky z hlediska tažnosti  $\epsilon$  vyplývá, že nejvyšších hodnot  $\epsilon$  bylo dosaženo při rychlosti ochlazování reprezentované teplotou vstřikovací formy 40°C (2,846 %). Nejnižší hodnota  $\epsilon$  byla naopak zjištěna u rychlosti ochlazování představované teplotou vstřikovací formy 80°C (2,741 %), jak je patrné z obrázku (Obr. 46).



Obr. 47. Srovnání maximální síly  $F_{max}$  u PP + 10% sklo

U testovaného materiálu PP + 10% skla z hlediska maximální síly  $F_{max}$  je z výsledků tahové zkoušky patrné, že nejvyšších hodnot  $F_{max}$  bylo dosaženo při rychlosti ochlazování představované teplotou formy 100°C (3951,093 N). Nejnižší hodnota  $F_{max}$  byla naopak zjištěna u rychlosti ochlazování představované teplotou vstřikovací formy 60°C (3918,476 N), jak je vidět na obrázku (Obr. 47).

## 9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Experimentální část bakalářské práce spočívala v přípravě zkušebních těles na vstřikovací stroji pro různé teploty formy (reprezentují rozdílné rychlosti ochlazování) při vstřikování a provedení zkoušek mechanických vlastností. Jako materiály byly použity PP + 40% mastek a PP + 10% sklo.

První zkouškou byla zkouška tvrdosti podle Shoreho typu D, při které byl ze série 15ti zkušebních těles vybráno jeden reprezentant a na něm provedeno 15 měření. Výsledky jsou zaneseny v tabulkách (Tab. 6 a Tab. 8), včetně vypočtených základních statistických veličin. Pro porovnání průměrných hodnot jsem v programu Excel vytvořil grafy, aby byl jasně patrný rozdíl mezi jednotlivými hodnotami.

U PP + 40% mastek je tvrdost největší při teplotě formy 40°C a nejmenší při teplotě 100°C. Hodnoty pro teploty formy 60°C a 80°C jsou si velmi blízké, jak je patrné z obrázku (Obr. 38). Výsledná tvrdost se pohybovala kolem hodnoty 65,6 HSD. Obecně se dá říci, že s rostoucí teplotou formy, výsledná tvrdost tohoto materiálu mírně klesá a rozdíl mezi maximální a minimální průměrnou hodnotou činí 0,48 HSD.

Přesně opačný trend byl naměřen u druhého materiálu, PP + 10% skla. U tohoto materiálu byla tvrdost při teplotě formy 40°C nejnižší a při teplotě 100°C nejvyšší. Hodnoty tvrdosti pro teploty formy 60°C a 80°C jsou opět velmi blízké, jak je patrné z obrázku (Obr. 43). Tvrdost se v tomto případě pohybuje kolem hodnoty 68,7 HSD a s rostoucí teplotou formy výsledná tvrdost mírně stoupá. Rozdíl mezi maximální a minimální průměrnou hodnotou činí 0,7 HSD.

Druhou zkouškou byla tahová zkouška, prováděná na trhacím stroji. Zkušebních těles bylo vyrobeno vždy 15 kusů při teplotách formy 40°C, 60°C, 80°C a 100°C. Z dané série bylo vybráno vždy 10 vzorků a na nich provedena zkouška. Tahová zkouška je jednou ze základních mechanických zkoušek materiálu, protože se z ní dozvíme hned několik důležitých údajů o vlastnostech materiálu. Já jsem z této zkoušky vyhodnocoval maximální napětí  $R_m$ , Youngův modul pružnosti  $E$ , tažnost  $\epsilon$  a maximální sílu  $F_{max}$ . Hodnoty pro jednotlivé veličiny jsou zapsány v tabulkách (Tab. 7 a Tab. 9). Pro jednotlivé veličiny jsem opět zpracoval grafy pro porovnání rozdílů v závislosti na teplotách formy.

Snažil jsem se vypořádat z grafů nějaké pravidelnosti jako např. lineární závislost dané vlastnosti na teplotě formy. To se mi ovšem nepodařilo, a jak je patrné z grafů (Obr. 39 –

Obr. 42 a Obr. 44 – Obr. 47), tak některé závislosti se zdají být podobné lineární nebo exponenciální, ovšem v každém grafu se najde jedna hodnota, která je odlišná a do dané závislosti nezapadá.

