

# Vliv teploty na mechanické chování konstrukčních materiálů

Zdeněk Bartoš

---

Bakalářská práce  
2007

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2006/2007

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk BARTOŠ**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv teploty na mechanické chování konstrukčních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních tělísek
3. Experimentální studium závislosti mechanických vlastností na teplotě
4. Vyhodnocení experimentálně získaných dat

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Zkoušení polymerů - doc.ing.Miroslav Schätz,CSc.**

**Analýza a zkoušení plastických hmot - ing. František Rybníkář,CSc.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **13. února 2007**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2007**

Ve Zlíně dne 3. května 2007

  
prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.  
děkan



  
doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
ředitel ústavu

## **ABSTRAKT**

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjistit mechanické chování polymerních materiálů v závislosti na teplotě. Praktická měření byla provedena pro dva široce průmyslově používané polymery, a to polypropylen a polystyren.

Klíčová slova: mechanické vlastnosti, zkušební těleso, polypropylen, polystyren, tahová zkouška, vliv teploty

## **ABSTRACT**

The main aim of this bachelor's thesis was to examine the mechanical behaviour of polymeric materials in dependence on temperature. Practical measurements were carried out on two plentifully used polymers – polypropylene and polystyrene.

Keywords: mechanical properties, test specimen, polypropylene, polystyrene, tensile test, temperature effect

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za podnětné a cenné rady, odborné vedení a za čas, který mi věnoval.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 POLYMERY A JEJICH TRŽDĚNÍ</b> .....	<b>10</b>
<b>2 ZKOUMANÉ KONSTRUKČNÍ POLYMERY</b> .....	<b>12</b>
2.1 POLYSTYRÉN .....	12
2.2 POLYPROPYLEN .....	14
<b>3 TEPELNÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ</b> .....	<b>17</b>
3.1 MĚRNÉ TEPLO.....	18
3.2 TEPELNÁ VODIVOST.....	18
3.3 TEPLITNÍ ROZTAŽNOST .....	19
3.4 TRVALÁ TEPELNÁ ODOLNOST .....	19
3.5 PŘÍKLADY MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ POLYMERŮ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLIT .....	21
<b>4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES</b> .....	<b>23</b>
4.1 ELASTOMERY .....	23
4.2 PLASTOMERY .....	24
4.3 REAKTOMERY .....	26
4.4 KONDICIONOVÁNÍ .....	27
<b>5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>28</b>
5.1 TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	28
5.2 TLAKOVÉ ZKOUŠKY .....	34
5.3 OHYBOVÉ ZKOUŠKY .....	35
5.4 TVRDOSTNÍ ZKOUŠKY .....	36
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>38</b>
<b>6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>39</b>
<b>7 POUŽITÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>40</b>
7.1 POLYPROPYLEN TATREN TI 924 .....	40
7.2 POLYSTYREN KRASTEN.....	40
<b>8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>41</b>
8.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG 420 C .....	41
8.2 TEPLITNÍ KOMORA ZWICK ROELL W91255 .....	42
8.3 ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 145 665 .....	43
<b>9 EXPERIMENT A VÝSLEDKY MĚŘENÍ</b> .....	<b>45</b>

9.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK.....	45
9.1.1	Parametry pro vstřikování .....	46
9.2	ZKOUŠKA TAHEM .....	48
9.2.1	Polypropylen .....	49
9.2.2	Polystyren.....	53
9.3	DISKUZE K VÝSLEDKŮM .....	57
9.3.1	Přehled výsledků modulu pružnosti v tahu v závislosti na teplotě .....	57
9.3.2	Přehled výsledků meze pevnosti v tahu v závislosti na teplotě.....	58
9.3.3	Přehled výsledků poměrného prodloužení v závislosti na teplotě .....	59
	<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>

## ÚVOD

Konstrukční materiály vždy zaujímaly významné postavení ve vývoji lidské společnosti. Rozvoj technických věd a výroby je často limitován materiálem a technologiemi jeho zpracování, které mají konstruktéři v jednotlivých oborech k dispozici. V současné době mají konstruktéři k dispozici obrovské množství různých materiálů. Nikdy v historii nebyl vývoj materiálu tak dynamický, jako v současnosti. Obrovský rozvoj nyní zažívají polymerní materiály.

Polymerní materiály, tedy plasty a kaučuky, nyní představují nejvýznamnější segment výroby a spotřeby podle objemu mezi všemi technickými materiály. V konkurenci s materiály klasickými, především kovy, se polymery prosadily snadnou zpracovatelností, nízkou hustotou a výhodným poměrem mezi užitnými vlastnostmi a cenou. Další vývoj polymerních materiálů stále pokračuje a je neobyčejně zajímavý a poučný. Objevují se jak netušené možnosti modifikace polymerních materiálů, tak jejich nečekané aplikace.

V polymerní materiály jsou vkládány velké naděje a kvůli obrovskému použití je nutné je zkoumat a znát jejich veškeré vlastnosti. V této bakalářské práci jsem se zabýval zkoumáním mechanických vlastností polymerů v závislosti na teplotě.

V teoretické části jsem se zaměřil na obecné rozdělení polymerů, jejich tepelné vlastnosti a představil dva zkoumané polymery. V další části teoretické části se věnuji vlastní přípravě na zkoušky mechanických vlastností jako je jednotlivý popis metod zkoušek a přípravě zkušebních tělísek z různých druhů polymerů

V praktické části pak představuji použitá zařízení, podmínky a výsledky měření.



## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 POLYMERY A JEJICH TŘÍDĚNÍ

Polymery jsou dnes důležitou materiálovou skupinou, jejich uplatnění v nejrůznějších oborech lidské činnosti přináší potřebu měřit a sledovat jejich vlastnosti. Tak vznikla celá technická oblast zkoušení polymerů, která se zabývá výběrem sledovaných veličin pro ten který materiál či výrobek a vypracováním příslušných zkušebních metod. Zkušební postupy a přístroje nemohou být stejné pro všechny typy polymerů tak rozdílného a chemického a strukturního uspořádání, které se velmi liší svými vlastnostmi.

Polymerní materiály rozdělujeme do tří základních kategorií:

Elastomery - jsou polymery s kaučukovou elasticitou, která se již malým napětím silně deformují a po uvolnění napětí se rychle nebo pomalu vrací do původního tvaru. Jsou to obvykle přírodní a syntetické kaučuky, které vulkanizací vytvářejí řídkou trojrozměrnou kaučukovou síť za vzniku vysoce elastické pryže. Sem patří i nevulkanizující elastomerní látky jako je polyisobutylén, termoplastické elastomery aj.

Termoplasty - jsou polymery, které lze opakovaně tvářek či tvarovat zahřátím. Ochlazením pak přecházející do tuhého, většinou sklovitého, někdy i krystalického stavu. Mezi termoplasty řadíme polystyrén, polyetylén, polypropylén, polyamidy, polivinylchlorid, polymethylmetakrylát a mnoho dalších polymerů.

Reaktoplasty - jsou polymery, které vytvrzením za tepla nebo i za normální teploty vytvářejí hustou prostorovou síť. Po vytvrzení jsou reaktoplasty nerozpustné, netavitelné, tvrdé, a proto jsou ve vytvrzeném stavu nazývány duromery. Mezi reaktoplasty zařazujeme fenolformaldehydové pryskyřice, epoxidové a polyesterové pryskyřice aj.

Podle typu makromolekul, které tvoří základ polymerního materiálu, můžeme polymery dělit také na:

- lineární- tvořené nerozvětvenými makromolekulami,
- větvené- tvořené makromolekulami, u nichž jsou na hlavním řetězci navázány různé dlouhé postranní řetězce,
- síťované- tvořeny z makromolekul navzájem spojených příčnými vazbami.

Při vysokém stupni zesíťování jsou prakticky všechny původní lineární nebo rozvětvené makromolekuly v polymeru propojeny příčnými vazbami tak, že tvoří jedinou trojrozměrně zesíťovanou makromolekulu.

Polymerní materiály se liší také velikostí a distribucí molekulové hmotnosti stupněm krystalinity, chemickým složením a mnoha dalšími faktory.[1]

## 2 ZKOUMANÉ KONSTRUKČNÍ POLYMERY

### 2.1 Polystyrén

Patří více než 60 let mezi nejběžněji používané termoplasty. Standardní polystyrén neboli polystyrén pro všeobecné použití je často pro svoji vynikající průhlednost, krystalickou čírost, nazýván krystalický, i když ve skutečnosti vůbec nekrytalizuje.

Polystyrén se vyrábí převážně polymerizací styrénu blokovou technologií, tedy polymerizací ve hmotě. Roztavený polystyrén se poté granuluje. Polymerizaci je možné uskutečnit také jako suspenzní i emulzní.

Jedná se o ataktický polymer, který vzhledem k nepravidelnosti makromolekulárního řetězce nemůže krystalizovat. Je tedy amorfní a to spolu s jeho chemickou strukturou je hlavní příčinou jeho vynikajících optických vlastností. Jsou známy i jiné formy krystalizujícího polystyrénu s uspořádanou chemickou strukturou (izotaktický polystyrén), které však nenalezly většího praktického uplatnění.

#### Přednosti:

- dobrá tuhost a tvrdost
- vynikající optické vlastnosti, mimořádná průhlednost
- kvalitní lesklý povrch výrobků
- výborná zpracovatelnost
- malá nasákavost vody
- velmi dobré elektrické a dielektrické vlastnosti

#### Nevýhody:

- poměrně vysoká křehkost
- nízká chemická odolnost, zejména vůči organickým rozpouštědlům
- sklon ke korozi za napětí

Vlastnosti:

Standardní polystyrén je tvrdý, křehký, čirý, průhledný polymer s vysokým leskem. Pevnostní chování polystyrénu je málo závislé na teplotě i na čase expozice. Při běžných teplotách použití je polystyrén pod svojí teplotou skelného přechodu (80-100 °C), takže je v tzv. sklovitém stavu, a tudíž křehký. Bez větších problémů lze výrobky z polystyrénu dlouhodobě používat při teplotách do 60 °C až 90 °C. Pro svoji nízkou nasákavost i navlhavost lze polystyrén dlouhodobě vystavit vzdušné vlhkosti, aniž by byly ovlivněny jeho vlastnosti. Polystyrén je ceněn pro svoje mimořádné optické vlastnosti. Propouští až 90 % dopadajícího světla. Elektrické a dielektrické vlastnosti jsou vynikající a jsou podmíněny tím, že polystyrén neobsahuje v makromolekule polární skupiny.

Polystyrén odolává běžným neoxidujícím kyselinám, louhům, alkoholům, některým olejům a tukům, roztokům solí a vodě. Je však narušován mnoha organickými rozpouštědly, jako benzínem, aromatickými a chlorovanými uhlovodíky a dalšími organickými rozpouštědly. Je také náchylný ke korozi za napětí, kdy se společným účinkem vnějšího prostředí a mechanického zatížení vytvářejí jemné vlasové trhlinky, projevující se jako známé zbělení postižených míst. Rovněž vzhledem k povětrnosti je polystyrén málo stálý, žloutne, ztrácí lesk a křehne. Pro stabilizaci se používají speciální typy stabilizátorů. Polystyrén je snadno zápalný a hoří plamenem provázeným silným vývinem sazí. Vydává přitom nasládlý pach.

Většina typů polystyrénu bývá schválena pro výrobu předmětů přicházejících do styku s potravinami. Nicméně je nezbytné zachovat doporučené režimy při zpracování polystyrénu, zejména zpracovatelské teploty. Obvyklé teploty se pohybují do 280 °C a neměly by být překročeny, zejména dlouhodobě. Při zvýšené teplotě hrozí totiž nebezpečí rozkladu polystyrénu zejména na toxický styren, který se pak může uvolňovat až do potravin (mlékárenské výrobky) uchovávaných v polystyrénových obalech.

### Zpracování:

Polystyrén se velmi dobře zpracovává a také směšování různých typů polystyrénu za účelem zlepšení vlastností nečiní obvykle potíže. Nejběžnější technologie zpracování jsou vstřikování, vytlačování, vyfukování a tepelné tvarování desek. Vzhledem k nízké navlhavosti není obvykle zapotřebí před vlastním zpracováním polystyrénový granulát předsoušet.

### Použití:

Polystyrén našel mimořádně široké uplatnění. Především se používá v obalové technice na nejrůznější nádoby a dózy, kde vynikne jeho průhlednost. Kelímky na jogurty, víčka, lahvičky, obaly na kosmetiku, farmaceutické přípravky jsou velmi časté. Rozšířené je použití v tzv. audio-video technice (obaly na kazety, CD disky). Vyrábějí se z něho kancelářské a psací potřeby, elektrotechnické výrobky, elektronika, domácí a kuchyňské potřeby, díly elektrospotřebičů, sprchové kouty, hračky a mnoho dalších výrobků.

## **2.2 Polypropylén**

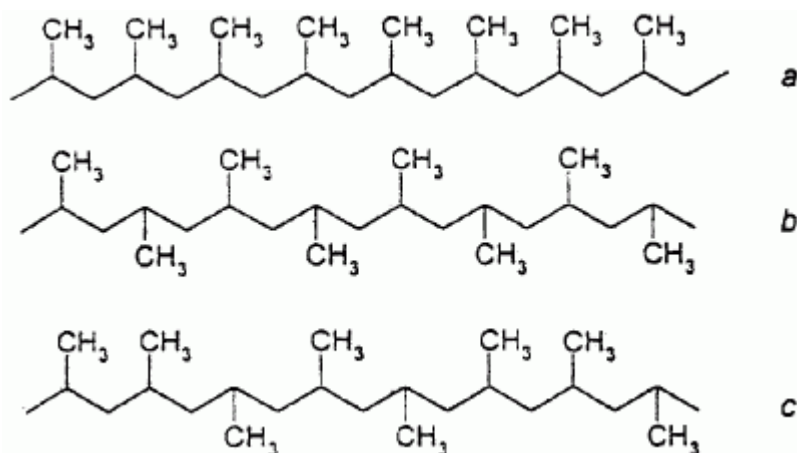
Polypropylén je klasický představitel komoditních polymerů. Přesto je už od svého objevu začátkem padesátých let trvale předmětem zájmu vědy i průmyslu.

Z velkotonážních plastů (PS, PE, PP) se izotaktický polypropylén začal průmyslově vyrábět až po roce 1953. Výhodná kombinace ceny s dobrými užitnými vlastnostmi zajistila izotaktickému polypropylénu pevné postavení mezi komoditními plasty. Některé jeho aplikace jej však řadí i mezi konstrukční materiály. Mezi nejvýznamnější aplikace polypropylénu patří vlákna, obalová technika, díly automobilů, domácích spotřebičů a různé spotřební zboží.

