

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MECHANICAL SCIENCE AND ENGINEERING

MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ

MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK SUCHÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA NOVOTNÁ, Ph.D.

BRNO 2009

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá plasty z hlediska jejich stavby a vnitřní struktury. Rozebírá dopad těchto charakteristik na výsledné mechanické vlastnosti materiálu. Dále zkoumá, jaké vnější vlivy významně působí na polymerní řetězce. V závěru uvádí dvě základní metody zjišťování mechanických vlastností – zkoušku tahem a zkoušku ohybem.

Klíčová slova:

Polymerní řetězec, struktura polymeru, plast, mechanické vlastnosti, zkouška tahem, zkouška ohybem.

Abstrakt:

This bachelor thesis deals with the plastics in terms of their internal structures. Analyzes the impact of these characteristics on the resulting mechanical properties of materials. Furthermore, examining the external influences significantly on the polymer chain operates. Concludes two basic methods for the detection of mechanical properties - tensile test and three-point bend tests.

Key words:

Polymer, polymer chain, structure of polymer, plastics, mechanical properties, tensile test, three-point bend test.

Bibliografická citace:

SUCHÝ, M. *Mechanické vlastnosti plastů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 27 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Novotná, Ph.D., Paed IGIP.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Mechanické vlastnosti plastů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 28. 5. 2009

.....
Marek Suchý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP, za cenné připomínky, rady a pomoc, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování	5
Obsah.....	6
1. Cíl práce.....	7
2. Historie plastů	8
3. Základní pojmy.....	9
3.1 Definování plastu.....	9
3.2 Definování polymeru.....	9
3.3 Polyreakce.....	9
3.3.1 Polymerace.....	9
3.3.2 Polykondenzace	10
3.3.3 Polyadice.....	10
3.4 Složení řetězce.....	11
3.5 Struktura (stavba) řetězce	11
3.6 Konfigurace (tacticita) řetězce	12
3.7 Konformace řetězce.....	12
3.8 Sekundární vazebné síly.....	13
3.9 Krystalizace.....	14
3.10 Tranzitivní teploty.....	15
3.11 Modul pružnosti E jako funkce teploty a času.....	16
3.12 Chování polymerů při tahovém zatěžování.....	17
4. Zkoušky mechanických vlastností.....	20
4.1 Zkouška tahem.....	20
4.1.1 Postup měření	20
4.1.2 Zkušební stroj.....	20
4.1.3 Zkušební vzorky.....	21
4.1.4 Typové chování plastů při tahové zkoušce	22
4.2 Zkouška ohybem.....	24
4.2.1 Postup měření.....	24
4.2.2 Zkušební stroj.....	24
4.2.3 Zkušební těleso.....	25
Závěr.....	26
Seznam použitých zdrojů.....	27

1. Cíl práce

Úkolem této práce je zkoumat plasty z hlediska jejich použitelnosti pro technickou praxi. Nejdříve se bude zabývat vznikem polymerních materiálů, stavbou a strukturou řetězců a dopad na mechanické vlastnosti. Dále jsou zkoumány důležité faktory - jakými jsou například teplota okolí, rychlost zatěžování a stupeň krystalinity - ovlivňující výsledné chování materiálu. Na závěr budou uvedeny dvě základní zkoušky mechanických vlastností - zkouška tahem a zkouška ohybem.

2. Historie polymerů a plastů

S přírodními polymery, jako například dřevo, kůže nebo rostlinná vlákna, se lidstvo setkává již od svých počátků. Umělé polymery byly poprvé syntetizovány v 19. století.

V roce 1839 americký vynálezce Charles Goodyear experimentoval s úpravou přírodní gumy pomocí síry. Tento proces nazval vulkanizace. V porovnání s neupravenou přírodní gumou je vulkanizovaná guma pevnější, odolnější proti obrušování, méně citlivá na teplotu a vysoce odolná na chemikálie a průraz elektrického proudu.

V polovině devatenáctého století objevil Alexandr Parkes nitrát celulózy. Ten byl poprvé veřejnosti představen roku 1862 v Londýně. John W. Hyatt zlepšil vlastnosti tohoto nitrátu smícháním s kافrem a nazval nový produkt celuloid. Tento nový plast byl s oblibou používán na výrobu hřebenu, knoflíků a rukojetí, ve formě folie dal základ filmovému průmyslu.

Nové polymerní materiály ve svých počátcích představovaly modifikované přírodní látky, z nichž nejznámější je viskózní vlákno vynalezené roku 1891. Tento polopřírodní polymer vyráběný z celulózy je používán v textilním průmyslu a je znám jako celofán.

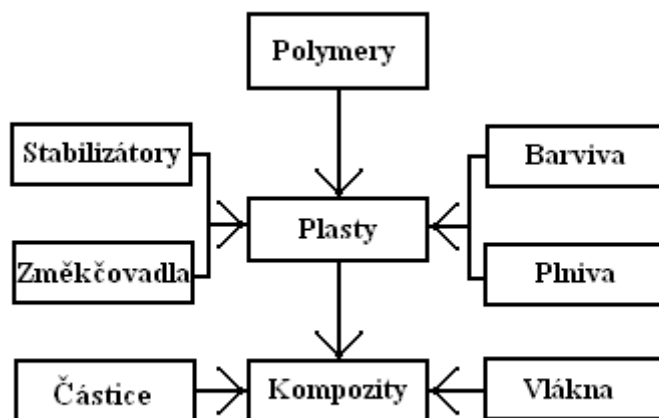
Roku 1909 Leo Baekeland v Americe vynalezl první plně syntetický plast – bakelit. Tento plast vyráběný z fenolu a formaldehydu se vyznačuje pevností, lehkostí, tepelnou odolností a dobrými izolačními vlastnostmi. Z těchto důvodů byl dlouho používán v elektrotechnice [1].

K masovému rozvoji a využití plastů došlo během 2. světové války a na začátku 50. let. Dnes plasty běžné střídají tradiční materiály jako je dřevo, kovy, sklo, kůže, papír a přírodní pryž, protože jsou lehčí, pevnější, odolnější proti korozi, trvanlivější, snadněji zpracovatelné a mají lepší izolační vlastnosti. Z těchto důvodů je použití plastů ve srovnání s klasickými materiály ekonomicky výhodnější. V mnohých případech je použití plastů výhodnější i z hlediska technologického a konstrukčního. Při praktické aplikaci je ovšem nutné nezapomínat, že oproti kovům mají plasty silnou závislost téměř všech mechanických vlastností na teplotě, rychlosti a době zatěžování [2].

3. Základní pojmy

3.1 Definice plastu

Plasty jsou materiály, jenž jsou tvořeny polymery a přísadami typu plniv, změkčovel, stabilizátorů, maziv, barviv aj. [3] , obr. 3.1 [4].



Obr. 3.1: Polymery – plasty – kompozity [4]

3.2 Definice polymeru

Polymer je chemicky čistá, makromolekulární látka, která má jasně definovaný chemický vzorec. Základním strukturním prvkem polymerů je atom uhlíku C, který je díky své atomové struktuře schopen vytvořit čtyři kovalentní vazby. Jednotlivé atomy uhlíku mohou být mezi sebou vázány buď jednoduchou vazbou, nebo vazbou násobnou (dvojnou, resp. trojnou) [3].