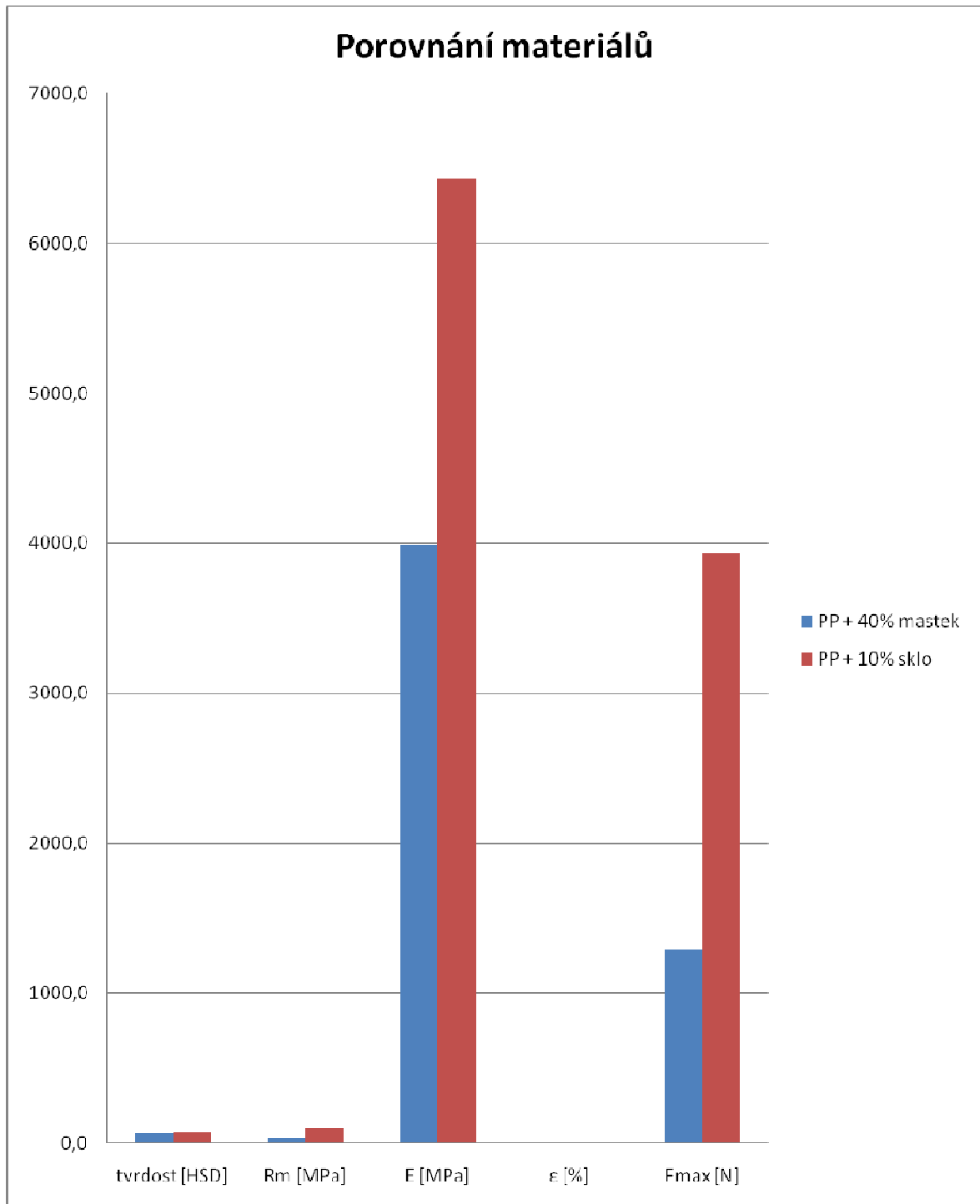
Zajímavější bylo přímé srovnání obou materiálů z hlediska jednotlivých vlastností.