V posledních letech význam polypropylénu znovu zřetelně roste. Důvodem jsou jednak nově vyvinuté modifikace a kompozity na jeho základě, nové pozoruhodné aplikace a také důraz na snadnou recyklovatelnost polymerních výrobků.

Z hlediska molekulární struktury jsou možné tři odlišné typy polypropylénu:

izotaktický, syndiotaktický a ataktický. U izotaktického typu (*obr. 1a*) jsou postranní methylové skupiny umístěny vždy na jedné straně hlavního polymerního řetězce, pokud si jej představíme v idealizované natažené podobě, zatímco v syndiotaktickém polypropylénu (*obr. 1b*) se postranní methylové skupiny pravidelně střídají po obou jeho stranách. Třetí, ataktický typ (*obr. 1c*) má zcela náhodnou statistickou molekulární strukturu.



Obr. 1. Schéma větví stereoizomerů polypropylénu

Izotaktický- Produkt obsahuje vedle izotaktického vždy určitý ataktický podíl. Jejich vzájemný poměr je ovlivněn použitým katalyzátorem, rozpouštědlem a také podmínkami polymerace. Přítomnost ataktického podílu je nežádoucí, protože zhoršuje mechanické vlastnosti a je i slabinou vzhledem k fotooxidační degradaci. V praxi je důležité, aby podíl izotaktické složky (index izotakticity) byl alespoň 90 %, v případě vláken nejméně 95 až 97 % . Při výrobě se ataktický podíl odstraňuje hexanem nebo kapalným propanem pod tlakem.

Ataktický- Nejdokonalejší polymerační postupy tak sice poskytují kvalitní izotaktický polypropylén, ale současně vyvolaly zvýšenou poptávku po ataktické formě. Pro ni se totiž postupně našly zajímavé aplikace s perspektivním odbytem (trvale plastické tmely, modifikátory bitumenů apod.) Proto se tento původně vedlejší odpadový produkt nyní paradoxně vyrábí speciálními postupy.

Vlastnosti:

Makroskopické vlastnosti izotaktického polypropylénu vyplývají z jeho krystalické struktury, ale závisí ovšem na teplotě, na čase i na působení vnějšího prostředí. Hustota polypropylénu se pohybuje mezi 900 až 920 kg.m<sup>-3</sup>.

Z tepelných vlastností je pozoruhodný vysoký bod tání (170 °C) a poměrně vysoká maximální teplota použití (až 135 °C).

Za normální teploty je izotaktický polypropylén nerozpustný ve všech organických rozpouštědlech, při teplotě 90 °C se rozpouští v aromatických a chlorovaných uhlovodících. Botná v ketonech, uhlovodících a esterech. Minerální a rostlinné oleje jsou jím absorbovány jen nepatrně a jeho vlastnosti se tím nemění. Nízká odolnost proti ultrafialovému záření se zlepšuje přidávkem stabilizátorů.

Elektrické vlastnosti izotaktického polypropylénu vyplývají z jeho nepolárnosti. Vykazuje výborné elektro-izolační vlastnosti v široké oblasti frekvencí.

Zpracování a aplikace:

Izotaktický polypropylén se zpracovává prakticky všemi technologiemi vyvinutými pro termoplasty. Zvlákňuje se, vyfukováním se vyrábějí jak fólie, tak duté nádoby, vstříkování produkuje drobné i rozměrné výrobky, vytlačováním se zhotovují trubky, profily a desky, které lze dodatečně svařovat nebo omezeně i tepelně tvarovat. O vhodnosti polypropylénu pro jednotlivé technologie rozhoduje především tekutost taveniny vyjádřená indexem toku. S rostoucí molární hmotností polymeru klesá tekutost taveniny, roste viskozita, klesá tekutost taveniny a index toku taveniny.[4]



### 3 TEPELNÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ

Tepelné vlastnosti polymerů jsou určeny především strukturou makromolekul. Rozhodujícím způsobem ovlivňuje tepelné vlastnosti poměr hlavních vazebných sil působících podél molekulárních řetězců k vedlejším vazebným silám, které působí mezi atomy sousedních molekul.

Polymery s lineárními řetězci mají makromolekuly navzájem vázány vazbami, jejichž pevnost se v širokém rozmezí teplot nemění.

Velký význam má tvar jednotlivých makromolekul, jejich vzájemné uspořádání (amorfní nebo částečně krystalická struktura), pohyblivost molekul a molekulárních segmentů atd. Proto z výsledků o chování plastů za tepla lze vyvozovat závěry o struktuře makromolekulární látky, o molekulové hmotnosti, o vlivu předchozího zpracování, znečištění apod.

Z hlediska zkušebnictví neexistuje žádná metoda, která by obecně hodnotila závislost mechanických vlastností na teplotě. Dosud vypracované metody jsou příliš jednostranné, to znamená že zkouší sledovanou vlastnost po určité teplotě nebo po určité době tepelného namáhání při určité teplotě, určitém teplotním spádu apod.

Jednotlivé metody lze v podstatě rozdělit do tří skupin, které vyplývají především z dostupnosti zkušebního zařízení:

1. Zkušební tělesa se temperují na zkušební teplotu dostatečně dlouho, pak se co nejrychleji upevní do měrného zařízení a odzkoušejí.

2. Zkušební tělesa se temperují upnutá již v přístroji a po určité době se zkouška provede.

3. Zkušební tělesa se umístí i se zkušebním přístrojem v termostatu a po vytemperování se odzkoušejí.

Při porovnání těchto metod je zřejmé, že první metoda je zatížena chybou chladnutí po teplotě. Třetí způsob lze zase využít pouze tehdy, jestliže zkušební zařízení je malé a snese příslušnou teplotu.

### 3.1 Měrné teplo

Měrné teplo látky je množství tepla  $Q$  potřebného k zahřátí 1kg této látky při určitém tlaku a teplotě  $1^{\circ}\text{C}$ .

Znalost měrného tepla je potřeba pro výpočet rychlosti ohřevu nebo ochlazení nejrozličnějších materiálů, je častým požadavkem při návrhu na konstrukci zařízení. Jiným příkladem potřeby znalosti měrného tepla je výpočet ohřátí na určitou teplotu při průběžné vulkanizaci, při zkratování zatíženého izolovaného vodiče apod. S teplotou se měrné teplo mění např. vždy v bodě tání, při teplotě skelného přechodu a v oblasti změn krystalinické a amorfní fáze, což je běžné u polymerů jako jsou polyolefiny.

Měrné teplo plastů je proti kovům asi pětkrát větší. Zvyšováním teploty měrné teplo roste, a to rychleji nežli u kovů. K výrazným změnám dochází zejména v oblasti přechodových teplot. Měrné teplo krystalických polymerů vykazuje v oblasti teploty tání maximum. V roztaveném stavu vykazují plasty větší měrné teplo než v tuhém stavu.

### 3.2 Tepelná vodivost

Schopnost látky vést teplo. Vyjadřuje se součinitelem  $\lambda$ , který udává množství tepla, které projde v ustáleném stavu za 1s plochou  $1\text{m}^2$  rovinné stěny krychle zkoušené hmoty při vzdálenosti protilehlých stran 1m a teplotním spádu  $1^{\circ}\text{C}$ .

K absolutnímu stanovení tepelné vodivosti se užívá většinou zkušebních tělísek ve tvaru destiček. Destička se umístí mezi dvě desky o různých teplotách z nichž jedna je elektricky zahřívána a druhá chlazená. Kontrolují se teploty ochlazované a ohřívané plochy až nastane ustálený stav kdy se teploty nemění. Jakmile nastane ustálený stav, odečtou se teploty na obou stranách zkušebního tělesa a změří se příkon ohřívacího proudu. Do vzorce se pak za  $Q$  dosadí příkon  $W$  elektrického proudu, přičemž se zanedbávají tepelné ztráty přístroje.

Tepelná vodivost tuhé látky závisí na její schopnosti přenášet tepelný pohyb z jedné částice na druhou. Tato schopnost souvisí s velikostí sil, kterými jsou tyto částice navzájem poutány. U plastů jsou síly mezi makromolekulami poměrně slabé, a proto je tepelná vodivost plastů podstatně menší než u kovů.

Špatná tepelná vodivost plastů je příčinnou, že technologický úsek zpracování plastů, při němž probíhá ohřev nebo ochlazování hmoty, vždy vyžaduje relativně dlouhý čas a tím se prodlužuje výrobní cyklus. Na druhé straně jsou plasty výbornými tepelnými izolátory, zejména pokud mají pěnovou strukturu. Tyto lehčené plasty, jako lehčený polystyrén, polvinylchlorid, polyuretan apod. představují nejkvalitnější tepelně izolační materiály, které máme k dispozici.

### 3.3 Teplotní roztažnost

Koeficient teplotní roztažnosti závisí na jejich struktuře, složení a na uvažované teplotní oblasti. Zvětšování objemu hmoty při zahřívání je podmíněné zeslabováním mezimolekulárních sil a zvětšováním pohyblivosti makromolekul. Z toho to důvodu mají relativně nejmenší teplotní roztažnost reaktoplasty, přičemž konkrétní hodnota závisí na hustotě zesíťování. Termoplasty vykazují ve sklovité oblasti, tj. pod  $T_g$  více než poloviční roztažnost než nad  $T_g$ . Platí to jak pro amorfni tak i pro krystalické polymery. Polymery bez plniv mají teplotní roztažnost asi desetkrát větší než kovy. To způsobuje často potíže při spojování součástí z obou materiálů, protože v případě kolísání teploty musí být spoj proveden tak, aby umožňoval teplotní dilataci. Jinou cestou je zmenšení koeficientu roztažnosti přidávkem plniv s malou roztažností.

### 3.4 Trvalá tepelná odolnost

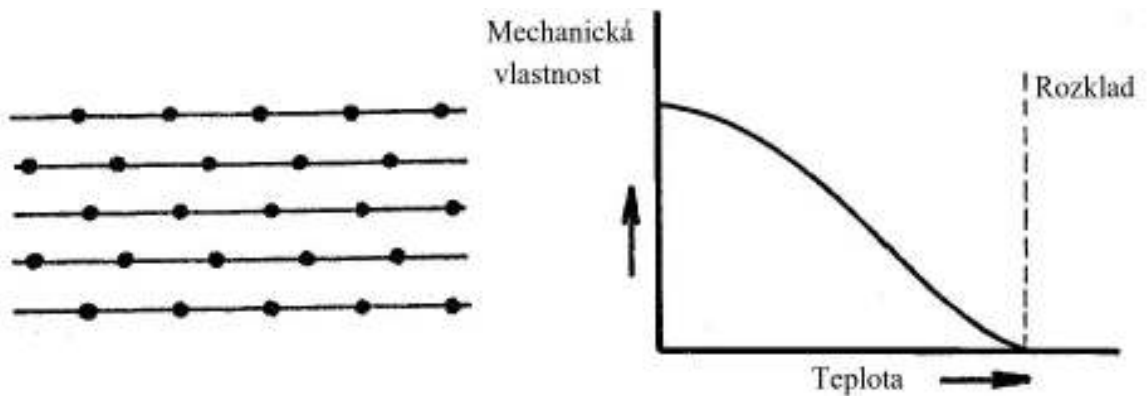
Obecně lze říci, že s teplotou se mění všechny mechanické vlastnosti jak kovů tak i plastů. U plastů však dochází k výrazným změnám jejich mechanických vlastností již při teplotách, při kterých jsou tyto změny u kovových materiálů prakticky neměřitelné. Přesto při srovnání lze nalézt značnou podobnost. Polymery (hlavně termoplasty) jsou však velmi náchylné k tečení při zvýšených teplotách. To vyvolává výraznou závislost důležitých konstrukčních veličin.

Trvalá tepelná odolnost se nejlépe zjišťuje dlouhodobou zkouškou v tahu, ohybu nebo tlaku. Pracuje se obvykle při určitém napětí za různých teplot. Sestrojením takových křivek lze zjistit napětí, za kterého nedochází za dané teploty k nežádoucím jevům.

Trvalá tepelná odolnost vyjadřuje teplotou, která způsobí pokles mechanických vlastností nejvýše o 10%. Zkouší se pevnost v ohybu a rázová houževnatost na zkušebních tělesech zahříváných 200 hodin při zvolené teplotě.

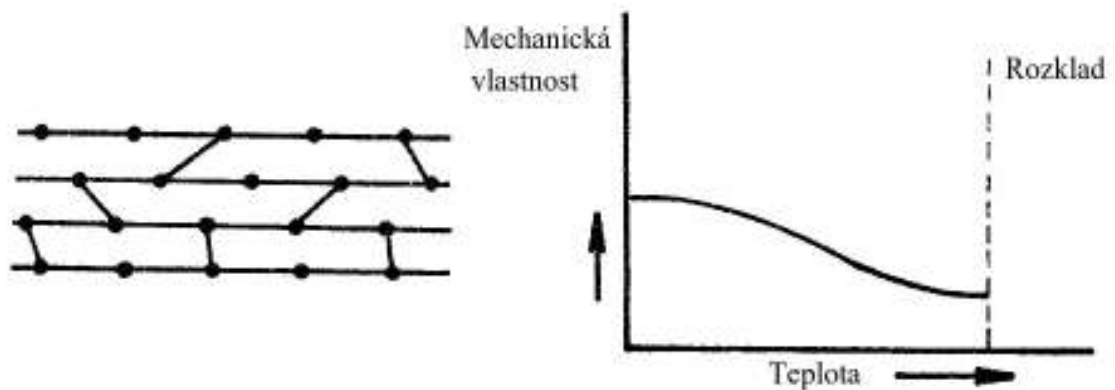
Schématické znázornění změny mechanických vlastností v závislosti na teplotě:

Termoplasty- mají lineární nezesíťované molekuly. Při zahřívání měknou, jsou vratně neformovatelné. Existuje výrazná závislost mechanických vlastností na teplotě (obr.2).



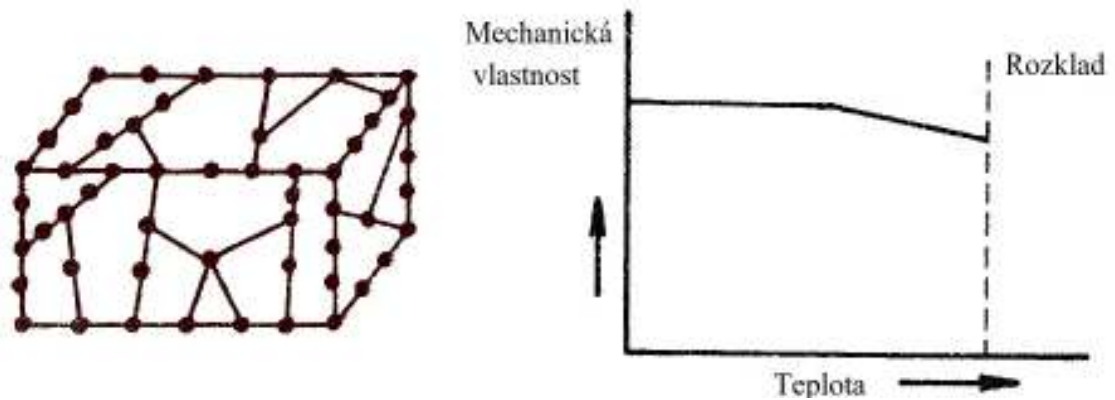
Obr. 2. Struktura a závislost mechanických vlastností na teplotě pro termoplasty

Eleastomery- mají řídkce zesíťované makromolekuly. Snadno se deformují a po uvolnění deformujícího napětí se opět vracejí do původního tvaru a rozměrů. Jsou to obvykle kaučuky a pryže (obr.3).



