

# Hodnocení vlivu přepracování polymerního materiálu na jeho vlastnosti

Juraj Žilinčík

---

Bakalářská práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Juraj Žilinčík**  
Osobní číslo: **T11470**  
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Hodnocení vlivu přepracování polymerního materiálu na jeho vlastnosti**

### Zásady pro vypracování:

Polymerní materiály se zpracovávají převážně tvářením, kdy musí být za někdy i dost vysokých teplot převedeny do taveniny. Při některých technologiích, například jako je výtlačné vyfukování, tvoří dost velká část zpracované taveniny odpad, který je snaha znovu použít. Problém je, že při každém roztavení dochází k větší či menší degradaci. Úkolem této studie bude připravit si opakovaným tavením za podmínek podobných průmyslovému vytlačování vzorky z různých v praxi používaných systémů a ohodnotit pomocí sledování základních parametrů míru degradace.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Mleziva, J.; Šňupárek J.; **Polymery ? výroba, struktura, vlastnosti a použití, Sobotáles 2000, Praha; ISBN 80-85920-72-7**
2. Tomis, F.; **Plastikářská výroba, VUT Brno 1982; skripta**
3. **Zdroje z impaktovaných časopisů**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Dagmar Měřinská, Ph.D.**  
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **10. ledna 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2014**

Ve Zlíně dne 7. února 2014

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



  
Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ...Juraj Žilinčík..... Obor: ...B2808.....

## 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 užit 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 .28.5.2014.....



<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 nevděčně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledek obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy

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

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

<sup>21</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, ujde-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní díla).*

<sup>22</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 díla;*

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

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit 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 vynaložil, a to podle obzornosti 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**

Táto bakalárska práca sa zaoberá plastmi z hľadiska ich mechanických a štrukturálnych vlastností. Rozoberá dopad opakovaného teplotného namáhania na tieto vlastnosti materiálu.

Kľúčové slová:

Polymérny reťazec, štruktúra polyméru, plast, mechanické vlastnosti.

## **ABSTRACT**

This thesis slew plastics in terms of their mechanical and structural properties. It analyzes the impact of repeated thermal stress on these material properties.

Keywords:

Polymer chain structure of the polymer, plastic, the mechanical properties.

Týmto by som rád poďakoval vedúcej bakalárskej práce Pani doc. Ing. Dagmar Měřínskej, Ph.D. za dobré pracovné podmienky a usmerňovanie mojej vedeckej činnosti počas vypracovávania bakalárskej práce. Tiež chcem poďakovať Pani Ing. Alici Tesaříkovej za odbornú pomoc počas práce na praktickej časti bakalárskej práce.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia bakalárskej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

Poděkování, motto a čestné prohlášení, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG jsou totožné ve znění:

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 POLYMÉR</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDELENIE POLYMÉRNÝCH MATERIÁLOV .....	12
1.1.1 Podľa tvaru molekuly .....	12
1.1.2 Podľa polarity .....	13
1.1.3 Podľa molárnej hmotnosti .....	13
1.1.4 Podľa nadmolekulárnej štruktúry .....	14
1.1.5 Podľa teplotného chovania .....	15
1.1.6 Podľa pôvodu .....	15
1.1.7 Podľa aplikácie .....	16
1.2 MORFOLÓGIA POLYMÉROV .....	16
1.2.1 Amorfné .....	17
1.2.2 Semikryštalické .....	17
1.2.2.1 Monokryštál .....	18
1.2.2.2 Axialit .....	18
1.2.2.3 Dendrid .....	18
1.2.3 Sférolit .....	19
1.3 VPLYV KRYŠTALINITY NA VLASTNOSTI POLYMÉRU .....	20
<b>2 ÚNAVA A STÁRNUTIE MATERIÁLU VŠEOBECNE</b> .....	<b>21</b>
2.1 MECHANICKÉ CHOVANIE POLYMÉROV .....	21
2.1.1 Sklovitý stav .....	21
2.1.2 Prechodová oblasť .....	21
2.1.3 Kaučukovitý stav .....	22
2.2 ZÁKLADNÉ POJMY .....	23
2.3 DEGRADAČNÉ PROCESY .....	23
2.3.1 Termodegradácia .....	24
2.3.1.1 Termo-oxidácia .....	26
2.3.2 Fotodegradácia .....	26
2.3.3 Mechanická degradácia .....	27
2.3.4 Zmeny nadmolekulárnej štruktúry .....	27
2.4 MECHANICKÉ SKÚŠKY .....	28
2.4.1 Statická skúška ťahom .....	28
2.4.2 Skúšobné teleso .....	28
2.4.3 Výsledný diagram statickej skúšky ťahom .....	29
2.4.3.1 Napätie na medzi úmernosti .....	31
2.4.3.2 Napätie na medzi pružnosti .....	32
2.4.3.3 Napätie na medzi sklzu .....	32
2.4.3.4 Napätie na medzi pevnosti .....	32
2.4.4 Skúška rázom v ohybe .....	33
2.4.5 Skúška tvrdosti .....	34
2.4.5.1 Skúška podľa Brinella .....	34
2.4.5.2 Skúška tvrdosti podľa Vickersa .....	35
2.4.5.3 Skúška tvrdosti podľa Rockwella .....	36
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>37</b>



<b>3</b>	<b>NADPIS .....</b>	<b>38</b>
3.1	PODNADPIS.....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>
3.2	PODNADPIS.....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>
3.2.1	Podpodnadpis .....	<b>Chyba! Záložka nie je definovaná.</b>
<b>4</b>	<b>NADPIS .....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>
4.1	PODNADPIS.....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>	
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>48</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>48</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>	
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>	
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.</b>	

## ÚVOD

V dnešnej dobe je známe obrovské množstvo plastických látok avšak vo väčšej miere sa uplatňuje len niekoľko desiatok. Treba podotknúť, že 80% svetovej výroby zahŕňa len šesť druhov plastov a 70% samotnej výroby iba tri druhy, a to polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid. Množstvo druhov polymérov na trhu neustále narastá a to hlavne v dôsledku možnosti ich modifikácie na požadované vlastnosti a samotnou výrobou nových polymérnych látok. Tento nárast sortimentu je výhodný pre technický priemysel, kedy sa pri malej zmene ceny dosiahnu požadované vlastnosti.

Počas technologického procesu spracovania polymérnych materiálov ako je napríklad vstrekovanie, lisovanie, vyfukovanie, tvarovanie atď. vzniká veľké množstvo odpadového materiálu vo forme pretokov, častí výrobkov, ktoré sú počas následného spracovania odstránené od celku, prípadne zmätočných výrobkov. Tieto je možné spracovať spiatočne na granulát a znova v určitej miere použiť vo výrobe. V tomto prípade je možné si položiť otázku, koľko krát daný materiál vlastne prejde samotným procesom výroby a ako toto opakované namáhanie vplýva na jeho vlastnosti.

Polyméry rovnako ako iné materiály podliehajú procesu degradácie. Tento proces často nastáva už počas samotného spracovania, čo do istej miery ovplyvňuje životnosť a vlastnosti získaných výrobkov. Degradácia polyméru sa obvykle dokazuje zmenami molekulovej hmotnosti v dôsledku vystavenia polyméru vysokej teplote spracovania a s týmto procesom spojeného mechanického namáhania.

V tejto bakalárskej práci sú zhodnotené chovania vybraných materiálov počas procesu opakovaného namáhania vzhľadom na ich mechanické vlastnosti. Zistené hodnoty sú porovnávané s hodnotami udanými v materiálových listoch a vzájomne medzi sebou u každého materiálu samostatne.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 POLYMÉR

Polyméry vnímame ako systémy pravidelne sa opakujúcich navzájom chemicky pospájaných stavebných alebo monomérnych jednotiek takzvaných merov. Počet merov udáva polymeračný stupeň, v rozsahu 10 až  $10^6$ . Touto reťazovou štruktúrou sa polymérne materiály odlišujú od ostatných látok. Základ štruktúry polyméru tvorí atóm uhlíku, ktorý je schopný utvoriť štyri kovalentné väzby. Dlhá lineárna rada takto prepojených stavebných jednotiek môže byť niekedy prerušená, prípadne miestami vetvená. [1]

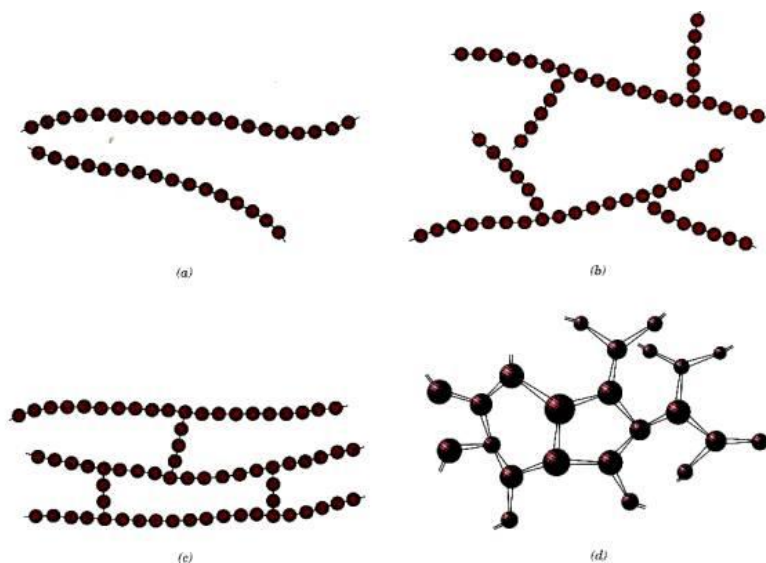
V minulosti sa za polyméry označovali výhradne makromolekulárne látky, v ktorých sa pravidelne opakovali štruktúrne jednotky. V dnešnej dobe do tejto skupiny bežne zahŕňame aj látky ako napríklad proteíny a nukleové kyseliny.

## 1.1 Rozdelenie polymérnych materiálov

### 1.1.1 Podľa tvaru molekuly

Tvar molekuly je udávaný funkčnosťou monomérov, ktorá rozhoduje o možnosti vzniku lineárnych, rozvetvených alebo sieťovaných makromolekúl. Dôležitú úlohu tu tiež zohráva teplota počas polymerizačnej reakcie, ako napríklad u polyetylénu, kde vzniká buď lineárny alebo rozvetvený PE. Tieto dva typy sa ďalej líšia kryštalinitou. [1,2]

- **Lineárne** – polyméry s lineárnou štruktúrou sú zväčša dobre tavitel'né, vyznačujú sa dobrou húževnatosťou v tuhom stave a dobrou spracovateľnosťou v tavenine. Ľahko kryštalizujú. Radia sa sem materiály ako PES PA, isté typy PE, PP a ďalšie. [2]
- **Rozvetvené** – vetvené polyméry sú rozpustné, ich vlastnosti sú závislé na veľkosti a počte bočných reťazcov. S ich zvyšujúcim sa počtom klesá hustota polyméru, teplota mäknutia, materiál mäkne a je ohybnejší. Zvyšuje sa ťažnosť materiálu, transparentnosť, rozpustnosť a priepustnosť plynov. [2]
- **Sieťované** – tieto materiály v rozpúšťadlách za normálnych podmienok len botnajú. Vznikajú spájaním lineárnych a rozvetvených polymérnych štruktúr, ktoré disponujú s nevyčerpanými väzobnými miestami. Patria sem napríklad sieťované kaučukyreaktoplasty. [2]



Obrázok 1 Štruktúra polymérov: a) lineárna štruktúra, b) vetvená, c) a d) sieťovacia štruktúra

### 1.1.2 Podľa polarity

Polarita vyplýva z polarizovateľnosti kovalentných väzieb v makromolekulách. Rôzna afinita elektrónov k atómom tvoriacich kovalentnú väzbu je zapríčinená rôznou elektronegativitou prvkov. Vznikajú tu dipóly posunom elektrónov na elektronegatívnejší atóm avšak toto nevedie ku vzniku kladných alebo záporných iónov, takže celistvosť molekúl zostáva zachovaná. [1,2]