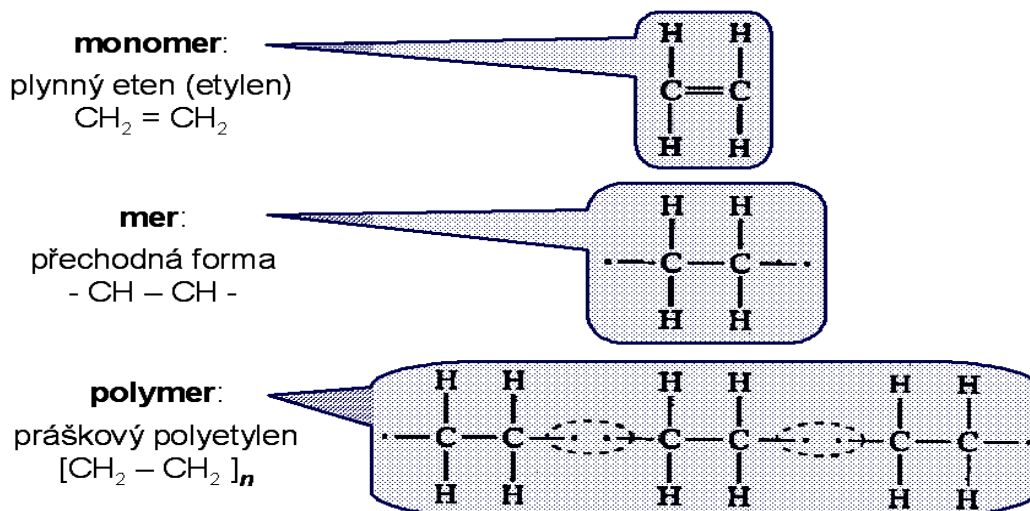
3.3 Polymerační reakce

Polymery vznikají z jednoduchých organických látek polyreakcemi, mezi které řadíme polymerace, polykondenzace a polyadice.

3.3.1 Polymerace

Polymerace je polyreakce, do které vstupuje jedna nízkomolekulární organická sloučenina. Při reakci dochází působením vysokého tlaku, teploty a za současného působení katalyzátorů ke štěpení násobných vazeb v monomeru a vzniku meru. Vysoce reaktivní konce rozštěpených vazeb jednotlivých merů se vzájemně naváží a dojde ke vzniku polymerních řetězců o různých délkách [3].

Výsledným produktem je polymer bez přítomnosti odštěpené látky. Na **obr. 3.2, [5]** je příklad polymerace polyetylenu PE [5].

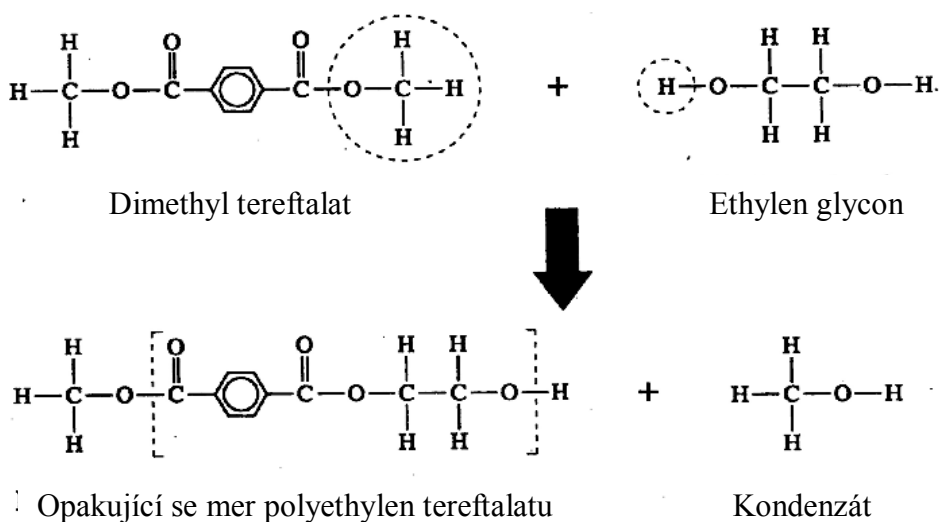


n je polymerační stupeň (počet merů v řetězci); udává celkovou délku polymerního řetězce.

Obr. 3.2: Polymerace PE [5]

3.3.2 Polykondenzace

Polykondenzace je reakce, při které reagují dvě různé organické sloučeniny za vzniku požadovaného polymeru a odštěpujícího se nízkomolekulárního kondenzátu (**obr. 3.3,[5]**).



Obr. 3.3: Polykondenzace [5]

3.3.3 Polyadice

Polyadiční reakce je podobná polykondenzaci s tím rozdílem, že nevzniká nízkomolekulární kondenzát.

3.4 Složení řetězce

Homopolymer obsahuje ve svém řetězci pouze mery jednoho typu.

Kopolymer obsahuje dva typy merů; při stejném chemickém složení může mít rozdílné mechanické vlastnosti, neboť záleží na tom, jak jsou při výrobě polymeru jednotlivé mery uspořádány (**obr 3.4**) [3].

- ⇒ *statistický*: mery se střídají zcela náhodně
- ⇒ *alternující*: pravidelné střídání merů
- ⇒ *blokový*: mery se střídají v blocích
- ⇒ *roubovaný*: hlavní (páteřní) řetězec je tvořen jedním typem meru a druhý je napojen jako boční skupina



Obr. 3.4: Kopolymer statistický (a), alternující (b), blokový (c), roubovaný (d) [3]

3.5 Struktura (stavba) řetězce

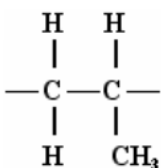
Výsledné mechanické vlastnosti polymeru jsou značnou měrou závislé na struktuře řetězce, obzvláště pak vzhledem ke směru řetězců a působících sil. V zásadě dělíme řetězce do čtyř základních skupin (**obr 3.5**) [3]:

- ⇒ *lineární*: existuje pouze jeden hlavní řetězec
- ⇒ *rozvětvený*: na hlavní řetězec jsou napojeny řetězce boční
- ⇒ *zesítěný*: řetězce jsou mezi sebou vzájemně v ploše propojeny
- ⇒ *3D – síť*: řetězce tvoří prostorovou síť



Obr. 3.5: Řetězec lineární (a), rozvětvený (b), zesítěný (c), 3D - síť (d) [3]

3.6 Konfigurace (takticita) řetězce

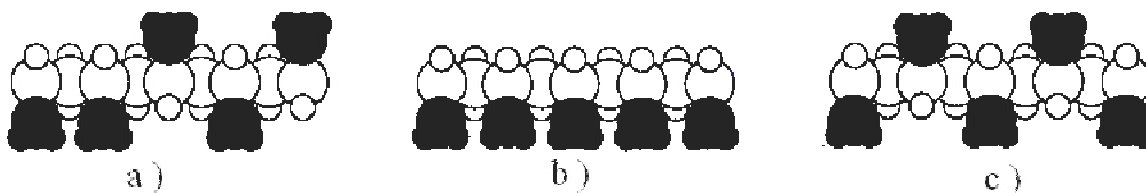


Takticita popisuje systém uložení bočních skupin atomů kolem základního řetězce; má přímý dopad na vlastnosti materiálu. Pravidelně uspořádané řetězce je totiž možno poskládat blíž k sobě, a proto vykazují větší pevnost. Změna konfigurace řetězce je možná pouze chemickým zásahem.

