

# **Vliv procesních parametrů na výsledné mechanické vlastnosti neplněných polymerů**

Jan Švehlík

---

Bakalářská práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

**Ústav výrobního inženýrství**

**akademický rok: 2011/2012**

# **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

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

**Jméno a příjmení: Jan ŠVEHLÍK**

**Osobní číslo: T09484**

**Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství**

**Studijní obor: Technologická zařízení**

**Téma práce: Vliv procesních parametrů na výsledné mechanické vlastnosti neplněných polymerů**

**Zásady pro vypracování:**

- 1) Vypracování literární studie na dané téma**
- 2) Příprava zkušebních těles pro experimentální část**
- 3) Provedení experimentu**
- 4) Vyhodnocení naměřených výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

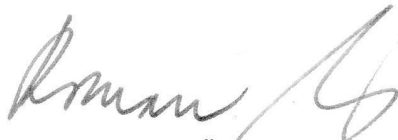
**Dle doporučení vedoucího DP**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. David Mañas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2012**

Ve Zlíně dne 10. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ŠVEHLÍK JAN

Obor: TECHNOLOGICKÁ ZAŘÍZENÍ

## 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 15.5.2012

  
.....

<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 nevydělčně 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.

(1) *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.*

(2) *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 vzdělávacímu 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). Odpirá-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**

Předložená bakalářská práce se zabývá vlivem procesních změny parametrů při vstřikování (změnou rychlosti ochlazování) na výsledné mechanické vlastnosti polymerních materiálů.

Teoretická část pojednává o druzích polymerních materiálů, technologii vstřikování a vybraných zkouškách mechanických vlastností.

V praktické části jsou vybrané druhy plastů (HDPE, LDPE, PP) podrobeny tahové zkoušce, zkoušce vrubové houževnatosti a zkoušce tvrdosti.

Klíčová slova: termoplasty, neplněné polymery, vstřikování, tahová zkouška, zkouška vrubové houževnatosti

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis deals with influence of changes in process parameters of injection molding (by changing rapidness of cooling) on the resulting mechanical characteristic polymeric materials.

Theoretic part deals with types of polymeric materials, technology of injection molding and selected tests of mechanical properties.

In practical part are selected sorts of plastics (HDPE, LDPE,PP) tested to tensile test, impact test and hardness test.

Keywords: thermoplastics, unfilled polymers, injection molding, tensile test, impact test

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D. za odborné vedení při psaní této bakalářské práce a Ing. Michal Staňkovi Ph.D. za čas strávený při vstřikování zkušebních těles.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TERMOPLASTY</b> .....	<b>12</b>
1.1 CHARAKTERISTIKA JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PLASTŮ .....	13
1.1.1 Polystyrénové plasty .....	13
1.1.2 Polyolefiny .....	13
1.1.3 Polyamidy .....	13
1.1.4 Polyformaldehyd (POM).....	14
1.1.5 Polykarbonát (PC).....	14
1.1.6 Polyetylentereftalát (PET).....	14
1.1.7 Polybutylentereftalát (PBT) .....	14
1.1.8 Polyvinylchlorid tvrdý (PVC tvrdý).....	14
1.2 ZPRACOVATELSKÉ PODMÍNKY PLASTŮ .....	14
<b>2 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ</b> .....	<b>16</b>
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS .....	16
2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	18
2.2.1 Vstřikovací jednotka .....	18
2.2.2 Uzavírací jednotka .....	20
2.2.3 Ovládání a řízení vstřikovacího stroje.....	20
2.2.4 Vstřikovací formy .....	21
<b>3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>25</b>
3.1 LOMY .....	25
3.1.1 Dělení podle energie .....	25
3.1.2 Dělení podle mechanismu .....	26
3.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	26
3.3 ZKOUŠKA TAHEM .....	26
3.3.1 Průběh zkoušky .....	27
3.3.2 Tahová křivka.....	28
3.4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY RÁZOVÉ .....	31
3.4.1 Zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy .....	31
3.4.2 Vrubová houževnatost.....	33
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>34</b>
<b>4 CÍLE BALALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>35</b>
<b>5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES</b> .....	<b>36</b>
<b>6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT</b> .....	<b>37</b>
<b>7 TAHOVÁ ZKOUŠKA</b> .....	<b>38</b>
7.1 ZKUŠEBNÍ STROJ PRO ZKOUŠKU TAHEM.....	38
7.2 POSTUP MĚŘENÍ ZKOUŠKY TAHEM.....	39
7.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	40
7.3.1 Vysokohustotní polyetylen.....	40
7.3.2 Nízkohustotní polyethylen .....	42
7.3.3 Polypropylen .....	44



<b>8</b>	<b>ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....</b>	<b>47</b>
8.1	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	47
8.2	POSTUP MĚŘENÍ CHARPYHO KLADIVEM .....	47
8.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	48
8.3.1	Vysokohustotní polyetylen.....	48
8.3.2	Nízkohustotní polyetylen .....	49
8.3.3	Polypropylen .....	49
<b>9</b>	<b>ZKOUŠKA TVRDOSTI.....</b>	<b>52</b>
9.1	SHOREĐ ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	52
9.2	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SHOREĐ ZKOUŠKU TVRDOSTI .....	52
9.3	POSTUP MĚŘENÍ SHOREĐ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	53
9.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	53
9.4.1	Vysokohustotní Polyetylen .....	53
9.4.2	Nízkohustotní polyetylen .....	54
9.4.3	Polypropylen .....	55
<b>10</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>56</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>68</b>

## ÚVOD

Syntetické polymery jsou relativně nové materiály, které ještě před 90 lety v podstatě neexistovali, dnes se však používají v téměř všech oborech lidské činnosti.

Neobyčejně rychlý rozvoj výroby a zpracování polymerních materiálů je zapříčiněn z následujících důvodů. V mnoha odvětvích mohou polymery nahrazovat klasické materiály (kovy, keramiku, sklo, dřevo, aj.), ale také mohou mít vlastnosti odlišné od klasických surovin, tudíž nám umožňují zcela nové aplikace a řešení materiálových problémů. Řadu polymerů je možno vyrábět z relativně levných a dostupných surovin, můžeme je tedy používat jako náhradu nedostatkových a drahých materiálů. Polymerní materiály mají nízkou hustotu a často také dobré elektroizolační vlastnosti, dále vynikají vysokou odolností proti korozi. Avšak i u polymerů existují vedle výhod i některé nedostatky. Mezi nevýhody patří omezená teplotní použitelnost a tvarová deformovatelnost, polymery mají sklon k elektrostatickému nabíjení. Problematická je také oprava plastových výrobků. V neposlední řadě také nastává problém s regenerací odpadu. [7]

Vstřikování polymerů patří mezi nejrozšířenější technologie výroby plastových dílců.

Vstřikování je ideální pro sériovou a hromadnou výrobu. Mezi výhody vstřikování patří vysoká produktivita výroby, využití široké škály materiálů, nízké pracovní náklady, nízké materiálové ztráty. Ve většině případů také již není nutnost dokončovacích operací.

Z nevýhod můžeme jmenovat vysokou pořizovací cenu vstřikovacího stroje a formy, nebo vysoké energetické nároky.

Při vstřikování je důležité analyzovat jednotlivé faktory vstřikovacího procesu tak, aby z těchto zjištěných procesních podmínek bylo možno nastavit optimální vstřikovací proces.

Při vstřikování je důležité dosažení optimálního výrobního procesu z důvodů optimálních nákladů na výrobu, zvýšení kvality výrobku a eliminaci možných vad výstřiků. [8]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

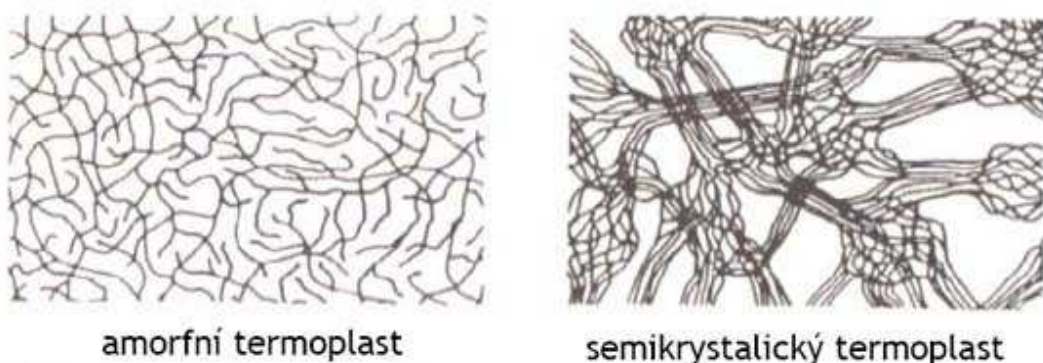
## 1 TERMOPLASTY

Termoplasty jsou nejrozšířenější skupina plastů. Je možné je za tepla tvarovat. Působením tepla měknou a chemicky se nemění. Zahřívání a chlazení je možno opakovat, aniž by to ovlivňovalo základní vlastnosti materiálů. Jsou to lineární nebo rozvětvené polymery. Dále se dělí na homopolymery a kopolymery. Řetězec homopolymerů tvoří jen jeden druh základní chemické skupiny. Kopolymery jsou složeny z více druhů základních chemických skupin. Z vnitřně strukturního hlediska se termoplasty dělí na:

- Amorfni, mají řetězce nepravidelně prostorově uspořádány
- Semikrystalické, mají podstatnou část řetězců uspořádanou pravidelně a těsně, čímž tvoří krystalické útvary. Zbytek má amorfni uspořádání.

Výrobky z amorfni plastů jsou používány v oblasti pod teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ). Polymer je v tomto stavu pevný. Zvyšování teploty nad teplotu skelného přechodu má za důsledek slábnutí kohezních sil mezi makromolekulami a polymer přechází do plastické oblasti až do viskózního stavu, při kterém se zpracovává. Při zvyšování teploty pozorujeme současně nárůst objemu plastu.

U semikrystalických polymerů jsou části makromolekul vázány pevněji v lamelách a ve sferolitech krystalické fáze. Zvyšování teploty vede k uvolnění části makromolekul z amorfni oblasti, dále z ostatních. To je doprovázeno značným nárůstem objemu. Použití semikrystalického polymeru je v oblasti nad teplotou skelného přechodu, protože zde mají výhodnou kombinaci pevnosti a houževnatosti. [1] [5]



Obr. 1. Struktury termoplastů [5]

## 1.1 Charakteristika jednotlivých typů plastů

### 1.1.1 Polystyrénové plasty

Polystyren (PS) – Vyrábí se polymerací styrenu. Je čirý, tvrdý a křehký plast. Má dobrou odolnost proti vodě, alkoholům kyselinám a zásadám. Používá se na výrobu spotřebních předmětů jako jsou nádoby, osvětlovací tělesa atd.

Styren-akrylonitril (SAN) – Tvrdý a méně křehký než PS. Má dobrou chemickou a tepelnou odolnost. Je dobře transparentní.

Akrylonitril-butadien-styren (ABS) – Je houževnatější než PS a SAN. Největší využití je v automobilovém průmyslu například na přístrojové desky, dále u domácích spotřebičů, nábytku. [1] [2]

### 1.1.2 Polyolefiny

Patří k masově vyráběným plastům. Vyrábí se polymerací etylenu. Má dobrou chemickou odolnost a elektroizolační vlastnosti. Používá se na výrobu fólií, obalů, sáčků nebo pro izolační opláštění elektrických vodičů.

Polyetylen nízkohustotní (LDPE) – Je měkký, pružný a houževnatý plast. Skládá se z bohatě rozvětvených polymerních řetězců. Křehne pod  $-60^{\circ}\text{C}$  a odolává teplotám do  $85^{\circ}\text{C}$ .

Polyetylen vysokohustotní (HDPE) – Je tužší a méně houževnatý než LDPE. Skládá se z lineárních řetězců. Stupeň krystalinity lineárního polyethylenu může být až 95%.

Polypropylen – V porovnání s PE je tvrdší a tužší. Krátkodobě odolává teplotám až  $140^{\circ}\text{C}$ . Má nízkou houževnatost za nižších teplot. Používá se pro výrobu nádob, nádrží, potrubí a obalů. [1] [2]

### 1.1.3 Polyamidy

Patří ke konstrukčním plastům.

Polyamid 6 (PA 6) – Je vysoce houževnatý. Má malý koeficient tření a výbornou odolnost proti otěru. Je nejvíce navlhavý ze skupiny polyamidů. Použitelný je v širokém intervalu teplot.

Polyamid 6 10 (PA 6 10) – Má nižší navlhavost, avšak také nižší pevnost.

Polyamid 6 6 (PA 66) – Je velmi pevný a odolný proti opotřebení.

Polyamid 11 (PA 11), polyamid 12 (PA 12) – Jsou nenavlhavými typy polyamidů. Vyznačují se nižší pevností oproti PA 66. Vykazují dobrou rozměrovou stabilitu v závislosti na teplotě. [1] [2]

#### **1.1.4 Polyformaldehyd (POM)**

Jedná se o vysoko-hustotní konstrukční plast. Vyniká pevností, dobrou odolností proti otěru a dobrými izolačními vlastnostmi. Má vysoce krystalickou strukturu, která je charakteristická pro kovy. Neodolává silným kyselinám a oxidačním činidlům. [1] [2]

#### **1.1.5 Polykarbonát (PC)**

Amorfní, transparentní plast s vynikající rázovou a vrubovou houževnatostí, pevností a tuhostí. Tepelná odolnost je až do 135°C. Má velmi nízkou nasákavost a výborné dielektrické vlastnosti. [1] [2]

#### **1.1.6 Polyetylentereftalát (PET)**

Semikrystalický plast. Vyniká vysokou tvrdostí a tuhostí, je také dobře odolný proti opotřebení a má dobré kluzné vlastnosti. Má vynikající elektroizolační vlastnosti. Používá se na výrobu textilních vláken, lahví na nápoje a fólií. [1] [2]

#### **1.1.7 Polybutylentereftalát (PBT)**

Má podobné vlastnosti jako PET. Liší se nižší pevností a vyšší houževnatostí. Je snadněji zpracovatelný. [1] [2]

#### **1.1.8 Polyvinylchlorid tvrdý (PVC tvrdý)**

Má relativně vysokou hmotnost. Je tvrdý, tuhý a poměrně křehký s nízkou tepelnou odolností. V porovnání s PE nebo PP je hůře zpracovatelný, z důvodu nevhodných tokových vlastností taveniny a malé tepelné stability. Z tvrdého PVC se vyrábí potrubí, obaly nebo desky pro stavebnictví. [1] [2]

### **1.2 Zpracovatelské podmínky plastů**

Na výsledné vlastnosti hotového výrobku mají technologické podmínky velký vliv. Zpracovatelské parametry (teplota, tlak, prodlevy) jsou určující pro rozměry, a také pro mechanické a fyzikální vlastnosti.

Při vstřikování také dochází ve vtokových kanálech a tvarových dutinách forem k orientaci makromolekul a jejich řetězce se srovnávají ve směru proudění taveniny. Po ztuhnutí jsou orientované molekuly příčinou anizotropie hmoty. Vedou také ke vzniku vnitřního pnutí a nepravidelnému smrštění.

U semikrystalických termoplastů se podmínkami při zpracování dá ovlivnit obsah krystalinity a jejich velikost. To znamená větší krystalinitu, vyšší pevnost, zvýšený modul pružnosti i u ostatních činitelů. [1]

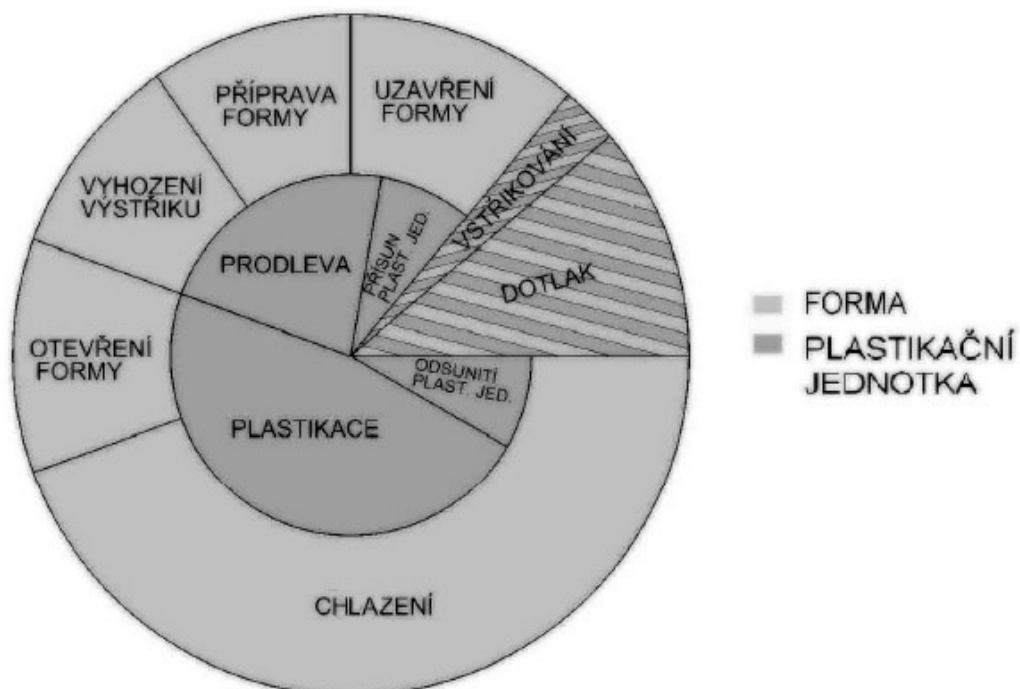
## 2 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ

Je to nejrozšířenější metoda výroby požadovaných plastových dílů. Jedná se o poměrně složitý fyzikální proces, na kterém se podílí vstříkovací stroj, vstříkovací forma a vstříkovaný polymer. V průběhu vstříkování je roztavený polymer tlakem dopravován z vstříkovacího stroje do dutiny formy, kde je chlazen ve tvaru požadované součásti. [1]

### 2.1 Vstříkovací cyklus

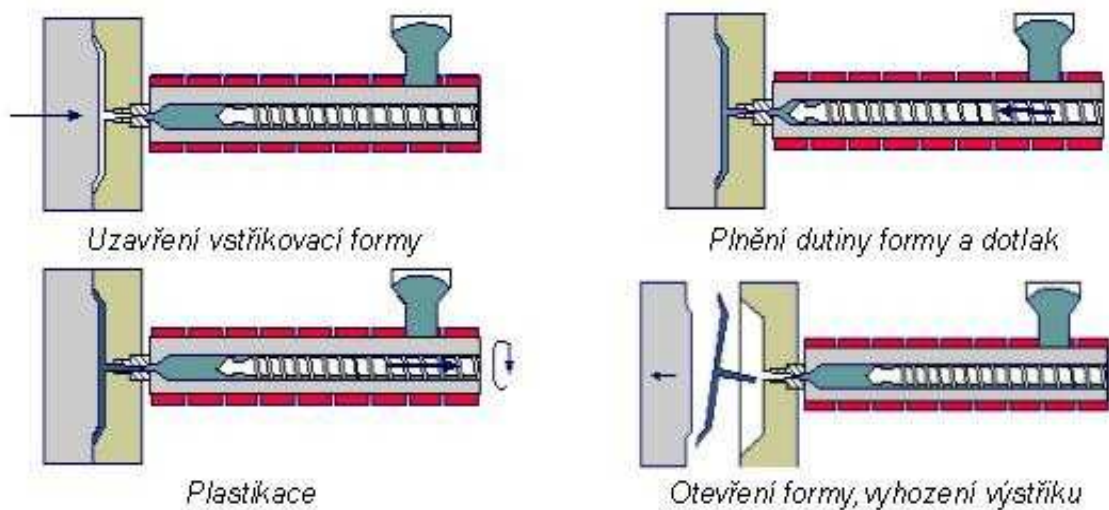
Je tvořen sledem specifikovaných úkonů. Během tohoto neizotermického procesu plast prochází teplotním cyklem. Pro popis cyklu musíme definovat jeho počátek. Za počátek považujeme okamžik impulsu k uzavření formy.