- **Polárne** – makromolekuly obsahujú polárne atómy (O,N,halogény atď.) a tým majú koncentráciu dipólov, čiže sú dipóly osamotené a dochádza ku zvýšeniu polárnosti (PA). [1]
- **Nepolárne** – v reťazcoch sa nachádzajú symetrické monomérmé jednotky tvorené rovnakými atómovými skupinami z nepolárnych prvkov. Vytvorené dipóly sa vo vnútri polyméru kompenzujú a materiál sa navonok javí ako nepolárny. Do tejto skupiny patria PE, PP, PS atď. [1]

### 1.1.3 Podľa molárnej hmotnosti

Molárna hmotnosť je jednou z najvýznamnejších charakteristík polymérnych materiálov. Polymérne materiály sú tzv. polydisperzné. Čiže tvorené súbormi makromolekúl o rôznej veľkosti molárnej hmotnosti. [1]

Polydisperzita je vyjadrená distribučnými krivkami vyjadrujúcimi rozptyl molárnych hmotností. Čím je distribučná krivka užšia, tým vykazujú molekuly menší rozptyl okolo strednej hodnoty a polymér je z hľadiska veľkosti molekúl homogénnejší. Dôležitým faktorom udávajúcim tvar krivky je spôsob samotnej polyreakcie. Zatiaľ, čo polykondenzačné reakcie vykazujú úzke distribučné krivky, klasickou polymerizáciou získame širší rozptyl hodnôt. Polymérne materiály tvorené úzkou škálou veľkosti molekúl, teda úzkou distribučnou funkciou vykazujú vyššie hodnoty v oblastiach modulu pružnosti, pevnosti a húževnatosti. Z dôvodu nesúmernosti veľkostí molekúl nemožno u polymérov stanoviť ostré body  $T_m$  a  $T_g$ . [1]

#### 1.1.4 Podľa nadmolekulárnej štruktúry

Nadmolekulárna štruktúra polymérov taktiež označovaná ako morfológia označuje usporiadanosť na nadmolekulárnej úrovni. Zahŕňa mnoho faktorov ako napríklad stupeň kryštalizácie, orientáciu, tvar kryštálov, ich veľkosť atď. U polymérov v tuhom stave možno pozorovať dva morfologické stavy (amorfný a semikryštalický). [3]

- **Amorfné polyméry** – Základným morfologickým útvarom tohto typu polymérov sú globuly, teda klobká zložené z chaoticky spletených makromolekúl. Globuly sa síce môžu usporiadať do pravidelnejších útvarov avšak charakter každého jedného klobka zostane nezmenený. Silovým pôsobením dochádza k orientácii makromolekulárnych reťazcov vytvárajúcich rozvinuté a parametrické zväzky pripomínajúce nepravé kryštály. [3]
- **Semikryštalické** – tip morfológie, s ktorým je možné sa stretnúť najčastejšie. Vzniká počas kryštalizácie z taveniny, pretože nenastávajú príliš vhodné podmienky na vznik lamiel. Reťazce sa v tomto prípade skladajú do energeticky výhodných sférolitov o veľkostiach od niekoľko mikrometrov až po milimetre. [3]

Dôležitým parametrom semikryštalických polymérov je stupeň kryštalinity. Ovplyvňuje radu vlastností ako hustotu, pevnosť v ťahu, tvrdosť, rázovú húževnatosť, modul pružnosti atď.

### 1.1.5 Podľa teplotného chovania

- **Termoplasty** – ide o nesieťované polyméry, ktorých polymérne reťazce sú viazané len relatívne slabými (van der Waals-ovými) silami. Počas zahrievania prechádzajú do stavu plastického, kedy ich je možno ľahko spracovávať a tvárniť rôznymi technológiami. Spätným ochladením pod teplotu tavenia  $T_m$  u semikryštalických materiálov, respektíve  $T_g$  pri amorfných polyméroch prechádzajú do tuhého stavu. Samotný proces tvárnenia možno cyklicky opakovať prakticky bez obmedzenia, keďže počas neho nedochádza ku chemickým zmenám. Celý proces stojí len na fyzikálnych zmenách. Do tejto skupiny sa zaradzuje väčšina spracovávaných materiálov, ako napríklad polyetylén, polypropylén, polyvinylchlorid, polyamid, polystyrén a ďalšie. [4]
- **Reaktoplasty** – taktiež nazývané duroplasty alebo termosety. Od termoplastických polymérnych materiálov sa líšia tým, že ich je možné tvárniť len raz a tento proces nie je vratný. Samotný proces tvárnenia môže prebiehať len obmedzenú dobu. Pri zvýšenej teplote nastáva chemická reakcia, ktorej dôsledkom je priestorové sieťovanie makromolekúl a s tým späté vytvrdenie. Takto vytvrdené materiály nie je ďalej možno taviť ani rozpúšťať a ďalším zahrievaním dochádza len ku degradácii polyméru. Reaktoplasty zahŕňajú hmoty ako napríklad vytvrzené epoxidy, polyesteru atď. [4]
- **Kaučuky, gummy, elastoméry** – jedná sa o polymérne materiály, ktoré taktiež v prvej fáze zahrievania mäknú a dajú sa tvárniť, avšak len obmedzenú dobu. Behom ďalšieho zahrievania dochádza k chemickej reakcii – priestorovému zosieťovaniu štruktúry, prebieha tzv. vulkanizácia. U elastomérov na báze termoplastov nedochádza ku zmenám chemickej štruktúry, proces mäknutia a následného tuhnutia možno teoreticky opakovať bez obmedzení, prebieha tu len fyzikálny dej. [4]

### 1.1.6 Podľa pôvodu

- **Prírodné** – rozdeľujú sa na: - pôvodné  
- modifikované
- **Syntetické** – umelo vytvorené materiály za použitia chemickej cesty.

### 1.1.7 Podľa aplikácie

- **Štandardné** – najdlhšie a v najväčších objemoch spracovávané materiály na veľmi široké spektrum výrobkov. Horšie mechanické vlastnosti, teplotná a chemická odolnosť sú v neustálom vývoji (kompozitá, zmesi s inými materiálmi atď.) a postupne eliminované, tieto inovované materiály potom zasahujú aj do skupiny konštrukčných materiálov. [5]
- **Konštrukčné** – polyméry viac špecializované, požadované mechanické a iné vlastnosti na určité skupiny technických výrobkov. Spracúvajú sa vo veľkých objemoch. [5]
- **Špičkové** – často vyvinuté na požiadavky zákazníkov väčšinou na úzko špecializované aplikácie. Podľa typov sú to materiály s výbornými mechanickými vlastnosťami a vysokou tepelnou odolnosťou. Relatívne menšie spracovávané množstvá sa s rozširovaním aplikácií budú neustále zvyšovať. Spracovanie nie je zložitejšie ako u všetkých materiálov, ale má svoje špecifiká. [5]

## 1.2 Morfológia polymérov

Vzájomné usporiadanie makromolekúl v polymére, teda nadmolekulárna (fyzikálna) štruktúra materiálu veľmi úzko súvisí so vzhľadom a vlastnosťami polymérneho materiálu. O ich usporiadaní rozhoduje chemická štruktúra jednotlivých reťazcov, teda konformácia a konštitúcia. Obor zaoberajúci sa štúdiom tohto usporiadania, tvaru, štruktúry, asociácie a veľkosti reťazcov sa nazýva morfológia polymérov. [6]

Polyméry možno rozlišovať na základe ich štruktúry na dve skupiny. Ak sa v materiáli nachádzajú reťazce chaoticky rozhádzané a nie sú schopné sa usporiadať do pravidelnej štruktúry, hovoríme o amorfných polyméroch. V prípade, že sú jednotlivé reťazce schopné skladať sa do vyšších štruktúr ako tomu je u nízkomolekulárnych kryštalických látok, označujeme takéto materiály za kryštalické. Z reálnej praxe je však dokázané, že polymér so 100% kryštalickou štruktúrou nemožno získať, označujeme túto skupinu semikryštalické polyméry. [7]



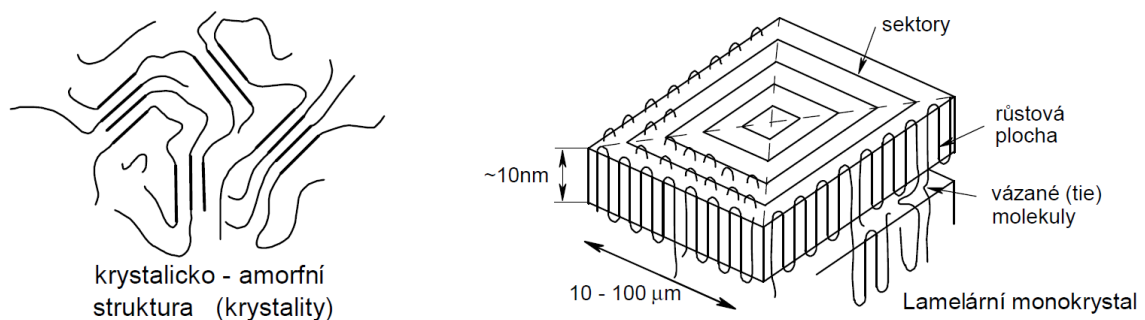
### 1.2.1 Amorfné

Ako bolo spomenuté v predošlej kapitole, amorfné polyméry sú látky neschopné z určitých dôvodov vytvoriť kryštalické domény. Z energetických dôvodov sa však stáčajú sa podľa konformačných podmienok zviňajú do rôznych štatistických klbkov. Ich veľkosti sú silne ovplyvňované teplotou, prípadne prítomnosťou nízkomolekulárnych látok ako zmäkčovadiel alebo rozpúšťadiel. V tuhom stave sa tieto klbká vzájomne prekrývajú a prechádzajú cez seba navzájom, čím tvoria zapleteniny, ovplyvňujúce vlastnosti v pevnom stave i v tavenine. Táto vlastnosť amorfov narastá s rastúcou strednou molekulárnou hmotnosťou. Za teplôt, pri ktorých sa stávajú z pevných materiálov taveniny na ne pôsobí ešte mechanické napätie. S jeho nárastom počas tečenia nastáva rozplietanie klbkov limitne do vypriameného stavu. [7]

### 1.2.2 Semikryštalické

Typ polyméru, u ktorého možno rozlíšiť kryštalickú a amorfnú fázu nazývane semikryštalickým. Tieto dve fázy sa navzájom rozkladajú do priestoru, pričom ich usporiadanie do určitej miery závisí na obsahu kryštalickej fázy. [7]

- Nízky obsah kryštalickej fázy spôsobuje vytváranie akýchsi zhukov rovnobežne orientovanej kryštalickej fázy plávajúcej v amorfnom prostredí. [7]
- Zvýšený obsah kryštalickej fázy možno pozorovať vznikom plošných kryštalických útvarov takzvaných lamiel. Tieto útvary sú tvorené reťazcami skladanými spôsobom zig-zag a vďaka svojej dĺžke môžu pozvoľne prechádzať cez viacero lamiel nad sebou, čím vytvárajú amorfnú štruktúru medzi jednotlivými lamelami. Týmto reťazcom taktiež hovoríme väzobné a hrajú dôležitú úlohu pri mechanickom namáhaní. [7]



Obrázok 2 Kryštalicko amorfna štruktúra a schéma lamelárneho monokryštálu [7]

Počas kryštalizačného procesu vznikajú najrýchlejšie tenké lamely, ktoré však majú relatívne veľký povrch, teda sú nestabilné a počas zahrievania majú tendenciu sa zväčšovať. Skladanie reťazcov do štruktúrnych útvarov sa deje podľa určitých kryštalografických smerov, čo vedie k tvorbe sektorov navzájom odlišných ako štruktúrou tak fyzikálnymi vlastnosťami. Lamely môžu vytvárať vyššie štrukturálne útvary ako monokryštály, axiality, dendridy a sférolity. [7]