Modelovým materiálem bude polypropylen PP, jehož výstavbovou jednotkou je mer uvedený na **obr. 3.6** [3].

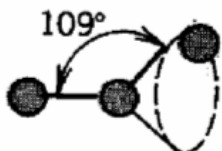
Obr. 3.6: Mer PP [3]

- ⇒ *ataktický*: boční skupiny jsou uloženy náhodně kolem základní páteře
- ⇒ *izotaktický*: boční skupiny jsou uloženy po jedné straně základní páteře
- ⇒ *syndiotaktický*: boční skupiny jsou uloženy pravidelně střídavě kolem základní páteře



Obr. 3.7: Řetězec ataktický (a), izotaktický (b), syndiotaktický (c) [3]

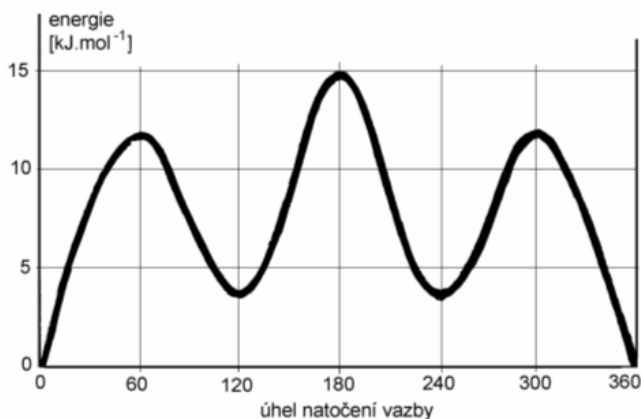
3.7 Konformace řetězce



Obr. 3.8: Rotace vazby mezi atomy uhlíku [3]

Na **obr. 3.8** jsou znázorněny tři atomy uhlíku vázané mezi sebou jednoduchou vazbou o délce vazby 0,154 nm a úhlem 109,5°. Jednoduché vazby jsou schopny rotace, a proto může třetí atom uhlíku ležet v libovolném bodě po obvodu podstavy kužele daném úhlem a délkou vazby.

Každé poloze přísluší určitá energie, přičemž jsou přednostně vybírány polohy s minimální energií (**obr. 3.9, tab. 3.1**) [3].



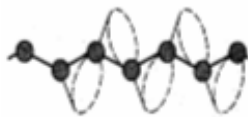
Obr. 3.9: Energie natočení vazby [3]

Úhel natočení [°]	Energie [kJ/mol]	Název polohy
0	0	trans
60	12	
120	3,4	gauche pravá
180	15	cis
240	3,4	gauche levá
300	12	
360	0	trans

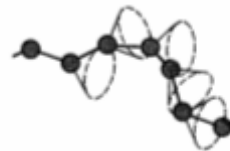
Tab. 3.1: Energie natočení vazby [3]

Lineární řetězce bez bočních skupin se formují do postavení *trans – trans*, což vede ke tvaru zvanému cik – cak (např. řetězce PE) (**obr. 3.10**), [3].

Řetězce s malou boční skupinou, jakým je například izotaktický PP, se ukládají do pozice *trans – gauche pravá*, což vede ke vzniku šroubovice – helixu – s boční skupinou uloženou v úhlu 120° (**obr. 3.11**) [3].



Obr. 3.10: Cik – cak řetězec [3]



Obr. 3.11: Šroubovice řetězce [3]

Ohebnost řetězce - schopnost měnit tvar - závisí na počtu tzv. ohebných kloubů připadajících na jednotku meru. V zásadě rozdělujeme ohebné klouby do čtyřech základních skupin [3]:

- ⇒ velmi dobře ohebný kloub: methylová skupina $-\text{CH}_2-$, dvouvazný kyslík $-\text{O}-$ a síra $-\text{S}-$, skupiny $-\text{NH}-$, $-\text{SO}_2-$
- ⇒ poměrně dobře ohebný kloub: symetricky situovaný uhlík $-\text{CF}_2-$ a křemík $-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-$
- ⇒ málo ohebný kloub: nesymetricky situovaný uhlík $-\text{C}(\text{CH}_3)-$
- ⇒ zásadně omezující v ohybu: rozměrné boční útvary (např. benzenová jádra) a násobné vazby v řetězci

Ohebnost a rotace řetězce závisí na struktuře meru a na vnitřní energii systému (čím je vyšší teplota a tedy i vnitřní energie, tím je pohyb řetězců snadnější). Je tedy možné tyto dvě vlastnosti ovlivnit fyzikálním zásahem – ohřevem [3].

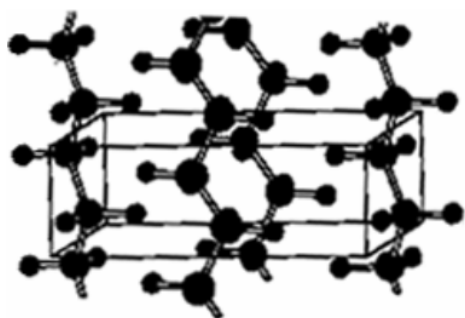
3.8 Sekundární (van der Waalsovy) vazebné síly

Sekundární (intermolekulární) vazebné síly působí mezi řetězci, drží je pohromadě a umožňují tak vznik polymerního materiálu jako celku. Jsou však slabé, vazebná energie se pohybuje řádově kolem 10 kJ/mol.

Existence sekundárních vazeb je podmíněna nesymetrickým rozložením kladného a záporného náboje v molekule. Tyto náboje se navenek vyruší (mají stejnou velikost), ale do malých vzdáleností se molekuly s opačně nabitými dipóly přitahují [3].

- ⇒ *Disperzní (Londonovy) síly* – jsou vyvolány nepatrnou polarizací způsobenou pohybem elektronů. Jsou slabé, ale nezávisí na teplotě.
- ⇒ *Permanentní dipól* – tvoří jej molekuly obsahující polární vazby. Permanentní dipóly mají tendenci se vzájemně orientovat. Tato snaha je však narušována tepelným pohybem molekul. Proto se koheze permanentními dipóly s rostoucí teplotou snižuje.
- ⇒ *Indukovaný dipól* – vzniká v blízkosti permanentních dipólů, které polarizují okolní původně neutrální vazby.
- ⇒ *Vodíkové můstky* – jsou nejsilnějším typem sekundární vazby, tvoří přechod k primárním vazbám.

3.9 Krystalizace



Obr. 3.12: Struktura PE [3]

Krystalinita polymerů popisuje takové uspořádání makromolekulárních řetězců, při kterém jsou atomy uloženy pravidelně. Krystalové uspořádání polymerů jsou než u kovů. Na **obr. 3.12**, [3] je zobrazeno uspořádání řetězců PE do ortorombické ($a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) mřížky.

V důsledku tvaru a složité stavby jsou polymerní makromolekuly semikrystalické (tz. krystalické pouze z části), protože každá nepravidelnost, nebo natočení řetězce brání přesnému uspořádání jednotlivých segmentů a způsobuje amorfnost materiálu.