Na počátku cyklu je forma otevřená a dutina formy prázdná. V dalším kroku se pohyblivá část formy přisune k pevné, dojde k uzavření a uzamknutí formy. Tyto pojmy je nutno odlišit. Na přisuv formy je potřeba vynaložit relativně malá síla, zatímco na uzamknutí je nutno vynaložit síly značně vyšší z důvodu zabezpečení uzavřené polohy proti tlaku taveniny. Následuje vlastní vstříkování roztaveného plastu do dutiny formy vlivem axiálního pohybu šneku. Po zaplnění dutiny formy je tavenina dále stlačena dokud tlak nedosáhne maximální hodnoty.



Obr. 2. Schéma vstříkovacího cyklu [5]





Obr. 3. Průběh vstřikovacího cyklu [5]

Ihned po vstupu taveniny do dutiny formy začíná chlazení. Chlazení je předávání tepla z taveniny do vstřikovací formy a trvá až do otevření formy a vyhození výstřiku. Doba chlazení představuje největší část cyklu a závisí na tloušťce stěny výstřiku, druhu plastu, teplotě taveniny, teplotě formy a na požadované vyhazovací teplotě. Dobu chlazení je možno zkrátit účinným chlazením formy. Při chlazení dochází k významným změnám stavových veličin teploty, tlaku a měrného objemu. Průběh chlazení ovlivňuje strukturu materiálu (orientaci, krystalizaci, vnitřní pnutí), i jakost povrchu, zejména lesklost. Během chlazení se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem, aby se na výstřiku netvořily propadliny a staženiny, je nutno zmenšování objemu kompenzovat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy.

Po dotlaku začíná plastikace další dávky polymeru. Šnek se otáčí, pod násypkou nabírá granulát, plastikuje ho a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Šnek současně ustupuje dozadu, přičemž překonává zpětný tlak. Velikost zpětného tlaku ovlivňuje dobu plastikace a kvalitu prohnětení taveniny. Během plastikace se plast ohřívá převodem tepla ze stěn válce, frikčním teplem, které vzniká třením polymeru o stěny komory a o povrch šneku a přeměnou hnětací práce šneku v teplo. [1] [5]

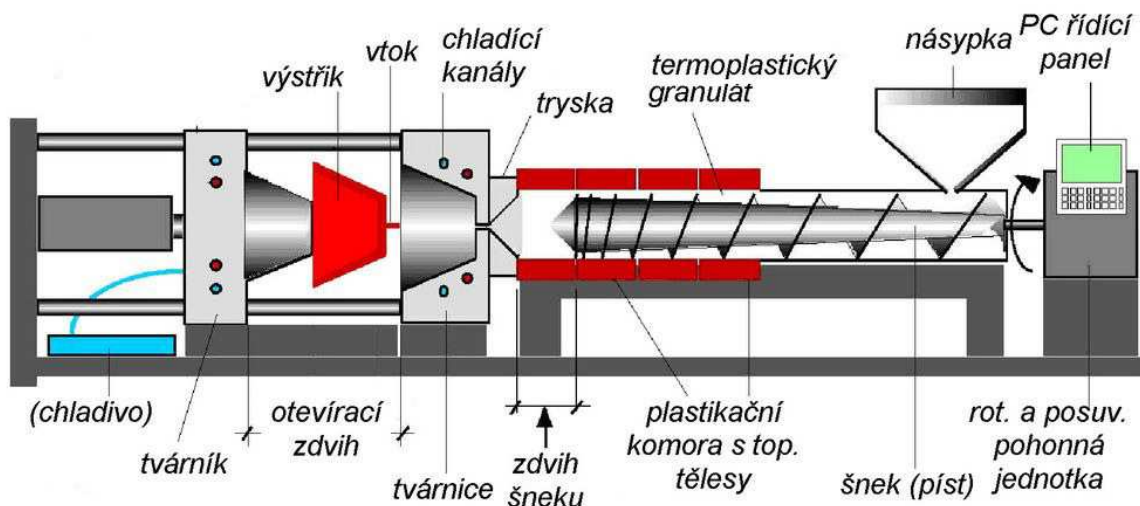
## 2.2 Vstřikovací stroj

Musí kvalitou svých parametrů a řízením zabezpečit výrobu jakostních výstřiků. Existuje velký počet různých konstrukcí strojů, které se liší provedením, způsobem řízení, reprodukovatelností a stálostí jednotlivých parametrů, rychlostí výroby či snadnou obsluhou.

Konstrukce stroje je charakterizována podle:

- vstřikovací jednotky
- uzavírací jednotky
- ovládání a řízení stroje

Nejčastěji používané vstřikovací stroje jsou především hydraulické nebo hydraulicko-mechanické stroje, především stavebnicového uspořádání s různým stupněm elektronického řízení.



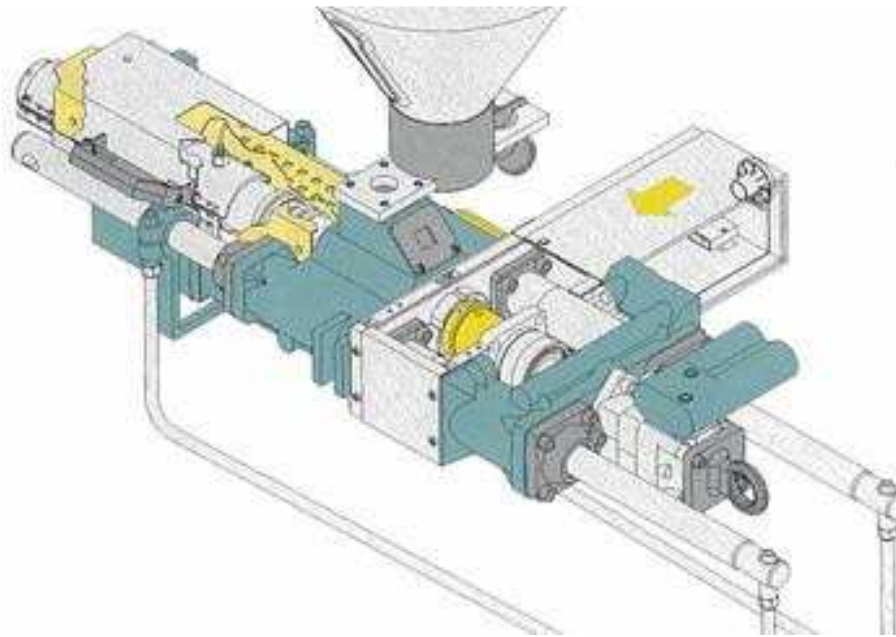
Obr. 4. Schéma vstřikovacího stroje [5]

Prvky pro řízení a ovládání bývají umístěny na panelu vstřikovacího stroje, případně v elektrorozvodné skříni vybavené zásuvkami a vypínači. Tím je umožněno připojení přídatných a pomocných zařízení (temperanční, vytáčetí, atd.) [1] [5]

### 2.2.1 Vstřikovací jednotka

Slouží k přípravě a dopravě požadovaného množství roztaveného polymeru s předepsanými technologickými parametry do vstřikovací formy. Množství dopravované taveniny musí být menší, než je kapacita vstřikovací jednotky při jednom zdvihu. Při příliš malém vstřikovaném množství setrvává polymer ve vstřikovací jednotce dlouhou dobu, čímž nastává jeho degradace. To můžeme ovlivnit rychlejšími cykly výroby. Maximální vstřikované

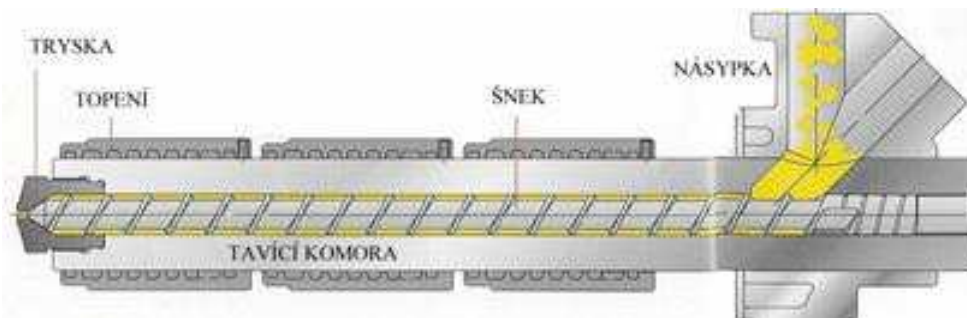
množství by nemělo překročit 90% jednotky, z důvodu případného doplnění při úbytku hmoty při chlazení smrštěním.



Obr. 5. Vstřikovací jednotka [5]

Práce vstřikovací jednotky probíhá tak, že do tavicího válce je dopravován zpracovaný polymer z násypky pohybem šneku. Šnek posouvá polymer přes vstupní, přechodové a výstupní pásmo. Postupně probíhá plastikace, homogenizace a tavenina se hromadí před šnekem. Současně ho odtlačuje do zadní polohy.

Topení tavicí komory je rozděleno do tří pásem (vstupní, střední a pásmo u trysky). Tryska disponuje samostatným topením. Část tepelné energie vzniká disipací materiálu.

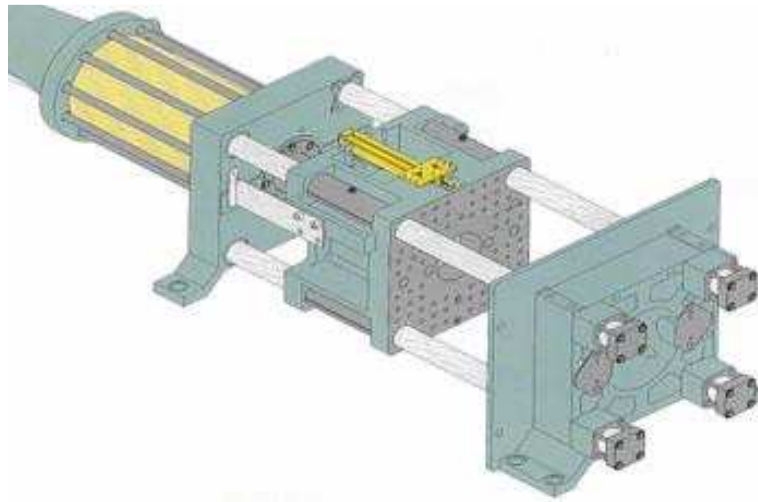


Obr. 6. Tavicí komora [5]

Tavicí komora je zakončena vyhřívanou tryskou, která spojuje formu s vstřikovací jednotkou. Přesné dosednutí do sedla vtokové vložky zajišťuje kulové zakončení trysky. Podmínkou správné funkce je jejich sousost, menší průměr otvoru a menší poloměr trysky než je u sedla vtokové vložky. [1] [5]

### 2.2.2 Uzavírací jednotka

Slouží k ovládní formy a zajišťuje její polohu v uzavřené i otevřené poloze. Velikost uzavíracího tlaku je nastavitelná a je přímo závislá na velikost vstřikovacího tlaku, ploše dutiny a vtoků v dělicí rovině.



Obr. 7. Uzavírací jednotka [5]

Hlavní části uzavírací jednotky:

- Pevná opěrná deska
- Upínací deska
- Vodící sloupky
- Uzavírací mechanismus

Uzavírací mechanismus má nejrůznější provedení. Hydraulické jednotky vyžadují zajištění závorou, umožňují pootevření formy hydraulickým tlakem. Výhodou hydraulické jednotky je nastavení libovolné hloubky otevření formy. Hydraulicky-mechanické jednotky jsou nejčastěji používány u strojů s malými gramážemi. Zaručují vyšší uzavírací rychlost s potřebným zpomalením před uzavřením a lepší tuhost. Konstrukce je jako kloubový mechanismus ovládaný hydraulickým válcem. Zajištění formy proti pootevření při vstřikování je pomocí hydraulického válce velkého průřezu, který je pevně spojen s upínací deskou. [1] [5]

### 2.2.3 Ovládání a řízení vstřikovacího stroje

Charakteristickým znakem kvality vstřikovacího stroje je stupeň řízení a snadná obsluha. Důležitá je stálá reprodukovatelnost technologických parametrů. Pokud tyto parametry

kolísají, nerovnoměrnost se projeví na přesnosti a kvalitě výroby. Řízení stroje je nutno zajistit vhodnými regulačními a řídicími prvky.

U nových koncepcí vstřikovacích strojů je nutnost výkonné procesorové techniky. Pro nastavování technologických parametrů se využívá grafické formy řízení pracovního cyklu na displeji se selektivním přístupem k jednotlivým parametrům stroje. Cyklus pracovního stroje sestavený do programových sekvencí je pak snadno kontrolovatelný a upravitelný.

Koncepce seřízení je rozdělena na:

- Sestavení grafu vstřikovacího stroje
- Definice a nastavení parametrů
- Kontrola procesu

Nastavení stroje je kontrolováno zpětně řídicím systémem. [1] [5]

#### **2.2.4 Vstřikovací formy**

Výroba dílů vstřikováním je realizována na vstřikovacím stroji a ve formě v poměrně krátkém čase. Důležití je působení dostatečné teploty, tlaku a dalších parametrů. Z toho vyplývají požadavky na stroj a vstřikovací formu.

U formy vyžadujeme:

- Vysokou přesnost a jakost funkčních ploch dutiny formy a dalších funkčních dílů.
- Maximální možnou pevnost a tuhost částí formy i celku, z důvodů zachycení potřebných tlaků.
- Správnou funkci formy, vhodný vtokový systém, vyhazovací systém, odvzdušnění, temperování a další.
- Dlouhou životnost zaručenou konstrukcí, materiálem a výrobou.

Konstrukce vstřikovacích forem jsou realizovány v mnoha variantách, lze je rozdělit do následujících skupin:

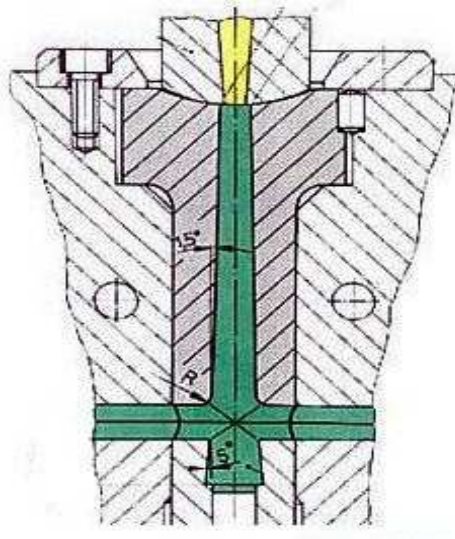
- Dle násobnosti na jednonásobné a vícenásobné
- Dle zaformování a konstrukčního řešení na dvoudeskové, třideskové, čelist'ové, etážové, vytáček, apod.

- Dle konstrukce vstřikovacího stroje na formy se vstřikem do dělicí roviny a na formy se vstřikem kolmo na dělicí rovinu.

Vstřikovací forma je složena z dílů, vymežujících dutinu formy, z vtokového systému, z temperančního systému, z vyhazovacího systému a z vodících a upínacích elementů. Části vstřikovací formy jsou rozděleny do dvou skupin na části funkční a části konstrukční. Funkční části jsou ve styku s tvářeným materiálem a dávají mu požadovaný tvar. Konstrukční části zabezpečují správnou činnost formy.