### 1.2.2.1 Monokryštál

Získavaný z vysoko zriedených polymérnych materiálov riadenou kryštalizáciou, počas ktorej sa dbá na vznik jediného kryštalizačného zárodka. Rýchlosť takejto kryštalizácie je veľmi nízka a počítá sa rádovo v hodinách. Takto vzniknutý monokryštál je v podobe tenkých plošných alebo pyramídovo prehnutých lamiel. [7]

### 1.2.2.2 Axialit

Vzniká podobným spôsobom ako monokryštál avšak z približne 30% roztokov za vzniku mnohovrstvých kryštálov. [7]

### 1.2.2.3 Dendrid

- Rozvetvený morfológický útvar zložený z lamiel. Vzniká kryštalizáciou z koncentrovanejších roztokov, kde nie je rast kryštálov rovnomerný. Vetvenie za-

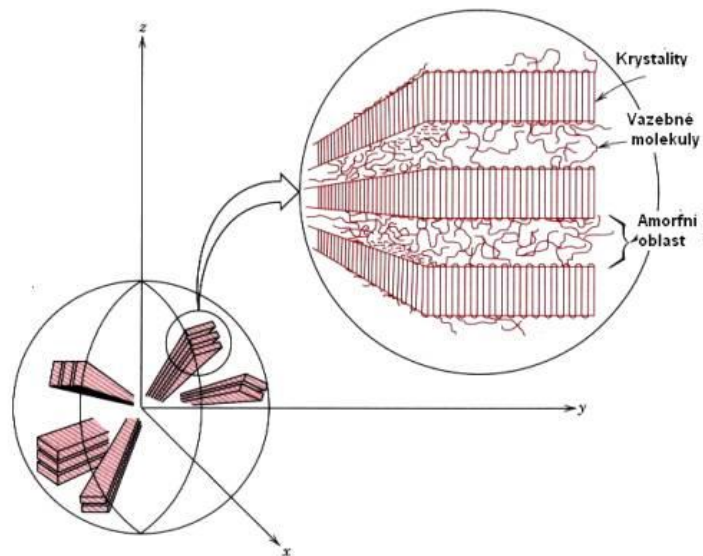
príčinuje vyššia rýchlosť rastu kryštálu v zakrivených miestach ako sú ku príkladu rohy kryštálu ako je znázornené na obrázku 3. [6]



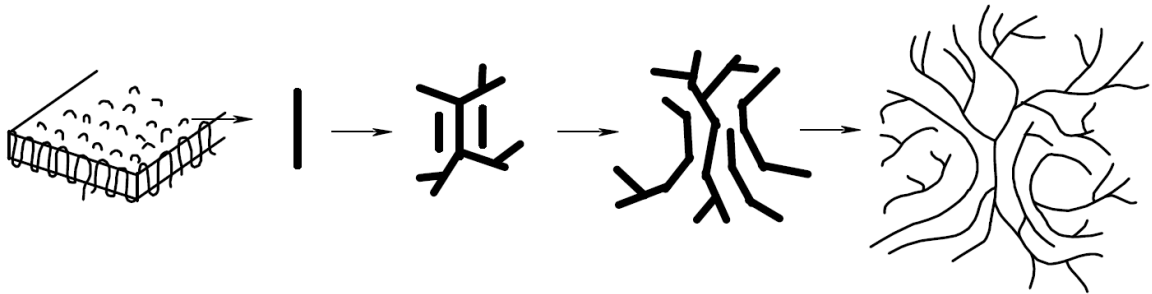
Obrázok 3 Schematické znázornenie dendridu [6]

### 1.2.3 Sférolit

Počas kryštalizácie z taveniny dochádza v kryštáloch k určitým smerom rastu, do ktorých sa postupne usporiadávajú makromolekuly, avšak vo výsledku je ich smer orientovaný náhodne. Ako náhle je do procesu kryštalizácie zavedené silové pôsobenie na materiál, dochádza k usporiadavaniu reťazcov vo smere šmyku. [6]



Obrázok 4 Štruktúra sférolitu



Obrázok 5 Štádiá rastu sférolitu [7]

### 1.3 Vplyv kryštalinity na vlastnosti polyméru

Systematické uloženie reťazcov v kryštalickej fáze spôsobuje efektívnejšie zaplnenie priestoru, než je to v amorfnej fáze, teda vyššiu hustotu. Z tohto tvrdenia teda vyplýva, že s rastúcim podielom kryštalickej štruktúry narastá aj merná hustota materiálu. Samotné uloženie makromolekúl ovplyvňuje rozpustnosť polyméru. Čím je štruktúra pravidelnejšia, tým je solvatácia molekúl rozpúšťadla obtiažnejšia. [7]

## 2 ÚNAVA A STÁRNUTIE MATERIÁLU VŠEOBECNE

### 2.1 Mechanické chovanie polymérov

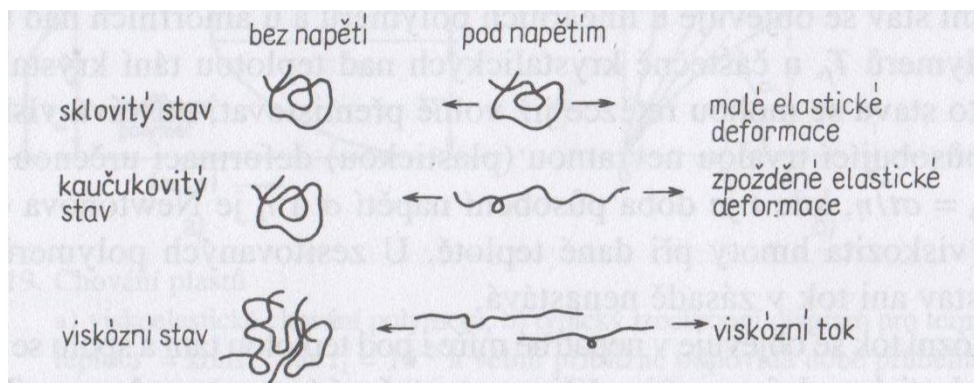
Nízkomolekulárne látky môžu bežne existovať vo všetkých druhoch skupenstiev ako plyny, kvapaliny alebo pevné látky (amorfné, kryštalické). Skupenstvo polymérov vzhľadom k veľkosti makromolekúl je obmedzené len na pevné a kvapalné. Na rozdiel od klasických materiálov sa však u nich prejavuje medzi stavom pevným (sklovitým) a kvapalným (viskóznym) ešte pre ne charakteristický kaučukovitý stav. Hranicou medzi sklovitým a kaučukovitým stavom je teplota skelného prechodu  $T_g$  charakteristická pre každý druh polyméru a odpovedajúce približne teplote krehnutia polyméru. [8]

#### 2.1.1 Sklovitý stav

Teplotná oblasť pod  $T_g$ . Reťazce ako celky sú tuhé, mechanickým napätím  $\sigma$  sa len veľmi málo mení vzdialenosť medzi atómami v makromolekule, čo odpovedá nepatrným pružným (elastickým) deformáciám hmoty. Polymér je tvrdý a krehký. Uplatňuje sa tuná Hookov zákon pre okamžité pružné ideálne elastické deformácie. [8]

#### 2.1.2 Prechodová oblasť

niekde v okolí  $T_g$ . Zvyšovaním teploty sa začína zvyšovať pohyblivosť reťazcov, pri zvýšenom napätí sa objavuje rozvíjanie reťazcov, hmota mäkne a jej modul pružnosti  $E$  prudko klesá. [8]



Obrázok 6 Schéma deformácií lineárnych polymérov [8]

### 2.1.3 Kaučukovitý stav

oblasť nad  $T_g$ . Makromolekulárne reťazce sa v tomto prípade pri mechanickom namáhaní ľahko rozvíjajú avšak nie ihneď. Modul pružnosti sa pohybuje rádovo nižšie než v sklovitom stave. Po uvoľnení napätia sa reťazce opäť pozvoľne vracajú do nepravidelne usporiadanej štruktúry, teda pre ne do energeticky najvýhodnejšieho stavu. Hmota sa chová, ako elastická a viskózna zároveň, čo je typické pre kaučukovitý stav polyméru a nazýva sa vysokoelastický stav.

Lineárne amorfné polyméry a riedko sieťované elastoméry sú v tomto stave mäkké, pružné a tvárne. Pri lineárnych, čiastočne kryštalických polyméroch vykazujú kryštalické oblasti značne väčšiu pevnosť než okolité amorfné oblasti v kaučukovitom stave a hmota ako celok je pevná a húževnatá. Husto sieťované reaktoplasty v tejto oblasti mäknú len veľmi málo.

Lineárne a amorfné polyméry vykazujú nad teplotou tečenia  $T_f$  viskózný stav. Toto chovanie možno pozorovať taktiež u čiastočne kryštalických polymérov nad teplotou tavenia kryštálov  $T_m$ . V tomto stave sa môžu reťazce voľne pohybovať, nastáva viskózný tok, spôsobujúci tvarovú nevratnú (plastickú) deformáciu. U sieťovaných materiálov v zásade nenastáva ani viskózný stav, ani tok.

Viskózný tok možno pozorovať v malej miere taktiež pod teplotou tavenia. Spolu s omeškanou elastickou deformáciou je príčinou takzvaného tečenia (creep) a relaxácie. [8]

## 2.2 Základné pojmy

Polymérne materiály nachádzajú veľké uplatnenie v technickom priemysle hlavne pre ich veľkú odolnosť voči korózii. Preto sa používajú vo veľkej miere ako ochranné prostriedky kovov, stavebných hmôt, dreva atď. Avšak nie sú odolné v plnej miere. [9]

U polymérnych materiálov vystavených fyzikálnym, chemickým, prípadne biologickým procesom v dlhších časových intervaloch dochádza ku nevratným zmenám označovanými taktiež stárnutím. Súhrn rozkladových reakcií polymérov označujeme pojmom degradácia (odbúravanie). Depolymerizácia je proces, počas ktorého degradujú makromolekuly na nižšie štruktúrne jednotky prípadne až na samotné monoméry. V prípade, že dochádza k hĺbkovým procesom dá sa tento dej označiť aj ako rozklad (deštrukcia). Počas tohto procesu dochádza k odbúraniu spojenému so zmenou chemickej štruktúry daného materiálu. Pojmom korózia označujeme znehodnotenie materiálu vzájomným chemickým alebo fyzikálnochemickým pôsobením okolitého prostredia. Tento proces nevyžaduje svetelnú ani tepelnú iniciáciu, avšak tepelná energia ho urýchľuje. [10]