Tab. 10. Porovnání materiálů

PP + 40% mastek					
teplota formy	tvrdost [HSD]	Rm [MPa]	E [MPa]	$\epsilon$ [%]	Fmax [N]
40°C	65,89	32,362	3982,770	5,288	1294,418
60°C	65,62	32,279	3995,484	3,584	1291,149
80°C	65,65	32,327	3989,212	5,628	1293,108
100°C	65,41	32,077	3991,713	5,566	1283,044
$\phi$	<b>65,643</b>	<b>32,2613</b>	<b>3989,7948</b>	<b>5,0165</b>	<b>1290,4298</b>
PP + 10% sklo					
teplota formy	tvrdost [HSD]	Rm [MPa]	E [MPa]	$\epsilon$ [%]	Fmax [N]
40°C	68,36	98,167	6493,400	2,846	3926,694
60°C	68,78	97,963	6396,742	2,811	3918,476
80°C	68,76	98,170	6457,780	2,741	3926,804
100°C	69,06	98,777	6351,808	2,814	3951,093
$\phi$	<b>68,740</b>	<b>98,2693</b>	<b>6424,9325</b>	<b>2,8030</b>	<b>3930,7668</b>

Tabulka (Tab. 10) porovnává všechny měřené veličiny pro oba zkoumané materiály. Jednotlivé rozdíly jsou nejlépe patrné z obrázku (Obr. 48). Největší rozdíly jsou v hodnotách maximálního napětí  $R_m$ , a maximální síly  $F_{max}$ , které jsou pro PP plněný sklem asi třikrát vyšší. Naopak tažnost PP plněného mastkem je téměř dvojnásobná. Takže PP plněný sklem je výrazně křehčí, ovšem pevnější než PP plněný mastkem. To také vyplývá z jednotlivých tahových křivek, které jsem získal z trhačích stroje a které jsou přiloženy v příloze.





Obr. 48. Porovnání obou zkoumaných materiálů

## ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá vlivem změny procesních parametrů vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti plněných polymerů. Konkrétním parametrem, jehož vliv byl zkoumán, byla teplota formy při vstřikování. Teoretická část popisuje polymerní materiály, jejich vlastnosti, plniva, zkoušky mechanických vlastností a technologii vstřikování. Praktická část je zaměřena na měření mechanických vlastností. Konkrétně zkoušku tvrdosti ShoreD a tahovou zkoušku. Obecně nelze říci, že čím vyšší teplota formy, tím lepší nebo horší mechanické vlastnosti daného materiálu. Záleží na nás, nebo na zákazníkovi, které vlastnosti jsou pro něj důležité, pro jakou aplikaci bude daný výrobek použit.

V dnešní době se také hojně využívá simulačních softwarů. CAE a Mold Flow systémy dokážou nasimulovat chování a odhadnout vlastnosti výrobku ještě předtím, než se vůbec začne s jeho výrobou. Tím dochází k minimalizaci ekonomických ztrát, což je v dnešní době hodně důležité.

Zajímavé bylo srovnání obou zkoumaných materiálů z hlediska použitého plniva. Při stejném typu polymerní matrice jsme dosáhli naprosto odlišných vlastností daného výstřiku. Materiál plněný skleněnými vlákny vykazoval mnohem větší odolnost z hlediska maximálního napětí, Youngova modulu pružnosti a maximální síly. Také byl mírně tvrdší. Naopak z hlediska tažnosti se ukázal, jako vhodnější plnivo mastek.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HUDCOVIČ, M., Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů. Zlín, 2008. 110 s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí diplomové práce ing. Michal Staněk, Ph.D.
- [2] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁLEK, J., Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vydání, Sobotáles Brno, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [3] RYBNIKÁŘ, F., Makromolekulární chemie, 1. vydání, VUT Brno, 2000. ISBN 80-214-1556-8.
- [4] MAŇAS, M., VLČEK, J., Aplikovaná reologie, 1. vydání, UTB Zlín, 2001. ISBN 80-7318-039-1.
- [5] LAPČÍK, L., RAAB, M., Nauka o materiálech II., 2. rozš. vydání, UTB Zlín, 2004. ISBN 80-7318-229-7.
- [6] RAUWENDAAL, CH., Statistical Process Control in Injection Molding and Extrusion., 1st ed. München (Germany): Hanser Publishers, 2000. ISBN 1-56990-285-2.
- [7] ŠTĚPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A., Technologie zpracování a vlastnosti plastů. 1. vyd. Praha: SNTL/Alfa, 04-602-89.
- [8] ČAUČÍK, P., aj. Prísady do plastov, 1. vydání, Bratislava: Alfa, 1985. 63-040-85.
- [9] PÖTSCH, G., MICHAELI, W., Injection molding: An Introduction. 2nd ed. München (Germany): Hanser Publishers, 2008. ISBN 978-1-56990-419-0.
- [10] ELIAS, H.-G., An Introduction of Plastics. 2nd compl. rev. ed. Mörlenbach (Germany), 2003. ISBN 3-527-29602-6.
- [11] TRES, P., Designing Plastic Parts for Assembly. 5th ed. München (Germany): Hanser Publishers, 2003. ISBN 1-56990-350-6.
- [12] DUCHÁČEK, V., Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 1. vyd. VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-241-3.
- [13] LÁNGOVÁ, E., Vliv podílu kaučuku a plniva na mechanické vlastnosti kompozitu epoxidová pryskyřice/silikonový kaučuk/uhlíkové saze, Zlín, 2008. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, vedoucí diplomové práce ing. Michaela Pelíšková, Ph.D.