### Vtokový systém

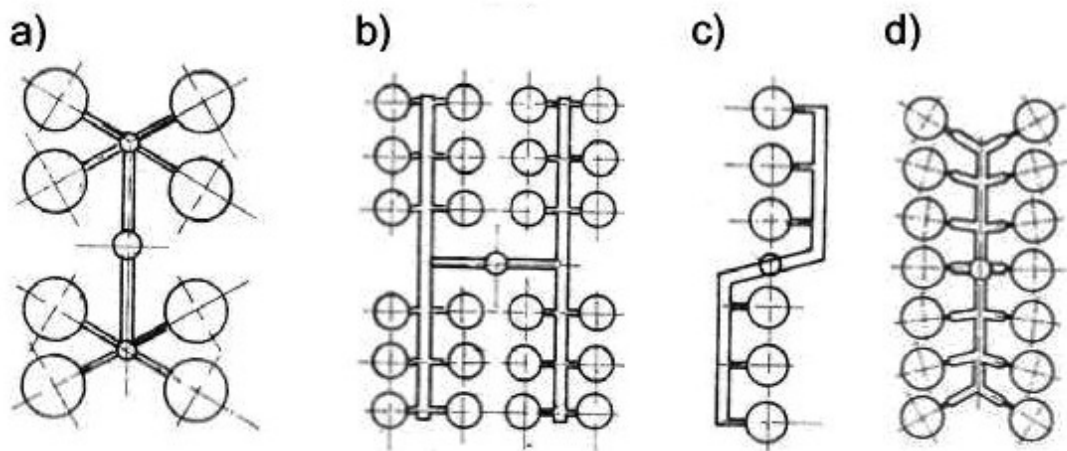
Kvalitu a jakost výstříku nejvíce ovlivňuje vtokový systém. Vtokový systém zajišťuje správné naplnění dutiny formy, oddělení od výstříku a snadné vyhození vtokového zbytku. Vtokový systém je navrhován podle rozmístění a počtu tvarových dutin a podle toho, zda bude konstruován jako horký nebo studený rozvod. Při vstřikování termoplastů je důležité správné umístění vtoku a správný druh vtokového systému. Vtok musí být řešen dle zásad tak, aby naplnění formy taveninou proběhlo co nejkratší cestou bez značných tlakových a teplotních ztrát. Důležité je doplnění formy co nejrychleji a pokud možno všude ve stejném čase. U forem vícenásobných je velmi důležité, aby plnění všech tvarových dutin probíhalo současně a při srovnatelných technologických podmínkách, což znamená při stejném vnitřním tlaku a stejné teplotě taveniny. [1] [5]



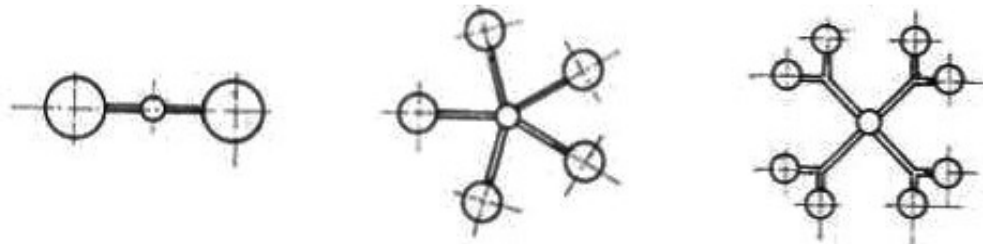
Obr. 8. Detail vtokového ústí [5]

U forem vícenásobných je možné umístění tvarových dutin buď v řadě, nebo do hvězdy. Pro plnění tvarových dutin je výhodnější umístění do hvězdy, protože k zaplnění dochází stejnoměrně. Uspořádání v řadě je méně výhodné a je třeba provést korekci ústí vtoku.

Korekci ústí vtoku provádíme změnou rozměrů rozváděcích kanálů směrem ke vzdálenějším dutinám.



Obr. 9. Řádové uspořádání vtokové soustavy u vícenásobných forem a) se stejnou délkou toku taveniny b),c),d.) s nesterjnou délkou toku taveniny [5]



Obr. 10. Hvězdicové uspořádání vtokové soustavy u vícenásobných forem [5]

### Temperační systém

Aby byla zajištěna opakovatelnost výroby, musí polymer ve formě zchladnout co nejrychleji z technologického a ekonomického hlediska. Z tohoto důvodu vstříkovací formy obsahují temperační systém. Temperační systém je soustava dutin a kanálů, které umožňují prostup a přestup tepla z taveniny do formy temperovací kapaliny. Chladící medium protékající soustavou chladících kanálků slouží k udržování požadované teploty formy. Je důležité zajistit, aby se hmota ochlazovala ve všech místech stejnou rychlostí. Nerovnoměrným ochlazením vznikají ve výrobku vnitřní pnutí, může se deformovat a vznikají v něm trhliny. Temperační systém se dělí do dvou okruhů, na okruh pro pevnou (vtokovou) část formy, a okruh pro pohyblivou část. Rozměry a rozmístění temperačních kanálků jsou navrhovány s ohledem na celkové řešení formy, tedy na umístění vtokové soustavy, tvarových složek a vyhazovacího systému. Vzdálenost jednotlivých kanálů od líce formy musí být volena tak, aby nedocházelo k porušení povrchu dutiny formy, ale také aby v tvarové dutině nevznikala podchlazená místa. Obecnou zásadou je použití většího počtu malých

kanálů, než-li menšího počtu větších kanálů. Průřez kanálů se používá kruhový o průměru 6-20 mm. Celkovou délku kanálů volíme tak, aby rozdíl teplot temperančního media na vstupu a výstupu byl 3-5°C.

#### Vyhazovací systém

Při ochlazování výrobku dochází k jejich smršťování a setrvání na tvarových součástech formy, z tohoto důvodu musí vstříkovací forma obsahovat různé mechanismy pro vyhazování výstřiků. Nejčastější a nejjednodušší způsob vyhazování je mechanický princip pomocí vyhazovacích kolíků, stíracích desek a kroužků, apod. Jednotlivé způsoby vyhazování se v praxi kombinují. [1] [5]



### 3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Mechanické zkoušky spočívají v tom, že se zkušební tělesa deformují pod určitým napětím v tahu, tlaku, ohybu, smyku nebo krutu. Při technickém použití plastů nás obvykle zajímá jejich mechanická pevnost proti různým působením síly. Používané zkušební metody můžeme rozdělit do tří skupin.

1. Statické zkoušky. Při těchto zkouškách je materiál namáhán pomalu se měnícími silami. Síla se zvyšuje rovnoměrně pomalu, obvykle do zničení zkušebního tělesa.
2. Dynamické zkoušky. Působení síly se mění za velmi krátký časový úsek. Někdy zkouška probíhá také tak, že působení síly je dlouhodobé, ale její velikost se mění periodicky ve velmi krátké době.
3. Únavové zkoušky. Mechanické vlastnosti se zkoušejí dlouhodobě za předepsaných podmínek časově proměnného namáhání, až do porušení materiálu. [3]

#### 3.1 Lomy

Lomy můžeme dělit dle následujících kritérií:

1. Dle energie nutné k lomu
2. Dle mechanismu lomového porušení
3. Dle místa šíření trhliny – mají význam pouze u materiálů tvořených zrny (kovy, keramika) [2]

##### 3.1.1 Dělení podle energie

Rozeznáváme lomy houževnaté a lomy křehké. U tvárných materiálů, kovů a některých druhů termoplastů, nastávají Houževnaté (stabilní) lomy. U čela rostoucí trhliny, kde se koncentruje napětí je lom doprovázen plastickou deformací. Houževnatý lom je velmi energeticky náročný, protože plastická deformace je proces vyžadující značnou energii. Z tohoto důvodu se lom v počáteční fázi šíří pomalu a nazývá se stabilní lom.

V křehkých materiálech (keramika, skla, reaktoplasty, některé kovy) nastávají křehké (nestabilní) lomy. Lomy probíhají v čele trhliny štěpením chemických vazeb bez plastické deformace. Proto rostoucí trhlina spotřebovává jen malé množství energie. Křehké lomy vznikají náhle a šíří se rychle. [2]

### 3.1.2 Dělení podle mechanismu

Podle mechanismu rozlišujeme lomy tvárné a štěpné. Lomy tvárné doprovází plastická deformace v čele rostoucí trhliny, to se projevuje členitou, jemnou a jamkovitou morfologií plochy lomu. Tento typ lomu je z hlediska energetického lomem houževnatým. Lomy štěpné jsou z hlediska energie lomy křehké a probíhají štěpením vazeb. Plocha lomu je obvykle poměrně hladká, s rozměrnými plochami (lomovými fazetami). [2]

### 3.2 Příprava zkušebních těles

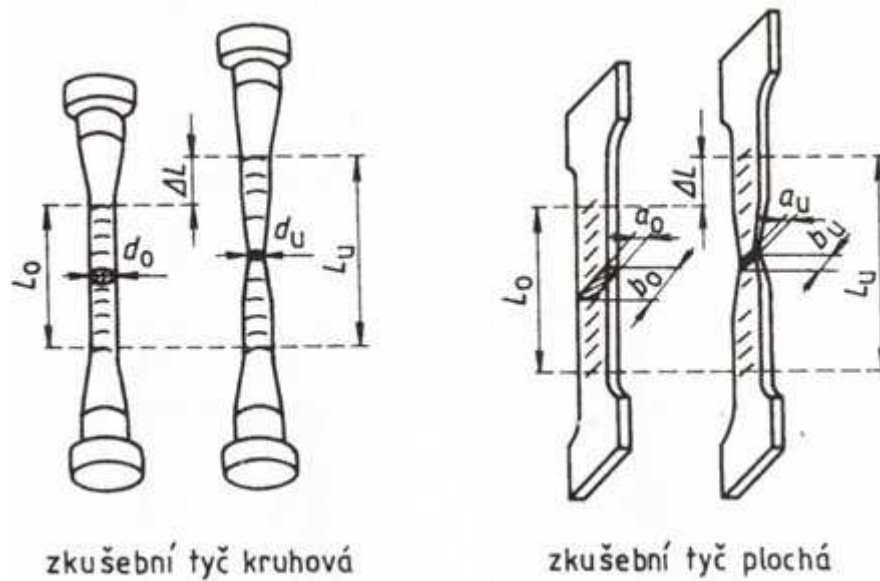
Výsledky zkoušek jsou závislé na tvaru zkušebních těles, technologii přípravy, opracování a dodatečné úpravě. Zkušební tělesa termoplastů se připravují převážně vstřikováním zkoušeného materiálu do vstřikovací formy. Vlastnosti těchto vzorků jsou závislé hlavně na rychlosti ochlazování taveniny.

Druhým způsobem je příprava z hotových výrobků, nebo polotovarů (desky, tyče) řezáním, vysekáváním nebo mechanickým obráběním. Tvar zkušebních těles, daných normou, musí být přesně dodržen, musí mít podélnou přímkovou osu, ostré, rovnoběžné hrany a rovné stěny. Porovnávat výsledky zkoušek je možné pouze při stejně připravených zkušebních tělesech, které byly zkoušeny normalizovaným způsobem. [3]

### 3.3 Zkouška tahem

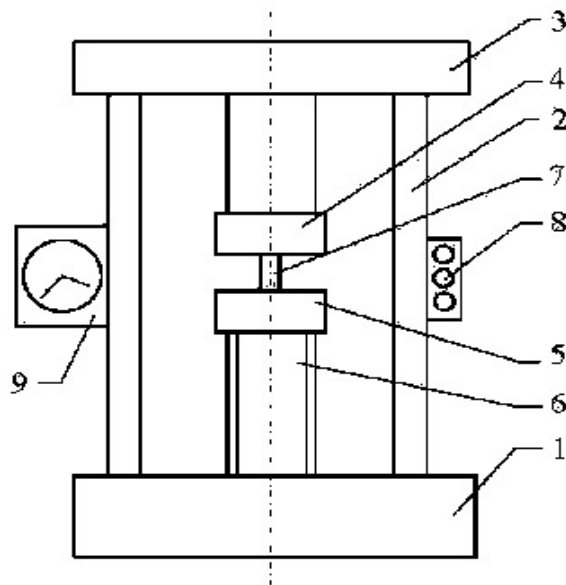
Je nejrozšířenější statická zkouška. Nutnost jejího provedení je téměř u všech technických materiálů, protože z ní získáváme některé hodnoty pro výpočty konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu.

Zkoušky tahem z pravidla nejsou prováděny na vyrobené součásti, ale na zkušebních tělesech, jejichž tvar a rozměry jsou dány normou. Počáteční délka  $L_0$  zkušební tyče je závislá na průřezu zkušební tyče a je při kruhovém průřezu u dlouhé tyče  $10 d_0$  a u tyče krátké  $5 d_0$ . ( $d_0$  – průměr zkušební tyče) [4]



Obr. 11. Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku [6]

### 3.3.1 Průběh zkoušky



Obr. 12. Schématické znázornění trhacího stroje: 1 - hnací jednotka, 2 - stojany s vedením, 3 - silový mechanismus, 4 - pevná čelist, 5 - pohyblivá čelist, 6 - pohybový šroub, 7 - zkušební vzorek, 8 - ovládní, 9 - výstupní zařízení [9]

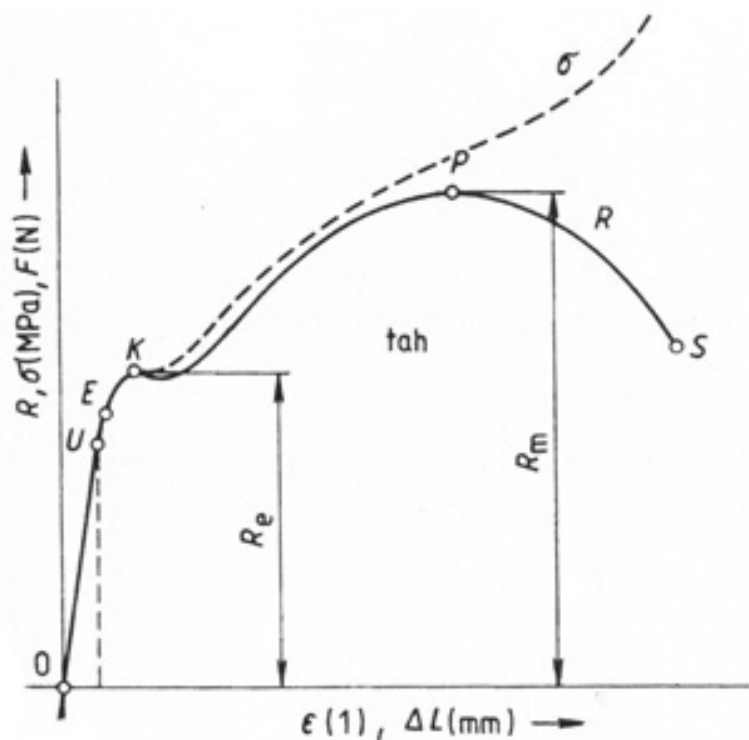
Při zkoušce je materiál namáhán silou tak, že dojde k jeho porušení. V isotropním materiálu by bylo rozložení napětí v celém průřezu rovnoměrné. Vlastnosti plastů se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo nerovnoměrně. Tím vznikají smyková napětí. Jestliže budeme působit na průřez tělesa  $S$  silou  $F$ , bude osově napětí působící v průřezu zkušební tělesa

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Při zkoušce se nám však bude měnit průřez tělesa, a to až do okamžiku, kdy je dosaženo mezi deformací a napětím. Při dalším zvětšování síly se dostaneme do okamžiku přetržení tělesa. V praxi se používá takzvané smluvní napětí, což je síla vztažená na počáteční průřez zkušební tělesa.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

### 3.3.2 Tahová křivka



Obr. 13. Tahová křivka [6]

#### Relativní prodloužení

S prodlužováním tělesa se mění jeho původní délka z  $l_0$  na  $l$ .

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

S prodlužováním tělesa nastává i zmenšování průřezu.

$$\varepsilon_s = \frac{s_0 - s}{s_0} = \frac{\Delta s}{s_0} \quad (4)$$

Relativní změna průřezu v závislosti na relativní změně délky se nazývá Poissonovo číslo.

$$\mu = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} = \text{poměrné zúžení/poměrné prodloužení} \quad (5)$$

Pro tahové zkoušky v počáteční části křivky platí Hookův zákon, který říká, že deformace je úměrná použité síle.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

E je modul pružnosti, také nazývaný Youngův modul.

#### Mez úměrnosti v tahu

Jedná se o mezní napětí, do kterého je deformace úměrná napětí. Až do této meze je průběh tahové přímky prakticky přímkový a platí zde Hookův zákon. Ve skutečnosti však již i při malém napětí zůstává na zkušební tělese trvalá deformaci. Pro dokonale pružný materiál bychom mez úměrnosti zjistili postupným zvyšováním a postupným rušením napětí až do hodnoty, kdy zůstane určité prodloužení. V praxi se jako mez úměrnosti definuje mezní napětí, při kterém po odtížení zkušební tělisko vykazuje trvalý přírůstek měřené délky do 0,01%.

#### Horní mez kluzu

Bod, do kterého se zvyšuje prodloužení se stoupajícím napětím. Za touto mezí se zvyšuje deformace, přičemž napětí klesá. Pokles napětí pokračuje až k dolní mezi kluzu. Deformace přestává být homogenní. V jednom místě zkušební tělesa se vytvoří místo s menším průřezem (krček). Napětí v této oblasti klesá, protože průřez krčku se zmenšuje. Současně dochází k orientaci molekul, tím se jeho odpor proti deformaci zvětšuje. Postupně dosáhne deformační zpevnění krčku takového stupně, že je jeho tuhost větší než tuhost neprodloužené části tělesa. Proto se průřez krčku již téměř nemění.

#### Dolní mez kluzu

Od tohoto bodu napětí opět stoupá, protože již bylo celé těleso zpevněno orientací. Dochází k homogennímu protahování vydlouženého tělesa.

#### Mez pevnosti v tahu

Maximální napětí naměřené v průběhu tahové zkoušky. Skutečná pevnost plastů je mnohem menší než pevnost vypočítaná teoreticky na základě mezimolekulárních sil. Příčina spočívá v přítomnosti defektů ve struktuře, které představují místa s nižší pevností, než má okolní hmota. Při zatěžování vznikají v těchto místech taková napětí, která překračují hodnotu kohezní pevnosti, čímž dochází ke vzniku mikrotrhliny. Ta se šíří až dojde k lomu tělesa v makroměřítku.