Obr. 3. Struktura a závislost mechanických vlastností na teplotě pro eleastomery

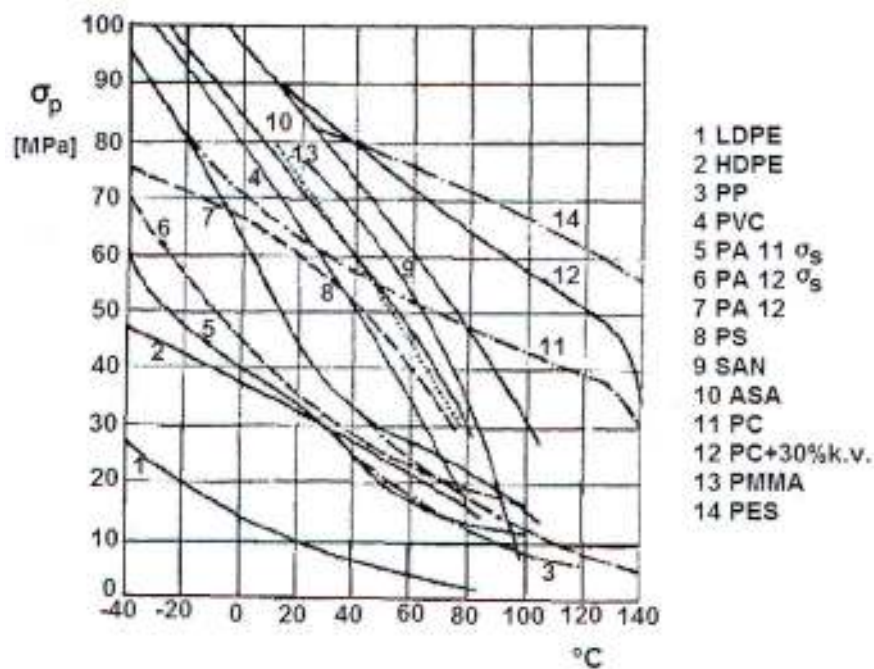
*Reaktoplasty*- mají prostorově zesíťované makromolekuly. Jsou nerozpustné a netavitelné. Nepatrná závislost mechanických vlastností na teplotě (*obr.4*).[2]



Obr. 4. Struktura a závislost mechanických vlastností na teplotě pro reaktoplasty

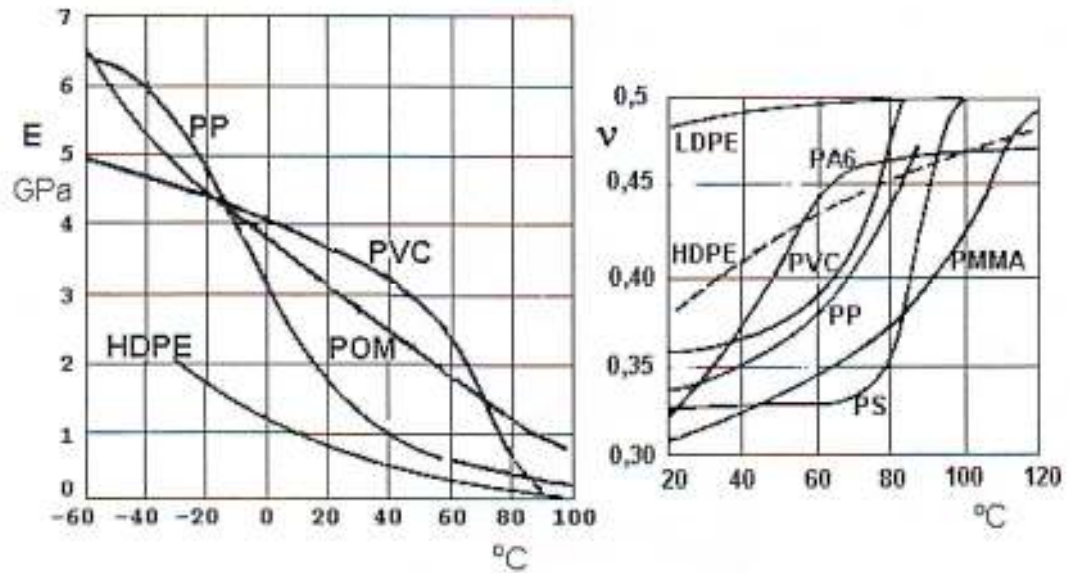
### 3.5 Příklady mechanického chování polymerů za zvýšených teplot

Základním materiálovým parametrem vstupujícím do úvah o spolehlivosti plastového výrobku či konstrukce je časová mez pevnosti při daných vnějších podmínkách. Směrem k nižším teplotám u plastů obecně vzrůstá pevnost a klesá tažnost. Závislost krátkodobé meze pevnosti resp. kluzu na teplotě pro některé typy plastů jsou na *obr.5*.



Obr. 5. Závislost krátkodobé meze pevnosti na teplotě

Specifičnost v chování plastů jsou výrazné závislosti elastických konstant na teplotě. S rostoucí teplotou se obecně modul pružnosti snižuje, Poissonovo číslo naopak vzrůstá. Příklady těchto závislostí jsou uvedeny na obr.6. [5]



Obr. 6. Závislost modulu pružnosti a Poissonova čísla na teplotě

## 4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa se připravují dvojím způsobem:

1. Přímo ze zkoušených materiálů jejich vulkanizací, lisováním, vstřikováním či vytvrzováním v příslušných formách s tvarem zkušebního tělesa nebo vzorku, z kterého se dále vysekává zkušební tělese.

2. Zkušební tělesa se připravují z hotových výrobků nebo polotovarů vysekáváním, vyřezáváním nebo obráběním.

Často se srovnávají vlastnosti zkušebních těles připravených oběma způsoby, aby byly získány korelace mezi podmínkami, za kterých jsou polymery zpracovány v laboratoři a ve výrobě. V laboratoři jsou podmínky modelovány hlavně z hlediska reprodukovatelnosti za zcela jiných tepelných a tlakových podmínek ve výrobě..

### 4.1 Elastomery

Elastomery mají definovatelnější a reprodukovatelnější vlastnosti v amorfním stavu než plastomery s relativně vyšším a různým stupněm krystalizace. Z kaučuku je nutno připravit směs a tu z vulkanizovat. Směsi se připravují na dvouválcích, kde se uplatňují více nebo méně mechanochemické reakce a je proto nutné pracovat za stejných podmínek, hlavně tepelných. Minimální změny v plasticitě přírodního kaučuku nastávají při teplotě kolem 100°C, norma doporučuje z praktických důvodů 70°C, kdy jsou změny vlivem teploty, frikce, rychlosti válců a mezerou mezi nimi poněkud větší.

Při hodnocení provozních směsí se dosahuje i při stejném složení jiných vlastností než u směsí připravených v laboratoři na malém dvouválci. U každého typu kaučuku je nutno dodržet podmínky míchání i postup v přidávání jednotlivých přísad, jak uvádí příslušná materiálová norma. Týká se to hlavně rozměru, rychlosti a frikce válců, jejich teploty a mezery mezi sebou a pak hlavně posloupnosti a časového sledu přidávání jednotlivých přísad. Tyto postupy jsou dnes v rámci ISO jednotné.

Kaučukové směsi jsou před vulkanizací válcovány, vytlačovány a vlivem orientace molekul a plniv vykazují i po vulkanizaci anisotropní vlastnosti. Proto se směsi označují ve směru tažení a zkušební tělesa se vysekávají v příslušných směrech.

Příprava zkušebních těles je značně různorodá, pro stanovení tahových vlastností se připravují 2 mm desky, z nichž se vysekávají oboustranné lopatky, nebo se vulkanizují 4 mm kotouče či plotny pro vysekávání kroužku.

Vulkanizace v příslušných tvárnících se provádí za podmínek, za jakých bylo stanoveno vulkanizační optimum, které se dnes již běžně stanovuje na vulkanoměrech dle smykového modulu.

Při vulkanizaci je nutno dodržet teplotu, dobu a minimální lisovací tlak. Jakmile je vulkanizace skončena, je nejlépe zkušební tělesa z vyjmout a nenechávat je chladnout v tvárnících, čímž se zvyšuje stupeň vulkanizace.

Pro většinu zkoušek je požadován hladký povrch zkušebních těles, proto musí být formy vyrobeny s dostatečně hladkým leštěným povrchem. Pro zkoušky odolnosti vůči praskání ozonem se doporučuje lisování směsí mezi broušenými skly.

Pro vysekávání zkušebních těles je nutno použít dokonale nabroušené hladké nože, jejichž ostří se před každým použitím kontroluje. Řez musí být hladký, provedený najednou, jinak jsou nesprávně vyseknuté tělesa zdrojem nepřesných výsledků.

## 4.2 Plastomery

Plastomery se zpracovávají převážně vstřikováním do formy, válcováním, vytlačováním nebo lisováním. Příprava zkušebních těles je zpravidla stejná. Při vstřikování a lisování se připravují v konečném tvaru, u ostatních procesů se získají desky, tyče, trubky, z nichž se zhotovují zkušební tělesa strojním obráběním, nebo na speciálních frézovacích kopírovacích strojích.

Pro každý typ polymeru je výhodný a z hlediska reprodukovatelnosti vlastností nutný určitý vstřikovací cyklus, který zahrnuje uzavření formy, plnění formy, tuhnutí taveniny a vyprazdňování formy. Jsou dány teploty taveniny a formy, tlaky a způsob jejich kontroly. Vlastnosti polymerního vzorku jsou závislé na vzniklé struktuře, kterou ovlivňuje charakter toku při vstřikování a pak hlavně rychlost ochlazování.

Při rychlém ochlazení se získá u krystalických polymerů výlisek s převážně amorfni strukturou na povrchu. Směrem do středu přibývá krystalických center a ve středu zvláště u



objemných výlisků jsou již dobře vyvinuté sférolity. Krystalické oblasti nejsou tedy dobře vyvinuty a jejich uspořádání závisí na teplotě, vlhkosti a čase. Výlisek mění své vlastnosti ještě dlouho po vyjmutí z formy a je v nerovnovážném stavu nevhodný pro zkoušení. Navenek se to projeví tím, že rychle ztverdne nejdříve na chladné formě vnější vrstva. Další ochlazování pak tuhne i vnitřní vrstvy, které ale mají snahu vyrovnat teplotní roztažnost, které lze někdy zmírnit tepelnou stabilizací, ale zcela odstranit se nedá. To se projeví v mechanických vlastnostech, tvarové stálosti a v odolnosti pro korozi za napětí.

Tavenina vstříknutá do temperované formy se ochlazuje pomalu, vytváří se velké množství homogenně rozložených krystalických center, která rychle narůstají. Výlisek je pak v převážně krystalickém stavu, kde se rovnovážného stavu docílí při kondicionování. Rozměry výlisku se pak shodují s formou, protože až do posledního okamžiku působí tlak, doplňuje taveninu a vyrovnává objem vzniklý smrštěním, vlivem krystalizace a ochlazování.

Všechna zkušební tělesa se před zkoušením podrobují vnější prohlídce. Zajišťují se vzduchové bublinky, povrchové trhlinky, vrásky, cizí tělesa zalisovaná v povrchu, mechanické poškození, nedolisky, vrstevnatost, homogenost v barvě apod.

Za účelem zjištění homogenity se vzorky i řežou. Tvar zkušební tělesa, daný normou, má být přesně dodržen. Musí mít podélnou přímkovou osu, ostré, rovnoběžné hrany a rovné stěny. Válcovitá tělesa musí být kruhového průřezu. Tělesa tvaru destiček musí mít v celé délce stejnou tloušťku, ostré, přímé rovnoběžné hrany. Tělesa s vadami se vyřazují.

Zkušební tělesa z měkčeného PVC se připravují válcováním, lisováním a vysekáváním, z tvrdého PVC se lisují a dále obrábějí, z polyamidů, polystyrénu a polyolefinů se připravují vstřikováním do forem. Vysušený polyamid, předehřátý na 50 – 60 °C se dávkuje do vstřikovacího stroje v množství odpovídajícím váze výlisku s přetokem. Teplota taveniny musí být tak vysoká, aby při zbytkovém tlaku 1 – 15,5 MPa ve formě nepřekročila při vstřiku 250 stupňů Celsia. Plnění formy nemá trvat déle než 10 vteřin (od dosednutí trysky k dosažení maximálního tlaku), celý vstřikovací cyklus (do ustálení zbytkového tlaku) nemá být delší než 30 vteřin.

### 4.3 Reaktomery

Reaktomery (pryskyřice) jsou zpracovávány převážně vysokotlakým lisováním s výjimkou pryskyřic tvrditelných za normální teploty a bez tlaku jako jsou epoxidové a polyesterové pryskyřice, které se odlévají a dodatečně dotvrzují ve vyhřívaných formách.

U teplem tvrditelných termoreaktivních pryskyřic, které jsou většinou směsí pryskyřice a pojiva – hlavně dřevné moučky – dochází při ohřátí k anisotropnímu rozložení pojiva, pryskyřice se taví a přechází z vnitřních vrstev směrem k teplému povrchu. Povrch je lesklý, téměř čistá pryskyřice, zatímco vnitřní vrstvy mají jiné složení.

Při lisování je vyhřívána obvykle spodní část formy, kam se klade nálož a pak se teprve zalisuje. Při vyjímání se opět tato zvedne dříve než je vylisované vytvrzené tělísko vyjmuto. Bude proto tepelná historie dolní plochy jiná než horní a je proto nutno plochy označit. Při stanovení např. tvrdosti je to důležité.

Příprava zkušebních těles z polotovarů nebo hotových výrobků vyřezáváním, frézováním, broušením a leštěním má také svá pravidla. Je nutno vědět, jak byl materiál připraven a brát zřetel na směrové efekty, které vznikají při kalandrování, vytlačování a jiných procesech.