- [14] DEBNATH, S., at al., Interface effects on mechanical properties of particle-reinforced composites, *Dental Materiále*, 2004. 20, 677-686.
- [15] SALVETA/DELMONTE, J.-P., RUBIO, A., Mechanical properties of carbon nanotubes: a fiber digest for beginners, *Carbon* 40, 2002. s. 172-179.
- [16] KAUSCH, H.H., BEGUELIN, P., Deformation and Fracture Mechanisms in Filled Polymers. *Macromol. Symp.* 2001. 142, 79-87.
- [17] POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L., *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*, 1. vydání, Brno: PC-DIR spol. s.r.o. – Nakladatelství, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
- [18] SUN, C., J., SAFARI, P., at. al., Effects of particle arrangement on stress concentration in composites, *Materials Science and Engineering A* 405, 2005. s. 287-295.
- [19] RICHARD A. BAREŠ, *Kompozitní materiály*, SNTL Praha, 1988.
- [20] MLEZIVA, K., *Polymery, struktura a vlastnosti*, Praha: Sobotáles, 1993.
- [21] MALÁČ, J., *Gumárenská technologie. Přednášky – 2007*.
- [22] Uhlíkové saze Cabot [online]. [citace 15/4/2008]. Dostupný z URL: [http://www.cabot.cz/cs/vyrobky/vyrobky\\_cabot](http://www.cabot.cz/cs/vyrobky/vyrobky_cabot).
- [23] BERTHELOT, J., M., *Composite Materials, Mechanical Engineering Series*, 1998.
- [24] AZAR PARVIZI-MAJIDI, Whiskers and Particulates. *Comprehensive Handbook of Composite Material, Volume 1*, 2000. s. 175-198.
- [25] Částicová plniva [online]. [citace 1/4/2008]. Dostupný z URL: <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>.
- [26] Kompozitní materiály [online]. [citace 5/4/2008]. Dostupný z URL: <http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Description-basica-y-general-delos-materiales-usados-al-producir-composites.html>.
- [27] POUCHELON, A., VONDRÁČEK, P., Tensile properties and loading in filled rubbers. *Plast. Rubb. Comp. Proc. Appl.*, 17, 1992. č. 2, s. 109-114.
- [28] SCHÄTZ, M., VONDRÁČEK, P., *Zkoušení polymerů*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.

- [29] MEISSNER, B., ZILVAR, V., Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. 1. vydání, Praha: SNTL, 1987.
- [30] ČSN EN ISO 527 – 1 Plasty – Stanovení tahových vlastností – Základní principy.
- [31] PLUMMER, G., C., J., KAUSCH, H., H., BEGUELIN, P., Microdeformation in core-shell particle modified polymethylmetacrylates. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 127, 1999. 281-296.
- [32] NEZBEDOVÁ, E., PONĚŠICKÝ, J., SOVA, M., Fracture toughness of filled thermoplasts at dynamical tests. Walter de Co, Berlin–New York, 1986.&Cruyber
- [33] NEZBEDOVÁ, E., GAHLEITNER, M., FIEBIG, J., GRELLMANN, W., SEIDLER, S., STARKE, J., U., KOCH, T., Vícefázové PP-systémy, vztah mezi strukturou a houževnatostí. *Plasty a kaučuk* 34, 1997. 292.
- [34] Částicové kompozitní materiály [online]. [citace 5/4/2008]. Dostupný z URL: <http://www.irsm.cas.cz/?Lang=CZE&Menu=20,52,0,0#2>.
- [35] Mechanické vlastnosti [online]. [citace 10/4/2008]. Dostupný z URL: [http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/data/st1/zk3\\_2htm](http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/data/st1/zk3_2htm).
- [36] ČSN EN ISO 179–1/A1 Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy.
- [37] Tvrdost [online]. [citace 28/3/2008]. Dostupný z URL: <http://www.converter.cz/tabulky/tvrdost.htm>.
- [38] Technická univerzita Liberec, fakulta strojní, Speciální způsoby vstřikování, [citace 10/1/2008]. Dostupný z URL: [http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/](http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/).
- [39] Selogica; User Manual, Arburg GmbH + Co KG, 2007.
- [40] BOBČÍK, L., aj., Formy pro zpracování plastů; I. díl – Vstřikování termoplastů. 2. opr. vyd., Uniplast Brno, 1999.
- [41] Katalog od fy Hasco Hasenclever GmbH + Co KG. Dostupný z URL: <http://www.hasco.com/www-gb/main.html>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