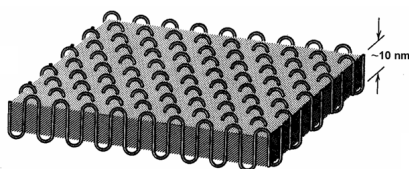
Krystalické oblasti jsou rozloženy v amorfním zbytku materiálu a semikrystalické polymery jsou tudíž analogií dvoufázových struktur u kovů. Pro daný polymer s určitou molekulovou hmotností bude hustota jeho krystalické formy vyšší než hustota formy amorfní, neboť v krystalové struktuře mají řetězce těsnější uspořádání [3].

Stupeň krystality k [%] může být 0 % až 95 % a je dán vztahem $k = \frac{\rho_c(\rho_v - \rho_a)}{\rho_v(\rho_c - \rho_a)} \cdot 100$ [%],

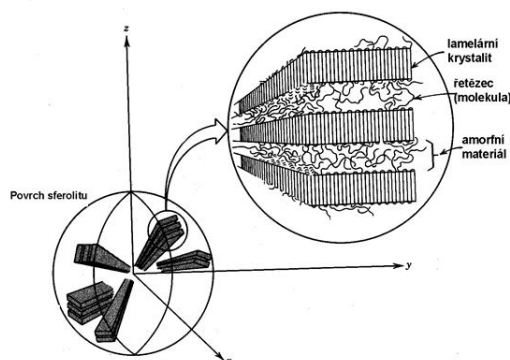
kde ρ_c je hustota zcela krystalického polymeru, ρ_v hustota zkoumaného semikrystalického polymeru a ρ_a hustota zcela amorfního polymeru.

V závislosti na podmínkách krystalizace vznikne [3]:

- ⇒ *lamela*: vzniká při krystalizaci zředěného roztoku; destička o tloušťce 10 nm až 20 nm a délce řádově 10 μm , ve které je za sebou naskládaný určitý počet řetězců (**obr 3.13**, [3])
- ⇒ *sferolit*: vzniká při krystalizaci taveniny; lamely rostou radiálně z krystalizačního zárodku a jsou oddělené amorfním podílem (**obr 3.14**) [3].



Obr. 3.13: Lamela [3]



Obr. 3.14: Sferolit [3]

Stupeň krystalinity je dán rychlostí ochlazování při tuhnutí materiálu a konfigurací řetězce. Ve viskózní kapalině jsou řetězce náhodně rozložené a zapletené. Během ochlazování přes teplotu tání se musí uspořádat do organizované konfigurace. Je potřeba určitý čas, aby se řetězce mohly uspořádat a naskládat [3]:

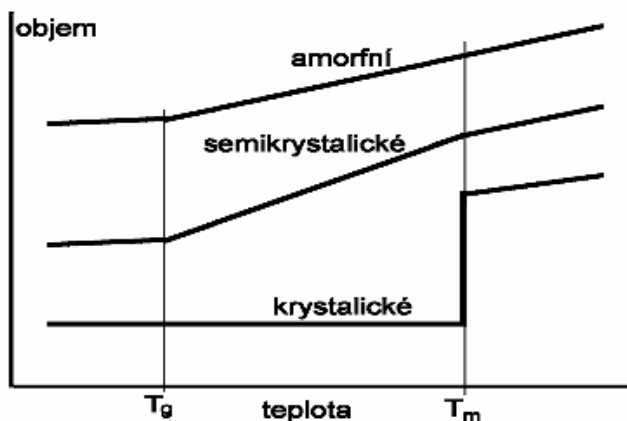
- ⇒ jednoduché lineární řetězce (např. PE) krystalizují ochotně, nejsou vážné překážky v uspořádání
- ⇒ rozvětvení řetězce brání krystalizaci; málo rozvětvené polymery mají nízký stupeň krystalinity, větší rozvětvení krystalizaci takřka znemožňují
- ⇒ zesítěné polymery mohou dosáhnout pouze omezeného stupně krystalinity
- ⇒ 3D- sítě jsou téměř amorfni
- ⇒ ataktické řetězce krystalizují jenom obtížně
- ⇒ isotaktické a syndiotaktické řetězce krystalizují pro svoji pravidelnou uspořádanost o mnoho lépe
- ⇒ alternující a bokové polymery mohou dosáhnout jisté krystalinity
- ⇒ náhodné a roubované kopolymery jsou běžně amorfni.

Krystalické polymery jsou obvykle pevnější a odolnější vůči měknutí a rozpadu vlivem tepla.

3.10 Tranzitní teploty

Při určitých teplotách dochází ke skokové změně objemu. Tyto teploty nazýváme tranzitní **obr 3.15, [3]**.

- ⇒ pro krystalický podíl semikrystalického polymeru se určuje standardní *teplota tání* T_m jako teplota, při níž atomy či ionty látky opouštějí svá místa v přesně organizované krystalové mřížce
- ⇒ pro amorfni podíl je určována *teplota skelného přechodu* T_g , která je pro daný polymer charakteristická; obvykle platí, že $T_g \cong \frac{2}{3} T_m$



Obr. 3.15: Závislost objemu materiálu na teplotě [3]

Při $T > T_g$ jsou možné konformační změny řetězců, polymer je kaučukovitý a schopný deformace. S klesající teplotou probíhají změny obtížněji a při dosažení $T = T_g$ se řetězce ustaví do stabilní konformace. Při $T < T_g$ je amorfni polymer sklovitý, tvrdý a křehký. Teplota T_g stoupá s rostoucí mezimolekulovou soudržností a s klesající ohebností řetězců [3].

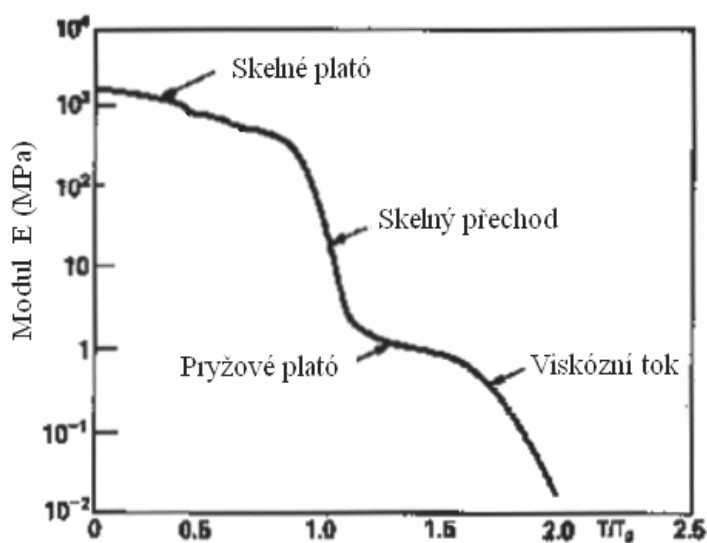
3.11 Modul pružnosti E jako funkce teploty a času

Většina konstrukcí je projektována na tuhost, tj. schopnost materiálu odolávat elastické deformaci; základním požadavkem je, aby nedošlo k plastické deformaci. Elastická deformace polymerů je časově a teplotně závislá a lze ji určit z Hookova zákona jako

$\varepsilon(t, T) = \frac{\sigma}{E}$. Pro tuhost konstrukce je tudíž nejdůležitější materiálovou charakteristikou

Youngův modul pružnosti E , který u polymerů nevykazuje konstantní hodnoty, ale závisí na čase a teplotě.