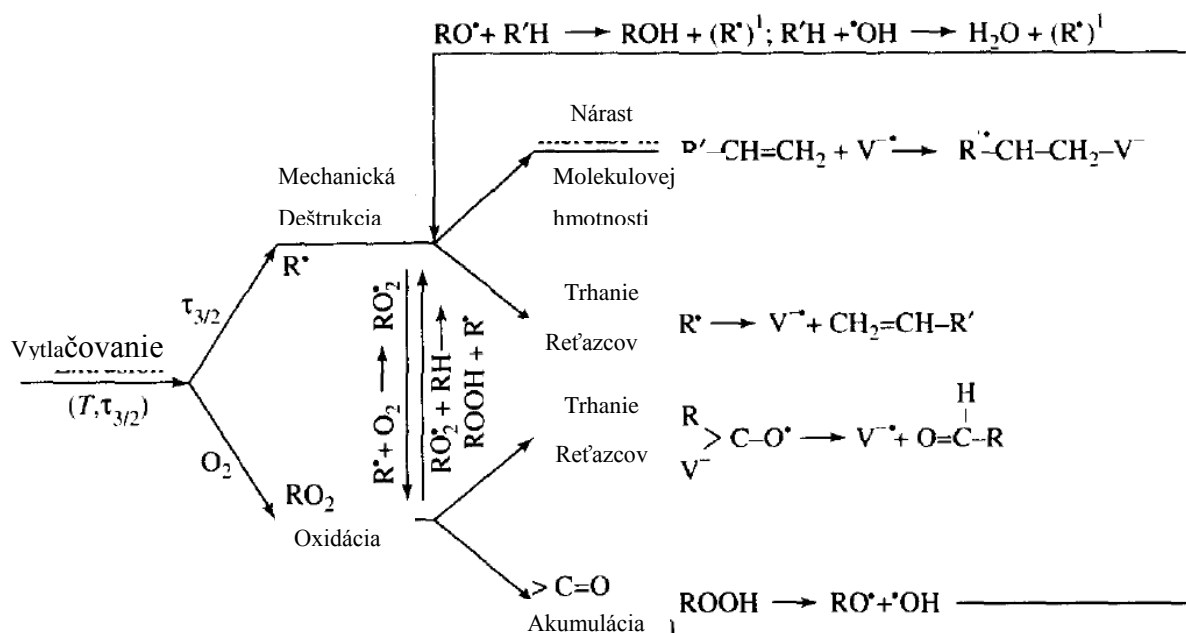
Proces prebiehajúci v materiáli v dôsledku dlhodobého statického alebo cyklického namáhania možno označiť ako únavu materiálu. Tento dej spôsobuje pokles mechanických vlastností materiálu, čo v konečnom dôsledku znamená, že dochádza k jeho porušeniu pri nižších napätiach. [10]

Negatívne zmeny materiálu neprebiehajú len počas jeho používania ale často k nim dochádza už pri samotnom spracovaní najčastejšie vplyvom mechanického a tepelného namáhania. Štúdium týchto dejov vedie ku novým poznatkom, umožňujúcim obmedzenie, prípadne predchádzanie negatívnych dopadov na polymér. [9]

## 2.3 Degradáčné procesy

Zmeny v polyméroch rozdeľujeme do niekoľkých základných skupín ako termodegradácia, fotodegradácia, mechanická degradácia a biodegradácia. Ak je počas procesu tepelnej, alebo svetelnej iniciácie prítomný kyslík, možno hovoriť o termooxidácii a fotooxidácii. V neposlednej rade môže dôjsť k zmene nadmolekulárnej štruktúry, ktorá taktiež ovplyvňuje životnosť materiálu. [10]

Mechanismus zmeny molekulovej hmotnosti pri spracovaní polymérov bol preukázaný a overený vedcami Gol'dberg a Zaikov (Obr. 7). Výsledky tejto práce ukazujú, že kinetika chemických premien, ktoré sa objavujú počas spracovania polymérov môžu byť označené obvyklým systémom tepelnej oxidácie, v ktorom je trhanie polymérnych reťazcov popísané iniciačnou rýchlosťou  $W_0$ . Gol'dberg a Zaikov analyzovali niektoré deje, a dospeli k záveru, že  $W_0$  nemá priamy vplyv na znižovanie molekulárnej hmotnosti, a udáva len počet voľných radikálov zapojených do oboch procesov. Je zrejmé, že  $W_0$  je funkcia teplota, reologických parametrov a molekulárnej hmotnosti. Podľa schémy makromolekuly transformácie uvedené dve (Obr. 7) [21]



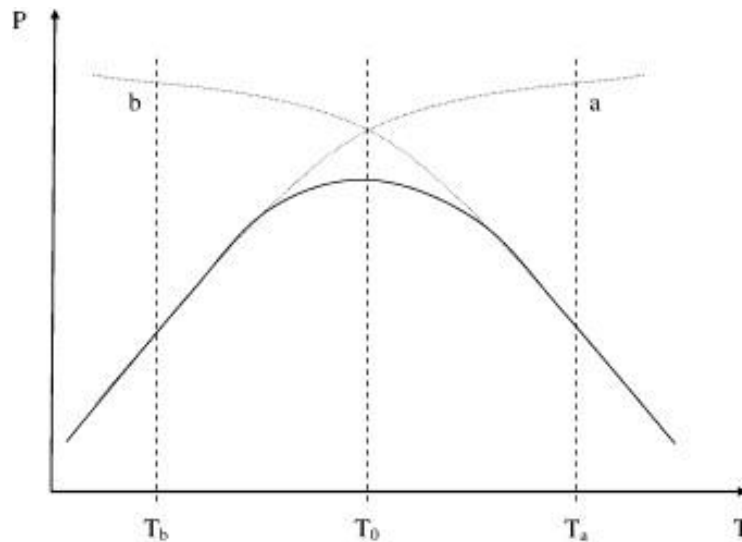
Obrázok 7 Transformácia makromolekuly počas procesu vytlačovania [21]

### 2.3.1 Termodegradácia

Jedným z hlavných zdrojov problémov, pri spracovaní polymérov, pochádza z vysokej viskozity taveniny polymérov. Väčšina priemyselných termoplastických polymérov, sú spracované v teplotnom intervale 400 - 650 K. Je zrejmé, že spracovanie v intervale 800-1000 K, kde sa očakáva, že viskozita je zvyčajne 10 až 1000 - krát nižšia, by minimalizovala veľa dôležitých technologických a ekonomických obmedzení. Bohužiaľ, to nie je možné, pretože polyméry sú pri týchto teplotách tepelne nestabilné. Spracovateľské činnosti sú vždy vykonávané v teplotných oblastiach, kde viskozita taveniny je pomerne



vysoká, tesne pod  $t_0$ , čo možno taktiež nazývať maximálnou teplotou, pri ktorej je materiál ešte stabilný (*TSC*). Podstatným kritériom je však difúzna hranica: nie je presne stanovený diskretný prah degradačných procesov. To znamená, že optimálne podmienky spracovania sa týkajú všeobecne malej časti štrukturálnej integrity makromolekúl, ako je znázornené na Obr. 7. [13]



Obrázok 8 Znázornenie vplyvu teploty spracovania (doba spracovania sa predpokladá konštantná) na spracovateľnosť. (A) Vplyv fyzikálnych parametrov. (B) Vplyv tepelnej degradácii. [13]

Pri nízkej teplote ( $T_b$ ), je tepelná degradácia zanedbateľná, ale chyby spôsobené vysokou viskozitou taveniny sú zodpovedné za nízku spracovateľnosť.

Pri vysokej teplote ( $T_a$ ), je spracovateľská časť v podstate obmedzená tepelným starnutím. Tepelná degradácia môže ovplyvniť vlastnosti materiálu v mnohých ohľadoch, ako v molekulárnej zmene hmotnosti, ale tieto účinky sú zvyčajne zanedbávané v procesoch tvárnenia. Zodpovedajúce štrukturálne zmeny však môžu mať vplyv na dlhodobé vlastnosti. [13]

Tepelným účinkom vyvolaný rozpad polyméru v inertnej atmosfére alebo vákuu. V priebehu tohto procesu dochádza ku vzniku prchavých produktov a nedefinovateľného uhlíkového zvyšku. Dôvodom skúmania termodegradácie je samotné spracovanie materiá-

lov, kedy sa často dosahujú teploty v rozmedzí od 200 °C do 300 °C. Samotný rozklad sa počas tohto procesu nemusí nejako výrazne prejavovať, no vznikajú poruchové centrá, ktoré sú príčinou následných reakcií. [11]

Pod pojmom tepelné stárnutie možno vnímať proces prebiehajúci počas výrazne nižších teplôt ako pri tepelnom rozklade. Ide o dlhodobý proces, počas ktorého nastávajú zmeny ako na molekulárnej úrovni, tak na nadmolekulárnej štruktúre. Tepelná odolnosť polymérov je z veľkej časti úzko spätá s pevnosťou väzieb nachádzajúcich sa v polyméry. Odbúravanie môže prebiehať dvoma spôsobmi. [10,11]

- **Štatistické štiepenie** – Sled jednotlivých štiepných reakcií na rôznych miestach reťazca
- **Depolymerácia** – Rozklad makromolekúl, pri ktorom dochádza vo veľkej miere ku vzniku monomérov. Tento typ rozpadu prebieha len u malej skupiny materiálov.

### 2.3.1.1 *Termo-oxidácia*

Pri nízkom obsahu kyslíka, makro-radikály reagujú medzi sebou za tvorbyvetyených polymérnych reťazcov a nenasýtených skupín. Na vysoký obsah kyslíka, makro-radikály reagujú zvýšenou tvorbu voľných radikálov útočiacich na polymérne reťazce a vedie k rozštiepeniu reťazca a zníženie molekulovej hmotnosti. Všeobecne sa predpokladá, že vplyv degradácie polymérov vystavených v tavenine pôsobeniu kyslíka (oxidácie), je výraznejší než je to u mechanické namáhanoa počas extrúzie. Avšak priebeh degradácie je silne závislý od typu polyméru a podmienkach počas spracovania. [23]

### 2.3.2 **Fotodegradácia**

Polymérne materiály sú citlivé na ultrafialový podiel slnečného žiarenia vyvolávajúceho obdobné reakcie ako tepelná energia. Dochádza ku trhaniu reťazcov, sieťovaniu a aktivácii oxidačných reakcií. Podmienkou fotodegradačného procesu je pohlcovanie žiarenia. Polyméry sú citlivé aj na iné druhy žiarenia ako rentgenové, gama a kozmické, pri čom sa na degradácii z najväčšej miery podiely UV, vplyvom ktorého dochádza ku trhaniu makromolekúl, tvorbe radikálov, prípadne sieťovaniu. Celý proces prebieha z väčšej miery štatistickým štiepením. [10]

### 2.3.3 Mechanická degradácia

Spôsobuje zmenu molekulárnej a nadmolekulárnej štruktúry, čím ovplyvňuje vlastnosti polyméru. K štiepeniu dochádza v momente, keď sa v hmote nahromadí vyššie napätie než pevnosť kovalentnej väzby. Degradačnému mechanizmu podliehajú pevné materiály napríklad počas mletia, tiež však nastáva u tavenín počas bežného spracovania polymérov a v roztokoch počas miešania alebo prietokom roztoku kapilármi. [10,11]

V momente, keď sa poruší väzba C-C vzniká voľný radikál. Najviac štiepných reakcií nastáva za znížených teplôt, so stúpajúcou teplotou ich množstvo klesá z dôvodu vyššej ohybnosti reťazcov a poklesu šmykových síl. Ako prvé degradujú dlhšie reťazce a trhanie prebieha, dokiaľ nie je ich dĺžka kritická. U semikryštalických polymérov sa trhajú prednostne reťazce v amorfnej fáze. V prvej fáze vznikajú radikály v mieste prerušenia makromolekuly. Vzhľadom na svoju reaktivitu reagujú so susedným reťazcom za vzniku nového radikálu, ktorý sa teraz už nachádza na reťazci. [10,24]

### 2.3.4 Zmeny nadmolekulárnej štruktúry

Počas degradačných procesov dochádza ku zmene mechanických vlastností, rozpustnosti, teploty tavenia, k tvarovým a rozmerovým zmenám, a v niektorých prípadoch ku zmene spracovateľnosti. Pod teplotou tavenia kryštalického podielu sú polyméry s pravidelným usporiadaním reťazcov schopné kryštalizácie. Jej rýchlosť priamo závisí na teplote a množstve nepravidelností reťazcov, prípadne nečistôt nachádzajúcich sa n polyméry. Tieto závady spôsobujú zníženie  $T_m$  a tiež spôsobujú zníženie podielu kryštalickej fázy. Vznik kryštalizačných zárodkov je priamo spätý s mechanizmom, kinetike kryštalizácie a v značnej miere na priebehu chladenia.