P	Polymerační stupeň
PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
-OH	Alkoholová skupina
-COOH	Karboxylová skupina organických kyselin
$T_g$	Teplota skelného přechodu
$T_m$	Teplota tání
$T_f$	Teplota tečení
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethyltereftalát
PEEK	Polyether-ether-keton
PAN	Polyakrylonitril
PMMA	Polymethylmetakrylát
PA6.6	Polyamid 6.6
M	Molární hmotnost
E	Youngův modul pružnosti
$\eta$	Smyková viskozita
$\gamma$	Rychlost smykové deformace
$\tau_{xy}$	Smykové napětí
$\sigma$	Normálové napětí
$\lambda$	Doba relaxace
SMC	S výztuží ze sekaných vláken

---

CaCO <sub>3</sub>	Uhličitan vápenatý
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethylen
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nitrid křemíku
SiO <sub>2</sub>	Oxid křemičitý
∅	Průměr
Tex	Váha 1 km vlákna v gramech
a <sub>n</sub>	Rázová houževnatost
a <sub>k</sub>	Vrubová houževnatost
W	Práce
GIT	Gas Injection Technology
WIT	Water Injection Technology
PIM	Powder Injection Molding
RIM	Reaction Injection Molding
MLFIM	Multi Live Feed Injection Molding
D	Průměr šneku
H	Hloubka šnekového kanálu
Θ	Úhel stoupání šroubovice šneku
F	Síla
p	Tlak
S	Plocha

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Polymerní řetězce. [1] .....	14
Obr. 2. Způsoby zesíťování polymerních řetězců. [3] .....	15
Obr. 3. Rozdělení polymerů. [4] .....	16
Obr. 4. Světová spotřeba termoplastů (cca 125 mil. t / 1998). [4] .....	22
Obr. 5. Energetická spotřeba pro výrobu různých druhů materiálů. [6] .....	27
Obr. 6. Závislost některých polymerů na P. [3] .....	28
Obr. 7. Deformační křivka. [11] .....	29
Obr. 8. Termomechanická křivka amorfního (1) a semikrystalického (2) polymeru. [12]..	30
Obr. 9. Tokové křivky různých materiálů. [1] .....	32
Obr. 10. Toková křivka v závislosti na různých parametrech. [6] .....	32
Obr. 11. Relaxace napětí [1] .....	33
Obr. 12. Překmit napětí. [1] .....	33
Obr. 13. Fontánový tok. [1] .....	34
Obr. 14. Jev „jetting“ [1] .....	34
Obr. 15. Zpracovatelská oblast procesu vstřikování [1] .....	35
Obr. 16. Průběh tlaku a teploty během procesu vstřikování. [4] .....	36
Obr. 17. Diagram pV-T během procesu vstřikování. [4] .....	36
Obr. 18. Trhací stroje. [13] .....	51
Obr. 19. Zkušební tělesa. [13] .....	52
Obr. 20. Charpyho kladivo. [13] .....	55
Obr. 21. Zkouška tlakem. [13] .....	56
Obr. 22. Tříbodový ohyb. [13] .....	57
Obr. 23. Vtlačování kuličky [13] .....	59
Obr. 24. Tvrdoměr SHORE [13] .....	59