Modul pružnosti E závisí na teplotě okolí, resp. jak blízko je tato teplota k teplotě skelného přechodu T_g daného polymeru. Proto s výhodou vyjadřujeme vlastnosti polymeru vzhledem k tzv. normalizované teplotě T/T_g [3].



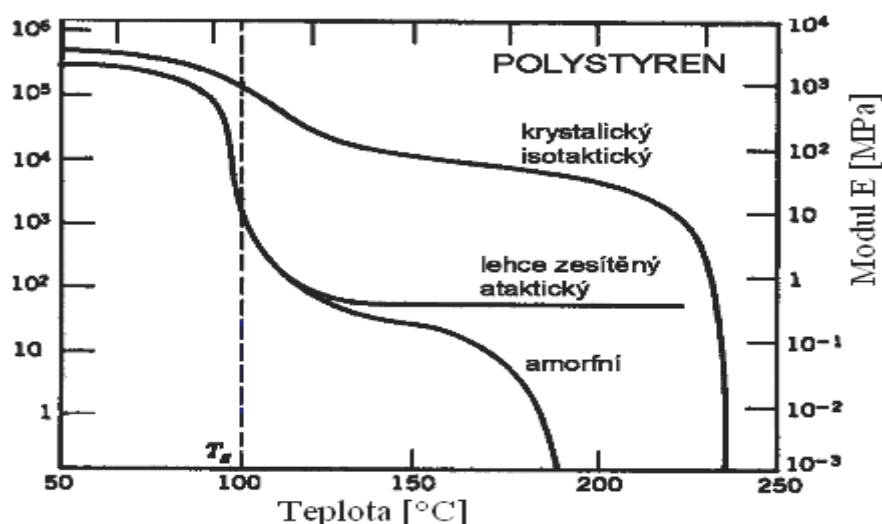
Obr. 3.16: Závislost modulu E na poměru T/T_g [3]

Na obr 3.16 [5] je možno rozlišit čtyři charakteristické oblasti [3]:

- ⇒ *oblast skelného režimu*: vysoká hodnota E (kolem 3GPa); makromolekuly polymeru uspořádány v amorfních zapleteninách nebo v krystalitech s amorfním podílem mezi nimi; napínány primární i sekundární vazby
- ⇒ *oblast skelného přechodu*: pokles E (až o tři řády nižší, 3MPa); porušování sekundárních vazeb s rostoucí teplotou; polymer vykazuje kožovité vlastnosti

- ⇒ *pryžové plató*: z materiálu s krátkými řetězci ($n < 10^3$) se stává lepkavá tekutina; dlouhé řetězce v sobě zůstávají zapleteny a při slabém zesítnění se z nich stávají elastomery (materiál schopný i více než 300% elastické deformace)
- ⇒ *oblast viskózního toku*: porušeny všechny sekundární vazby; lineární polymery se mění na viskózní kapalinu, zesítněné polymery jsou trvale poškozeny a dochází k degradaci materiálu

Modul pružnosti E je ovlivněn také stupněm krystalinity a zesítnění polymerního materiálu (obr. 3.17), [3].



Obr. 3.17: Závislost modulu E na teplotě pro různé druhy polystyrénu [3]

3.12 Chování polymerů při tahovém zatěžování

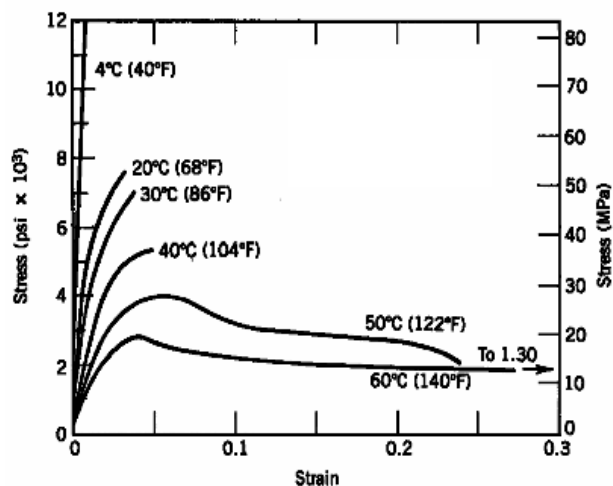
U polymerních materiálů je důležitým faktorem ovlivňující výsledné mechanické vlastnosti teplota okolí; na obr. 3.18 je vidět změna mechanických vlastností polymethylmethakrylátu (PMMA) v závislosti na teplotě. Při nízkých teplotách je materiál pevný, ale křehký. S rostoucí teplotou se snižuje jeho pevnost a roste schopnost plastické deformace.

Stojí za povšimnutí, že u sledovaného polymerního materiálu dojde k změně chování ze zcela křehkého na velmi plastické v teplotním rozsahu 4°C až 60°C, což je ve srovnání s kovy zcela odlišná teplotní oblast změn vlastností materiálu. U kovů by podobná změna vlastností šla očekávat při podstatně vyšších teplotách.

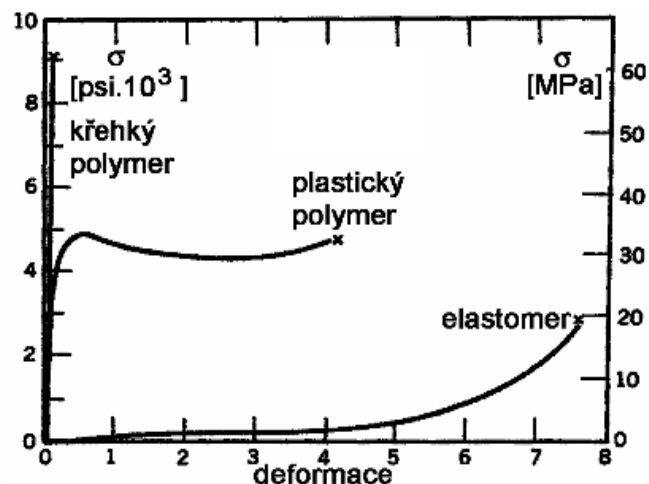
V zásadě rozlišujeme tři charakteristické typy chování polymerů (obr. 3.19), [3]:

- ⇒ *křehké polymery*: k porušení dojde už při elastické deformaci
- ⇒ *plastické polymery*: počáteční elastická deformace přechází v plastickou
- ⇒ *elastomery*: materiály schopné dosáhnout deformace řádově až 10^3 %