Zkušební tělíška ze silnějších materiálů se opracovávají buď z jedné strany, je-li druhá hladká, nebo z obou stran. Podmínky řezání, obrábění i všechny další operace jsou dány příslušnými normami. Používá se okružních nebo pásových pil a rychlořezné oceli s rozvedenými podbroušenými zuby.

Z desek a folií se vzorky vyřezávají nebo vysekávají tvarovanými noži. Vyřezávací a vysekávací zařízení musí být uzpůsobeno na tažný řez nebo výsek. Přesné podmínky a způsob provádění uvádí vždy příslušná zkušební norma.

#### 4.4 Kondicionování

V zásadě platí, že zkušební tělesa, která budou podrobena fyzikálně mechanickým zkouškám, nesmí být předem vystavena mechanickému, fyzikálně chemickému nebo tepelnému namáhání, které by mohlo výsledky zkoušek ovlivnit. Výjimku tvoří zkoušky stárnutí, koroze, zkoušky tepelné odolnosti aj., při nichž se tělesa vystavují záměrně přirozenému nebo zrychlenému stárnutí a stanoví se změna mechanických vlastností vůči původním hodnotám.

Většina zkušebních vzorků a materiálů pro zkoušení prošla tepelným namáháním. I vzorky připravené obráběním a broušením se povrchově zahřívají. Před provedením vlastní zkoušky je nutno materiál nechat odležet, až dosáhne rovnovážného stavu, hlavně z hlediska teploty a vzdušné vlhkosti. Všechny faktory, které ovlivňují při přípravě stav polymerního materiálu, tvoří tzv. historii vzorku, která se má kondicionováním vyrovnat, aby se co nejméně podílela na výsledcích měření.

Kondicionování spočívá v tom, že se vzorky nechávají určitou dobu odležet v klimatizovaných prostorech za podmínek smluvní teploty a relativní vlhkosti. Vzorky přejímají teplotu okolního vzduchu, vlhkost se vyrovnává, přičemž doba kondicionování je závislá na teplotě, při které byl vzorek připraven, tloušťce vzorku, tepelné vodivosti a difúzních vlastnostech hmoty.[1]

## 5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Podle účelu a způsobu zkoušení lze mechanické vlastnosti rozdělit takto:

1. Mechanické vlastnosti zjišťované krátkodobým působením statické síly nebo statického napětí. Zjišťuje se chování zkoušeného materiálu za konkrétních podmínek napětí, deformace, teploty a času. Jednotlivé podmínky se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky, s výjimkou doby vliv na hodnotu zjišťované vlastnosti. Krátkodobých zkoušek se používá hlavně pro rychlou kontrolu jakosti. Hlavním požadavkem je dobrá redukovatelnost výsledků bez zřetele na možnost jejich širšího využití v praxi.

2. Mechanické vlastnosti zjišťované dlouhodobým působením statické síly nebo statického napětí. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních zkušebních podmínek v podstatě delším časovém úseku, než je tomu u zkoušek krátkodobých. Zjišťují se závislosti hodnot zkoušených vlastností na čase. Podmínky zkoušky (napětí, teplota, event. vlhkost) se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušek. Dlouhodobé zkoušky slouží ke zjišťování inženýrských vlastností, jejichž znalost podmiňuje správnou aplikaci plastických hmot.

3. Mechanické vlastnosti zjišťované cyklicky nebo acyklicky měnícím se napětím. Zkouší se únava materiálu za určitých podmínek časově proměnného namáhání, konstantní teploty popř. vlhkosti. Doba trvání zkoušky je buď předepsána, nebo závisí na odolnosti materiálu proti únavě.[3]

### 5.1 Tahové zkoušky

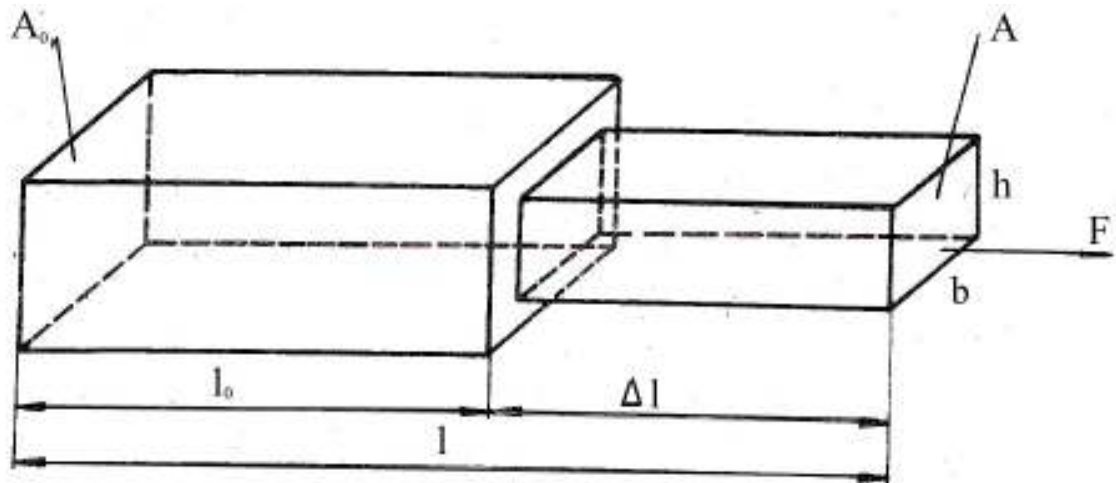
Tahová zkouška byla jednou z prvních, podle které se hodnotila pevnost materiálu. Na zkušební těleso působila stále se zvětšující síla, až došlo po určité deformaci k přetržení- destrukci materiálu. Pevnost v tahu byla vyjadřována silou, vztaženou na jednotkový průřez – tedy napětím potřebným k přetržení hmoty. Zavedením dokonalých systémů snímání napětí a deformace a jejich grafickým záznamem jsou získávány pracovní diagramy, tím celá tahová křivka poskytuje širší a přesnější informaci o deformačním chování materiálů za různých podmínek zkoušení. Deformaci tahem můžeme znázornit na hranolu v pravoúhlých souřadnicích, jehož původní průřez  $A_0$  je dán součinem šířky  $b_0$  a výšky  $h_0$ .

$$A_0 = b_0 \cdot h_0. \quad [1]$$

Působí-li na plochu  $A_0$  jednosměrný tah silou  $F$ , jak znázorňuje *Obr.7*, tedy napětím:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}. \quad [2]$$

Začne se hranol deformovat a tím i měnit původní rozměry až do okamžiku, kdy se dosáhne rovnováhy mezi deformací a působícím napětím. Chceme-li těleso dále deformovat, musíme zvýšit napětí zvětšením síly až na hranici, kdy se těleso přetrhne.



*Obr. 7. Jednosměrná deformace tělesa*

S prodloužením tělesa se mění jeho původní délka  $l_0$  na délku  $l$  a tuto délkovou změnu definujeme jako tzv. poměrné (relativní) prodloužení:

$$\varepsilon_1 = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad [3]$$

Zmenšení průřezu obdobně vyjadřuje poměrným zkrácením základny nebo výšky hranolu:

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}, \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad [4]$$

Vztah mezi poměrným zkrácením a poměrným prodloužením je tzv. Poissonův poměr:

$$\nu = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_1}, \quad [5]$$

který charakterizuje do určité míry změnu objemu zkoušeného materiálu jeho protažením.

Je prakticky nezávislý na teplotě.

Z hlediska deformačního chování nás především zajímá změna délky zkoušeného tělesa během namáhání až do stadia jeho přetržení. Poměrná deformace se vyjadřuje zlomkem

$\frac{\Delta l}{l_0}$ , protažení v jakémkoliv stadiu měření nebo v okamžiku přetržení se vyjadřuje v %:

$$\varepsilon_1 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad [6]$$

Podobně jako mezní hodnota deformace- protažení při přetržení- tzv. tažnost. Tažnost je důležitou fyzikální veličinou z hlediska konstrukčních vlastností polymerů:

$$\varepsilon_t = \frac{l_t - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [7]$$

kde  $l_t$  je délka tělíska při přetržení.

### Lineární vztah napětí – deformace

Budeme-li protahovat tzv. ideálně elastický materiál v oblasti malých deformací, zjistíme, že poměr mezi vzrůstajícím napětím  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$  a vzniklou příslušnou deformací  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$  je mezi jednotlivými a dvojicemi konstantní.

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} = konst. \quad [8]$$

Konstantu úměrnosti mezi napětím a deformací nazýváme modulem pružnosti E a vztah Hookovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad [9]$$

Modul E není u ideálně elastického tělesa závislý na velikosti použité deformace. Nezávisí ani na čase, to znamená, že deformace vyvolaná působením určitého napětí vznikne okamžitě a s časem se již nemění. Podobně napětí vzniklé v důsledku deformace tělesa se ustaví okamžitě a zůstává stále stejné. Je proto jedno, jakou rychlostí deformujeme na

předem zvolenou hodnotu a změříme k tomu potřebné napětí nebo působíme-li určitým napětím a měříme výslednou deformaci.

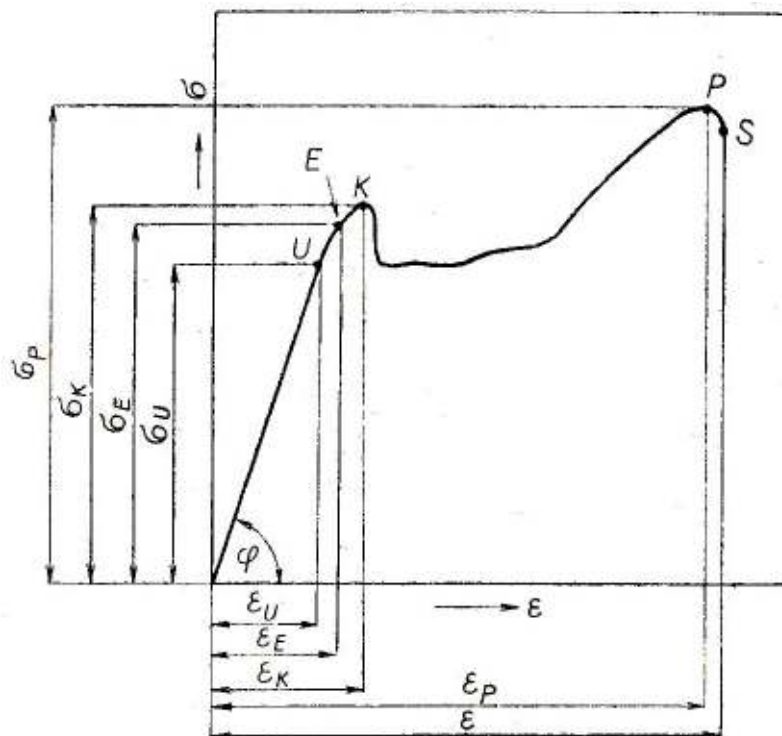
V grafu napětí- deformace je modul  $E$  dán hodnotou směrnice jednotlivých přímk. Čím je přímka strmější, tím je zapotřebí k určitému jednotkovému protažení větší napětí, materiál je soudržnější a tužší. Modul pružnosti se stanovuje z tahových křivek jen u takových materiálů kde lze příslušný úsek napětí a deformace v lineární části křivky přesně odečíst:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \operatorname{tg}\alpha . \quad [10]$$

### Nelineární vztah napětí- deformace

Většina tuhých polymerů vykazuje již od samého počátku nelineární průběh deformace. Je-li zakřivení velmi malé pak lze počítat se zdánlivě lineárním průběhem a vyhodnotit graficky zdánlivý modul pružnosti  $E_z$ . [1]

### Pracovní diagram tahové zkoušky (obr.8)



Obr. 8. Pracovní diagram tahové zkoušky

Na křivce pracovního diagramu lze vyznačit několik důležitých bodů:

U-mez úměrnosti  $\sigma_U$

E-mez pružnosti  $\sigma_E$

K-mez kluzu  $\sigma_K$

P-mez pevnosti  $\sigma_P$

S-napětí při přetržení

Bodům odpovídají hodnoty tažnosti  $\varepsilon_E, \varepsilon_U, \varepsilon_L, \varepsilon_P$

*Mez úměrnosti-*  $\sigma_U$ - mezní napětí v tahu, pro které platí úměrnost mezi napětím a celkovou deformací. Pro mez úměrnosti platí Hookův zákon

*Mez pružnosti-*  $\sigma_E$ - po překročení meze úměrnosti vzrůstá deformace zkušební tělesa rychleji než příslušné napětí. Přestane-li v určitém okamžiku napětí působit, deformace okamžitě zcela nevymizí. Působí-li napětí ještě delší dobu, dochází k částečné plastické, dokonale nevratné deformaci

*Mez kluzu-*  $\sigma_K$ - nejmenší napětí, při kterém nastávají podstatné trvalé deformace. Lze ji vyjádřit rovnicí:

$$\sigma_K = \frac{P_K}{F_0} \quad [11]$$

Kde  $P_K$  je zatížení na mezi kluzu a  $F_0$  je původní průřez měřené části zkušební tělesa

*Mez pevnosti v tahu-*  $\sigma_P$ - zvětšuje-li se napětí nad mez kluzu, zkušební těleso se přetrhne.



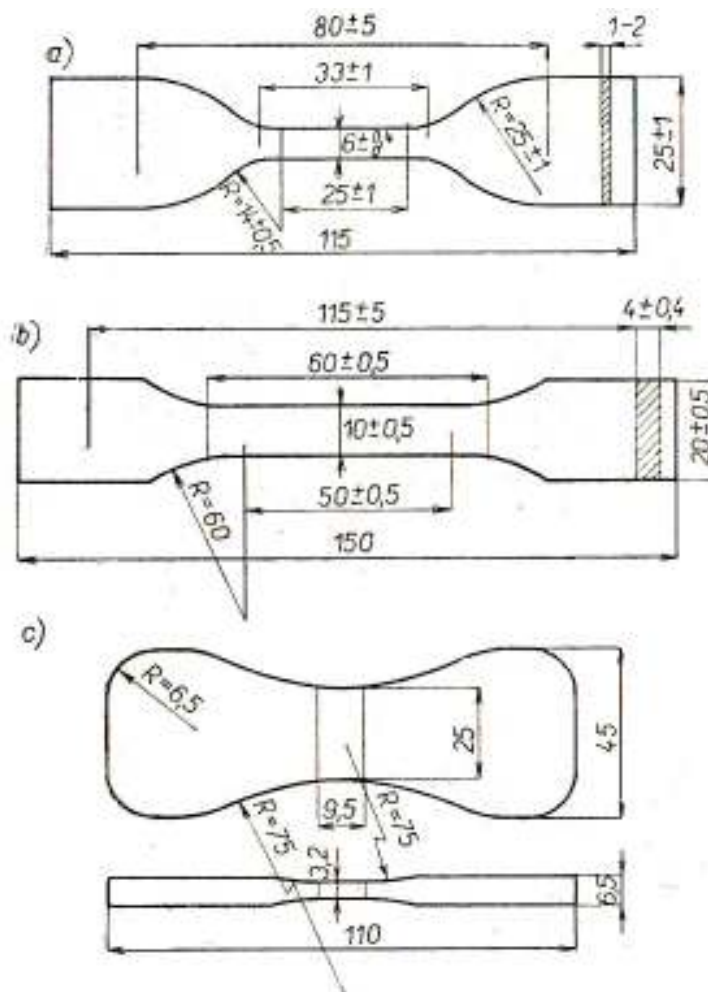
Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku

Jsou navrženy tři typy zkušebních těles. Liší se od sebe jak rozměry, tak i tvarem.