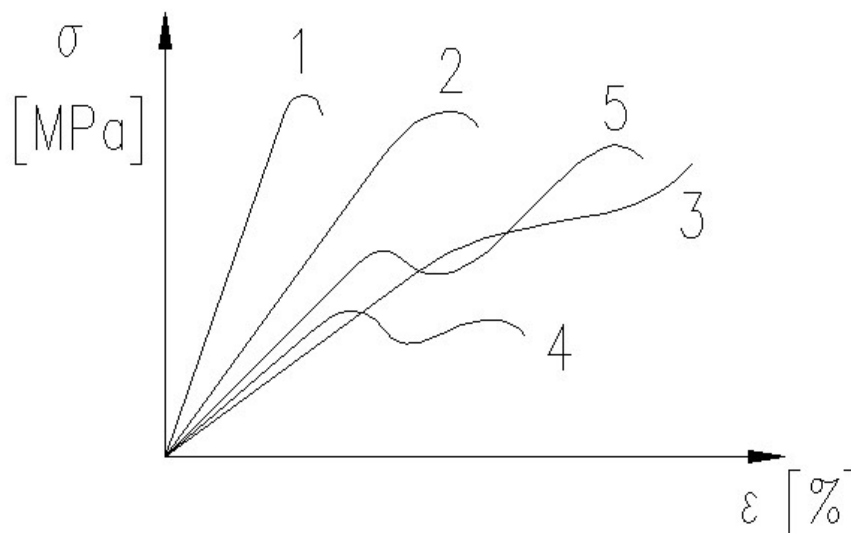
#### Poměrné prodloužení při přetržení

Vyjadřuje poměrnou změnu délky při tahové zkoušce v okamžiku přetržení. Vyjadřuje se v procentech měřené délky

$$\varepsilon_r = \frac{(l - l_0) \cdot 100}{l_0} = \frac{\Delta l \cdot 100}{l_0} \quad (7)$$

#### Poměrné prodloužení při největším zatížení

Změna délky v okamžiku dosažení maximální síly vztažená na počáteční měřenou délku zkušebního tělesa



Obr. 14. Charakteristické křivky různých materiálů[5]

Křivka 1. – Materiál s malou průtažností ( reaktoplasty, epoxidové pryskyřice, bakelit)

Křivka 2. – Houževnatější materiál (neměkčený PVC)

Křivka 3. - Nemá mez kluzu. Odpovídá materiálu s velkou průtažností (měkčený PVC)

Křivka 4. - Má dolní i horní mez kluzu (Polyethylen, Polypropylen)

Křivka 5. – Mechanické vlastnosti se zlepšují prodloužením (Polyamid) (Obr. 14.) [3]

### 3.4 Dynamické zkoušky rázové

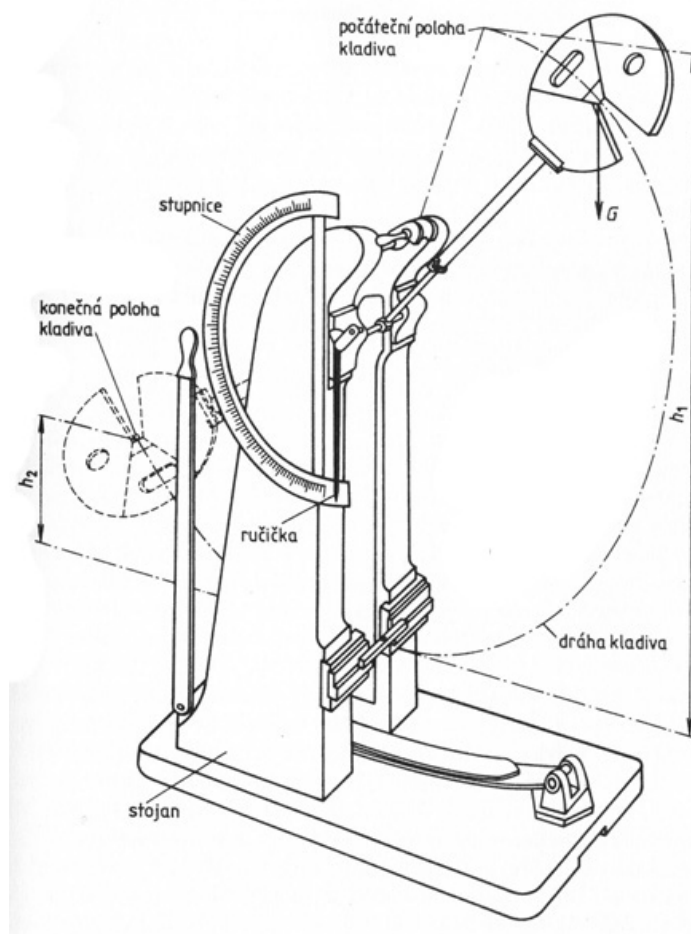
Rázové zkoušky provádíme proto, abychom zjistily schopnost polymeru odolávat napětí v krátkém časovém úseku. Pomalé zvyšování napětí vede u houževnatých materiálů ke značné deformaci a zkušební těleso se buď vůbec nezlomí, nebo se zlomí až při velkém průhybu. Čím více se bude zvyšovat rychlost zkoušky, tím více se namáhaný materiál bude jevit jako křehký.

Za rázové namáhání se považuje namáhání s rychlostí 1-10 m/s. Rázová houževnatost závisí na druhu polymeru, jeho složení a teplotě. Polymery, jejichž teplota skelného přechodu je vyšší než normální teplota, jsou při běžné teplotě křehké a při zkoušce snadno prasknou. Jsou to amorfní plasty jak s lineární, tak s rozvětvenou strukturou. U krystalických polymerů, u nichž je teplota skelného přechodu nižší než 20°C, vykazují často takovou houževnatost, že při zkoušce vůbec neprasknou. Houževnatost však u nich klesá se stoupajícím stupněm krystalinity.

Rázové zkoušky nám dávají určité informace o chování polymerů, jejichž výsledky nelze přenášet na různé tvary výrobku. Nejčastěji prováděná zkouška je rázová zkouška v ohybu. Lze také provádět rázové zkoušky v tahu, tlaku a krutu. [3]

#### 3.4.1 Zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy

Podstatou zkoušky je stanovení rázové práce potřebné k porušení zkušebního tělesa, na které dopadne nos nárazového kladiva. Zkušební těleso je opřeno o dvě podpěry svou širší plochou a přeráží se uprostřed své délky klínovitou částí kladiva. Na začátku zkoušky je kladivo ve své horní poloze, po uvolnění padá do dolní polohy a přerazí zkušební vzorek. Část energie padajícího kladiva se spotřebuje na přeražení vzorku. Čím je potřebná energie na přeražení větší, tím je menší výška, do které kladivo po přeražení vystoupí. Proto lze energii nutnou na přeražení materiálu přímo odečíst na zkalibrované stupnici, která je umístěna na zařízení. [3]



Obr. 15. Charpyho kladivo[6]

Zavěšené kyvadlo má ve své horní poloze potenciální energii.

$$K_p = m \cdot g \cdot h_1 [\text{J}] \quad (8)$$

- v okamžitá rychlost
- m hmotnost kyvadla
- g gravitační zrychlení

Hmota kladiva má při dopadu na zkušební těleso kinetickou energii.

$$K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 [\text{J}] \quad (9)$$

- v okamžitá rychlost
- m hmotnost kyvadla



### 3.4.2 Vrubová houževnatost

Vrubová houževnatost je poměr práce potřebné k přeražení zkušebního tělesa zeslabeného vrube k ploše průřezu v místě zeslabení. Vrub má za důsledek, že v jeho okolí dochází ke koncentraci napětí, což způsobuje křehnutí. To vede k tomu, že při namáhání rázem nastává porušení tělesa i u houževnatých materiálů, které bez vrubu vůbec nepraskají. Na vrub jsou citlivé hlavně plasty ve sklovitém stavu. [3]

$$KV = \frac{K}{S_V} \quad (10)$$

KV Vrubová houževnatost

K Rázová energie

S<sub>V</sub> Plocha v místě vrubu

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE BALALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo porovnání mechanických vlastností jednotlivých druhů polymerních materiálů (HDPE, LDPE, PP) v závislosti na rychlosti ochlazování. Rychlost ochlazování byla volena teplotou formy (25, 50, 75, 100°C). Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny na základě tahové zkoušky, zkoušky vrubové houževnatosti a zkoušky tvrdosti. Zkoušky byly realizovány v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství.

Cíle byly realizovány následujícím postupem:

1. Vypracováním literární studie
2. Příprava zkušebních těles na vstřikovacím stroji
3. Provedení daných zkoušek mechanických vlastností
4. Grafické znázornění a vyhodnocení naměřených výsledků

## 5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa byla vyrobena na vstřikovacím stroji dostupném na Ústavu výrobního inženýrství.

ARBURG 420 C Allrounder Advance	
Uzavírací síla	1000 kN
Maximální rozměr formy	420x420x500 mm
Průměr šneku	40 mm
Maximální vstřikovaný objem	182 cm <sup>3</sup>

Tab. 1. Technické parametry vstřikovacího stroje



Obr. 16. Vstřikovací stroj ARBURG

Byly zvoleny tyto tři typy polymerů: Vysokohustotní polyetylen (HDPE), Nízkohustotní polyetylen (LDPE) a Polypropylen (PP). Z každého polymeru byly vyrobeny čtyři série zkušebních těles, každá pro rozdílnou teplotu formy. Každá série se skládala z deseti kusů zkušebních těles pro tahovou zkoušku a deseti kusů zkušebních těles pro zkoušku vrubové houževnatosti.

## 6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Výsledné průměrné hodnoty byly vypočteny pomocí aritmetického vzorce

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

$\bar{x}$  aritmetický průměr

$x_i$  i-tá hodnota měřené veličiny

$n$  počet měření

Vzorec použitý pro výpočet střední kvadratické chyby aritmetického průměru

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (12)$$

$s$  empiricky směrodatná odchylka

$\bar{x}$  aritmetický průměr

$x_i$  i-tá hodnota měřené veličiny

$n$  počet měření

## 7 TAHOVÁ ZKOUŠKA

### 7.1 Zkušební stroj pro zkoušku tahem

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním trhacím stroji Zwick 1456. Tento stroj slouží k provádění mechanických zkoušek materiálu, nejčastěji tahové zkoušky. Lze na něm, za použití vhodných čelistí, provádět též zkoušky tlakem, ohybem, nebo zkoušky cyklické.

Nastavení parametrů a vyhodnocení zkoušky se provádí na počítači, který je součástí stroje.

Zwick 1456	
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Teplotní komora	-80°C / 250°C

*Tab. 2. Technické parametry trhacího stroje*



Obr. 17. Trhací stroj ZWICK 1456

## 7.2 Postup měření zkoušky tahem

Po spuštění stroje a počítače vybereme software TestXpert Master a zvolíme umístění výstupních souborů. Nastavíme rychlost zatěžování 100 mm/min. Dále nastavíme vhodnou vzdálenost upínacích čelistí dle délky zkušební vzorku. Posuvným měřidlem provedeme měření šířky a tloušťky zkušební tělesa. Tyto hodnoty zadáme do softwaru jako  $a_0$ - tloušťka zkušební tělesa a  $b_0$ - šířka zkušební tělesa. Dalším krokem je upnutí zkušební tělesa kde musíme dbát na to, aby těleso bylo upnuto kolmo a uprostřed upínacích čelistí. Než započneme vlastní zkoušku, vynulujeme zatěžující sílu tlačítkem Force 0.

Zkoušku zahájíme tlačítkem Start. Po zahájení zkoušky ke vzorku přijede extenzometr, který nám slouží k přesnějšímu určení modulu pružnosti (tuhosti). Po dosažení meze pružnosti extenzometr odjíždí a zatěžování probíhá až do maximálního zatížení, kde se vzorek zpravidla přetrhne. Po přetržení vzorek vyjmeme a tlačítkem LE vrátíme čelisti do původní polohy.

### 7.3 Výsledky měření

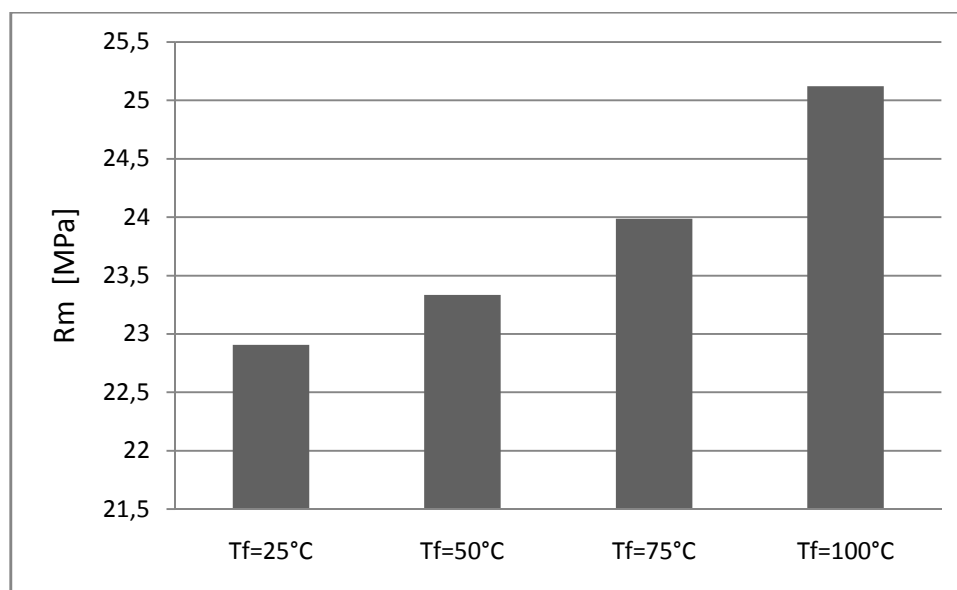
Pro každou sérii měření bylo voleno 9 kusů zkušebních těles. Vyhodnocovány byly tyto parametry:

Rm [MPa]	Mez pevnosti v tahu
F [N]	Maximální zatížení
E [MPa]	Mez pružnosti v tahu (tuhost)

#### 7.3.1 Vysokohustotní polyetylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
Rm [MPa]	22,9 ± 0,6	23,3 ± 0,2	24 ± 0,7	25,1 ± 0,4

Tab. 3. Hodnoty Rm pro HDPE při různých teplotách formy



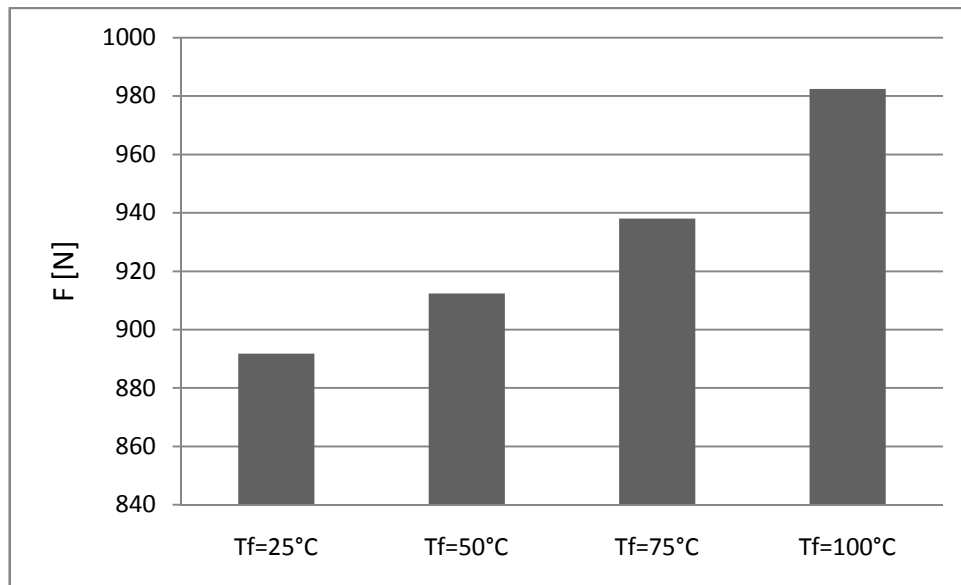
Obr. 18. Porovnání Rm pro HDPE při různých teplotách formy

Nejmenší hodnota maximální pevnosti v tahu byla zjištěna u materiálu vstříkovaného do formy o teplotě 25°C (890 MPa). Největší maximální pevnost pak u materiálu vstříkovaného do formy při 100°C (982 MPa). (Obr. 18)

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
F [N]	890 ± 24	912 ± 7	940 ± 27	982 ± 16

Tab. 4. Hodnoty F pro HDPE při různých teplotách formy



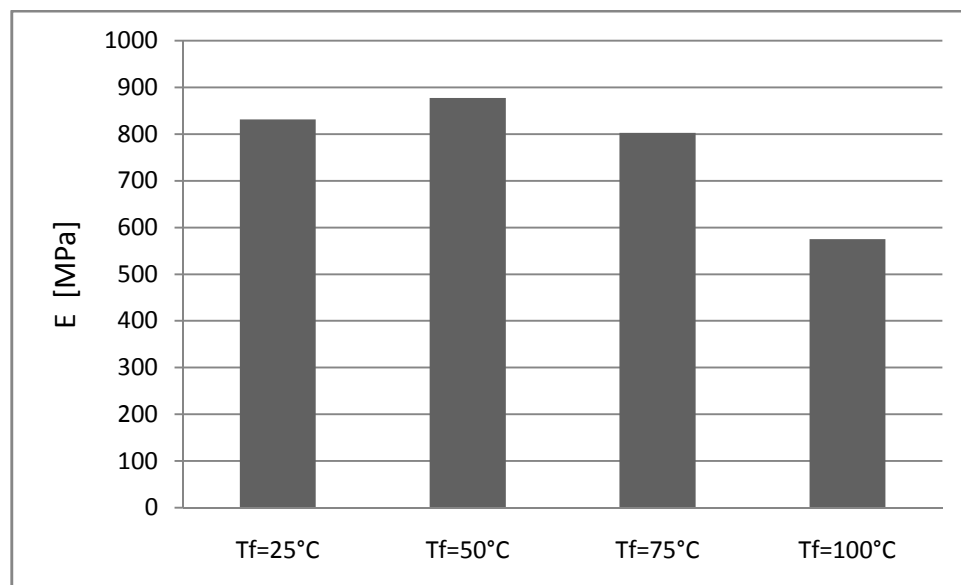


Obr. 19. Porovnání  $F$  pro HDPE při různých teplotách formy

Nejmenší maximální sílu snesl HDPE vstřikovaný do formy o teplotě 25°C (890N). Největší pak HDPE vstřikovaný do formy o teplotě 100°C (982N). (Obr. 19)