Z reálnej praxe je zrejmé, že úplnej kryštalizácie sa u žiadneho polyméru nedá dosiahnuť. Samotný kryštalizačný proces možno rozdeliť na dve fázy

- **Primárna** – je definovaná rovnovážnym stavom hustoty  $\rho$ .
- **Sekundárna** – prejavuje sa v prípadoch, kedy sa počas primárnej fázy nedosiahne konečnej hranice a kryštalizácia prebieha ďalej, čo je charakterizované zvýšením hustoty. Stárnutie materiálu, u ktorého prebieha tento proces je závislé na jeho rýchlosti, ktorá je asi o dva rády nižšia ako rýchlosť primárnej kryštalizácie. Zapríčiňuje fyzikálne, tvarové zmeny a vznik trhlín. [10, 12]

## 2.4 Mechanické skúšky

Mechanické vlastnosti predstavujú hodnotenie charakteru správania sa materiálu pri mechanickom namáhaní, resp. odolnosť proti deformácii a porušeniu. Preto kritériom hodnotenia odolnosti voči mechanickému namáhaniu sú zaradené tieto štyri základne mechanické vlastnosti: pružnosť, plasticnosť, pevnosť a húževnatosť. [14]

Mechanické vlastnosti je potrebné zisťovať takými metódami, ktoré majú určité pravidlá, aby získane hodnoty vlastnosti boli zrozumiteľné a porovnateľné v každom ohľade. Existuje široká škála mechanických skúšok pre určovanie mechanických vlastností materialov, napriek tomu v ďalšom texte sú popísane základy troch základných metód skúšania mechanických vlastností materiálov. [14]

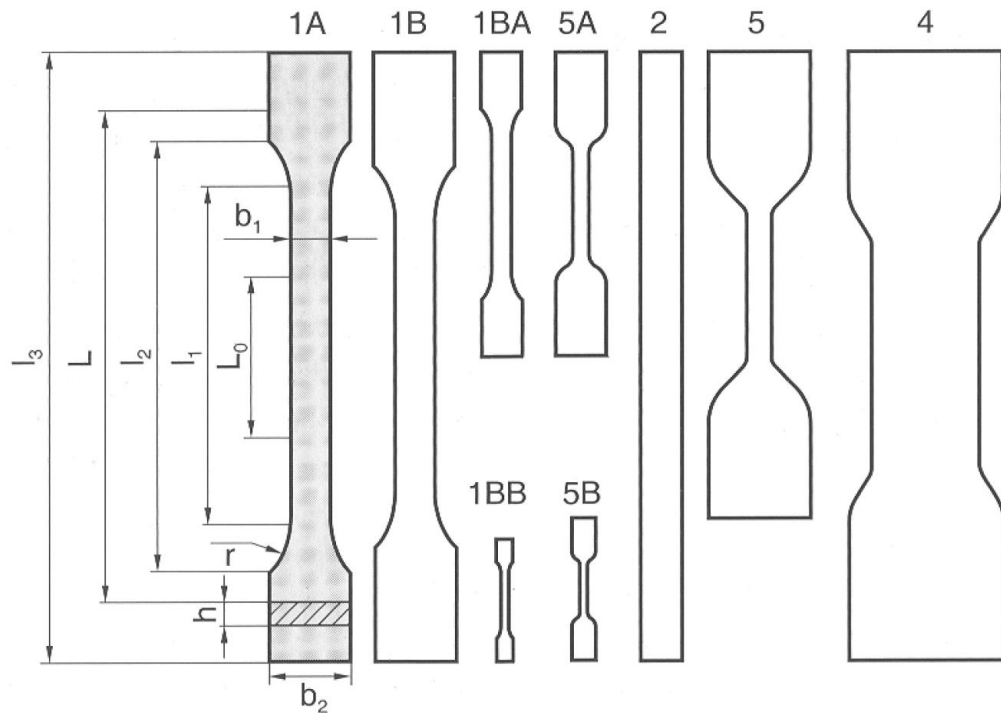
### 2.4.1 Statická skúška ťahom

Statická skúška ťahom je jednou z najrozšírenejších mechanických skúšok materiálov vôbec prevádzaná. Je dôležitá hlavne z dôvodu získavania niektorých základných hodnôt technických materiálov potrebných pre výpočet konštrukčných prvkov a voľbu vhodného materiálu. Celý princíp skúšky spočíva v jednoosom statickom namáhaní skúšobného telesa. [15]

Za predpokladu ideálneho chovania skúšobného telesa, možno tvrdiť, že je materiál izotropný a napätie v ťahu by bolo rozložené po celom priereze telesa. Tento stav však v reálnej praxi z dôvodu anizotropie materiálu nejestvuje. Z tohto tvrdenia teda vyplýva, že materiálové vlastnosti sa pri ťahovom namáhaní v rôznych oblastiach líšia. [12]

### 2.4.2 Skúšobné teleso

Všeobecné rozmery skúšobných telies sú určené normou ČSN EN ISO 527. V dnešnej dobe sa používa širšia paleta druhov telies líšiacich sa tvarmi, veľkosťou a spôsobom výroby ako napríklad tvárnením, mechanickým opracovaním, vstrekovaním atď. [15]

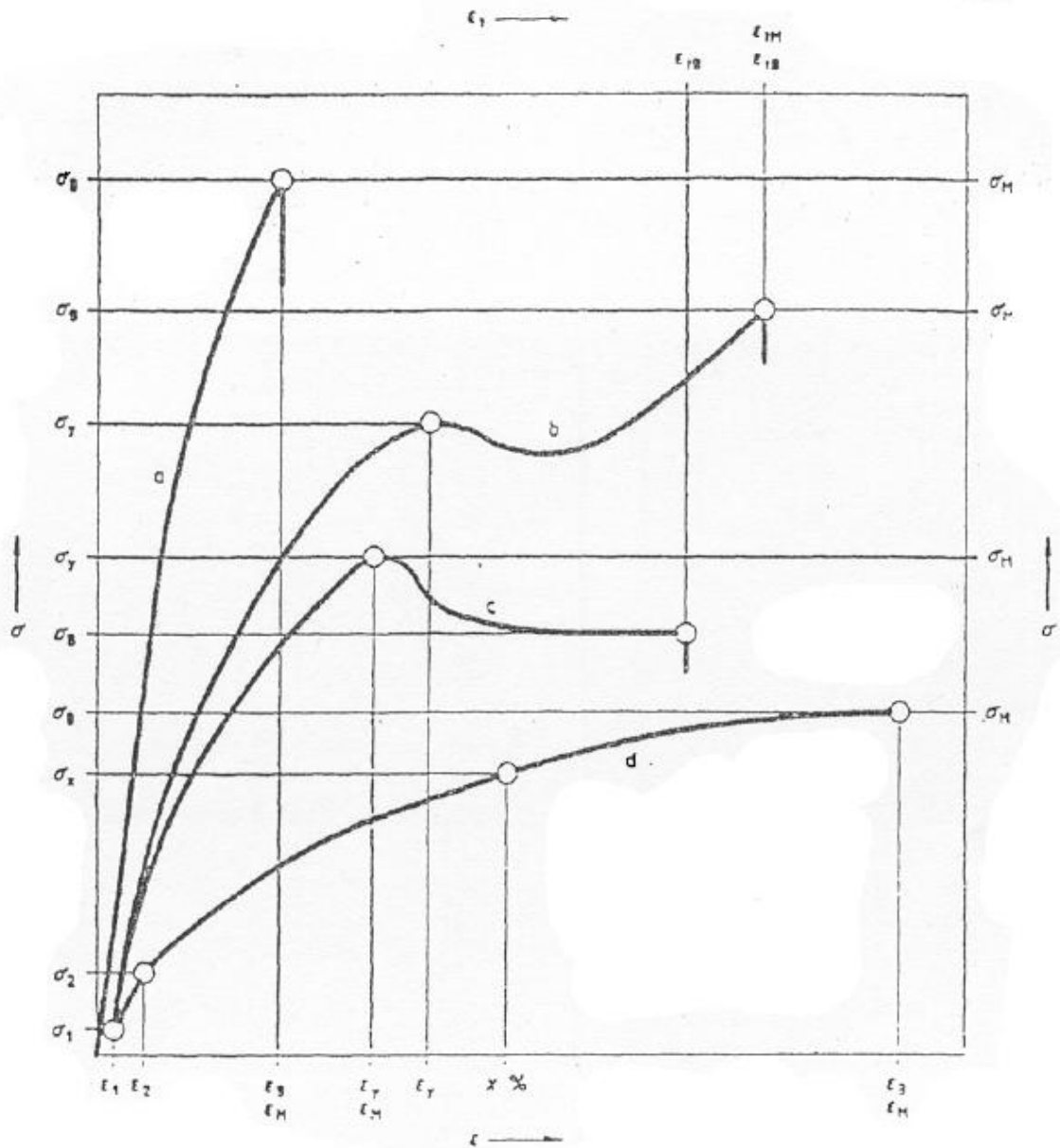


Obrázok 9 Rôzne typy skúšobných teliesok [22]

### 2.4.3 Výsledný diagram statickej skúšky ťahom

Grafické znázornenie ťahovej skúšky znázorňuje závislosť pomerného predĺženia  $\varepsilon$  na napätie  $\sigma$ . Každý materiál vykazuje iný pracovný diagram. [8]

Polyméry možno rozdeliť na tri základné typové chovania v závislosti na stupni kryštalinity, teplote okolia, vnútornej štruktúry a ďalších vplyvov, ako je znázornené v diagrame (obr. 4.2) [15]

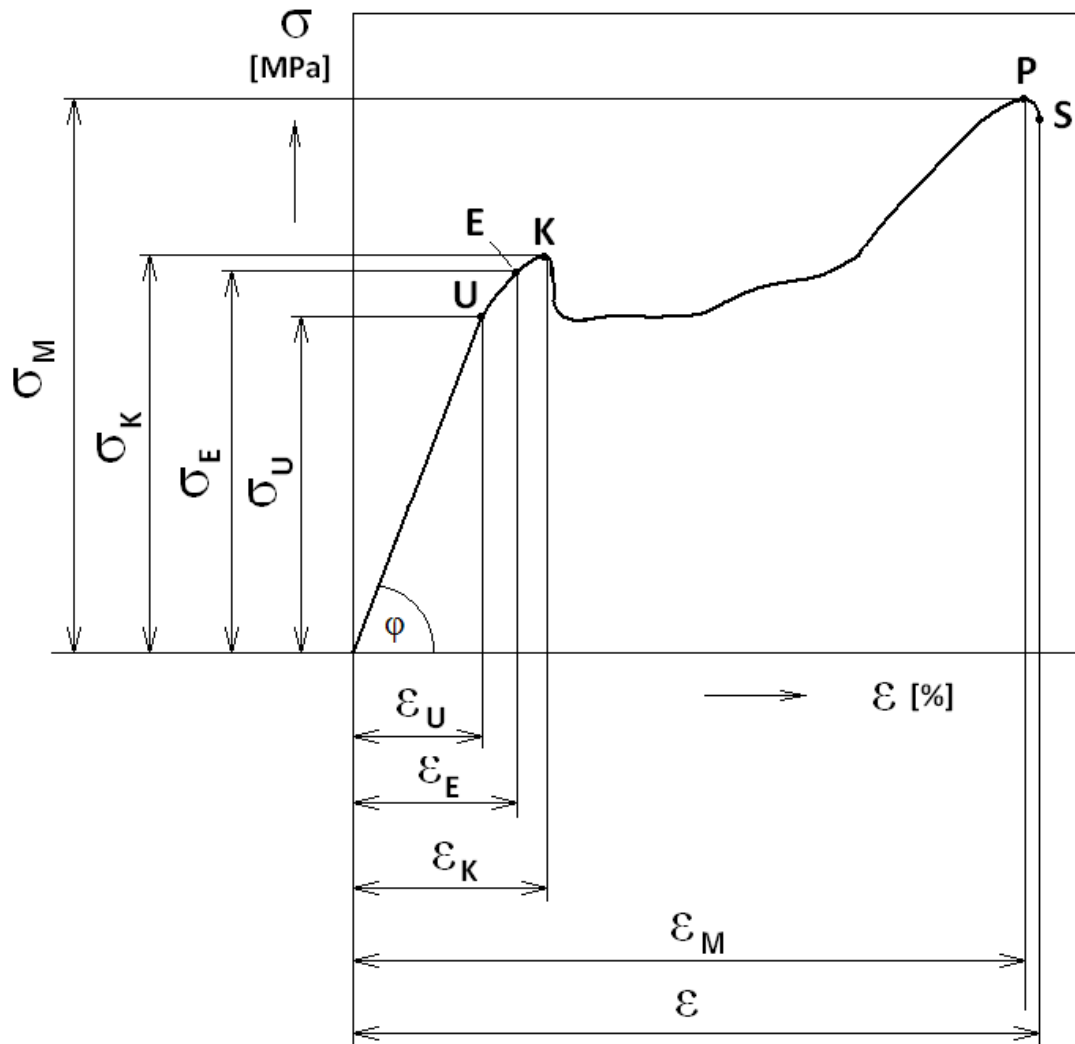


Obrázok 10 Krivky napätia na predĺženie: (a) krehký materiál, (b, c) húževnatý materiál s medzou klzu, (d) húževnatý materiál bez medze klzu. [15]