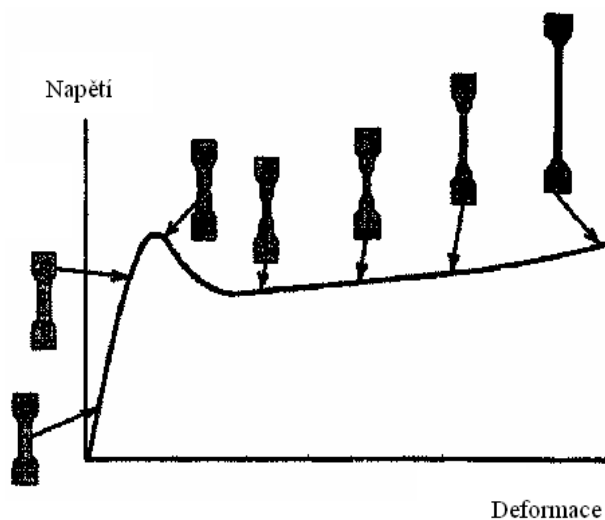
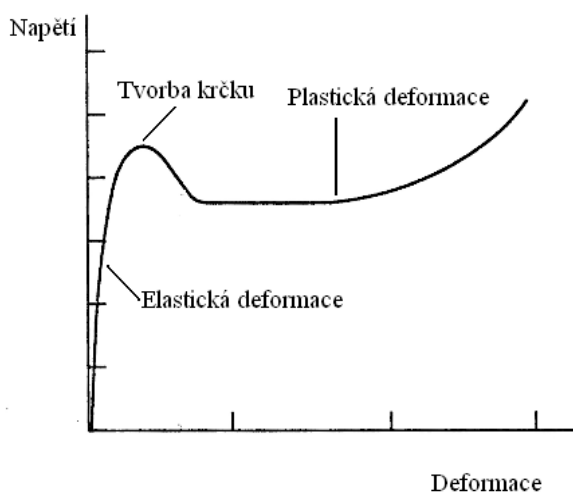
Na rozdíl od kovových materiálů nedojde při tahovém namáhání semikrystalického polymeru po vytvoření krčku k jeho přetržení v zúžení, ale krček se postupně rozšíří po celé délce vzorku; teprve poté dojde k destrukci materiálu (obr. 3.20), [3].



Obr. 3.18: Vliv teploty na mechanické vlastnosti [3]



Obr. 3.19: Vliv typu polymeru na mechanické vlastnosti [3]

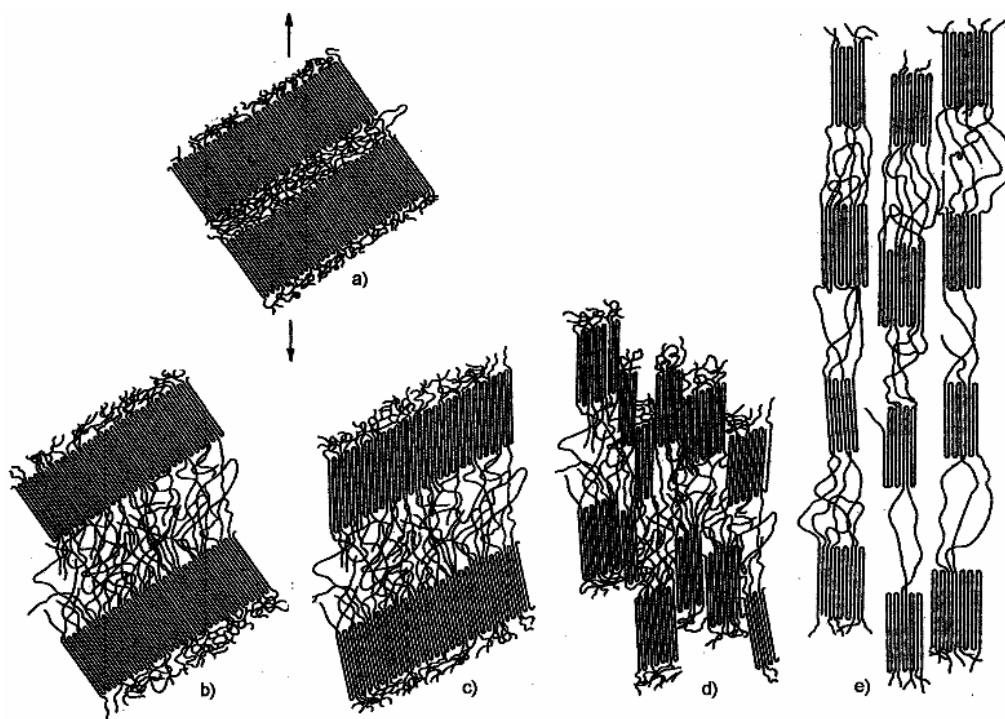


Obr. 3.20: Zkouška tahem pro semikrystalický polymer [3]

Změny, ke kterým dochází uvnitř materiálu, jsou zobrazeny na obr. 3.21 [3]:

- ⇒ (a) – výchozí struktura je znázorněna dvěma sousedními lamelami, mezi nimiž je amorfni materiál
- ⇒ (b) – v počátečním stupni deformace se amorfni řetězce pomocí konformačních pohybů vyplétají ze zapletenin, což vede k jejich prodloužení

- ⇒ (c) – postupně dochází k orientaci amorfního podílu ve směru působení zatížení
- ⇒ (d) – lamely se trhají na jednotlivé krystalické segmenty, navzájem se však stále dotýkají
- ⇒ (e) – krystalické bloky i amorfní řetězce jsou orientovány ve směru zatížení



Obr. 3.21: Vnitřní změny v materiálu při zatížení [3]

4. Zkoušky mechanických vlastností

Pro praktické použití plastů jako konstrukčních materiálů je důležité kvantifikovat hodnoty jejich mechanických charakteristik; k tomu slouží zkoušky mechanických vlastností. Především jde o:

- ⇒ zkoušku tahem, která vychází z normy ČSN EN ISO 527 Plasty – Stanovení tahových vlastností, při níž jsou ze závislosti napětí/poměrné prodloužení stanovovány hodnoty modulu pružnosti při tahovém namáhání, meze pevnosti v tahu a dalších napěťových a deformačních charakteristik.
- ⇒ zkoušku třibodovým statickým ohybem, která se řídí normou ČSN EN ISO 178 Plasty – Stanovení ohybových vlastností, která slouží ke stanovení modulu pružnosti v ohybu, pevnosti v ohybu a dalších charakteristik za daných podmínek.

Obě tyto zkoušky jsou statické a jsou velmi často používané téměř u všech technických materiálů, protože slouží k získání základních informací potřebných pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu [7].

4.1 Zkouška tahem

Zkouška jednoosým tahem je základní zkouška, která je svým principem, jednoduchostí a účelností předurčena k tomu, aby se stala nejrozšířenější a nejuznávanější zkušební metodou hodnocení mechanických vlastností materiálů.