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
E [MPa]	830 ± 30	877 ± 19	800 ± 170	575 ± 6

Tab. 5. Hodnoty  $E$  pro HDPE při různých teplotách formy



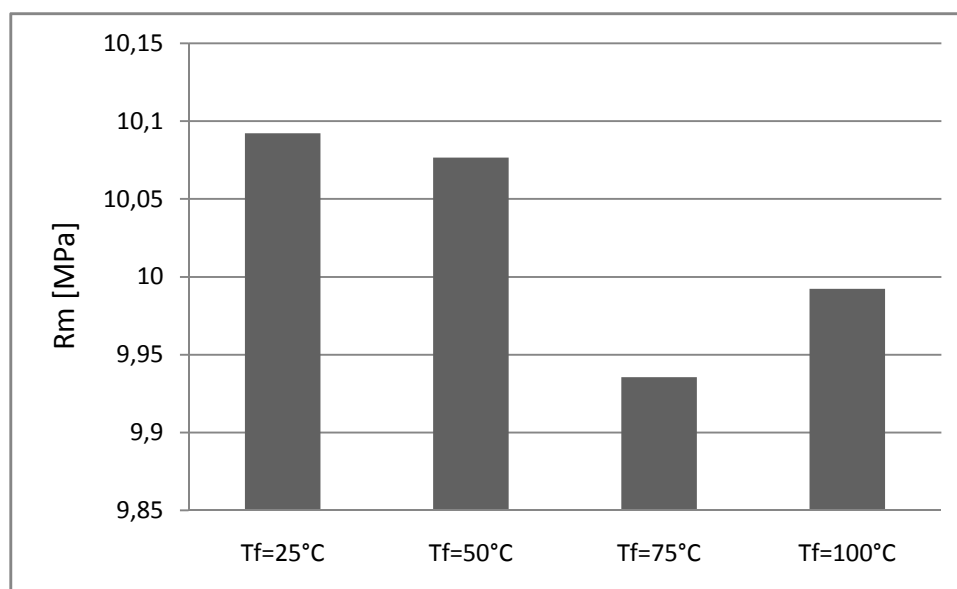
Obr. 20. Porovnání  $E$  pro HDPE při různých teplotách formy

Nejmenší hodnotu modulu pružnosti v tahu (tuhosti) vykazoval HDPE vstříkovaný při teplotě formy 100°C (575 MPa). Největší hodnota tuhosti pro HDPE vstříkované při teplotě 50°C (877 MPa), avšak s malou odchylkou od HDPE vstříkovaného při teplotách 25°C, 75°C. (Obr. 20)

### 7.3.2 Nízkohustotní polyethylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
Rm [MPa]	10,09 ± 0,06	10,08 ± 0,05	9,94 ± 0,14	9,99 ± 0,1

Tab. 6. Hodnoty Rm pro LDPE při různých teplotách formy

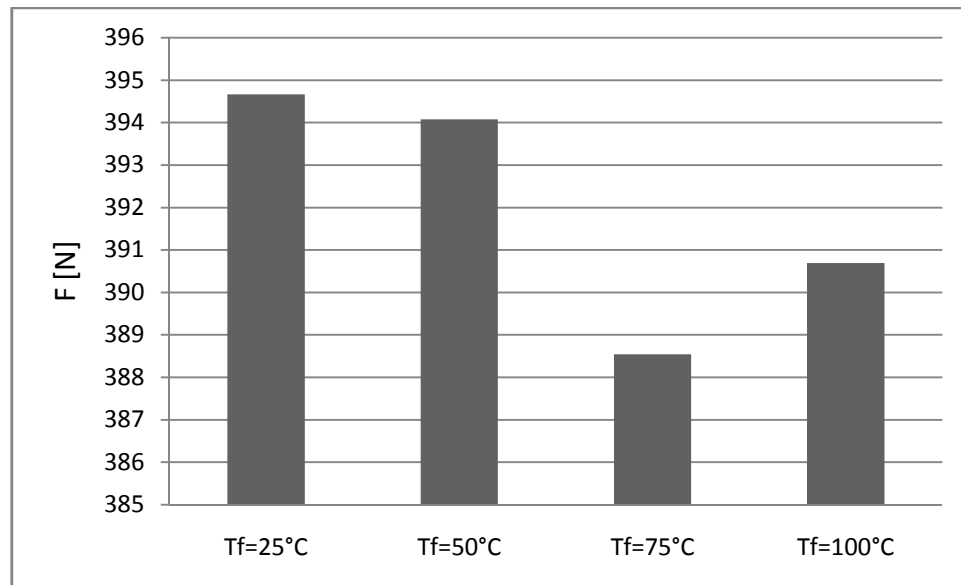


Obr. 21. Porovnání Rm pro LDPE při různých teplotách formy

Nejmenší hodnotu maximální pevnosti v tahu vykazoval LDPE vstříkovaný do formy o teplotě 75°C (9,94 MPa). Největší maximální pevnost pak byla zjištěna u LDPE vstříkovaného do formy o teplotě 25°C (10,09 MPa). (Obr. 21)

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
F [N]	395 ± 2	394 ± 2	389 ± 6	391 ± 5

Tab. 7. Hodnoty F pro HDPE při různých teplotách formy

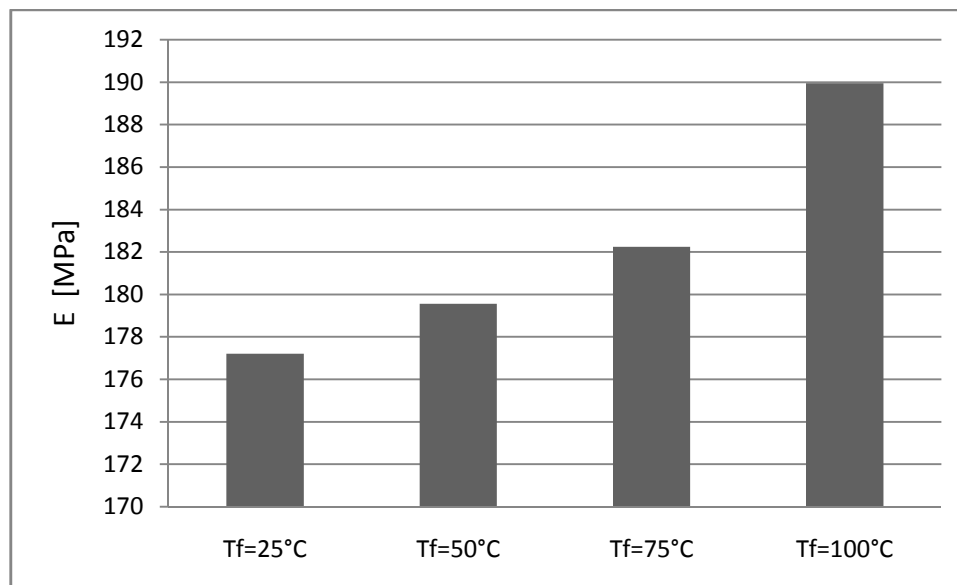


Obr. 22. Porovnání  $F$  pro LDPE při různých teplotách formy

Nejmenší maximální sílu snesl LDPE vstřikovaný do formy o teplotě 75°C (389 N). Největší pak LDPE vstřikovaný do formy o teplotě 25°C (395 N). (Obr.22)

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
E [MPa]	177 ± 3	180 ± 4	182 ± 6	190 ± 13

Tab. 8. Hodnoty  $E$  pro LDPE při různých teplotách formy



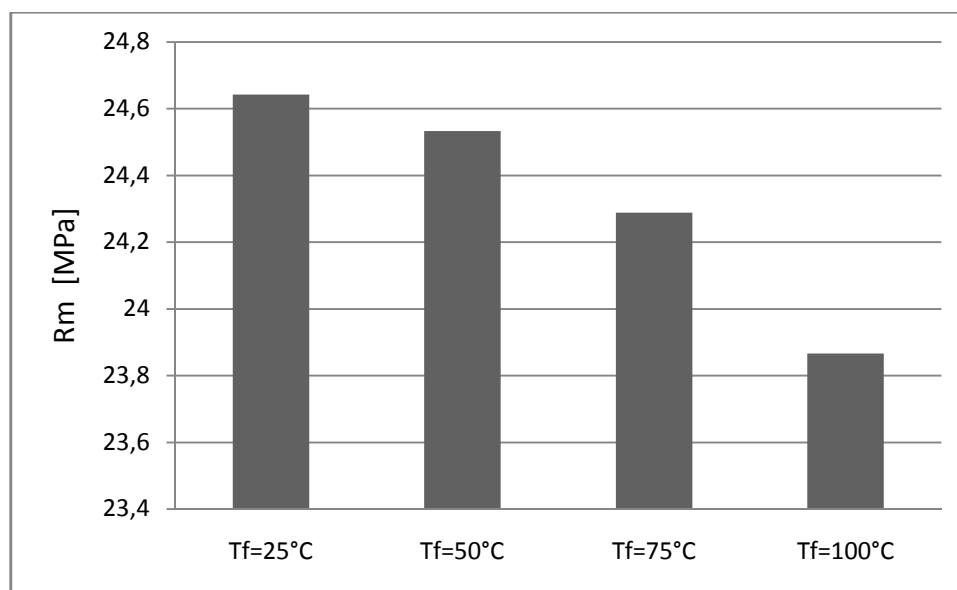
Obr. 23. Porovnání  $E$  pro LDPE při různých teplotách formy

Nejmenší hodnota modulu pružnosti v tahu (tuhosti) byla zjištěna u LDPE vstříkovaného do formy o teplotě 25°C (177 MPa). Největší hodnota tuhosti pak u LDPE vstříkovaného do formy o teplotě 100°C (190 MPa). U LDPE roste tuhost s teplotou. (Obr. 23)

### 7.3.3 Polypropylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
Rm [MPa]	24,64 ± 0,11	24,5 ± 0,2	24,29 ± 0,19	23,9 ± 0,2

Tab. 9. Porovnání  $R_m$  pro PP při různých teplotách formy

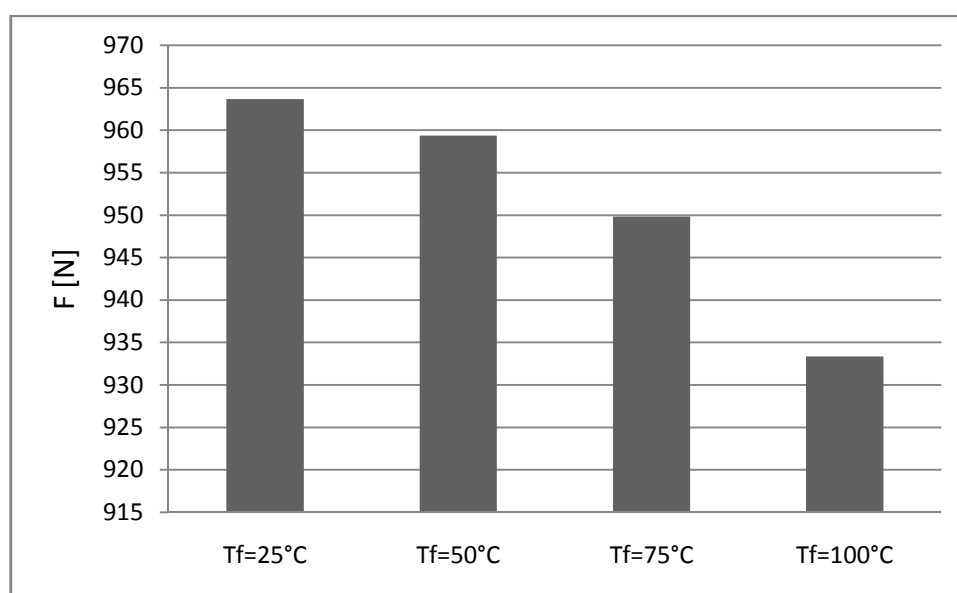


Obr. 24. Porovnání  $R_m$  pro PP při různých teplotách formy

Největší maximální hodnotu pevnosti vykazoval polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 25°C (24,64 MPa). Nejmenší hodnotu tuhosti pak polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 100°C (23,9°C). U polypropyleny klesala mez pevnosti s rostoucí teplotou formy. (Obr. 24)

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
F [N]	964 ± 5	960 ± 9	950 ± 7	933 ± 8

Tab. 10. Hodnoty F pro LDPE při různých teplotách formy

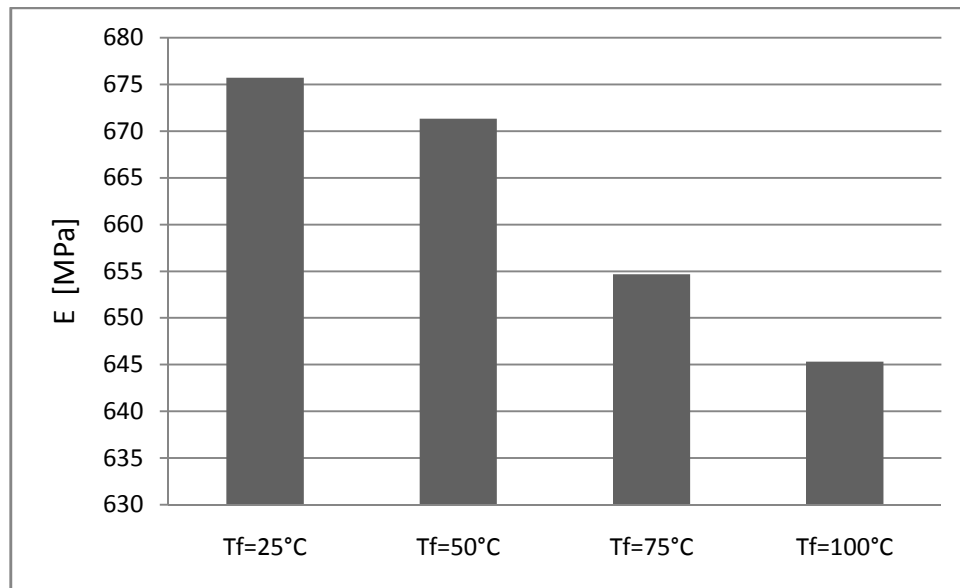


Obr. 25. Porovnání F pro PP při různých teplotách formy

Nejmenší maximální síla byla zjištěna u Polypropyleny vstříkované při teplotě formy 100°C (933 N). Největší pak u Polypropyleny vstříkované do formy o teplotě 25°C (964 N). U polypropyleny klesala maximální síla s rostoucí teplotou formy. (Obr. 25)

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
E [MPa]	675 ± 12	671 ± 8	655 ± 12	645 ± 11

Tab. 11. Hodnoty E pro LDPE při různých teplotách formy



*Obr. 26. Porovnání  $E$  pro PP při různých teplotách formy*

Největší modul pružnosti (tuhost) vykazoval polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě  $25^\circ\text{C}$  (675 MPa). Nejmenší tuhost pak polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě  $100^\circ\text{C}$  (645 MPa). U Polypropylenu klesal modul pružnosti ze zvyšující se teplotou formy. (Obr. 26)

## 8 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

### 8.1 Zkušební zařízení pro měření vrubové houževnatosti



Obr. 27. Resil impactor junior

Resil impactor junior je možno použít na zkoušku vrubové houževnatosti metodou Charpy, Izod a další nárazové zkoušky. Stroj disponuje výměnnými čelistmi pro různé typy zkoušek a pro různé nárazové rychlosti. Digitální displej zobrazuje celkovou energii absorbovanou během nárazu. Když provedeme volné zhoupnutí kladiva, můžeme z displeje odečíst ztráty způsobené odporem vzduchu a ztráty třením. Otočným přepínačem můžeme regulovat měřítko závisle na potencionální energii. Stroj však disponuje připojením k PC, takže veškeré vyhodnocení zkoušky lze provádět v daném softwaru (DAS8WIN). [10]

### 8.2 Postup měření Charpyho kladivem

Na vyrobených zkušebních vzorcích nejdříve zhotovíme vrub na vrubovačce. Vrub typu V je umístěn uprostřed tělesa do hloubky 2,5 mm a vrcholovém úhlu 45°. Po zapnutí přístroje a počítače spustíme program DAS8WIN. Vložíme zkušební těleso na podpěry. Pomocí

dorazu ustředíme vrub tělesa do osy kladiva. V softwaru odstartujeme záznam naměřených hodnot. Následně manuálně odjistíme kladivo.

### 8.3 Výsledky měření

Pro každou sérii bylo voleno 10 kusů. Při této zkoušce byly vyhodnoceny tyto parametry.