Diagram statickej skúšky (obr. 4.3) ťahom pozostáva z niekoľkých dôležitých bodov:

- E – medza pružnosti  $\sigma_E$
- K – medza sklzu  $\sigma_K$
- P – medza pevnosti alebo pevnosť v ťahu  $\sigma_{Pt}$
- S – napätie pri pretrhnutí

- U – medza úmernosti  $\sigma_U$



Obrázok 11 Diagram statickej ťahovej skúšky [15]

#### 2.4.3.1 Napätie na medzi úmernosti

Do tohto bodu je závislosť predĺženie na napätí lineárna. Platí tuná Hookov zákon:

Youngov model (modul pružnosti):

---

Inak nazývaný taktiež E-modul, nie je konštantou materiálu, pretože je závislý na podmienkach merania. Hlavne na teplote (so stúpajúcou teplotou klesá) a čase. Materiál v tejto väze deformácie je schopný sa vrátiť do pôvodného stavu. [13]

#### **2.4.3.2 Napätie na medzi pružnosti**

Nárast pružnej deformácie nad medzou úmernosti s odchyľovaním od lineárneho chovania. Deformácia je až do bodu  $E$  stále pružná. Po odstránení zaťaženia, ideálne elastická deformácia okamžite zmizne, avšak zostáva deformácia vysokoelastická (zbrzdená), ktorej vymiznutie je časovo závislé. [13]

---

#### **2.4.3.3 Napätie na medzi sklzu**

Najmenšie napätie, pri ktorom sa objavujú sa prvé stále deformácie a neustále narastajú bez ďalšieho nárastu napätia.[13]

---

#### **2.4.3.4 Napätie na medzi pevnosti**

Ďalším zväčšovaním napätia po dosiahnutí medze sklzu možno u polymérnych materiálov pozorovať rôzne typy chovania ako je znázornené v diagrame 4.2:

- a) Napätie v materiáli stúpa až po dosiahnutie medze sklzu. Štruktúra materiálu nedovoľuje narovnávanie reťazcov vo smere napätia, čiže nedochádza k vytvoreniu krčku a dochádza k pretrhnutiu materiálu. V tomto prípade môžeme tvrdiť, že medza sklzu je súčasne aj medza pevnosti.
- b) Po dosiahnutí medze sklzu nastáva orientovanie štruktúrnych jednotiek vo smere deformácie, tvorí sa teda krčok. V tomto momente sa spomalí zvyšovanie napätia



na materiál a rýchlosť nárastu jeho pomerného predĺženia naopak prudko narastá. Medza pevnosti nastáva v momente pretrhnutia materiálu.

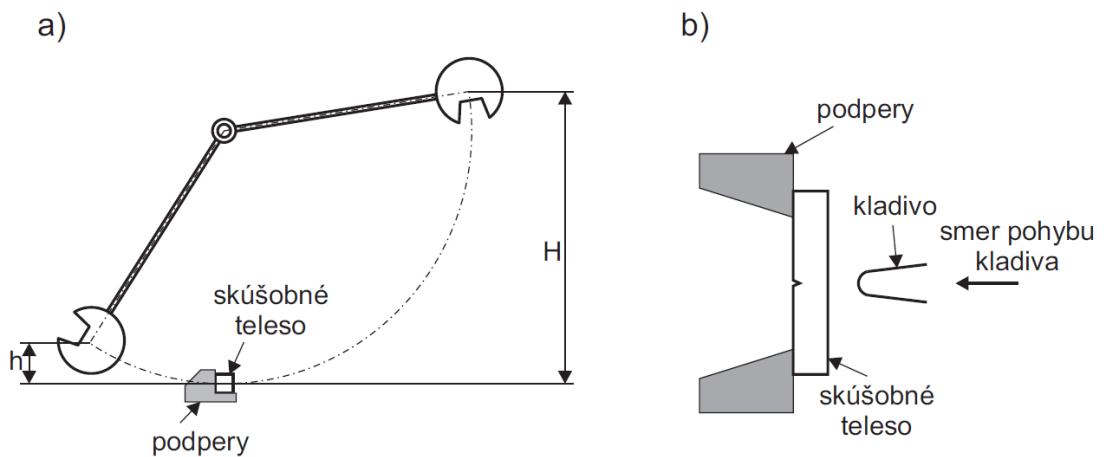
- c) Materiály tohto typu sa chovajú ekvivalentne ako tomu bolo v bode b). Na rozdiel od tohto chovania však napätie po dosiahnutí medze sklzu klesá na určitú úroveň a dochádza k pretrhnutiu. U takéhoto chovania materiálu sa považuje za medzu pevnosti medza sklzu
- d) Elastoméry s ohľadom na ich elastické mechanické vlastnosti nedosahujú medzu sklzu. Deformácia materiálu prebieha až do momentu, kedy nastane kritické napätie a materiál sa pretrhne.

Definícia medze pevnosti vyplýva z napätia potrebného k pretrhnutiu skúšobného telesa ku pôvodnému prierezu.

—

#### 2.4.4 Skúška rázom v ohybe

Princíp skúšky je založený na dynamickom trojbodom ohybe ako je to znázornene na obr. 4.4. Skúšobné teliesko je uložené na podperách a na stranu oproti vrubu pôsobí zaťaženie ( $F$ ). Veľkosť zaťaženia je zabezpečené pádom kladiva s tiažou  $F_G$ , ktoré je spustené z definovanej výšky  $H$  a teda jeho kinetická energia je v najnižšej polohe padajúceho kladiva rovná počiatocnej potenciálnej energie. Počas nárazu nastáva spotrebovanie určitého množstva kinematickej energie, čo spôsobí zmenšenie vychýlenia kladiva oproti reálnemu vychýleniu bez prítomnosti skúšobného telieska. Čím je tento rozdiel väčší, tým väčšia je húževnatosť materiálu  $K$ : [16]



Obrázok 12 Princíp skúšky rázom v ohybe [16]

Hodnotu húževnatosti  $K$  teda práce spotrebovanej na deformáciu objemu materiálu nie je možné presne stanoviť z dôvodu zložitosti merania deformovaného objemu. Preto sa húževnatosť materiálu stanovuje na plochu prierezu pod vrubom  $S_0$ : [16]

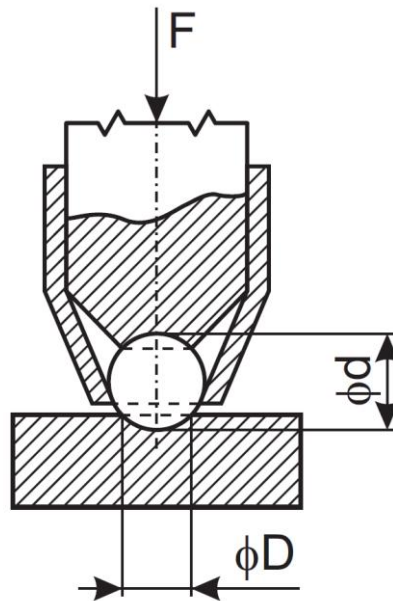
—

#### 2.4.5 Skúška tvrdosti

V reálnej praxi veľmi výhodná metóda stanovenia materiálovej vlastnosti, keďže počas jej prevádzania nie sú potrebné skúšobné telieska a samotná skúška prebieha priamo na povrchu výrobku bez jeho poškodenia a ovplyvní len veľmi malú časť materiálu na povrchu. Podľa princípu testovania môžeme rozdeliť skúšky tvrdosti na rôzne metódy ako vtláčacie, vrypové, odrazové a kyvadlové. [16]

##### 2.4.5.1 Skúška podľa Brinella

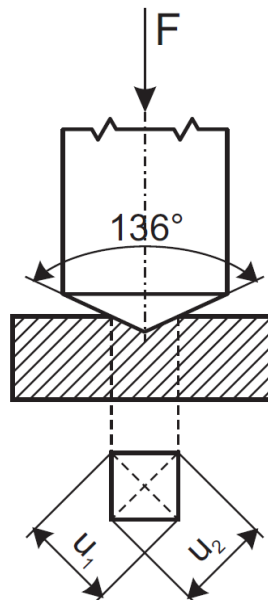
Pri skúške tvrdosti podľa Brinella je vtláčaná guľôčka s priemerom  $d$  z kalenej ocele do povrchu materiálu silou  $F$ . Zo vzniknutého odtlačku s plochou  $S$  a priemerom  $D$  sa určí tvrdosť materiálu: [16]



Obrázok 13 Skúška podľa Brinella [16]

#### 2.4.5.2 Skúška tvrdosti podľa Vickersa

Pri skúške tvrdosti podľa Vickersa je vťahovaný diamantový štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom  $136^\circ$  do povrchu materiálu silou  $F$ . Zo vzniknutého odtlačku s plochou  $S$ , a uhlopriečkami  $u_1$  a  $u_2$  sa určí tvrdosť materiálu: [16]



Obrázok 14 Skúška podľa Vickersa [16]

### *2.4.5.3 Skúška tvrdosti podľa Rockwella*

Pri skúške tvrdosti podľa Rockwella je vtlačaný diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom  $120^\circ$  (HRC) alebo diamantová guľôčka s priemerom 1,587 mm (HRA) do povrchu materiálu. Tvrdosť sa z rozdielu medzi zmluvnou hĺbkou vpichu a hĺbkou trvalého vpichu.

[16]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 MATERIÁLY, METODIKA A INŠTRUMENTÁCIA

#### 3.1 Charakteristika niektorých použitých materiálov

##### 3.1.1 Lupolen 4261 AG (HDPE)

Ide o polyetylén s vysokou molekulovou hmotnosťou. Typickou aplikáciou tohto materiálu sú palivové nádrže v automobiloch. Je stabilizovaný antioxidantami pre vytlačovací proces. Produkt má vynikajúcu odolnosť voči degradácii spôsobenej okolitým prostredím, dobrú chemickú odolnosť v kombinácii s vynikajúcou odolnosťou proti nízkym teplotám. Typické technologické procesy zahŕňajú vyfukovanie a tvarovanie. Lupolenu 4261 AG nie je určený pre použitie v lekárskejších a farmaceutických aplikáciách. Produkt nie je možné použiť pre styk s potravinami. [17]

##### 3.1.2 TEFABLOC TO SE 861 80A schwarz 2165 (TPE-A)

TPE je obecný názov pre termoplastický elastomér. Materiál má kaučukovitý charakter, avšak je ho možné spracovávať spracovateľskými technológiami určenými termoplastom ako napríklad vytlačovanie, vstrekovanie apod. Do skupiny TPE spadá široká škála materiálov, pretože ide o zmes dvoch polymérov, z ktorých jeden vytvára elastické väzby medzi molekulovými reťazcami druhého, podľa ktorého ich je možno rozdeliť do skupín:

- TPE-O
- TPE-S – styrérové zmesi na báze polyolefinu a SBS, SEBS alebo SEPS
- TPE-V – vulkanizovateľná zmes PP/EPDM
- TPE-E – kopolyesterová zmes
- TPE-U – termoplastický polyuretan
- TPE-A – termoplastický polyamid

[18]

### 3.1.3 HYTREL HTR4275 BK316 SCHWARZ (TEEE)

Materiál je určený pre vyfukovanie alebo iné spracovateľské techniky vyžadujúce vysokú viskozitu taveniny. Má nominálnu tvrdosť 55D, je pigmentovaný čiernou farbou s malou veľkosťou častíc sadzí, a obsahuje stabilizátor pre všeobecné použitie.