První typ (*obr.9a*) se připravuje vysekáváním nožem, jehož ostří je zabroušeno do úhlu  $15^\circ$ . Používá se ho pro měkčené plastické hmoty nebo pro plastické hmoty s velkou tažností.

Druhý typ (*obr.9b*) se připravuje strojním obráběním. Tloušťka je dána tloušťkou desky, nemá však být větší než 10mm. Zkušební tělesa připravovaná vstřikováním mají rozměry stejné, ale tloušťka má být 4mm. Používá se pro materiály střední tažnosti

Třetí typ se připravuje lisováním. Jejich tvar a rozměry jsou na (*obr.9c*). Připravují se z skelných laminátů nebo z plastických kůží s podkladem.[3]

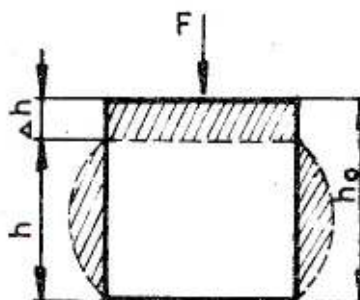


Obr. 9. Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku

## 5.2 Tlakové zkoušky

Chování polymerů vůči tlaku se většinou odhaduje z pevnosti, stanovené tahovou zkouškou. V praxi se vyskytuje většinou dlouhodobé tlakové zatížení, při uchycení polymerních materiálů tažením šrouby nebo v případě ukládání přepravek na sebe.

Z hlediska způsobu deformace je tlaková zkouška opakem zkoušky tahové. Tvarový faktor zkušebních těles se uplatňuje však zcela jinak. Stlačování zkušebního tělesa je na *obr.10*.

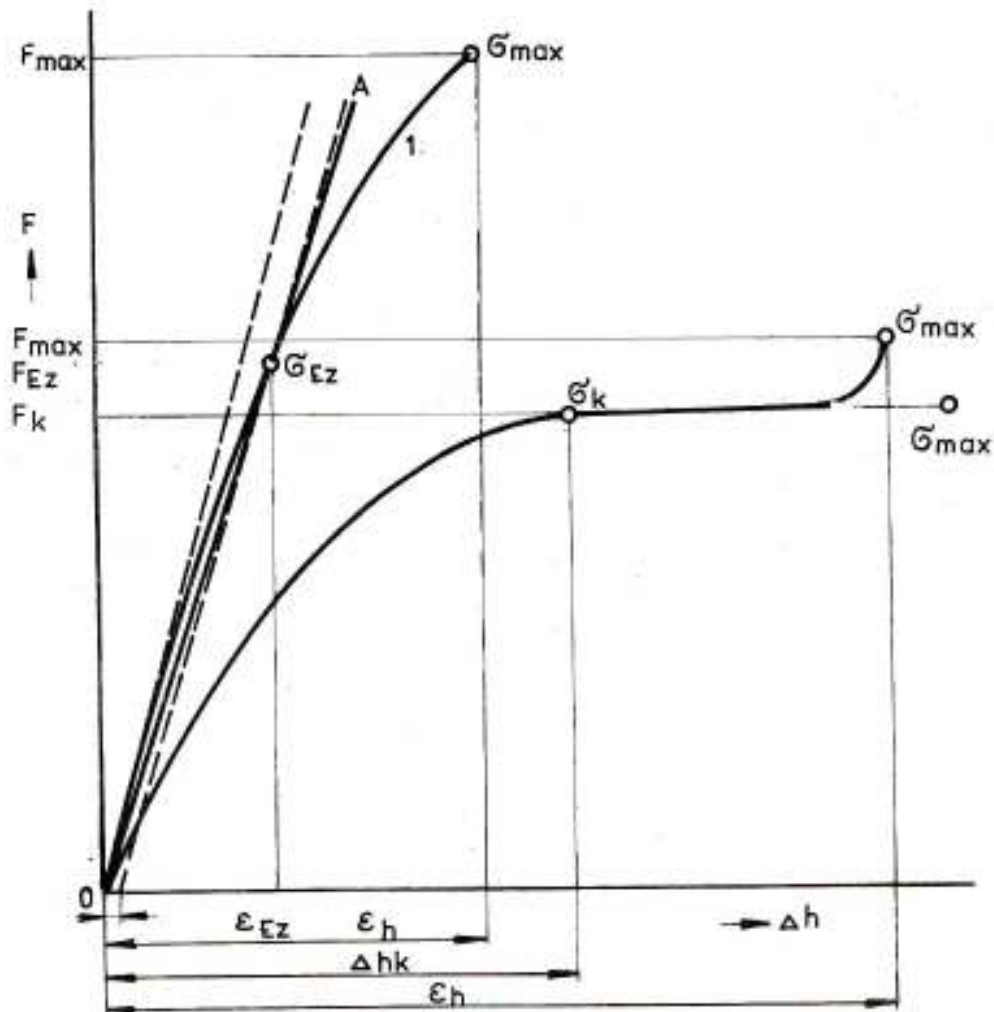


*Obr. 10. Stlačování zkušebního tělesa*

U tuhých, tvrdých a křehkých materiálů probíhá deformace dle křivky 1 (*obr.11*), kdy stoupá napětí v tlaku celkem rovnoměrně až do meze pevnosti, která je i destrukční mezí. Vzhledem k odlišnému deformačnímu mechanismu se nevyskytuje téměř vůbec u polymerů lineární hookovské chování.

Překročí-li napětí mez pevnosti, dojde k roztříštění nebo pomalejšímu rozdrčení materiál. Často dochází k výskytu trhlin na povrchu zkušebního tělesa, aniž by došlo k velké deformaci a byla porušena celková soudržnost. Způsob lomu závisí na struktuře polymerů.

U houževnatých, měkčích plastomerních materiálů probíhá deformace dle křivky 2 (*obr.11*) Méně strmější začátek ukazuje na menší tuhost, po překročení určité hranice začínají plastické deformace, zkušební těleso se deformuje, aniž dochází k viditelné destrukci. Zkušební těleso je prostoupeno mikrotrhlinami, které vznikají přemísťováním materiálu. Tlakové vlastnosti jsou konstrukčně zajímavé až do meze kluzu, která se staví podobně jako u tahových zkoušek jako napětí při smluvní hodnotě deformace.



Obr. 11. Pracovní diagram tlakové zkoušky

### 5.3 Ohybové zkoušky

Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro ty polymerní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Jsou to nejen nosníky, ale např. obkladový materiál ve stavebnictví, střešní krytiny apod. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti  $E$  u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek.

Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové. Při dodržení určitých podmínek je neutrální vrstva uprostřed průřezu s maximální napětí na povrchových nejvzdálenějších vrstvách. Maximální napětí se určí pomocí rovnic:

$$\sigma_l = \frac{M_0 \cdot h_1}{I}, \sigma_h = \frac{M_0 \cdot h'}{I}, \quad [12]$$

Kde -  $M_0$  je ohybový moment,

-  $I$  je moment setrvačnosti plochy průřezu zkušebního tělesa vzhledem k neutrální ose

-  $h_1$  je tloušťka materiálu v tahové oblasti od neutrální osy

-  $h'$  je tloušťka materiálu v tlakové oblasti

Dosazením poměru  $\frac{I}{h_1} = W$ , kde  $W$  je modul průřezu do rovnic pro maximální napětí

vychází pro napětí v ohybu:

$$\sigma_y = \frac{M_0}{W}. \quad [13]$$

Pro určování ohybových zkoušek se používá jako zkušební tělesa nosníku ve tvaru trámce umístěných na dvou podpěrách, vzdálených od sebe ve vzdálenosti  $l$ . Síla způsobující průhyb působí uprostřed mezi podpěrami, nebo je rozdělena na dvě stejné síly  $F/2$  působící v určité vzdálenosti podpěr, která se používá pro stanovení ohybových vlastností u vzorků malých rozměrů

## 5.4 Tvrdoštní zkoušky

Obecně je tvrdost fyzikální pojem pro odpor materiálů, kterým se brání proti vniknutí jiného, tvrdšího tělesa.

Polymerní materiály jsou houževnaté, v případě pryže i pružné, jejich povrchy se více nebo méně deformují. Tvrdoštní zkoušky se proto vyvinuly v měření odporu celého objemu proti vtlačování tvrdých těles definovaných tvarů. Při měření tvrdosti kovů, které jsou plastické, se vyhodnocuje tvrdost podle velikosti stopy, kterou čidlo na povrchu zanechalo. Vzhledem k viskoelastickému chování polymerů nelze u nich měřit stopu, ale rovnovážnou hloubku vniknutí čidla při určité konstantní síle vtlačování.

Při odporu celého objemu je tvrdost vyjádřením tuhosti a u některých metod jsou dosahovány dobré korelace mezi tvrdostí a modulem pružnosti. Protože pryž má značně nižší modul a rozdílné deformační vlastnosti, jsou konstruovány zvlášť přístroje na stanovení tvrdosti pryže a jiné pro měření tuhých sklovitých polymerů.

Podle tvaru čidla se ustálily následující metody měření tvrdosti:

1. kuličkou nebo tyčkou s kulovým zakončením
2. kuželem nebo jehlanem
3. komolým kuželem.

Při posuzování určitých hodnot tvrdosti různými metodami je třeba si uvědomit, že hodnoty tvrdosti jsou naměřená a srovnatelná čísla pro zcela určité přístroje a smluvní postupy.[1]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem této bakalářské práce je, jak již bylo vícekrát v předchozích částech avizováno, zjištění změny mechanických vlastností polymerních materiálů v závislosti na teplotě. Budou prošetřeny tyto mechanické charakteristiky: E- modul pružnosti,  $\sigma_p$ - mez pevnosti a  $\varepsilon_p$ - poměrné prodloužení při mezi pevnosti.

V první fázi praktické části bylo provedeno vstřikování zkušebních tělísek na vstřikovacím stroji ARBURG 420 C z dvou materiálů, a to amorfního polystyrenu a semikrystalického polypropylenu. Po výrobě zkušebních tělísek byla provedena zkouška na tah na univerzálním trhacím stroji Zwick 145 665 za normální teploty. Následně byly vzorky podrobeny ohřevu v teplotní komoře Zwick W91255 a na zahřátých vzorcích byly opětovně provedeny další tahové zkoušky.

V závěrečné části byly vyhodnoceny výsledky měření pro oba materiály.

## 7 POUŽITÉ MATERIÁLY

Oba dva materiály, jak polypropylen tak polystyren, jsou podrobně popsány v teoretické části bakalářské práce. Zde pouze uvádím použité typy a jejich vlastnosti.

### 7.1 Polypropylen TATREN TI 924

Tabulka 1. Základní vlastnosti Polypropylenu TATREN TI 924

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	0,9	g/cm <sup>3</sup>
Index toku taveniny (230 °C/21,6 N)	30	g/10 min
Mez kluzu	28	Mpa
Prodloužení na mezi kluzu	11	%
Modul pružnosti v tahu	1200	Mpa
Modul pružnosti v ohybu	1100	Mpa
Vrubová houževnatost Charpy	2	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí podle Vicata	149	°C

### 7.2 Polystyren KRASTEN

Tabulka 2. Základní vlastnosti Polystyrenu KRASTEN

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	1,04	g/cm <sup>3</sup>
Index toku taveniny (200 °C/50 N)	6-7	g/10 min
Mez kluzu	30	Mpa
Prodloužení na mezi kluzu	40	%
Modul pružnosti v tahu	2100	Mpa
Modul pružnosti v ohybu	40	Mpa
Vrubová houževnatost Charpy	100	kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí podle Vicata	94	°C



## 8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ

### 8.1 Vstřikovací stroj ARBURG 420 C

Vstřikovací stroj ARBURG 420 C (*Obr.12*) je určen k univerzálnímu řešení úkolu v oblasti vstřikování a pro speciální oblasti zpracování plastů. Díky velkému spektru použití ho lze přizpůsobit požadavkům a nárokům na něj kladeným. ARBURG 420 C je vybaven řídicím systémem zvaným SELOGICA. Jedná se o 32 bitový multiprocesorový řídicí systém, který je vybaven efektivním grafickým rozhraním a umožňuje tak tomuto stroji lehkou a jednoduchou ovladatelnost.



*Obr. 12. Vstřikovací stroj Arburg 420C*

Technické specifikace:

Uzavírací síla: 1000 kN	Výška formy: min. 250 mm
Upínací deska: 605 x 605 mm	Objem dávky: 182 cm <sup>3</sup>
Účinná délka šneku: 20 L/D	Čas otváracího cyklu: 2,0 – 329 s – mm
Otevírací síla: max. 35/350 kN	Vzdálenost mezi sloupky: 420 x 420 mm
Síla vyhazovacích kolíků: max. 40 kN	Průměr šneku: 40 mm
Tah šneku: max. 145 mm	
Rychlost toku taveniny: max. 128/168/212 cm <sup>3</sup> /s	
Řízení energie vstřikovacího čerpadla: 22 kW	

## 8.2 Teplotní komora Zwick Roell W91255

Standardní teplotní komory, osvědčeny a testovány ve Zwick Roell kvalitě, byly zkonstruovány pro největší užívané rozmezí teplot. Jsou úsporné a jsou vybaveny vnitřním osvětlením, průmyslovým osvědčením Eurotherm kontroly a sériovým rozhraním pro komunikaci s testovacím PC.

Optimální přizpůsobení lokálním ověřovacím požadavkům může být dosaženo skrz stacionární umístění zařízení do testovacího stroje nebo připevněním na kolejnice. Připevnění na kolejnice umožňuje přisunutí a odsunutí teplotní komory do zkušební oblasti stroje Zwick.

Při použití optického extenzometru spolu s teplotní komorou je teplotní gradient velmi nízký díky plně zahřátému, průhlednému oknu.