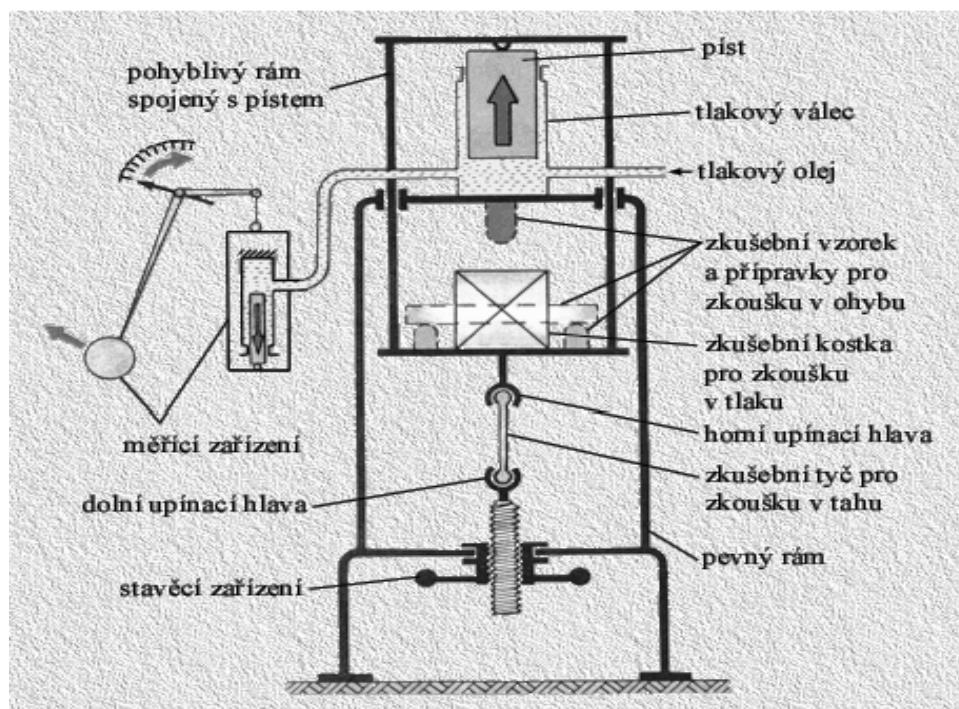
4.1.1 Postup měření

Zkušební těleso je protahováno ve směru hlavní podélné osy konstantní rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhnou předem zvolené hodnoty. V průběhu zkoušky se zaznamenává síla a jí odpovídající zvětšení počáteční měřené délky. Doporučuje se použití automatického záznamového systému, který umožňuje plynulé získání kompletní křivky napětí/poměrné prodloužení. Vzorek se do čelistí stroje upíná tak, že jeho podélná osa je shodná s osou zatěžování. Upínací systém musí v maximální míře zabránit vyklouzávání a nesmí způsobit předčasný lom zkušebních těles. Přednostně se používají samosvorné typy čelistí. Zkušební tělesa nesmí být znatelně napnuta před započítáním zkoušky. Po vyrovnání předpětí se nastaví a připevní na počáteční měřenou část průtahoměr nebo se přiloží měřidlo poměrného prodloužení. Pro optická měření se vyznačí na vzorku počáteční měřená délka [7].

4.1.2 Zkušební stroj

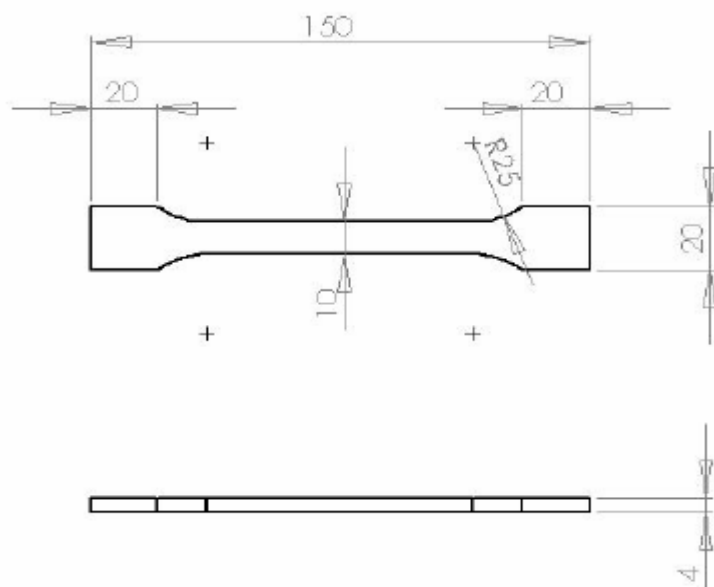
Zkušební stroj může být buď jednoúčelový nebo univerzální (**obr. 4.1**, [7]). Ve druhém případě lze pomocí vhodných přípravků provádět různé druhy zkoušek (tlakem, ohybem, krutem, stříhem). Stroj musí odpovídat podmínkám ISO 5893. Součástí zařízení musí být siloměrný snímač, který udává celkovou tahovou sílu. Mechanismus musí vylučovat vliv setrvačnosti a pracovat s přesností vyšší než je 1 % měřené hodnoty síly. Další částí stroje by měl být průtahoměr umožňující stanovení relativní změny počáteční délky v průběhu celé

zkoušky. Opět pro něj platí, že musí vylučovat vliv setrvačnosti a pracovat s přesností vyšší než je 1 % měřené hodnoty délky vzorku. Připojený průtahoměr nesmí zkušební vzorek deformovat nebo způsobit jeho zkroucení [7].



Obr. 4.1: Schéma univerzálního zkušebního stroje [7]

4.1.3 Zkušební vzorky



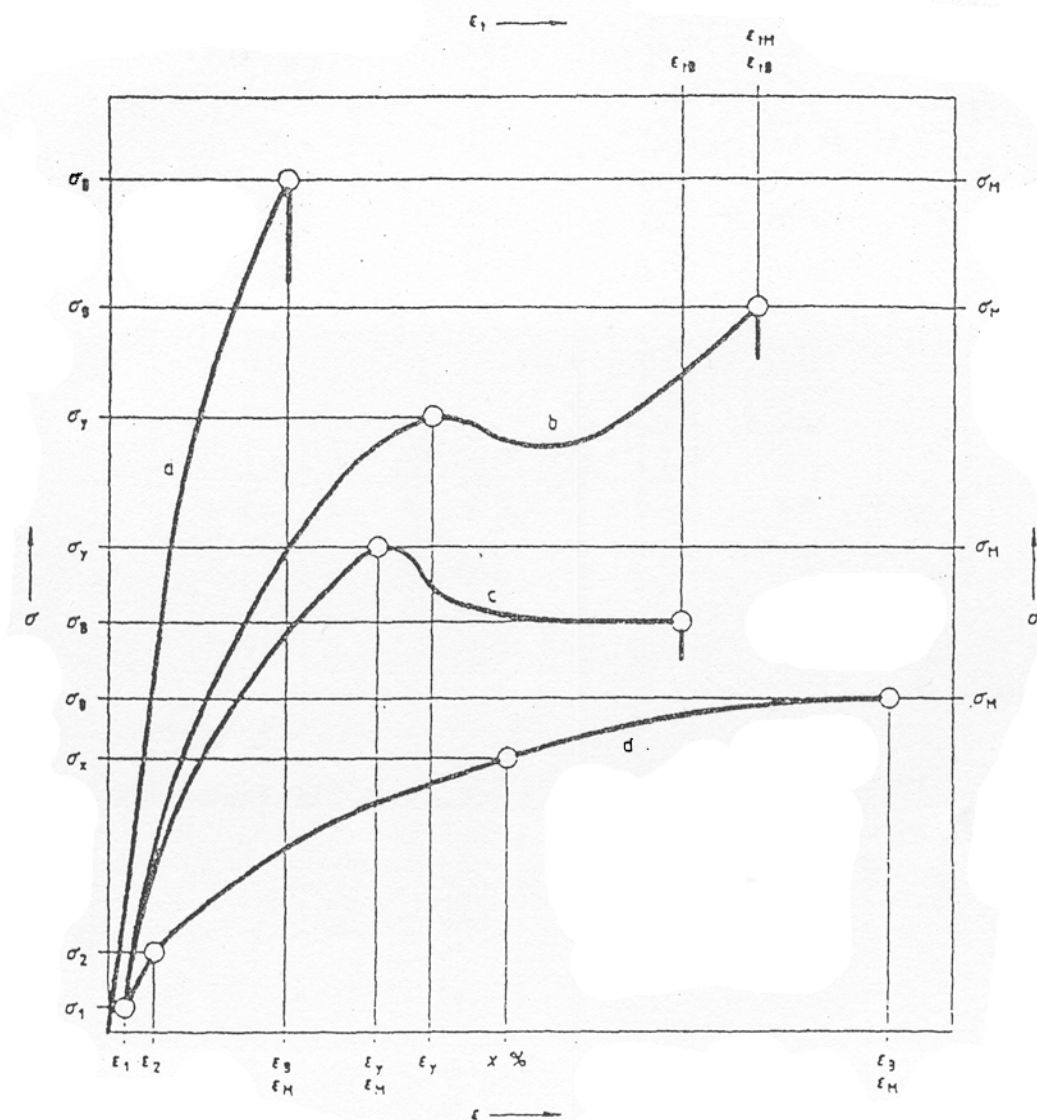
Obr. 4.2: Nákres zkušebního tělesa pro tah [7]