Funkčnosť môže byť tiež opísaná nasledujúcimi podmienkami: zvýšenou tepelnou odolnosťou, stabilnou teplotou starnutia a dobrou odolnosťou voči oderu.

Použitie môže byť tiež popísané nasledujúcimi podmienkami: Zhotovovanie a vytváranie povlakov na rúrky, drôty a káble a v automobilovom priemysle. [19]

### 3.1.4 Daplen BE 52 (16336) (PPH)

BE52 je vysoko tepelne stabilizovaný homopolymér, vyznačujúci sa vynikajúcou kombináciou odolnosti voči nárazom a tuhosťou. Je určený pre vyfukovanie. Má dobre vyvážené mechanické vlastnosti, nízku index toku taveniny, dobrú spracovateľnosť, je testovaný a schválený podľa UL 94 HB. Využíva sa zväčša k výrobe vyfukovaných dielov pre práčky.

### 3.1.5 ARNITEL PB 582-H (TPC-ET)

Arnitel ® PB582-H je termoplastický elastomér kopolyester (TPC-ET) materiál. Jeho funkcia môže byť opísaná nasledujúcimi podmienkami: zvýšenou tepelnou odolnosťou a odolnosťou voči tepelnému stárnutiu. [20]

## 3.2 Príprava vzoriek

### 3.2.1 Sušenie

Proces sušenia bol použitý len u materiálov, pri ktorých bol predpísaný materiálom listom. Sušenie bolo prevádzané v sušiarňi za predpísaných teplôt a dôb sušenia.

### 3.2.2 Prepracovanie

Prepracovanie zmesí prebiehalo homogenizáciou granulátu vo vytlačovacom stroji Collin podľa technologických predpisov udaných v materiálových listoch jednotlivých polymérov zhrnutými v tab. (prepracovanie). Celý proces prebiehal u každej zmesi trikrát, aby boli získané vzorky po viacnásobnom prepracovaní.

Materiál	Cyklus	Zóna I [°C]	Zóna II [°C]	Zóna III [°C]	Zóna IV [°C]	Rýchlosť [ot./min.]
LUPOLEN 4261 AG	I	130	160	180	180	90
	II	130	160	180	180	90
	III	130	160	180	180	90
TEFABLOC TO SE 861 80A schwarz 2165	I	170	180	190	190	34
	II	170	180	190	190	25
	III	170	180	190	190	25
HYTREL HTR4275 BK316 SCHWARZ	I	160	190	220	230	55
	II	160	190	210	220	55
	III	160	190	210	220	55
Daplen BE 52 (16336)	I	180	210	230	240	10-17
	II	180	210	230	240	19
	III	180	210	230	240	17
AKULON K240-HP SCHWARZ	I	195	225	245	255	60
	II	195	225	245	255	50
	III	195	225	245	255	50
ARNITEL PB 582-H	I	215	245	265	275	50
	II	215	245	265	275	50
	III	215	245	265	275	50

Tabuľka 1 Teploty zón vytlačovacieho stroja počas spracovania

### 3.2.3 Lisovanie

Lisovanie prebiehalo na dvoch ručných lisoch a proces chladenia bol prevádzaný v hydraulickom lise. Materiály boli lisované medzi dvoma kovovými doskami a v ráme o rozmeroch 125 x 125 x 2 mm. Teploty a časy jednotlivých procesov sú v tabuľke číslo (Lisovanie). Pre každý materiál bolo pripravených päť dosiek, z ktorých boli následne vysekané skúšobné telieska pre ťahovú skúšku.





Obrázok 15 Hydraulický chladiaci lis a ručný lis

Materiál	Výhrev		Lisovanie		Chladienie	
	$T$ [°C]	$\tau$ [min]	$T$ [°C]	$\tau$ [min]	$T$ [°C]	$\tau$ [min]
LUPOLEN 4261 AG	190	3	190	1	40	5
	190	3	190	1	40	5
	190	3	190	1	40	5
TEFABLOC TO SE 861 80A schwarz 2165	155	4	155	2	40	5
	155	4	155	2	40	5
	155	4	155	2	40	5
HYTREL HTR4275 BK316 SCHWARZ	250	10	250	2	40	5
	250	10	250	2	40	5
	250	10	250	2	40	5
Daplen BE 52 (16336)	230	4	230	2	40	5
	230	4	230	2	40	5
	230	4	230	2	40	5
AKULON K240-HP SCHWARZ	255	4	255	2	40	5
	255	4	255	2	40	5
	255	4	255	2	40	5
ARNITEL PB 582-H	260	4	260	2	40	5
	260	4	260	2	40	5
	260	4	260	2	40	5

Tabuľka 2 Teploty a doby jednotlivých fáz lisovania

### 3.2.4 Statická skúška ťahom

Meranie prebiehalo na FT UTB v Zlíne, v Demoroom ALPHA Technologies s.r.o., na trháacom stroji TENSOMETR 2000 (viz obr. č. ŤAHOVKA) a tam taktiež následne vyhodnotené. Prednostne boli skúmané tri základné mechanické vlastnosti polymérov a to napätie pri pretrhnutí, maximálne napätie a E-modul (v rozmedzí 0,025 – 0,05 %).



Obrázok 16 TENSOMETR 2000

Skúška prebiehala podľa normy ČSN EN ISO 527-3 (64 0604). Skúšobné telieska boli tvaru obojstranných lopatiek typu 5 zhotovených z vylisovaných dosiek po päť v každej sérii. Počiatočné rozpätie čeľustí bolo stanovené na 80 mm. Meranie zahŕňalo dve rýchlosti trhania:

- 1. Rýchlosť – 1 mm/min do modulu 2 %
- 2. Rýchlosť – 100 mm/min do pretrhnutia

## 4 DISKUSIA A ZÁVERY

### 4.1 Statická skúška ťahom

Vyhodnotenie kriviek statických ťahových skúšok a ich porovnaním navzájom v rámci každého materiálu zodpovedá zmenám jeho mechanických vlastností počas procesu opakovaného namáhania.

#### 4.1.1 Lupolen 4261 AG

Mechanické vlastnosti jednotlivých vzoriek prepracovaného HDPE sú spracované v tabuľke 3. Polymér vykazoval stabilné vlastnosti i po viacnásobnom prepracovaní, čo je výhodné pre proces prevádzkovej recyklácie, kedy sa odpadný materiál spracuje na granulát a opätovne použije v určitom percentuálnom objeme vo výrobe.

Cyklus	Predĺženie pri pretrhnutí		Maximálne napätie		E-modul	
	[%]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka
0	778,32	71,254	35,664	5,766	453,64	277,31
1	794,82	26,528	34,603	1,479	406,99	133,89
2	845,84	39,708	36,362	1,529	1906,8	2213,5
3	894,96	33,12	36,686	2,452	551,05	381,65

Tabuľka 3 Mechanické vlastnosti pre Lupolen 4261 AG

#### 4.1.2 TEFABLOC TO SE 861 80A schwarz 2165

TPE-A sa preukázal taktiež ako vhodný kandidát na opakované používanie v technologickom procese. Počas prvého prepracovania síce nastalo mierne kolísanie hodnoty E-modulu avšak ďalšie testy preukázali stabilné chovanie materiálu. Hodnoty sú spracované v tabuľke 4.

Cyklus	Predĺženie pri pretrhnutí		Maximálne napätie		E-modul	
	[%]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka
0	579,2	28,005	6,844	0,128	906,14	70,192
1	646,66	48,301	7,441	0,06	444,35	402,11
2	561,26	27,884	6,721	0,475	849,18	84,739
3	562,88	83,884	7,254	0,35	846,85	396,26

Tabuľka 4 Mechanické vlastnosti pre Tefabloc TO SE 861 80A schwarz 2165

#### 4.1.3 HYTREL HTR4275 BK316 SCHWARZ

Problematický materiál z hradiska mechanického chovania. Počas merania bol zaznamenaný prudký nárast predĺženia pri pretrhnutí a maximálneho napätia za klesajúceho E-modulu, čo naznačuje, že materiál sa stáva opakovaným prepracovaním plastickejším. Získané hodnoty sa nachádzajú v tabuľke 5.

Cyklus	Predĺženie pri pretrhnutí		Pevnosť v ťahu		E-modul	
	[%]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka
0	49,64	15,855	13,506	0,746	166,82	34,186
1	485,5	53,612	26,129	3,545	129,05	46,482
2	599,6	142,95	31,739	6,286	130,66	45,735
3	667,5	18,852	37,836	0,791	100,84	25,622

Tabuľka 5 Mechanické vlastnosti pre Hytrel HTR4275 BK316 schwarz

#### 4.1.4 Daplen BE 52 (16336)

Materiál s podobným chovaním ako TPE-A. Zistené hodnoty (tab. 6) poukazujú na stabilitu vlastností.

Cyklus	Predĺženie pri pretrhnutí		Pevnosť v ťahu		E-modul	
	[%]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka
0	875,6	34,176	34,687	3,802	6767,7	6790,5
1	638,24	285,84	28,81	2,31	11327	1146,8
2	867,68	71,654	29,788	1,373	9319,3	6288,7
3	1026	50,42	33,183	0,654	10367	6475,7

Tabuľka 6 Mechanické vlastnosti pre Daplen BE52

#### 4.1.5 ARNITEL PB 582-H

Polymér vykazuje stabilitu počas spracovania a určitým poklesom vlastností medzi hodnotami nespracovávaného materiálu a vzorky po prvom cykle, avšak ďalej zostávajú viac menej konštantné. Hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.

Cyklus	Predĺženie pri pretrhnutí		Pevnosť v ťahu		E-modul	
	[%]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka
0	713	63,271	38,306	2,647	36,65	25,688
1	483,64	11,476	30,152	0,786	644,55	1008,8
2	523,06	37,245	35,278	3,676	3371,4	2543,8
3	547,18	55,843	36,298	3,698	1027,8	1222,7