Technická data

Teplotní rozmezí: -80 °C až + 250 °C	Čas ohřevu na +250 °C: < 30min
Maximální teplotní odchylka: ± 3,5 °C	Čas ochlazení na -60 °C: < 20 min
Vnější rozměry: 850x400x840 mm	Hmotnost: 90 kg



*Obr. 13. Teplotní komora Zwick Roell W91255*

### **8.3 Zkušební stroj Zwick Roell 145 665**

Pro realizaci zkoušky tahem byl použit zkušební stroj Zwick Roell 145 665 (*obr.14*), který je umístěn v laboratořích ÚVI Univerzity Tomáše Bati a je používán pro praktické testování vzorků. Zkušební stroj lze použít na zkoušky tahem, tlakem, ohybem i cyklické zkoušky míjivým zatížením. Součástí přístroje je osobní počítač s programem pro vyhodnocování dat o prováděné zkoušce.

Technické specifikace přístroje:

Maximální zkušební síla	20 kN
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg



Obr. 14. Zkušební stroj Zwick Roell 145 665

## 9 EXPERIMENT A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 9.1 Příprava zkušebních tělísek

Zkušební vzorky byly vyrobeny na vstřikovacím stroji ARBURG 420 C při použití jednonásobné formy. Dutina formy měla tvar předepsaný pro zkušební vzorek užívaný pro zkoušku na tah. Vzorky pro polypropylen i polystyren jsou uvedeny na *obr.15* a *obr.16*.



*Obr. 15. Zkušební vzorek PP*



*Obr. 16. Zkušební vzorek PS*

### 9.1.1 Parametry pro vstřikování

#### PS KRASTEN

*Výsledné nastavení stroje – hodnoty vypsáné ze vstřikovacího stroje:*

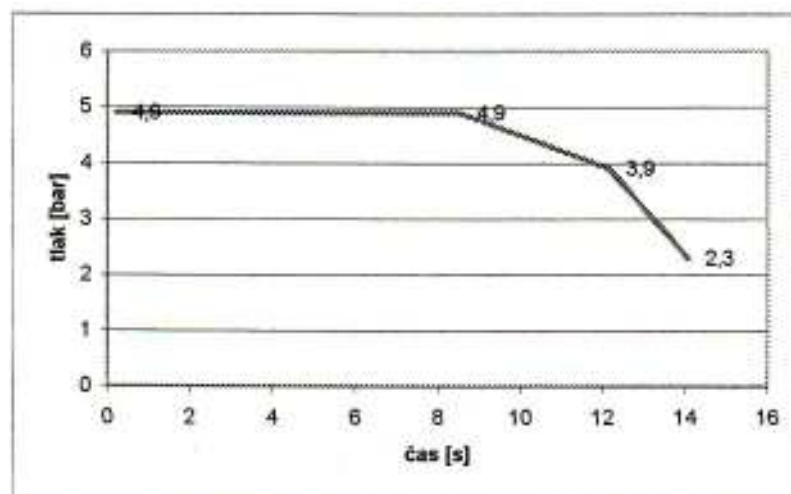
Vstřikovací rychlost: 112,2 mm/s

Dráha dávkování: 41,2 mm

Bod přepnutí: 25,8 mm

Tlak hydrauliky: 90,5 bar

Celkový čas dotlaku: 14,08 s



Obr. 17. Průběh dotlaku PS

*Nastavení teplot plastikační jednotky:*

Teplota pod násypkou:  $T_1=50\text{ °C}$

Teplotní pásmo 2:  $T_2=180\text{ °C}$

Teplotní pásmo 3:  $T_3=210\text{ °C}$

Teplotní pásmo 4:  $T_4=230\text{ °C}$

Teplotní pásmo 5:  $T_5=245\text{ °C}$

Teplotní na trysce:  $T_6=255\text{ °C}$

Doba chlazení: 28,411 s

**PP TATREN TI 924**

Výsledné nastavení stroje – hodnoty vypsané ze vstřikovacího stroje:

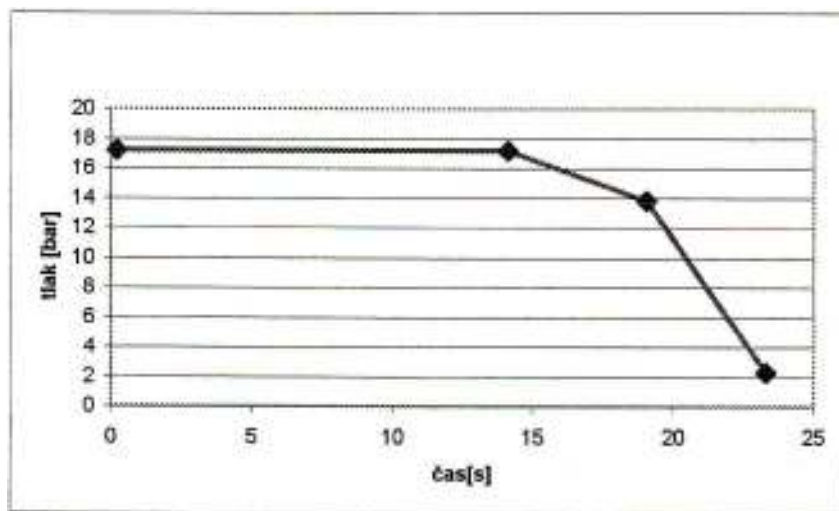
Vstřikovací rychlost: 46,1 mm/s

Dráha dávkování: 41,2 mm

Bod přepnutí: 24,3 mm

Tlak hydrauliky: 90,5 bar

Celkový čas dotlaku: 23,3 s



Obr. 18. Průběh dotlaku PP

Nastavení teplot plastikační jednotky:

Teplota pod násypkou:  $T_1=50\text{ °C}$

Teplotní pásmo 2:  $T_2=200\text{ °C}$

Teplotní pásmo 3:  $T_3=205\text{ °C}$

Teplotní pásmo 4:  $T_4=210\text{ °C}$

Teplotní pásmo 5:  $T_5=220\text{ °C}$

Teplotní na trysce:  $T_6=230\text{ °C}$

Doba chlazení: 2,43 s

## 9.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena na zkušebním stroji Zwick Roell 145 665 ve kterém došlo k zatěžování jednoosým tahem při teplotě 23°C. Při vyšších teplotách byly vzorky zkoušeny na trhacím stroji Instron 1122 vybaveným teplotní komorou, který poskytl Institut pro testování a certifikaci, ITC a.s. Zlín.

Zkouška byla rozdělena do dvou fází. V první fázi došlo ke změření modulu pružnosti za rychlosti posuvu čelistí 1 mm/min a v druhé fázi při rychlosti posuvu čelistí 50 mm/min probíhala zkouška až do přetržení vzorku. Zkouška se prováděla za normální teploty 23°C a dále pak docházelo k zahřívání testovacích vzorků na teplotu 40°C, 60°C a 80°C v teplotní komoře a následovala výdrž na dané teplotě 15 minut pro dokonalé prohřátí zkušební vzorku. Pro každý materiál bylo změřeno pět vzorků a z nich stanovena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.



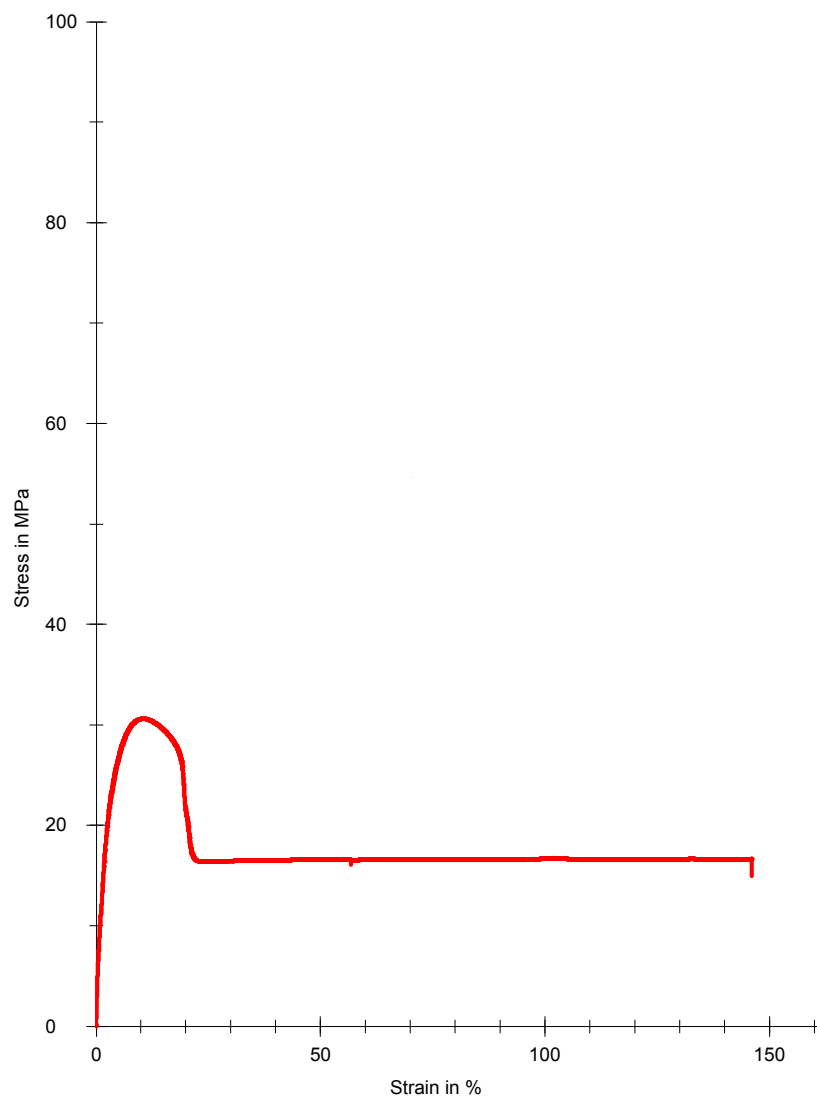
### 9.2.1 Polypropylen

Naměřené hodnoty pro teplotu 23 °C

Tabulka 3. Naměřené hodnoty PP pro teplotu 23°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_Z$ [%]
x	3,86	10,07	1254,04	30,46	6,03	10,04
s	0,01	0,01	41,54	1,29	0,07	0,11

Tahový diagram pro teplotu 23°C



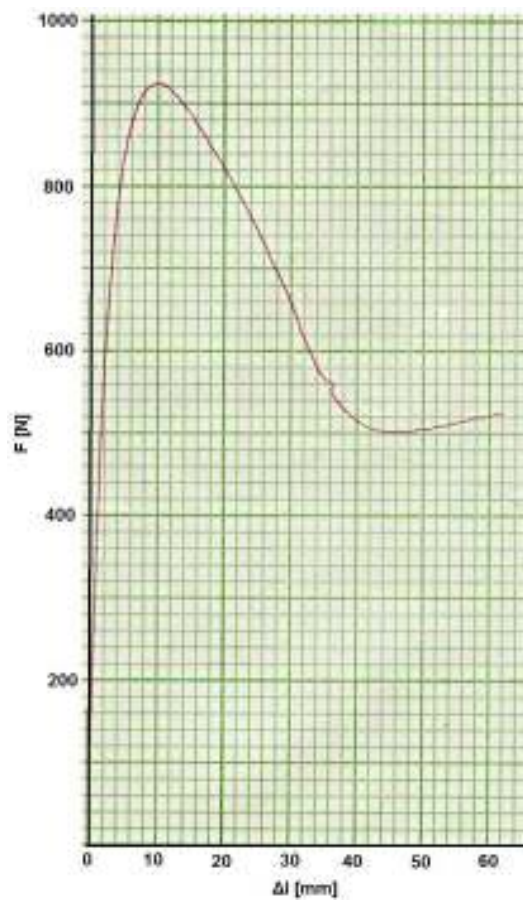
Obr. 19. Tahový diagram PP pro teplotu 23 °C

Naměřené hodnoty pro teplotu 40 °C

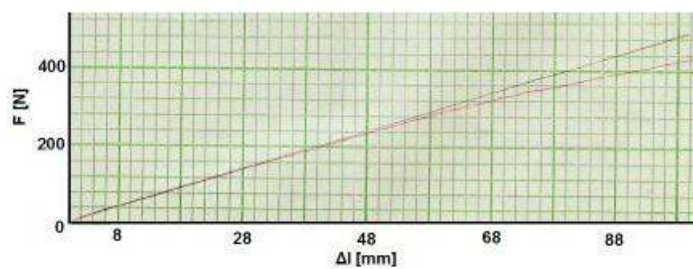
Tabulka 4. Naměřené hodnoty PP pro teplotu 40°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_z$ [%]
x	3,86	10,07	1254,04	30,46	6,03	10,04
s	0,01	0,01	41,54	1,29	0,07	0,11

Tahový diagram pro teplotu 40°C



Obr. 20. Tahový diagram PP pro teplotu 40°C



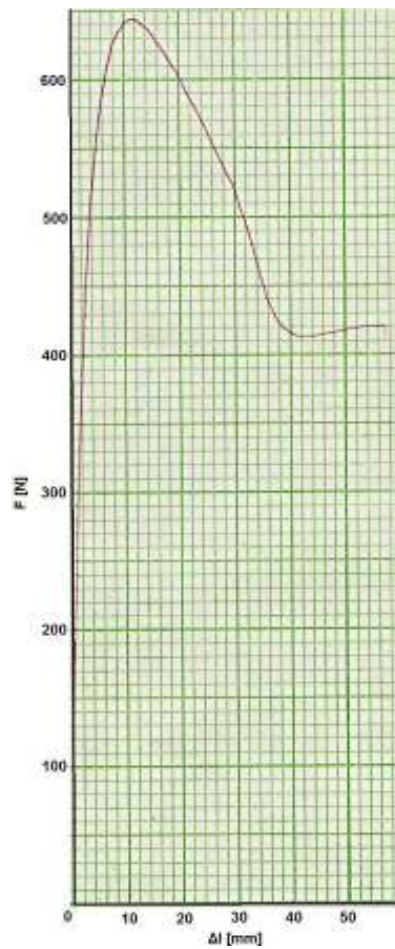
Obr. 21. Tahový diagram PP pro teplotu 40°C-modul

Naměřené hodnoty pro teplotu 60 °C

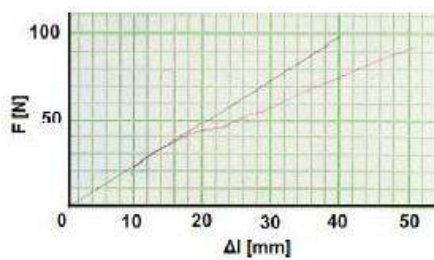
Tabulka 5. Naměřené hodnoty PP pro teplotu 60°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_z$ [%]
x	3,86	10,07	934,50	17,01	11,50	11,50
s	0,01	0,01	60,10	0,51	0,71	0,71