K [J] Energie potřebná k přeražení tělesa

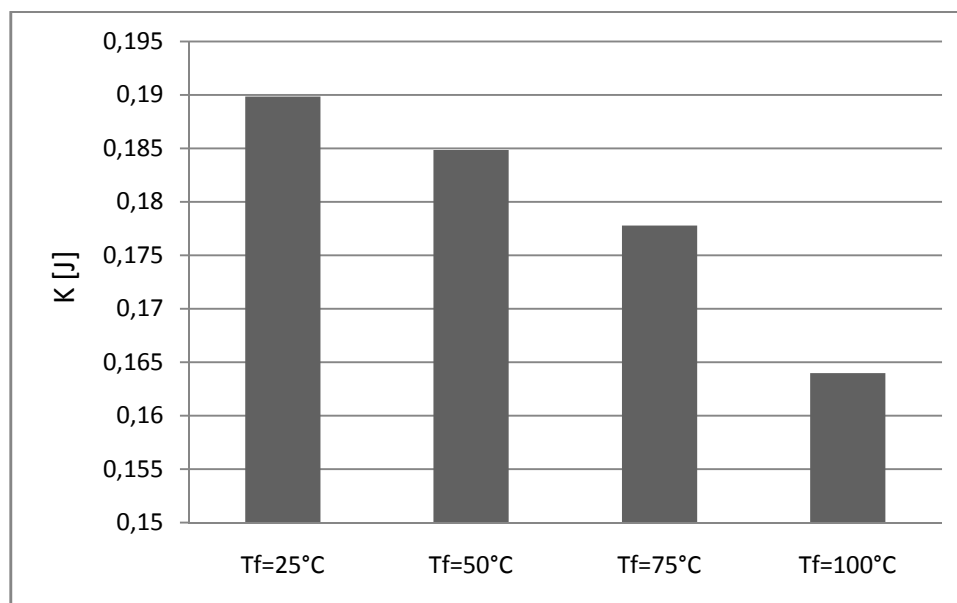
KV [J.cm<sup>-2</sup>] Vrubová houževnatost

Pro výpočet vrubové houževnatosti použijeme vzorec (10)

#### 8.3.1 Vysokohustotní polyetylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
K [J]	0,19 ± 0,02	0,18 ± 0,01	0,177 ± 0,099	0,164 ± 0,007

Tab. 12. Hodnoty K pro HDPE při různých teplotách formy



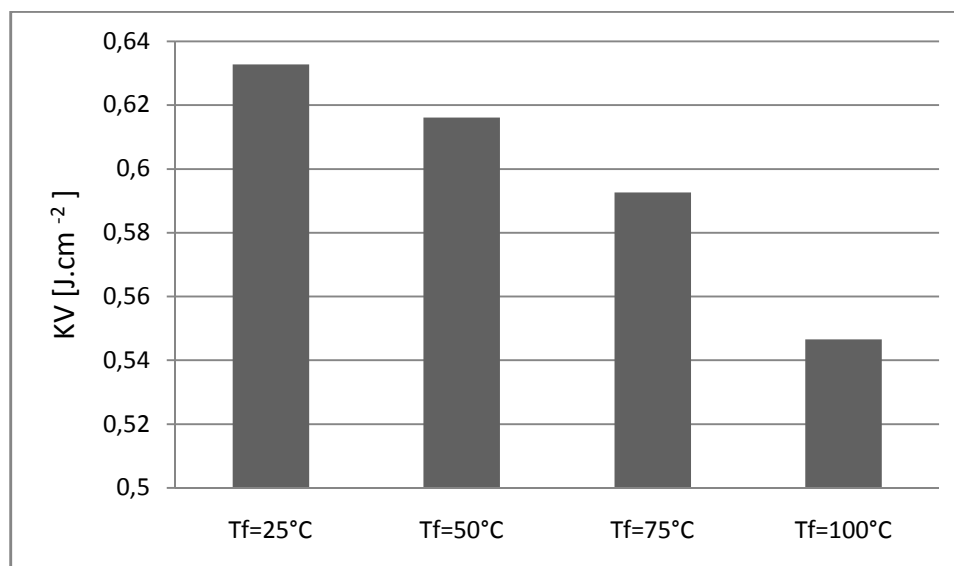
Obr. 28. Porovnání K pro HDPE při různých teplotách formy

Největší energie potřebná přeražení zkušebního tělesa byla zjištěna u materiálu vstříkovaného do formy o teplotě 25°C (0,19J). Naopak nejmenší energie u materiálu vstříkovaného do formy o teplotě 100°C (0,164 J). (Obr. 28)



Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
KV [ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	0,63±0,07	0,62 ± 0,04	0,59 ± 0,03	0,55±0,02

Tab. 13. Hodnoty KV pro HDPE při různých teplotách formy



Obr. 29 Porovnání hodnot KV pro HDPE při různých teplotách formy

Nejvyšší hodnotu vrubové houževnatosti vykazoval HDPE vstříkovaný do formy o teplotě 25°C (0,63  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). Nejnižší hodnotu vrubové houževnatosti pak vykazoval HDPE vstříkovaný do formy o teplotě 100°C (0,55  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). (Obr. 29)

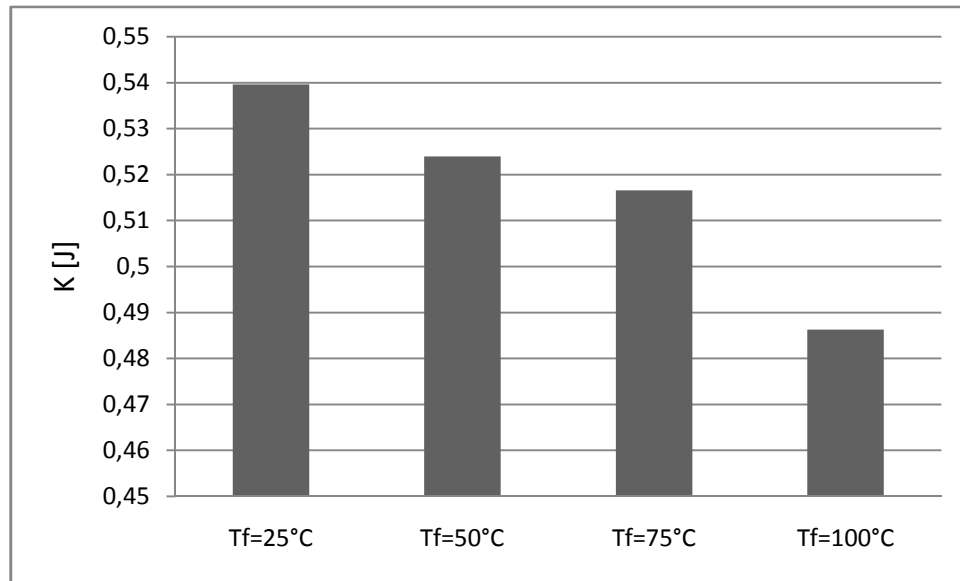
### 8.3.2 Nízkohustotní polyetylen

U tohoto materiálu nedošlo k přeražení tělesa z důvodu malé zatěžující síly (malého počátečního úhlu vychýlení). Kdybychom úhel vychýlení zvýšily, nebylo by již možné výsledky statisticky porovnávat.

### 8.3.3 Polypropylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
K [J]	0,54 ± 0,03	0,524 ± 0,016	0,517 ± 0,018	0,486 ± 0,019

Tab. 14. Hodnoty E pro PP při různých teplotách formy

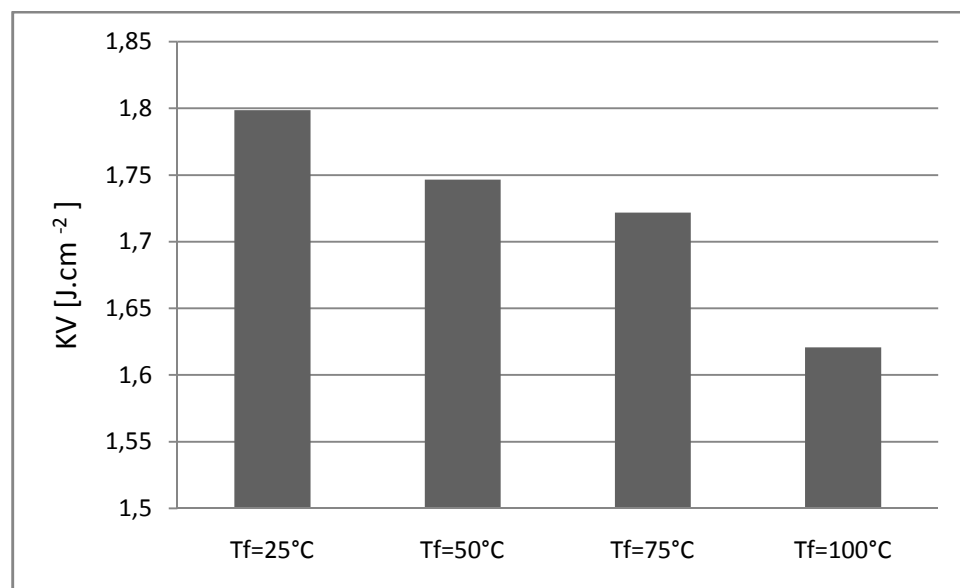


Obr. 30. Porovnání K pro PP při různých teplotách formy

Největší energii potřebnou k přeražení zkušební tělesa vykazoval Polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 25°C (0,54 J). Naopak nejmenší energii Polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 100°C (0,486 J). (Obr. 30)

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
KV [J.cm <sup>-2</sup> ]	1,80±0,09	1,75 ± 0,05	1,72±0,06	1,62±0,07

Tab. 15. Hodnoty KV pro PP při různých teplotách formy



Obr. 31. Porovnání hodnot KV pro PP při různých teplotách formy

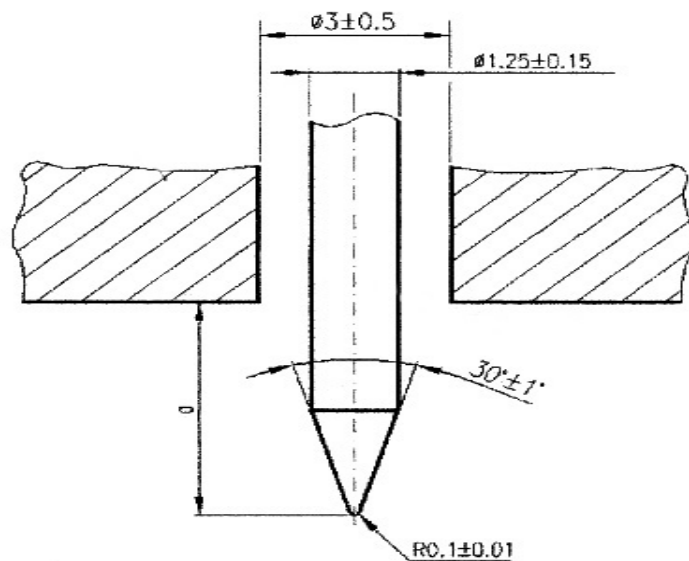
Nejvyšší hodnotu vrubové houževnatosti vykazoval Polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 25°C (1,8 J.cm<sup>-2</sup>). Nejnižší hodnotu vrubové houževnatosti pak vykazoval HDPE vstříkovaný do formy o teplotě 100°C (1,62 J.cm<sup>-2</sup>). (Obr. 31)

## 9 ZKOUŠKA TVRDOSTI

Pro měření tvrdosti materiálu byla vybrána Shoreho zkouška tvrdosti typu D, která se používá pro tvrdší polymerní materiály. [11]

### 9.1 ShoreD zkouška tvrdosti

Podstatou zkoušky je měření odporu proti vlačování hrotu předepsaného tvaru do zkoušeného materiálu. Odpor, který materiál klade je zajištěn pomocí pružiny. Tvrdost je nepřímo úměrná vniku ocelového hrotu do zkoušeného materiálu. [11]



Obr. 32. Zkušební hrot ShoreD zkoušky tvrdosti

### 9.2 Zkušební zařízení pro ShoreD zkoušku tvrdosti

Pro měření tvrdosti dle Shoreho byl použit tvrdoměr OMAG AFFRI ART 13, který disponuje digitálním výstupem naměřených hodnot.



Obr. 33. Zkušební zařízení pro měření zkoušky tvrdosti dle Shoreho OMAG AFRR RT 13

### 9.3 Postup měření ShoreD zkoušky tvrdosti

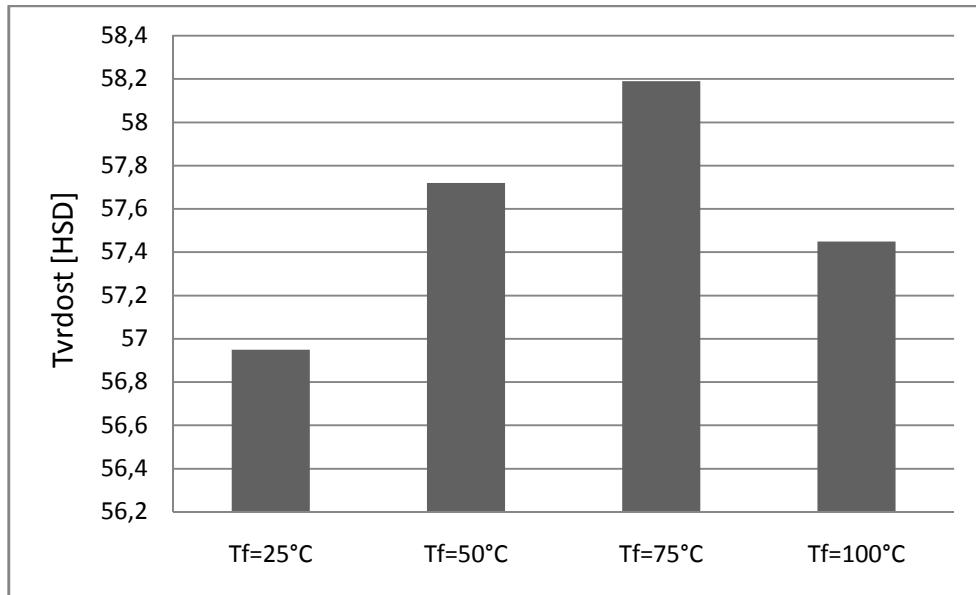
Zkušební těleso položíme pod zkušební hrot tak, aby špička hrotu byla od okraje zkušebního tělesa vzdálena nejméně 9 mm. Pomocí páky zatlačíme co nejrychleji a bez nárazu zkušební těleso na hrot. Po uplynutí určité doby zobrazované na displeji odečítáme hodnotu tvrdosti dle Shoreho.

### 9.4 Výsledky měření

#### 9.4.1 Vysokohustotní Polyetylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
Tvrđost [HSD]	57 ± 0,6	57,7 ± 0,6	58,2 ± 0,4	57,5 ± 0,5

Tab. 16. Hodnoty Tvrđosti pro HDPE při různých teplotách formy



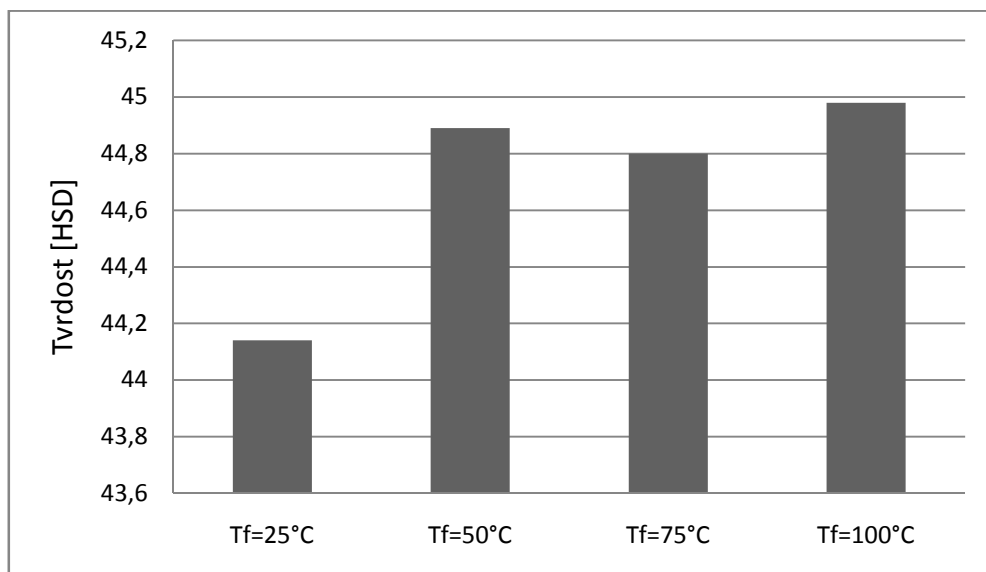
Obr. 34. Hodnoty Tvrdości pro HDPE pro různé teploty formy

Nejmenší hodnotu tvrdosti vykazoval HDPE vstřikovaný do formy o teplotě 25°C (57 HSD). Největší pak HDPE vstřikovaný do formy o teplotě 75°C (58,2 HSD). (Obr. 32)

#### 9.4.2 Nízkohustotní polyetylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
Tvrdość [HSD]	44 ± 0,5	44,9 ± 0,7	44,8 ± 0,4	45 ± 0,8

Tab. 17. Hodnoty Tvrdości pro LDPE při různých teplotách formy



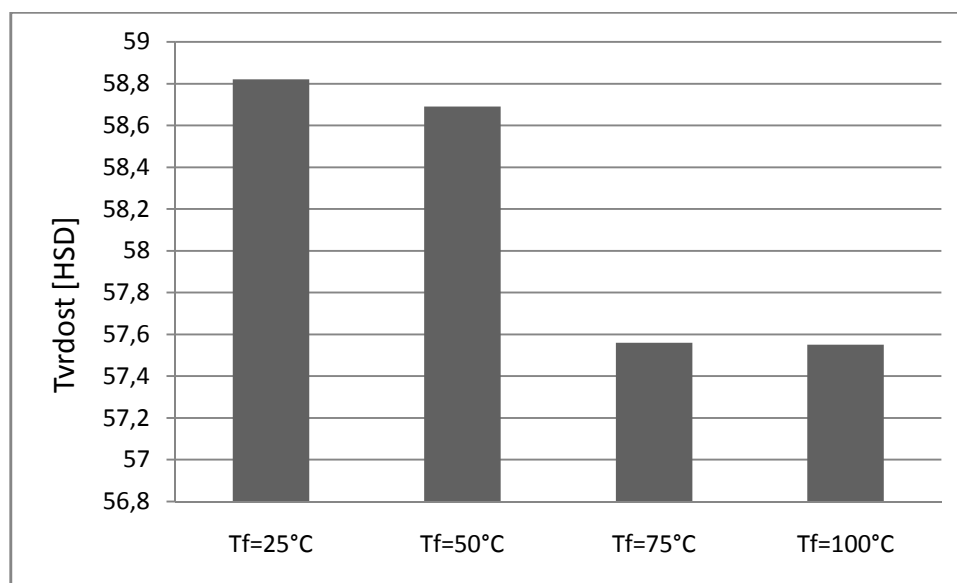
Obr. 35. Porovnání Tvrdości pro LDPE při různých teplotách formy