Tabuľka 7 Mechanické vlastnosti pre Arnitel PB582-H

#### 4.1.6 AKULON K240-HP SCHWARZ

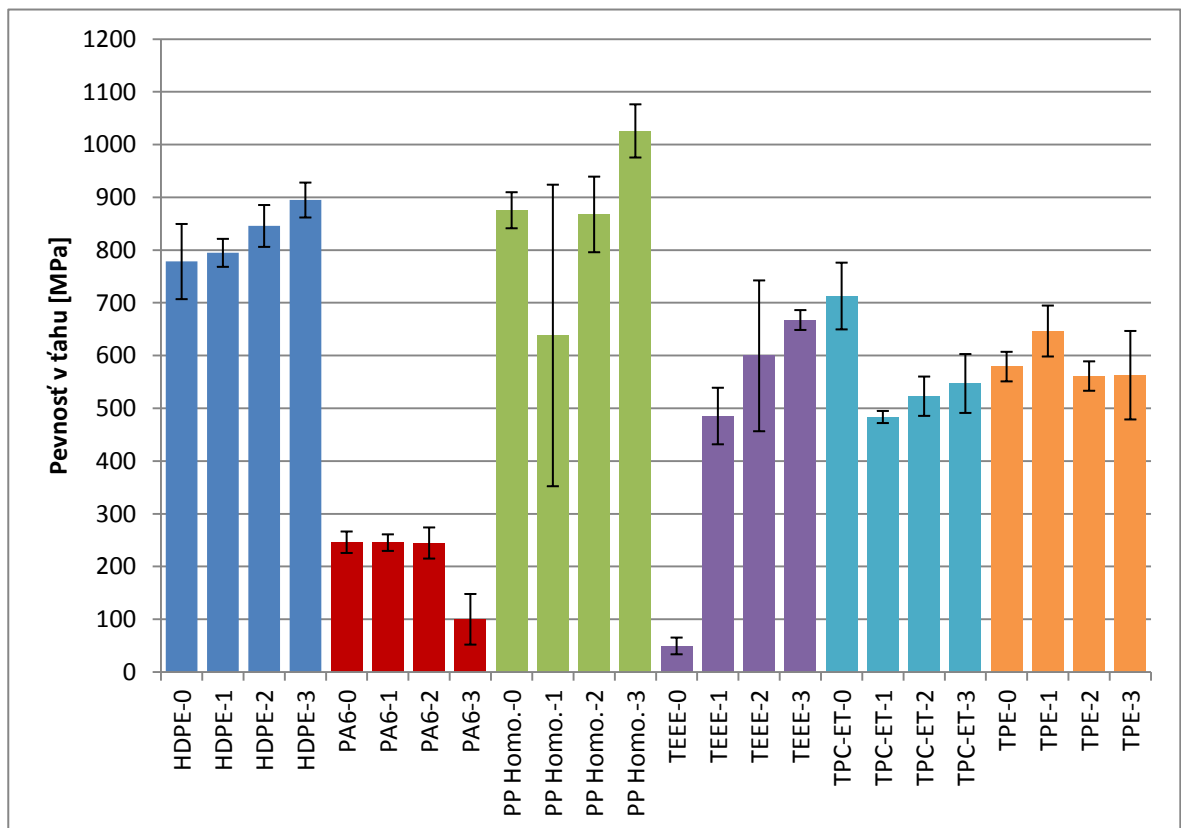
PA 6 degradoval zo všetkých skúmaných materiálov najviac. Dokázal si zachovať mechanické vlastnosti počas prvého cyklu avšak ďalej nasledoval ich spád. Zmerané hodnoty sú uvedené v tabuľke 8.

Cyklus	Predĺženie pri pretrhnutí		Pevnosť v ťahu		E-modul	
	[%]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka	$\sigma$ [MPa]	Odchýlka
0	246,23	20,371	58,328	3,41	5382,92	6325,3
1	245,46	15,714	60,198	4,083	4671,7	6244,9
2	244,76	29,516	53,31	8,611	6591,7	6961,1
3	100,1	48,001	42,492	1,24	11389	6780,1

Tabuľka 8 Mechanické vlastnosti pre Akulon K240-HP schwarz

## 4.2 Pevnosť v ťahu

Pre lepšie zobrazenie výsledkov boli dáta o pevnosti v ťahu prevedené do nasledujúcej tabuľky. Jak vidno, hodnoty u jednotlivých meraní nemajú rovnaký trend, bude treba vo výskume pokračovať a pokúsiť sa zistiť, prečo sú výsledky odlišné od obecného očakávania.



Obrázok 17 Súhrnný graf pevnosti v ťahu

## ZÁVER

Bakalárska práca sa zaoberala degradačnými procesmi pôsobiacimi na materiál počas spracovania, ich dôsledkami a dopadmi na mechanické vlastnosti. Hlavným cieľom bolo hodnotenie vplyvu technologického procesu opakovaného prepracovania, z dôvodu opakovaného používania odpadového materiálu v určitom percentuálnom objeme vo výrobnom procese. Zahŕňa všeobecné vlastnosti polymérov so zameraním na štruktúru a metódy používané k zisťovaniu mechanických vlastností.

V praktickej časti skúma degradačné procesy na vybranú skupinu materiálov so zameraním na zmenu vlastností po cyklickom spracovávaní so zameraním na statické skúšky ťahom. Hodnotí základné materiálové vlastnosti ako je predĺženie pri pretrhnutí, maximálne napätia a E-modul. Bolo zistené, že u materiálov za použitia predpísaných hodnôt pre spracovateľský proces degradácia neprebíha, alebo prebieha len minimálne, až na PA-6, u ktorého bol zistený spád vlastností po druhom prepracovaní.

**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY**

- [1] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [3] Morfologie. Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci: Oddělení tváření kovů a plastů [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzV1a/FMkomplet3.htm>
- [4] Studijní materiály - Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/vip.htm>
- [5] MÉZL, Milan, 2012. Základy technológie vstrekovania plastov. Olomouc: Mapro, 301 s.
- [6] ISBN 978-80-970749-7-5. PROKOPOVÁ, Irena. Makromolekulární chemie. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-807-0806-623.
- [7] STOKLASA, Karel. Makromolekulární chemie I. Zlín: UTB, 2005, 106 s
- [8] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007, 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [9] ASKELAND, Donald R, Pradeep P FULAY a Wendelin J WRIGHT. The science and engineering of materials. 6th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, c2011, xxi, 921 p. ISBN 04-956-6802-8.
- [10] MLEZIVA, Josef. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 80-901-5704-1.
- [11] HAGEN, Vladislav. Únava a stárnutí materiálu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1981.
- [12] Šimek, J.: Hodnocení pevnostních parametrů součástí vytvořených metodami rapid prototyping; diplomová práce FSI VUT v Brně. Brno 2008



- [13] COLIN, Xavier a Jacques VERDU. Polymer degradation during processing. *Comptes Rendus Chimie*. 2006, vol. 9, 11-12, s. 1380-1395. DOI: 10.1016/j.crci.2006.06.004.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631074806000889>
- [14] MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMERS. [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: [http://info.smithersrapra.com/downloads/chapters/Physical%20testing%20of%20plastics\\_chapter%201.pdf](http://info.smithersrapra.com/downloads/chapters/Physical%20testing%20of%20plastics_chapter%201.pdf)
- [15] RYBNIKÁŘ, František. Analýza a zkoušení plastických hmot. 1. vyd. Praha: SNTL, 1965, 418 s.
- [16] Mechanické vlastnosti materiálů a ich skúšanie [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: [http://web.tuke.sk/hf-knom/content/studenti/predmety/nom\\_hf/text\\_c2.pdf](http://web.tuke.sk/hf-knom/content/studenti/predmety/nom_hf/text_c2.pdf)
- [17] LUPOLEN 4261 AG: Materiálový list [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: [https://polymers.lyondellbasell.com/portal/site/basell/template.PAGE/menuitem.em.f1ff80c98625adef62e408fde5548a0c/?VCMChannelID=2daf473032095110VgnVCM100000646f3c14\\_\\_\\_\\_&javax.portlet.tpst=7bc706488cd9f36418c3691026f6c341&javax.portlet.pst=7bc706488cd9f36418c3691026f6c341\\_ws\\_MX&javax.portlet.prp\\_7bc706488cd9f36418c3691026f6c341\\_viewID=single\\_product\\_grade&VCMContentID=e22e95b162337010VgnVCM100000646f3c14RCRD](https://polymers.lyondellbasell.com/portal/site/basell/template.PAGE/menuitem.em.f1ff80c98625adef62e408fde5548a0c/?VCMChannelID=2daf473032095110VgnVCM100000646f3c14____&javax.portlet.tpst=7bc706488cd9f36418c3691026f6c341&javax.portlet.pst=7bc706488cd9f36418c3691026f6c341_ws_MX&javax.portlet.prp_7bc706488cd9f36418c3691026f6c341_viewID=single_product_grade&VCMContentID=e22e95b162337010VgnVCM100000646f3c14RCRD)
- [18] Termoplastický elastomer [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/tpe.html>
- [19] HYTREL HTR4275 BK316 SCHWARZ: Materiálový list [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://plastics.ides.com/datasheet/e37016/hytrel-htr4275-bk316>
- [20] ARNITEL PB 582-H: Materiálový list [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://plastics.ides.com/datasheet/e75093/arnitel-pb582-h>
- [21] EL'DAROV, E.G., F.V. MAMEDOV, V.M. GOL'DBERG a G.E. ZAIKOV. A kinetic model of polymer degradation during extrusion. *Polymer Degradation and Stability*. 1996, vol. 51, issue 3, s. 271-279. DOI: 10.1016/0141-3910(95)00160-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141391095001603>

- [22] Statické zkoušky krátkodobé [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)
- [23] SANTOS, A.S.F, J.A.M AGNELLI, D.W TREVISAN a S MANRICH. Degradation and stabilization of polyolefins from municipal plastic waste during multiple extrusions under different reprocessing conditions. *Polymer Degradation and Stability*. 2002, vol. 77, issue 3, s. 441-447. DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00101-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391002001015>
- [24] DA COSTA, Helson M., Valéria D. RAMOS a Márcia G. DE OLIVEIRA. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*. 2007, vol. 26, issue 5, s. 676-684. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.04.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941807000591>

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

PE	Polyetylén
PP	Polypropylén.
$T_m$	Teplota mäknutia
$T_g$	Teplota skelného prechodu
$T_f$	Teplota tečenia
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyrén
PMMA	Polymetylmetakrylát
HDPE	Vysoko-hustotný polyetylén
TPE-A	Termoplastický elastomér - polyamid
TPE	Termoplastický elastomér
TEEE	Termoplastický elastomér polyester éter
PPH	Polypropylén homopolymér
$\varepsilon$	Pomerné predĺženie
$\sigma$	Napätie
$\rho$	Hustota
P	Spracovateľnosť
PF	Prahová hodnota spracovateľnosti
x	Konverzný pomer starnutia
T	Teplota
$t_F$	Životnosť
ITT	Index toku taveniny

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázok 1 Štruktúra polymérov: a) lineárna štruktúra, b) vetvená, c) a d) sieťovaná štruktúra.....	13
Obrázok 2 Kryštalicko amorfná štruktúra a schéma lamelárneho monokryštálu [7] .....	18
Obrázok 3 Schematické znázornenie dendridu [6].....	19
Obrázok 4 Štruktúra sférolitu .....	20
Obrázok 5 Štádiá rastu sférolitu [7].....	20
Obrázok 6 Schéma deformácií lineárnych polymérov [8].....	22
Obrázok 7 Transformácia makromolekuly počas procesu vytlačovania [21] .....	24
Obrázok 8 Znázornenie vplyvu teploty spracovania (doba spracovania sa predpokladá konštantná) na spracovateľnosť. (A) Vplyv fyzikálnych parametrov. (B) Vplyv tepelnej degradácii. [13] .....	25
Obrázok 9 Rôzne typy skúšobných teliesok [22] .....	29
Obrázok 10 Krivky napätia na predĺženie: (a) krehký materiál, (b, c) húževnatý materiál s medzou klzu, (d) húževnatý materiál bez medze klzu. [15].....	30
Obrázok 11 Diagram statickej ťahovej skúšky [15] .....	31
Obrázok 12 Princíp skúšky rázom v ohybe [16].....	34
Obrázok 13 Skúška podľa Brinella [16] .....	35
Obrázok 14 Skúška podľa Vickersa [16].....	35
Obrázok 15 Hydraulický chladiaci lis a ručný lis.....	41
Obrázok 16 TENSOMETR 2000.....	42
Obrázok 17 Súhrnný graf pevnosti v ťahu.....	46

**SEZNAM TABULEK**

Tabuľka 1 Teploty zón vytlačovacieho stroja počas spracovania .....	40
Tabuľka 2 Teploty a doby jednotlivých fáz lisovania .....	41
Tabuľka 3 Mechanické vlastnosti pre Lupolen 4261 AG.....	43
Tabuľka 4 Mechanické vlastnosti pre Tefabloc TO SE 861 80A schwarz 2165.....	43
Tabuľka 5 Mechanické vlastnosti pre Hytrel HTR4275 BK316 schwarz.....	44
Tabuľka 6 Mechanické vlastnosti pre Daplen BE52 .....	44
Tabuľka 7 Mechanické vlastnosti pre Arnitel PB582-H .....	45
Tabuľka 9 Mechanické vlastnosti pre Akulon K240-HP schwarz .....	45