Tahový diagram pro teplotu 60°C



Obr. 22. Tahový diagram PP pro teplotu 60°C



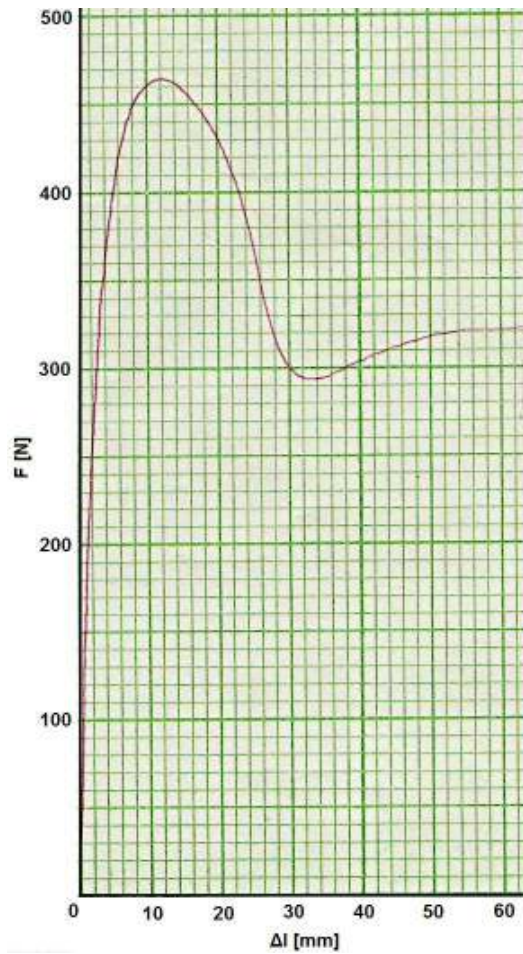
Obr. 23. Tahový diagram PP pro teplotu 60°C-modul

Naměřené hodnoty pro teplotu 80 °C

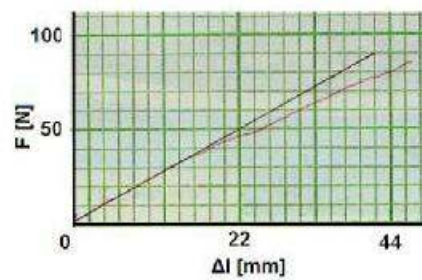
Tabulka 6. Naměřené hodnoty PP pro teplotu 80°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_z$ [%]
x	3,88	10,06	546,50	12,07	12,25	11,75
s	0,01	0,02	30,41	0,18	0,35	0,35

Tahový diagram pro teplotu 80°C



Obr. 24. Tahový diagram PP pro teplotu 80°C



Obr. 25. Tahový diagram PP pro teplotu 80°C-modul

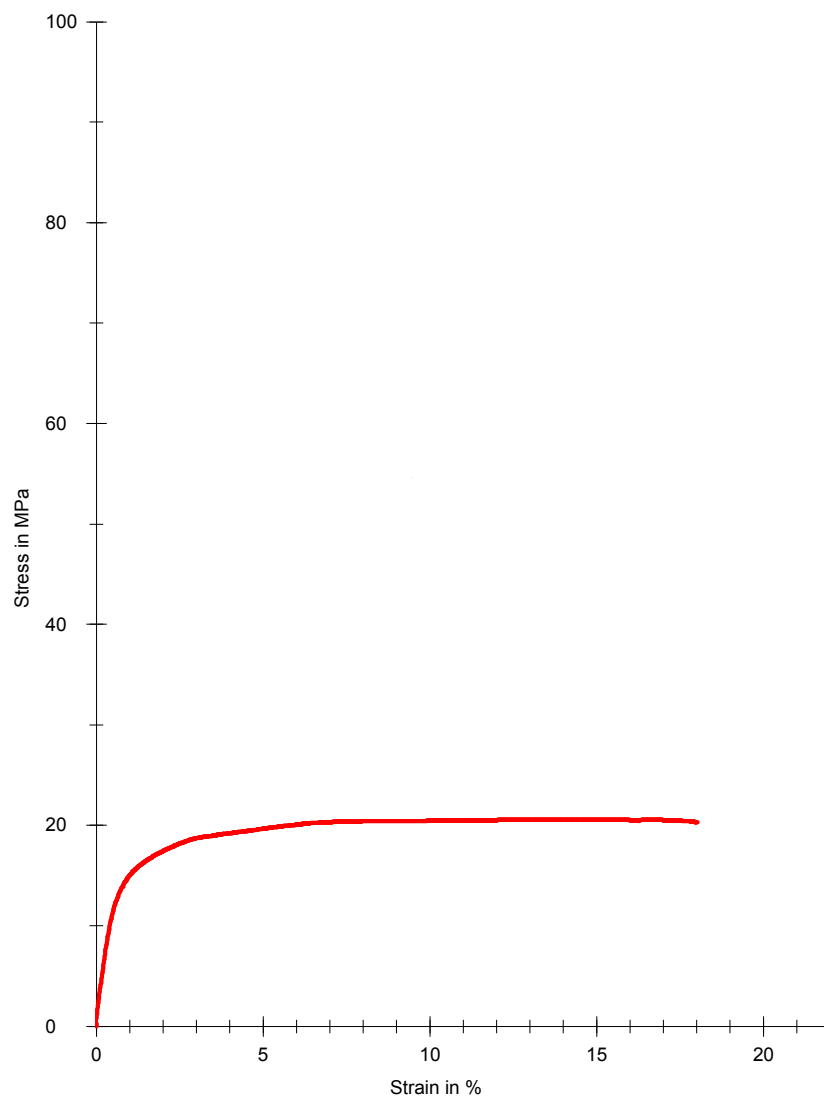
## 9.2.2 Polystyren

### Naměřené hodnoty pro teplotu 23 °C

Tabulka 7. Naměřené hodnoty PS pro teplotu 23°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_Z$ [%]
x	3,98	9,99	2375,39	20,61	3,11	15,52
s	0,01	0,01	91,99	0,09	0,32	1,63

### Tahový diagram pro teplotu 23°C



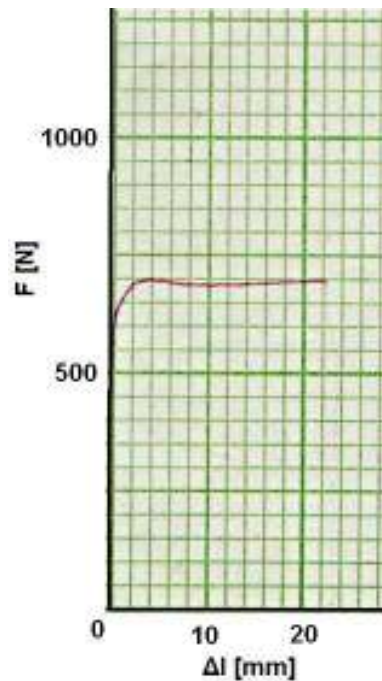
Obr. 26. Tahový diagram PS pro teplotu 23°C

Naměřené hodnoty pro teplotu 40 °C

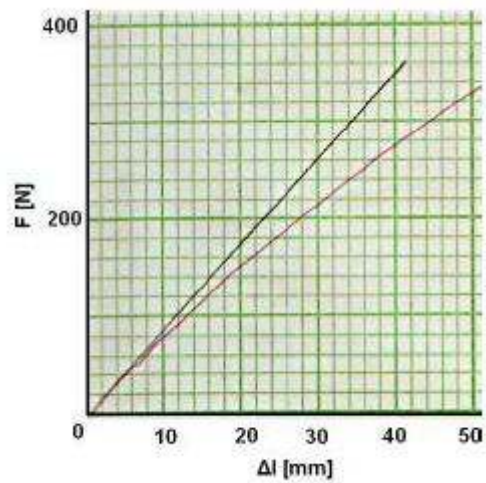
Tabulka 8. Naměřené hodnoty PS pro teplotu 40°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_z$ [%]
x	3,97	9,97	2098,00	17,25	4,50	4,50
s	0,01	0,01	247,49	0,35	0,71	0,71

Tahový diagram pro teplotu 40°C



Obr. 27. Tahový diagram PS pro teplotu 40°C

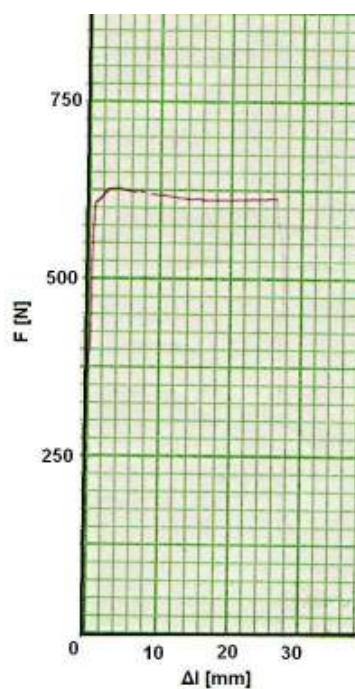


Obr. 28. Tahový diagram PS pro teplotu 40°C-modul

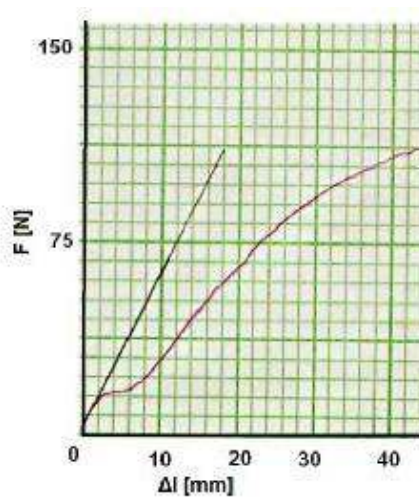
Naměřené hodnoty pro teplotu 60 °C

Tabulka 9. Naměřené hodnoty pro PS teplotu 60°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_z$ [%]
x	3,99	9,98	1635,00	15,94	3,50	3,50
s	0,01	0,01	207,89	0,44	0,71	0,71

Tahový diagram pro teplotu 60°C

Obr. 29. Tahový diagram PS pro teplotu 60°C



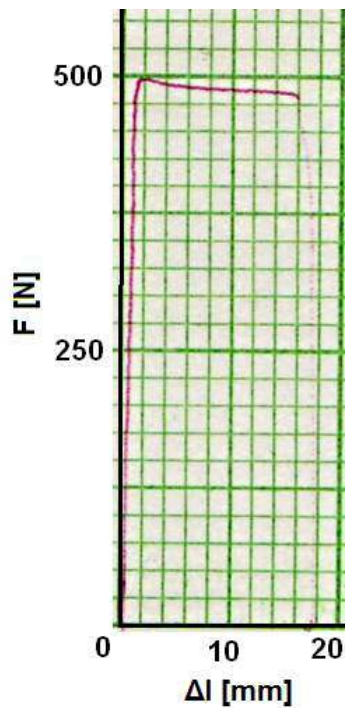
Obr. 30. Tahový diagram PS pro teplotu 60°C-modul

Naměřené hodnoty pro teplotu 80 °C

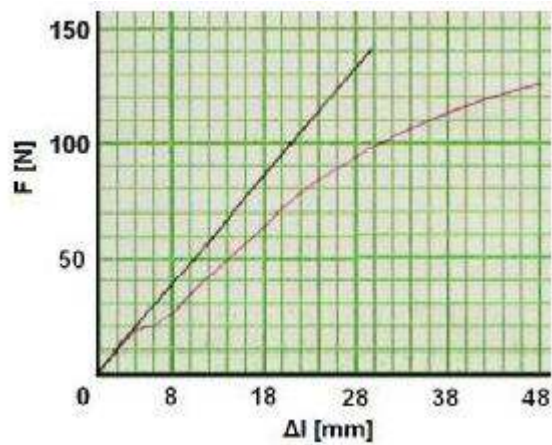
Tabulka 10. Naměřené hodnoty PS pro teplotu 80°C

Počet měření	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$\Delta l \sigma_p$ [mm]	$\varepsilon_z$ [%]
x	3,97	9,97	1319,50	12,25	1,25	1,50
s	0,01	0,01	98,29	0,35	0,35	0,71