Obr. 25. Schéma vstřikovacího stroje. [6] .....	63
Obr. 26. Schéma mechanického uzavíracího systému s pěti bodovou dvojitou kloubovou pákou s centrálním řídicím válcem. [9] .....	65
Obr. 27. Schéma hydraulického uzavíracího systému. [9] .....	65
Obr. 28. Schéma standardního šneku. [1] .....	67
Obr. 29. Systém Selogica – ovládací panel s tlačítky. [39] .....	68
Obr. 30. Arburg Allrounder 420 C 1000-350. [1] .....	69
Obr. 31. Řez formou. [41] .....	71
Obr. 32. Schéma vstřikovacího cyklu. [4] .....	72
Obr. 33. Zkušební tělesa s vtokovým zbytkem.....	75
Obr. 34. Sada pěti zkušebních těles.....	76
Obr. 35. Nastavení teplot na vstřikovacím stroji.....	77
Obr. 36. Nastavení vstřikování.....	78
Obr. 37. Nastavení dotlaku.....	79
Obr. 38. Porovnání tvrdosti ShoreD u PP + 40% mastek.....	82
Obr. 39. Porovnání maximálního napětí $R_m$ u PP + 40% mastek.....	84
Obr. 40. Porovnání Youngova modulu pružnosti E u PP + 40% mastek.....	85
Obr. 41. Porovnání tažnosti $\epsilon$ u PP + 40% mastek.....	86
Obr. 42. Porovnání maximální síly $F_{max}$ u PP + 40% mastek.....	87
Obr. 43. Srovnání tvrdosti ShoreD u PP + 10% sklo.....	89
Obr. 44. Srovnání maximálního napětí $R_m$ u PP + 10% sklo.....	91
Obr. 45. Srovnání Youngova modulu pružnosti E u PP + 10% sklo.....	92
Obr. 46. Srovnání tažnosti $\epsilon$ u PP + 10% sklo.....	93
Obr. 47. Srovnání maximální síly $F_{max}$ u PP + 10% sklo.....	94
Obr. 48. Porovnání obou zkoumaných materiálů.....	97

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Schematické znázornění uspořádání dlouhých makromolekulárních řetězců v různých polymerech a jejich vlastnosti. [4] .....	17
Tab. 2. Vlastnosti amorfních a semikrystalických polymerů. [6] .....	19
Tab. 3. Možnosti zlepšení vlastností polymerů přísadami. [8] .....	25
Tab. 4. Charakteristické teploty vybraných polymerů. [4] .....	30
Tab. 5. Technické parametry vstřikovacího stroje. [1] .....	69
Tab. 6. Naměřené hodnoty tvrdosti PP + 40% mastek.....	81
Tab. 7. Naměřené hodnoty z tahové zkoušky PP + 40% mastek.....	82
Tab. 8. Naměřené hodnoty tvrdosti PP + 10% sklo.....	88
Tab. 9. Naměřené hodnoty z tahové zkoušky PP + 10% sklo.....	89
Tab. 10. Porovnání materiálů.....	96

## SEZNAM PŘÍLOH

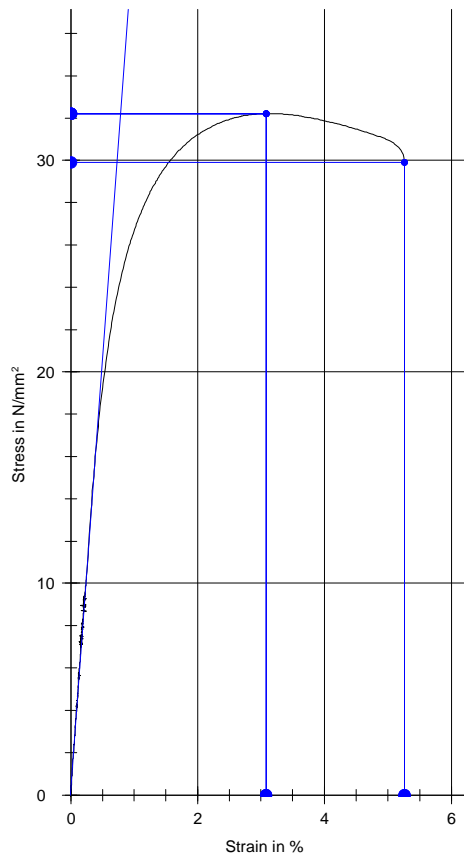
Příloha I. Tahové křivky PP + 40% mastek pro teploty formy 40°C, 60°C, 80°C a 100°C

Příloha II. Tahové křivky PP + 10% sklo pro teploty formy 40°C, 60°C, 80°C a 100°C