Nejmenší hodnotu tvrdosti vykazoval LDPE vstřikovaný do formy o teplotě 25°C (44 HSD). Největší pak LDPE vstřikovaný do formy o teplotě 100°C (45 HSD). (Obr. 33)

### 9.4.3 Polypropylen

Teplota formy	25°C	50°C	75°C	100°C
Tvrdost [HSD]	58,8 ± 0,5	58,7 ± 0,3	57,6 ± 0,2	57,6 ± 0,3

Tab. 18. Hodnoty Tvrdosti pro PP při různých teplotách formy

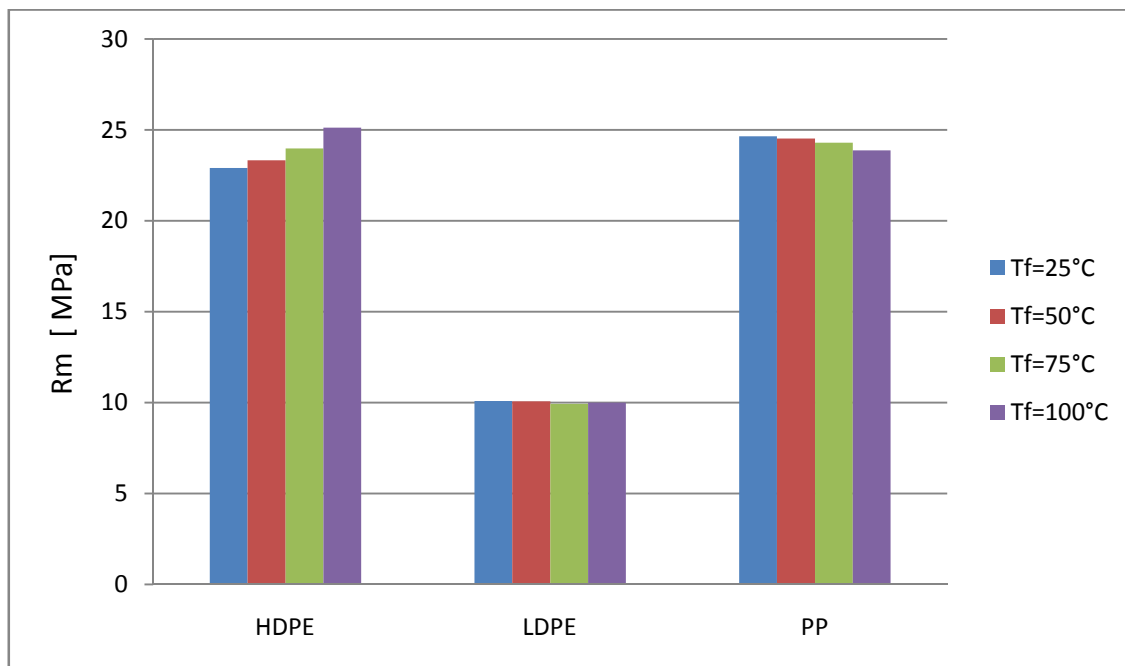


Obr. 36. Porovnání Tvrdosti pro PP při různých teplotách formy

Nejmenší hodnotu tvrdosti vykazoval LDPE vstřikovaný do formy o teplotě 25°C (58,8 HSD). Největší pak LDPE vstřikovaný do formy o teplotě 75°C a 100°C (57,6 HSD) (Obr. 34)

## 10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

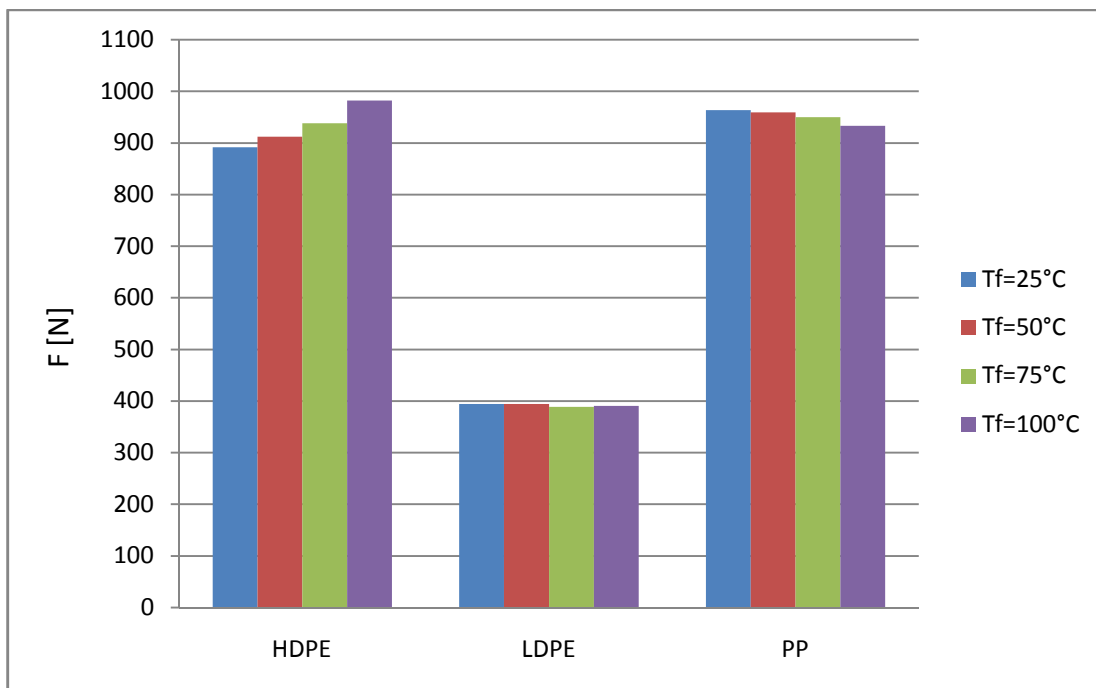
Bakalářská práce řeší problém porovnání mechanických vlastností u vybraných typů polymerních materiálů (PP, HDPE, LDPE) při různých rychlostech ochlazování. Rychlost ochlazování byla volena teplotou formy (25, 50, 75, 100°C). Zkušební tělesa byla připravena vstřikováním pro tahovou zkoušku a test vrubové houževnatosti. Počet měřených zkušebních těles byl 9. naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



Obr. 37. Porovnání  $R_m$  pro různé typy polymerů

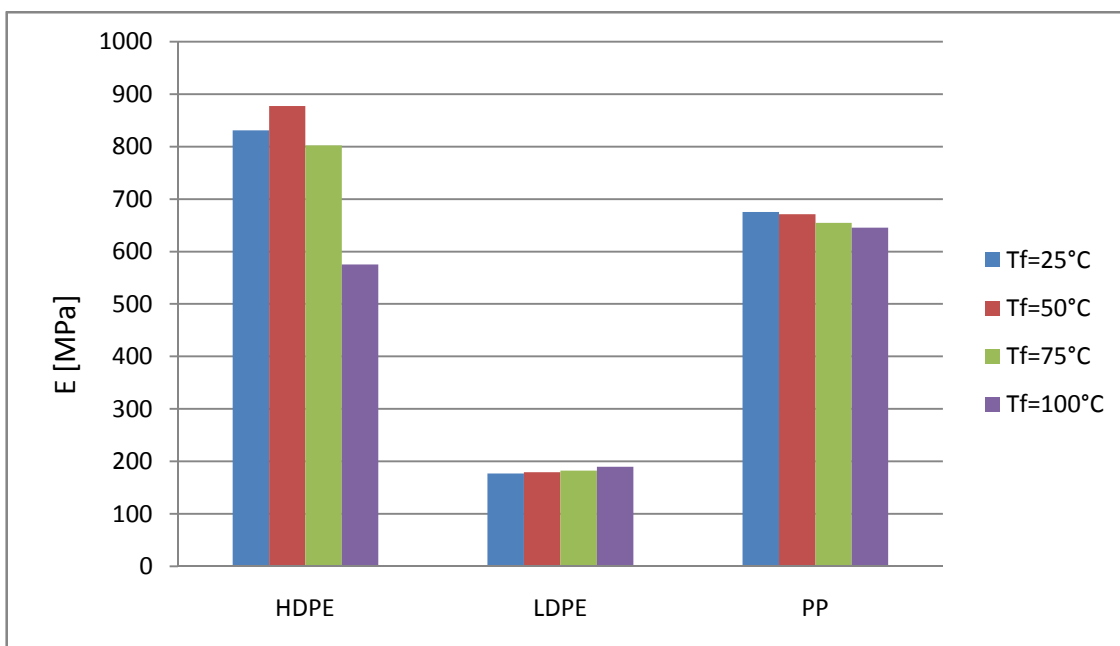
Nejvyšší hodnota maximální pevnosti v tahu byla zjištěna u HDPE, zatímco nejmenší hodnoty bylo dosaženo u materiálů LDPE. Při pohledu na vliv teploty formy je patrné, že u materiálu HDPE docházelo při zvýšení teploty formy (snížení rychlosti ochlazování) k nárůstu maximální pevnosti. U materiálu LDPE nebyl zaznamenán vliv teploty formy na hodnoty maximální pevnosti v tahu. U polypropylenu došlo naopak k poklesu hodnot maximální pevnosti v tahu při zvyšování teploty formy (snížování rychlosti ochlazování). To je způsobeno vzniklou rozdílnou strukturou u jednotlivých typů sledovaných polymerních materiálů.. (Obr. 35)





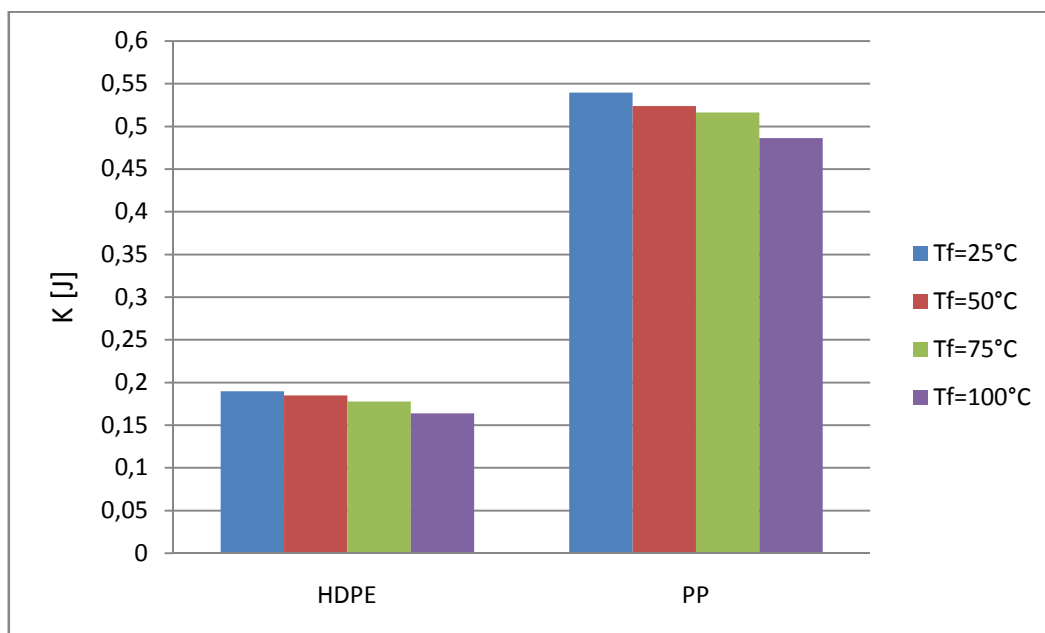
Obr. 38. Porovnání  $F$  pro různé typy polymerů

Z výsledků tahové zkoušky vyšlo najevo, že největších hodnot maximální síly bylo dosaženo u HDPE. Naopak nejmenších hodnot maximální síly hodnot bylo dosaženo u LDPE. Při snižování rychlosti ochlazování (zvyšování teploty formy) u HDPE docházelo k nárůstu maximální síly. U LDPE nebyly zaznamenány změny hodnot maximální síly v závislosti na rychlosti ochlazování. U Polypropylenu byl zaznamenán nárůst maximální síly s rostoucí rychlostí ochlazování (snižování teploty formy). (Obr. 36)



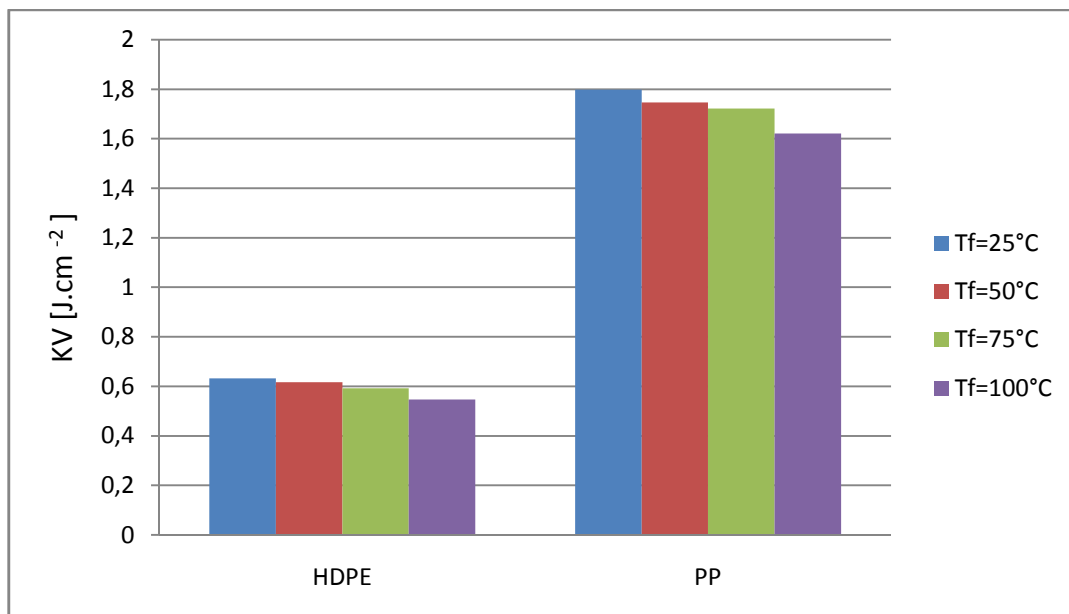
Obr. 39. Porovnání  $E$  pro různé typy polymerů

Největší hodnota meze pružnosti (tuhosti) byla zjištěna u HDPE, naopak nejmenší tuhost vykazoval LDPE. U HDPE nebylo možno určit vliv změny rychlosti ochlazování na tuhost materiálu. U LDPE byl pozorován mírný nárůst tuhosti při snižování rychlosti ochlazování. U polypropylenu bylo zjištěno, že tuhost materiálu roste se zvyšující se rychlosti ochlazování (Snižování teploty formy). (Obr. 37)



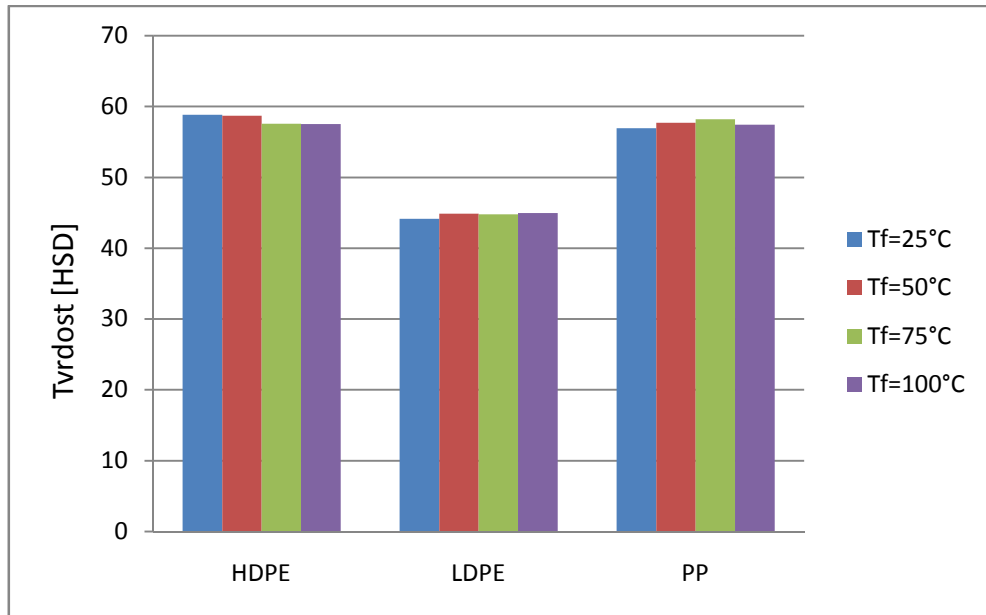
Obr. 40. Porovnání  $K$  pro různé typy polymerů

Nejvyšší hodnota energie potřebné k přeražení zkušebního tělesa byla zaznamenána u Polypropylenu, naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u HDPE. Pro LDPE nebylo možno určit energii potřebnou k přeražení zkušebního tělesa z důvodu malé zatěžující síly (malého počátečního úhlu vychýlení). Kdybychom úhel vychýlení zvýšili, nebylo by již možné výsledky statisticky porovnávat. Při pohledu na vliv teploty formy je pozorován nárůst energie potřebné k přeražení zkušebního tělesa se zvyšující se rychlostí ochlazování. Tento nárůst je pozorován jak u HDPE, tak u Polypropylenu. (Obr. 38)



Obr. 41 Porovnání KV pro různé typy polymerů

Nejvyšší hodnota vrubové houževnatosti byla znamenána u Polypropylenu, naopak nejmenší hodnoty bylo dosaženo u HDPE. Pro LDPE nebylo možno určit hodnotu vrubové houževnatosti z důvodu malé zatěžující síly (malého počátečního úhlu vychýlení). Kdybychom úhel vychýlení zvýšili, nebylo by již možné výsledky statisticky porovnávat. Při pohledu na vliv teploty formy je pozorován nárůst hodnoty vrubové houževnatosti se zvyšující se rychlostí ochlazování. Tento nárůst je pozorován jak u HDPE, tak u Polypropylenu. To je způsobeno zvětšujícím se podílem amorfní fáze se zvyšující se rychlostí ochlazování. (Obr. 39)



Obr. 42. Porovnání tvrdosti pro různé typy polymerů

Nejvyšší hodnotu tvrdosti dle Shoreho vykazoval Polypropylen, avšak téměř srovnatelnou s materiálem HDPE. Nejmenší hodnota tvrdosti pak byla zjištěna u materiálu LDPE. U vybraných typů polymerních materiálu nebyl zjištěn vliv rychlosti ochlazování na výslednou tvrdost materiálu, což souvisí se vzniklou strukturou na povrchu tělesa. Velikost jednotlivých krystalů, jejich tvar a uspořádání mají velký vliv na měření tvrdosti. (Obr. 40)

## ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém porovnání mechanických vlastností u vybraných typů polymerních materiálů (PP, HDPE, LDPE) při různých rychlostech ochlazování. Rychlost ochlazování byla volena teplotou formy (25, 50, 75, 100°C). Zkušební tělesa byla připravena vstříkáním pro tahovou zkoušku a test vrubové houževnatosti. Počet měřených zkušebních těles byl 9. naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z tahové zkoušky vyplívá, že nejvyšší hodnota maximální pevnosti v tahu byla dosažena u materiálu HDPE při teplotě formy 100°C. Naopak nejmenší hodnota maximální pevnosti v tahu byla zjištěna u LDPE při teplotě formy 75°C. Největší hodnota maximální síly byla zjištěna u materiálu HDPE při teplotě formy 100°C, zatímco nejmenší hodnotu maximální síly vykazoval materiál LDPE při teplotě formy 75°C. Největší hodnota meze pružnosti (tuhosti) byla dosažena u materiálu HDPE při teplotě formy 50°C, naopak nejmenší tuhost vykazoval materiál LDPE při teplotě formy 25°C.