Tahový diagram pro teplotu 80°C



Obr. 31. Tahový diagram PS pro teplotu 80°C



Obr. 32. Tahový diagram PS pro teplotu 80°C-modul



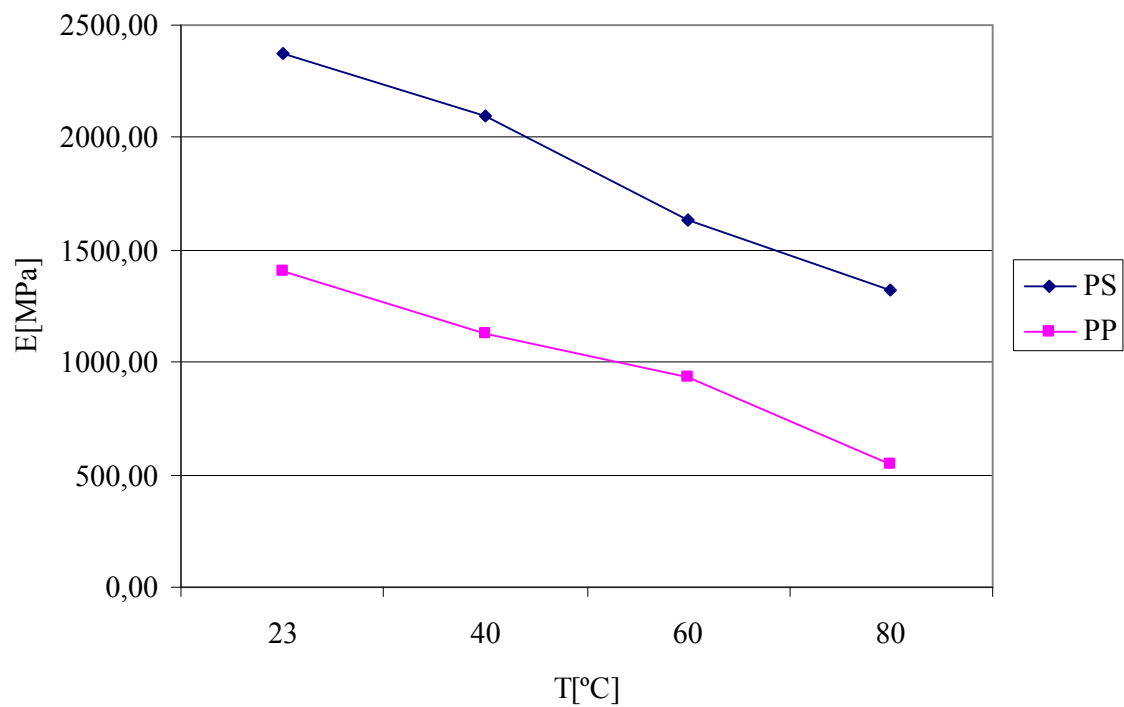
### 9.3 Diskuze k výsledkům

#### 9.3.1 Přehled výsledků modulu pružnosti v tahu v závislosti na teplotě

Tabulka 11. Hodnoty modulu pružnosti v tahu materiálů pro dané teploty

T[°C]	PP (E[MPa])	PS (E[MPa])
23	1407,14	2375,39
40	1130,00	2098,00
60	934,50	1635,00
80	546,50	1319,50

Závislost modulu pružnosti na teplotě zkoušených materiálů



Obr. 33. Graf závislosti modulu pružnosti na teplotě

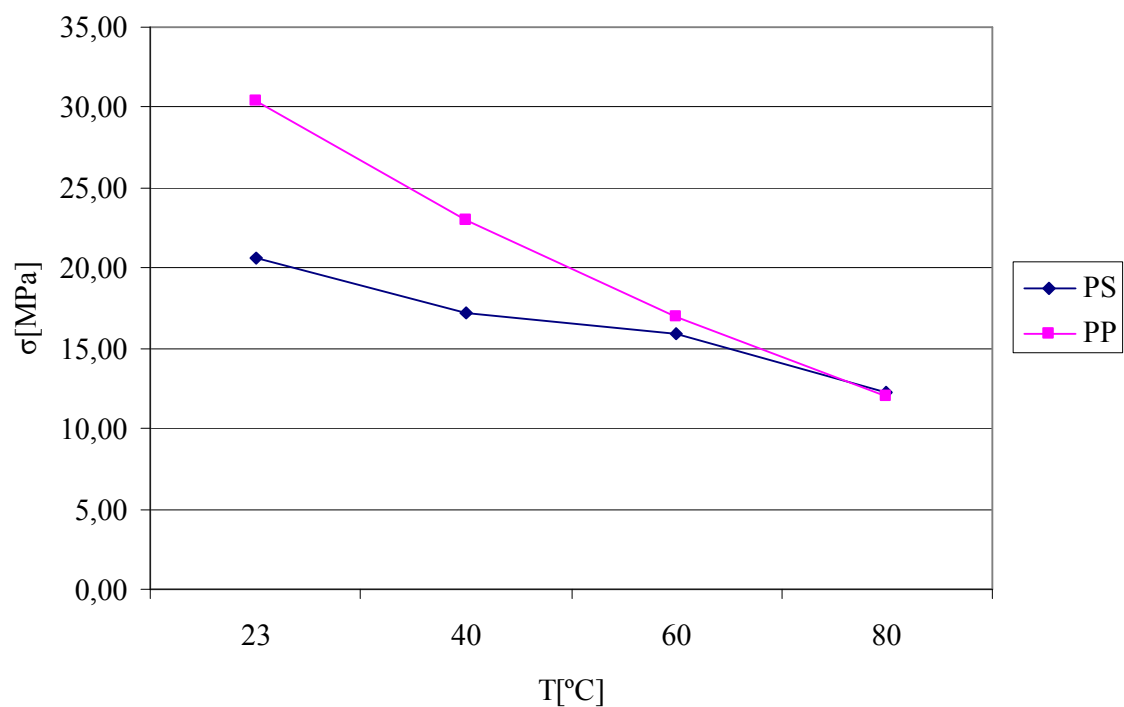
Z naměřených hodnot (tab.11) a grafu (obr. 27) vyplývá, že za zvýšených teplot dochází ke snižování modulu pružnosti.

### 9.3.2 Přehled výsledků meze pevnosti v tahu v závislosti na teplotě

Tabulka 12. Hodnoty meze pevnosti v tahu materiálů pro dané teploty

T[°C]	PP ( $\sigma$ [MPa])	PS ( $\sigma$ [MPa])
23	30,46	20,61
40	22,96	17,25
60	17,01	15,94
80	12,07	12,25

Závislost meze pevnosti na teplotě zkoušených materiálů



Obr. 34. Graf závislosti meze pevnosti na teplotě

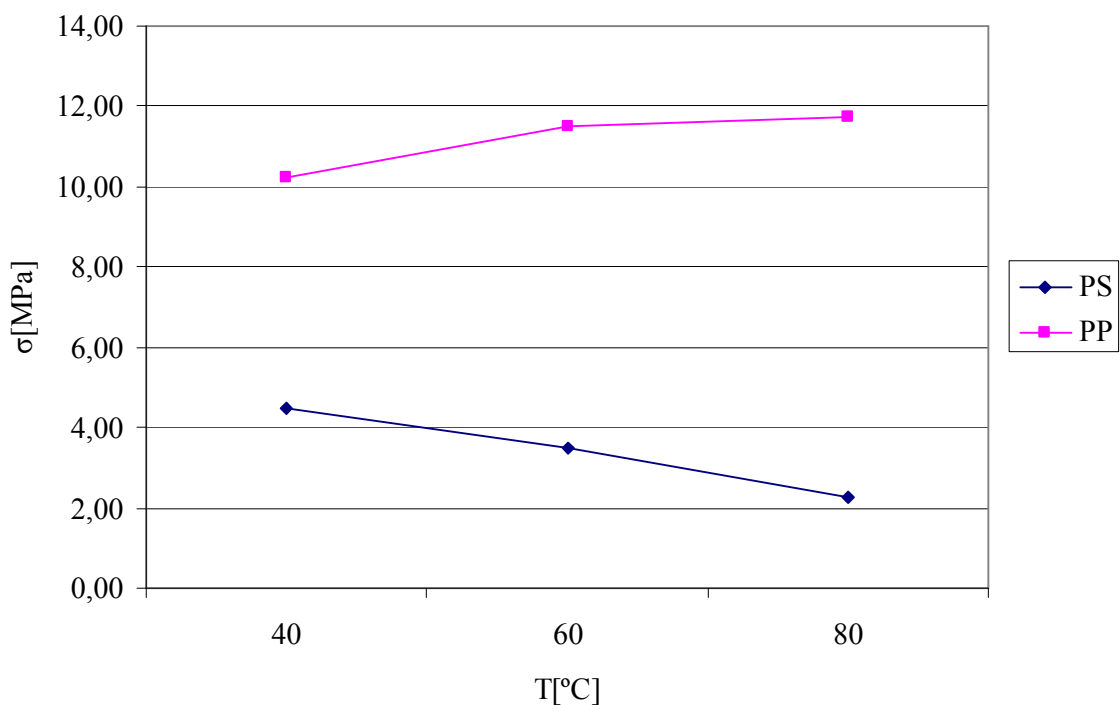
Z naměřených hodnot (tab.12) a grafu (obr. 28) vyplývá, že za zvýšených teplot dochází ke snižování meze pevnosti. U PP se jedná asi o 60% pokles pevnosti a u PS přibližně o 40%.

### 9.3.3 Přehled výsledků poměrného prodloužení v závislosti na teplotě

Tabulka 13. Hodnoty poměrného prodloužení materiálů pro dané teploty

T[°C]	PP ( $\epsilon_z$ [%])	PS ( $\epsilon_z$ [%])
40	10,25	4,50
60	11,50	3,50
80	11,75	2,25

Závislost poměrného prodloužení na teplotě zkoušených materiálů



Obr. 35. Graf závislosti poměrného prodloužení na teplotě

Z naměřených hodnot (tab.13) a grafu (obr. 29) vyplývá, že za zvýšených teplot dochází ke zvyšování poměrného prodloužení. Pouze u PS hodnoty poměrného prodloužení klesají. Pro dostatečné posouzení, zadli se nejedná pouze o výchylku by bylo potřeba znát hodnoty poměrného prodloužení ve větším rozsahu teplot.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá studiem mechanického chování polymerů (polystyrenu a polypropylenu) v závislosti na teplotě.

V teoretické části jsem se zabýval základním rozdělením polymerních materiálů, jejich vlastnostmi, strukturou a tepelnými vlastnostmi, které ovlivňují jejich chování. Popsal jsem nejčastěji používané zkoušky mechanických vlastností, uvedl jejich rozdělení, samotné provádění a přípravou zkušebních tělísek.

V praktické části jsou popsány použítá zařízení a typy polymerů, které jsme použili pro studium dané problematiky. Dále pak následují naměřené hodnoty, které byly získány zkouškou tahem pro čtyři stoupající hodnoty teplot spolu s tahovými diagramy pro oba polymery.

Výsledky měření podle předpokladů potvrzují to, že se stoupající teplotou klesají mechanické vlastnosti polystyrenu i polypropylenu a je proto důležité zvažovat jejich použití jako konstrukčních polymerů obezřetně, aby nedocházelo k nepříjemným překvapením při provozním zatížení.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Schätz, Miroslav. *Zkoušení polymerů*, Praha, VŠCHT, 1988
- [2] Jarušek, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*, Pardubice, VŠCHT, 1984
- [3] Rybníkář, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*, Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 1965
- [4] Miloš Sova, Josef Krebs a kolektiv autorů. *Termoplasty v praxi*, Praha, Verlag Dashöfer, 2003
- [5] Šuba, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

a	tloušťka vzorku [mm]
$A_0$	průřez hranolu [mm]
b	šířka vzorku [mm]
$b_0$	šířka hranolu [mm]
E	modul pružnosti [MPa]
$E_z$	zdánlivý modul pružnosti [N /mm <sup>2</sup> ]
F	síla [N]
$F_0$	původní průřez měřené součásti [mm <sup>2</sup> ]
$h'$	tloušťka materiálu v tlakové oblasti [mm]
$h_0$	výška hranolu [mm]
$h_1$	tloušťka materiálu v tahové oblasti od neutrální osy [mm]
I	moment setrvačnosti plochy průřezu tělesa vzhledem k neutrální ose [kg.m <sup>2</sup> ]
l	délka tělesa po zatížení [mm]
$l_0$	délka tělesa [mm]
$l_t$	délka při přetržení [mm]
$M_0$	ohybový moment [N.mm]
$P_k$	zatížení na mezi kluzu [N]
PP	polypropylen
PS	polystyren
s	směrodatná odchylka
W	modul průřezu [mm <sup>3</sup> ]
$\Delta b$	skutečné zkrácení základny [mm]
$\Delta h$	skutečné zkrácení výšky hranolu [mm]
$\Delta l$	skutečné prodloužení [mm]

---

$\Delta l$	$\sigma_p$	protažení při maximálním napětí
$\varepsilon_l$		poměrné prodloužení [mm]
$\varepsilon_b$		poměrné zkrácení základny [mm]
$\varepsilon_h$		poměrné zkrácení výšky hranolu [mm]
$\varepsilon_t$		prodloužení při přetržení [mm]
$\varepsilon_z$		poměrná deformace při maximálním napětí[%]
$\sigma$		napětí [MPa]
$\sigma_p$		protažení při maximálním napětí [mm]
$\nu$		Poissonovo číslo [-]
$\bar{x}$		průměrná hodnota měření



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1. Schéma větví stereoizomerů polypropylénu .....</i>	15
<i>Obr. 2. Struktura a závislost mechanických vlastností na teplotě pro termoplasty.....</i>	20
<i>Obr. 3. Struktura a závislost mechanických vlastností na teplotě pro eleastomery .....</i>	20
<i>Obr. 4. Struktura a závislost mechanických vlastností na teplotě pro reaktoplasty.....</i>	21
<i>Obr. 5. Závislost krátkodobé meze pevnosti na teplotě .....</i>	21
<i>Obr. 6. Závislost modulu pružnosti a Poissonova čísla na teplotě.....</i>	22
<i>Obr. 7. Jednosměrná deformace tělesa.....</i>	29
<i>Obr. 8. Pracovní diagram tahové zkoušky.....</i>	31
<i>Obr. 9. Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku .....</i>	33
<i>Obr. 10. Stlačování zkušebního tělesa .....</i>	34
<i>Obr. 11. Pracovní diagram tlakové zkoušky.....</i>	35
<i>Obr. 12. Vstřikovací stroj Arburg 420C .....</i>	41
<i>Obr. 13. Teplotní komora Zwick Roell W91255 .....</i>	43
<i>Obr. 14. Zkušební stroj Zwick Roell 145 665 .....</i>	44
<i>Obr. 15. Zkušební vzorek PP .....</i>	45
<i>Obr. 16. Zkušební vzorek PS.....</i>	45
<i>Obr. 17. Průběh dotlaku PS.....</i>	46
<i>Obr. 18. Průběh dotlaku PP .....</i>	47
<i>Obr. 19. Tahový diagram PP pro teplotu 23 °C.....</i>	49
<i>Obr. 20. Tahový diagram PP pro teplotu 40°C.....</i>	50
<i>Obr. 21. Tahový diagram PP pro teplotu 40°C-modul.....</i>	50
<i>Obr. 22. Tahový diagram PP pro teplotu 60°C.....</i>	51
<i>Obr. 23. Tahový diagram PP pro teplotu 60°C-modul.....</i>	51
<i>Obr. 24. Tahový diagram PP pro teplotu 80°C.....</i>	52
<i>Obr. 25. Tahový diagram PP pro teplotu 80°C-modul.....</i>	52
<i>Obr. 26. Tahový diagram PS pro teplotu 23°C .....</i>	53
<i>Obr. 27. Tahový diagram PS pro teplotu 40°C .....</i>	54
<i>Obr. 28. Tahový diagram PS pro teplotu 40°C-modul.....</i>	54
<i>Obr. 29. Tahový diagram PS pro teplotu 60°C .....</i>	55
<i>Obr. 30. Tahový diagram PS pro teplotu 60°C-modul.....</i>	55
<i>Obr. 31. Tahový diagram PS pro teplotu 80°C .....</i>	56

---

<i>Obr. 32. Tahový diagram PS pro teplotu 80°C-modul</i> .....	56
<i>Obr. 33. Graf závislosti modulu pružnosti na teplotě</i> .....	57
<i>Obr. 34. Graf závislosti meze pevnosti na teplotě</i> .....	58
<i>Obr. 35. Graf závislosti poměrného prodloužení na teplotě</i> .....	59

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 Základní vlastnosti Polypropylenu TATREN TI 924 .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 2 Základní vlastnosti Polystyrenu KRASTEN.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 3 Naměřené hodnoty PP pro teplotu 23°C .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 4 Naměřené hodnoty PP pro teplotu 40°C .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 5 Naměřené hodnoty PP pro teplotu 60°C .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 6 Naměřené hodnoty PP pro teplotu 80°C .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7 Naměřené hodnoty PS pro teplotu 23°C.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8 Naměřené hodnoty PS pro teplotu 40°C.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro PS teplotu 60°C.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 10 Naměřené hodnoty PS pro teplotu 80°C.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 11 Hodnoty modulu pružnosti v tahu materiálů pro dané teploty .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 12 Hodnoty meze pevnosti v tahu materiálů pro dané teploty.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 13 Hodnoty poměrného prodloužení materiálů pro dané teploty.....</i>	<i>59</i>