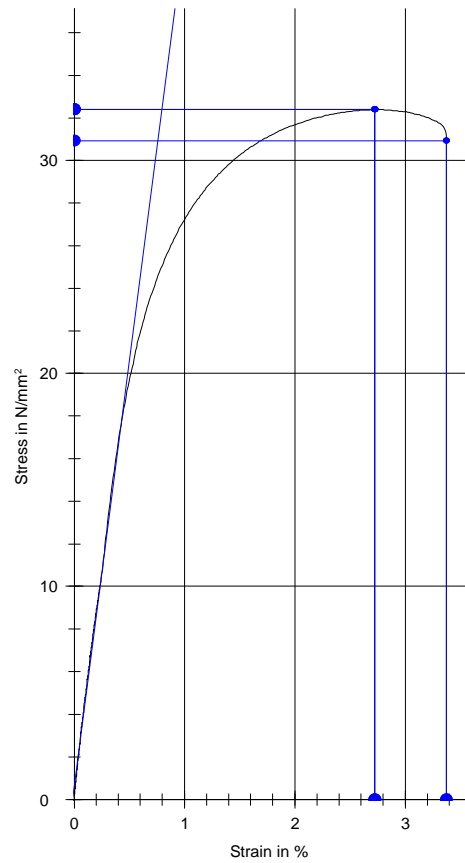
## PŘÍLOHA I:

Tahové křivky PP + 40% mastek pro teploty formy 40°C, 60°C, 80°C a 100°C

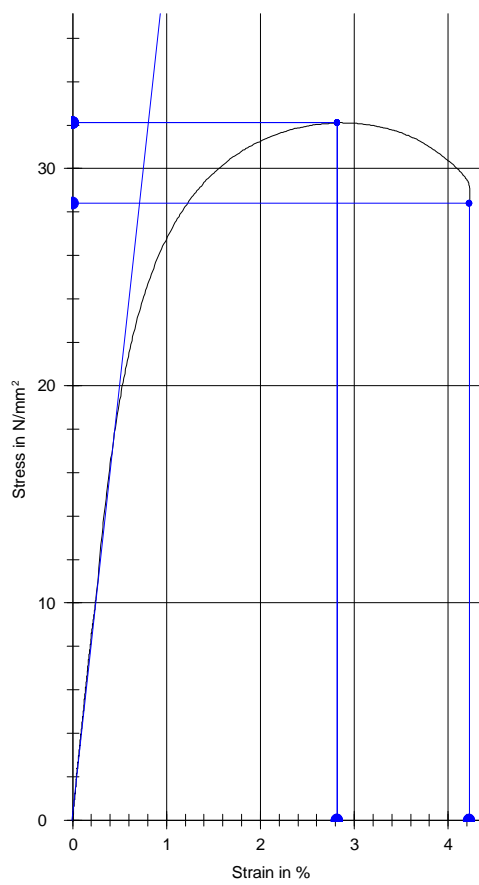
Teplota formy 40°C



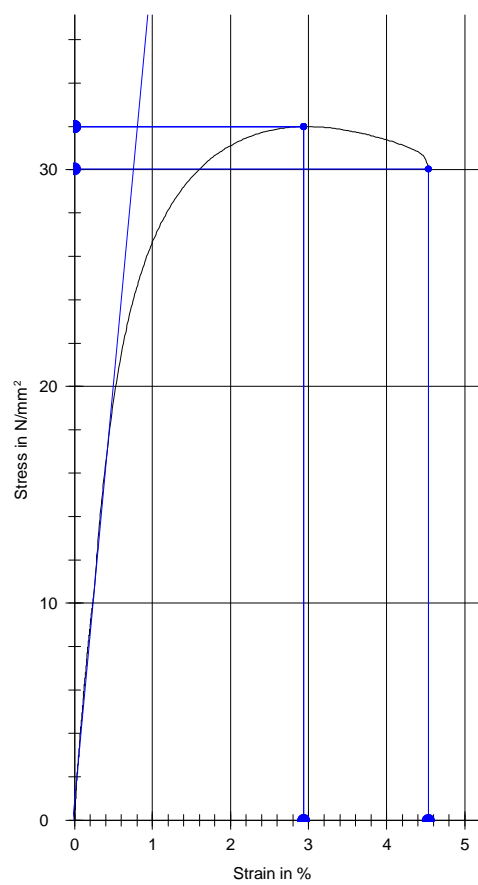
Teplota formy 60°C



Teplota formy 80°C



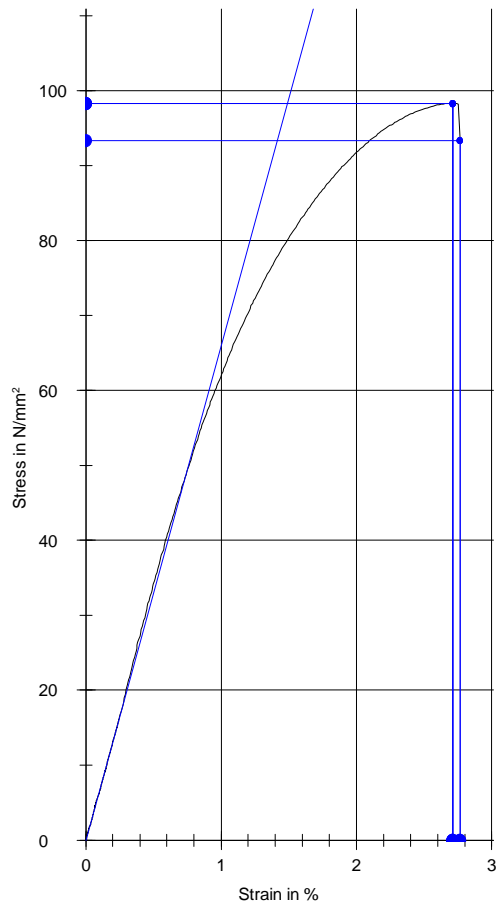
Teplota formy 100°C



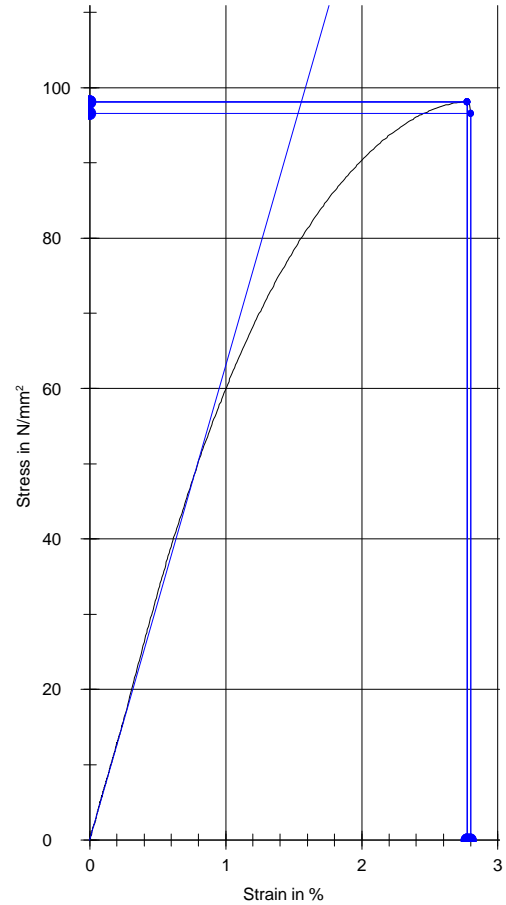
## PŘÍLOHA II:

Tahové křivky PP + 10% sklo pro teploty formy 40°C, 60°C, 80°C a 100°C

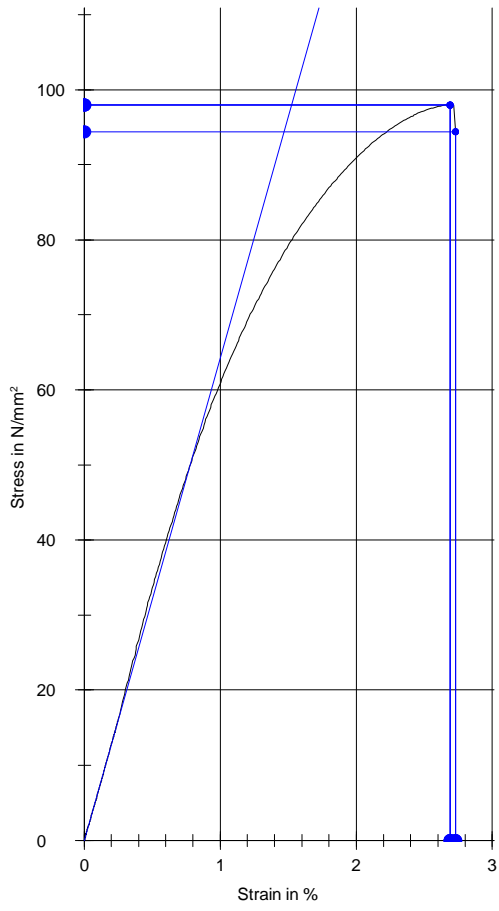
Teplota formy 40°C



Teplota formy 60°C



Teplota formy 80°C



Teplota formy 100°C