Zkouškou vrubové houževnatosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnotu energie potřebné k přeražení tělesa vykazoval Polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 25°C, zatímco nejmenší hodnota energie byla zjištěna u materiálu HDPE vstříkovaného do formy o teplotě 100°C. Dále byla vyhodnocena vrubová houževnatost, jejíž nejvyšší hodnotu vykazoval Polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 25°C. Nejmenší hodnotu vrubové houževnatosti vykazoval HDPE vstříkovaný do formy o teplotě 100°C. Zkoušku vrubové houževnatosti nebylo možno vyhodnotit pro materiál LDPE z důvodu nevhodně zvolené tíže kladi-va.

Z provedené zkoušky tvrdosti dle Shoreho bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty tvrdosti dosahoval Polypropylen vstříkovaný do formy o teplotě 75°C. Poměrně stejné hodnoty tvrdosti dosahoval materiál HDPE. Nejmenších hodnot tvrdosti pak dosahoval materiál LDPE.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] BOBČÍK a kolektiv. *Formy pro zpracování plastů, I-DÍL – Vstřikování termo-  
plast.* 2. vyd. BRNO: uniplast 1999. 134s
- [2] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy.* 1. vyd. Vydavatelství  
VŠCHT Praha. 2010. 212s. ISBN 978-80-7080-741-5
- [3] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů.* 2. Vyd. Vysoká škola chemic-  
ko-technologická v Pardubicích. 1989. 105s. ISBN 80-85113-01-5
- [4] HLUCHÝ, M. KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1,* 3. vyd. Scientia, spol.  
s.r.o., pedagogické nakladatelství. PRAHA, 266s. ISBN 80-7183-262-6
- [5] Vstřikování plastů [online].[cit .2012-1-15]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm)>
- [6] Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost [online].[cit .2012-1-10]. Dostupný  
z WWW:< [http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)>
- [7] MLEZIVA, J. ŠŇUPÁREK, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití.*  
2. vyd. Vydavatelství Sobotáles. 2000. 544s. ISBN 80-85920-72-7
- [8] Injection molding [online]. [cit .2012-1-10]. Dostupný z WWW:  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Injection\\_molding](http://en.wikipedia.org/wiki/Injection_molding)>
- [9] RAGAN, E., RUŽBARSKÝ, J., MAŇAS, M. *Vstrekovanie a spracovanie plastic-  
kých hmot.* FVT Prešov. 2008. 548s. ISBN 978-80-553-0002-0
- [10] CEAST Resil Impactor [online]. [cit .2012-4-25]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.ccsi-inc.com/p-impact-ceast-resil-impactor-6963.htm>>
- [11] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit- Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdo-  
měru (tvrdost Shore).* Praha: Český normalizační institut, 2003. 12s.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a_0$	Tloušťka zkušebního tělesa
ABS	Akrylonitril butadien styren
$b_0$	Šířka zkušebního tělesa
$d_0$	Počáteční průměr zkušebního tělesa
E	Yongův modul pružnosti (tuhost)
F	Zatěžující síla
g	Gravitační zrychlení
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
K	Rázová energie
$K_p$	Potencionální energie
KV	Vrubová houževnatost
$l_0$	Počáteční délka zkušebního tělesa
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
m	Hmotnost kladiva
n	Počet měření
PA	Akrylonitril butadien styren
PBT	Polybutadien
PC	Polykarbonát
PET	Polyetylentereftalát
PE	Polyetylen
POM	Polyformaldehyd
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
$R_m$	Maximální pevnost v tahu

---

$s$	empiricky směrodatná odchylka
SAN	Styren akrylonitril
$v$	okamžitá rychlost kladiva
$x$	aritmetický průměr
$x_i$	i-tá hodnota měřené veličiny
$\mu$	Poissonovo číslo
$\varepsilon_l$	Poměrné prodloužení
$\varepsilon_r$	Poměrné prodloužení při přetržení
$\varepsilon_s$	Poměrné zúžení
$\sigma$	Normálové napětí



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Struktury termoplastů [5]</i> .....	12
<i>Obr. 2. Schéma vstřikovacího cyklu [5]</i> .....	16
<i>Obr. 3. Průběh vstřikovacího cyklu [5]</i> .....	17
<i>Obr. 4. Schéma vstřikovacího stroje [5]</i> .....	18
<i>Obr. 5. Vstřikovací jednotka [5]</i> .....	19
<i>Obr. 6. Tavicí komora [5]</i> .....	19
<i>Obr. 7. Uzavírací jednotka [5]</i> .....	20
<i>Obr. 8. Detail vtokového ústí [5]</i> .....	22
<i>Obr. 9. Řádové uspořádání vtokové soustavy u vícenásobných forem a) se stejnou délkou toku taveniny b),c),d.) s nesterjnou délkou toku taveniny [5]</i> .....	23
<i>Obr. 10. Hvězdicové uspořádání vtokové soustavy u vícenásobných forem [5]</i> .....	23
<i>Obr. 11. Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku [6]</i> .....	27
<i>Obr. 12. Schématické znázornění trhacího stroje: 1 - hnací jednotka, 2 – stojany s vedením, 3 – silový mechanismus, 4 – pevná čelist, 5 – pohyblivá čelist, 6 – pohybový šroub, 7 – zkušební vzorek, 8 – ovládání, 9 – výstupní zařízení [9]</i> .....	27
<i>Obr. 13. Tahová křivka [6]</i> .....	28
<i>Obr. 14. Charakteristické křivky různých materiálů[5]</i> .....	30
<i>Obr. 15. Charpyho kladivo[6]</i> .....	32
<i>Obr. 16. Vstřikovací stroj ARBURG</i> .....	36
<i>Obr. 17. Trhací stroj ZWICK 1456</i> .....	39
<i>Obr. 18. Porovnání <math>R_m</math> pro HDPE při různých teplotách formy</i> .....	40
<i>Obr. 19. Porovnání <math>F</math> pro HDPE při různých teplotách formy</i> .....	41
<i>Obr. 20. Porovnání <math>E</math> pro HDPE při různých teplotách formy</i> .....	41
<i>Obr. 21. Porovnání <math>R_m</math> pro LDPE při různých teplotách formy</i> .....	42
<i>Obr. 22. Porovnání <math>F</math> pro LDPE při různých teplotách formy</i> .....	43
<i>Obr. 23. Porovnání <math>E</math> pro LDPE při různých teplotách formy</i> .....	44
<i>Obr. 24. Porovnání <math>R_m</math> pro PP při různých teplotách formy</i> .....	44
<i>Obr. 25. Porovnání <math>F</math> pro PP při různých teplotách formy</i> .....	45
<i>Obr. 26. Porovnání <math>E</math> pro PP při různých teplotách formy</i> .....	46
<i>Obr. 27. Resil impactor junior</i> .....	47
<i>Obr. 28. Porovnání <math>K</math> pro HDPE při různých teplotách formy</i> .....	48
<i>Obr. 29. Porovnání hodnot <math>KV</math> pro HDPE při různých teplotách formy</i> .....	49

---

<i>Obr. 30. Porovnání K pro PP při různých teplotách formy .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 31. Porovnání hodnot KV pro PP při různých teplotách formy.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 32. Zkušební hrot ShoreD zkoušky tvrdosti .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 33. Zkušební zařízení pro měření zkoušky tvrdosti dle Shoreho OMAG AFRI RT 13 .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 34. Hodnoty Tvrdosti pro HDPE pro různé teploty formy .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 35. Porovnání Tvrdosti pro LDPE při různých teplotách formy.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 36. Porovnání Tvrdosti pro PP při různých teplotách formy.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 37. Porovnání Rm pro různé typy polymerů.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38. Porovnání F pro různé typy polymerů .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39. Porovnání E pro různé typy polymerů .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 40. Porovnání K pro různé typy polymerů .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 41 Porovnání KV pro různé typy polymerů .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 42. Porovnání tvrdosti pro různé typy polymerů.....</i>	<i>60</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Technické parametry vstřikovacího stroje.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2. Technické parametry trhacího stroje.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 3. Hodnoty Rm pro HDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 4. Hodnoty F pro HDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 5. Hodnoty E pro HDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 6. Hodnoty Rm pro LDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 7. Hodnoty F pro LDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 8. Hodnoty E pro LDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 9. Porovnání Rm pro PP při různých teplotách formy .....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 10. Hodnoty F pro LDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 11. Hodnoty E pro LDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 12. Hodnoty K pro HDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 13. Hodnoty KV pro HDPE při různých teplotách formy.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 14. Hodnoty E pro PP při různých teplotách formy .....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 15. Hodnoty KV pro PP při různých teplotách formy .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 16. Hodnoty Tvrdosti pro HDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 17. Hodnoty Tvrdosti pro LDPE při různých teplotách formy .....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 18. Hodnoty Tvrdosti pro PP při různých teplotách formy .....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 19. Tabulka naměřených hodnot - tah .....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 20. Tabulka naměřených hodnot - tah .....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 21. Tabulka naměřených hodnot - tvrdost .....</i>	<i>72</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

**PI I:** Tabulka naměřených hodnot – tah

**PI II:** Tabulka naměřených hodnot – Charpyho kladivo

**PI III:** Tabulka naměřených hodnot – Tvrdost

## PŘÍLOHA P I: TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT- TAH

	Rm	E-Modulus	Rm		Rm	E-Modulus	Rm
Nr	[MPa]	[MPa]	[N]	Nr	[MPa]	[MPa]	[N]
58	23,15	842,87	868,88	107	10,13	177,93	396,19
60	23,25	790,69	909,25	108	10,16	176,01	397,32
61	23,99	839,52	938,23	109	10,06	174,84	393,34
62	22,98	880,59	898,82	110	10,08	175,04	394,23
63	23,15	839,81	905,41	111	10,1	177,73	394,99
64	22,95	858,15	897,59	112	10,11	184,55	395,4
65	22,56	830,6	882,26	113	10,16	182,51	397,35
66	21,94	819,49	858,14	114	10,13	178,17	396,33
67	22,19	779,73	867,68	115	10,08	177,67	394,3
68	23,49	880,3	918,51	116	9,97	176,85	389,7
70	23,53	868,75	920,19	117	10,08	179,88	394,13
71	23,26	874,6	909,63	118	10,02	189,81	391,83
72	23,21	881,18	907,5	119	10,05	178,04	393
73	23,46	875,91	917,34	120	10,12	177,85	395,88
74	23,25	908,22	909,11	121	10,08	175,22	394,2
75	23,53	833,08	919,95	122	10,17	186,46	397,63
77	23,35	895,5	913,13	123	10,13	189,54	396,08
78	22,92	876,94	896,46	124	10,06	191,08	393,58
79	24,05	894,04	940,32	125	9,77	177,7	382,15
80	24,13	928,98	943,75	126	9,77	173,67	381,91
81	24,07	902,81	941,28	127	9,87	176,51	385,79
82	25,25	997,24	987,28	128	9,79	175,48	382,84
83	24,33	917,28	951,33	129	9,93	182,77	388,4
84	23,96	896,38	937,1	130	9,93	187	388,5
85	22,83	510,06	892,74	131	10,21	221,83	399,38
87	24,36	605,27	952,54	132	9,89	188,98	386,71
88	22,9	568,31	895,63	133	10,05	190,13	393,03
89	25,53	573,89	998,33	134	9,95	174,61	389,05
91	24,19	581,45	946,05	135	9,99	178,27	390,59
92	24,73	573,57	966,99	136	10,06	192,3	393,24
95	25,2	571,14	985,6	137	10,02	190,25	391,79
96	25,25	560,42	987,41	138	9,74	185,4	380,71
98	25,22	578,89	986,42	139	10,02	187,78	391,73
100	25,54	578,8	998,74	140	9,86	175,31	385,65
102	25,04	575,85	979	141	24,46	678,57	956,38
103	25,4	581,44	993,25	142	24,76	677,5	968,29
104	9,97	172,86	389,84	143	24,64	664,58	963,63
105	10,16	177,16	397,22	144	24,77	693,34	968,71
106	10,06	178,78	393,48	145	24,52	689,47	958,89

146	24,59	683,99	961,6
147	24,55	674,84	960,09
148	24,67	654,99	964,83
149	24,82	664,16	970,66
150	24,8	681,08	969,91
151	24,77	680,4	968,64
152	24,7	675,04	966
153	24,06	669,14	940,77
154	24,66	676,71	964,24
155	24,34	660,43	951,78
156	24,47	674,07	956,76
157	24,65	668,83	963,87
158	24,35	656,33	952,37
159	24,55	646,02	959,99
160	24,44	669,49	955,7
161	24,39	666,53	953,88
162	24,3	648,13	950,17
163	24,38	639,34	953,29
164	24,03	677,54	939,7
165	24,24	652,14	948,08
166	24,36	649,11	952,61
167	23,91	643,79	935,07
168	23,71	668,08	927,14
169	23,87	646,07	933,56
170	23,95	648,35	936,61
171	24,14	646	944,16
172	23,51	630	919,24
173	23,92	651,32	935,31
174	24,02	632,28	939,39
175	23,62	637,37	923,74
176	24,06	648,51	940,94

*Tab. 19. Tabulka naměřených hodnot - tah*

**PŘÍLOHA P II: TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT – CHARPYHO  
KLADIVO**

Nr	K[J]	Nr	K[J]	Nr	K[J]
1	0,207276	38	0,172375	75	0,49826
2	0,20396	39	0,159226	76	0,4672
3	0,188814	40	0,163048	77	0,47879
4	0,193392	41	0,170447	78	0,51331
5	0,201756	42	0,166729	79	0,445948
6	0,136826	43	0,163975	80	0,490645
7	0,191155	44	0,006746		
8	0,175049	45	0,53576		
9	0,210355	46	0,529883		
10	0,189843	47	0,574735		
11	0,021372	48	0,53123		
12	0,189889	49	0,507636		
13	0,210712	50	0,510799		
14	0,180916	51	0,551043		
15	0,197439	52	0,588781		
16	0,172468	53	0,526553		
17	0,177766	54	0,522136		
18	0,17528	55	0,550866		
19	0,182274	56	0,519062		
20	0,176786	57	0,518687		
21	0,184837	58	0,538832		
22	0,011714	59	0,507365		
23	0,178305	60	0,525269		
24	0,170294	61	0,494849		
25	0,153619	62	0,538798		
26	0,177658	63	0,535213		
27	0,182366	64	0,521275		
28	0,188866	65	0,485983		
29	0,180916	66	0,538753		
30	0,186833	67	0,526381		
31	0,181299	68	0,533609		
32	0,177795	69	0,508476		
33	0,009934	70	0,490854		
34	0,156591	71	0,508397		
35	0,169238	72	0,49809		
36	0,167295	73	0,48058		
37	0,150827	74	0,503505		

*Tab. 20. Tabulka naměřených hodnot - tah*

## PŘÍLOHA P III: TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT - TVRDOST

PP			
25°C	50°C	75°C	100°C
59,6	58,6	57,9	57,4
59,4	58,8	57,5	57,7
58,4	58,7	57,1	57,1
59,8	58,2	57,3	57,3
58,4	58,5	57,7	57,4
58,5	58,5	57,4	57,4
58,6	58,5	57,5	57,9
58,4	59	57,7	57,8
58,6	59,2	57,9	58
58,5	58,9	57,6	57,5
LDPE			
25°C	50°C	75°C	100°C
43	44,2	44,8	44,5
44,5	45,6	44,1	44
44,4	46,2	44,3	44,2
44,5	45,7	45,2	45,8
44,6	44,9	44,8	44,9
44,3	44,3	44,5	44,3
43,8	44,3	45,6	46,1
44,2	43,9	45,2	44,5
43,5	45,1	44,9	46,2
44,6	44,7	44,6	45,3
HDPE			
25°C	50°C	75°C	100°C
57,6	58,3	57,9	56,9
56,1	58	58,7	57,1
56,9	57,5	58,5	58,5
57,2	56,5	57,8	57,7
56,5	57,5	58,2	57,2
57,3	58,2	58,8	56,9
56,8	58,5	57,8	58,2
57,4	58,1	57,9	57,5
55,9	57,4	57,8	57,2
57,8	57,2	58,5	57,3

*Tab. 21 Tabulka naměřených hodnot - tvrdost*