Vzorky (obr. 4.2, [7]) nesmí být zkroucený a musí mít vzájemně kolmé respektive rovnoběžné dvojice povrchů. Ty nesmí mít škrábance, důlky, vyštípnuté části atd. Splnění těchto požadavků se kontroluje vizuálně.

Tělesa vykazující prohlídkou nebo měřením nedodržení jednoho nebo více parametrů musí být před zkouškou vyřazena nebo dodatečně opracována na správný tvar a rozměr. V každém požadovaném směru a pro každou hodnocenou vlastnost musí být zkoušeno minimálně 5 vzorků. Z hodnocení jsou vyřazena tělesa, která se přetrhnou v rozšířené části, vyklouznou z čelistí či u nich dojde k předčasnému lomu [7].

4.1.4 Typové chování plastů při tahové zkoušce

V závislosti na vnitřní struktuře, stupni krystalinity, teplotě okolí a dalších vnějších vlivech rozlišujeme tři základní typové chování polymeru: křehký materiál (a), houževnatý materiál s mezí kluzu (b,c) a houževnatý materiál bez meze kluzu (d) (obr. 4.3, [7]).



Obr. 4.3: Typické křivky napětí/poměrné prodloužení [8]

Z obr. 4.3 je také zřejmé, které významné napěťové a deformační meze jsou při zkoušce tahem určovány [8]:

- ⇒ napětí v tahu při přetržení, σ_B : napětí v tahu, při kterém dochází k přetržení zkušebního tělesa
- ⇒ napětí na mezi kluzu v tahu; mez kluzu, σ_Y : první hodnota napětí, při které dochází ke zvyšování protažení bez zvyšování napětí
- ⇒ mez pevnosti v tahu, σ_M : maximální napětí v tahu
- ⇒ napětí v tahu při x %-ním poměrném prodloužení, σ_x : napětí, při kterém poměrné prodloužení dosáhne zadané hodnoty x , zvedené v procentech; využívá se v případech, kdy křivka napětí/poměrné prodloužení nevykazuje mez kluzu

- ⇒ poměrné prodloužení na mezi kluzu, ε_y : poměrné prodloužení odpovídající napětí na mezi kluzu
- ⇒ poměrné prodloužení při přetržení, ε_B : poměrné prodloužení při odpovídajícím napětí v tahu při přetržení
- ⇒ poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, ε_M : poměrné prodloužení odpovídající mezi pevnosti v tahu
- ⇒ jmenovité poměrné prodloužení, ε_t : zvětšení délky vztažené na jednotku původní vzdálenosti mezi čelistmi; používá se pro hodnoty poměrného prodloužení za mezi kluzu
- ⇒ jmenovité poměrné prodloužení při přetržení, ε_{tB} : jmenovité poměrné prodloužení odpovídající napětí při přetržení
- ⇒ jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, ε_{tM} : jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, pokud se tento bod nachází za mezi kluzu

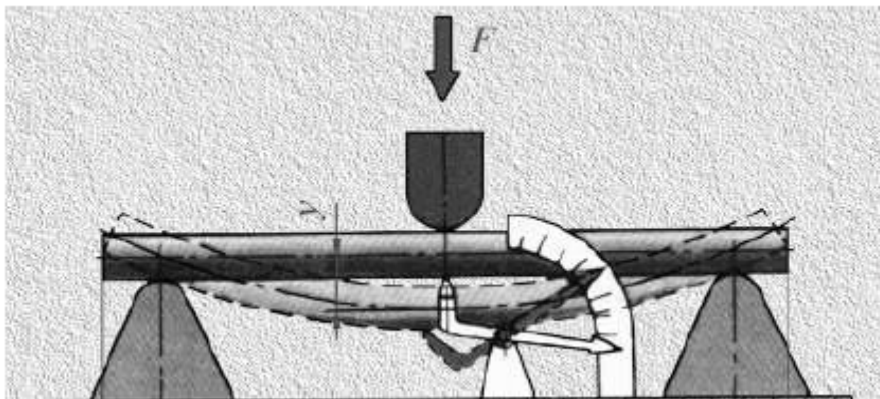
- ⇒ křehký materiál (a):
 - ↳ napětí v tahu při přetržení, σ_B
 - ↳ mez pevnosti v tahu, σ_M
 - ↳ poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, ε_M
 - ↳ poměrné prodloužení při přetržení, ε_B
- ⇒ houževnatý materiál s mezi kluzu (b,c)
 - ↳ napětí na mezi kluzu v tahu; mez kluzu, σ_y
 - ↳ mez pevnosti v tahu, σ_M
 - ↳ napětí v tahu při přetržení, σ_B
 - ↳ poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, ε_M
 - ↳ jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, ε_{tM}
 - ↳ jmenovité poměrné prodloužení při přetržení, ε_{tB}
 - ↳ poměrné prodloužení na mezi kluzu, ε_y
- ⇒ houževnatý materiál bez meze kluzu (d)
 - ↳ napětí v tahu při x %-ním poměrném prodloužení, σ_x
 - ↳ mez pevnosti v tahu, σ_M
 - ↳ poměrné prodloužení při přetržení, ε_B
 - ↳ poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu, ε_M

4.2 Zkouška ohybem

4.2.1 Postup měření

Zkušební těleso, podepřené symetricky dvěma podporami jako nosník, je konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. V průběhu zkoušky je měřena působící síla, pokud možno automatickým záznamovým zařízením, poskytujícím úplnou křivku závislosti síla v ohybu/průhyb. Vše probíhá v předepsaném prostředí, pokud se zúčastněné strany nedohodnou jinak, např. na zkouškách při vysokých či nízkých teplotách.

Rychlost zatěžování se nastaví dle požadavků v předmetové normě zkoušeného materiálu. Není-li k dispozici, vybere se hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1 % za minutu. To je rychlost zkoušky, která během 1 minuty způsobí průhyb tělesa co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky (tzn. $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro přednostní těleso) [7].



Obr. 4.4: Zkouška ohybem - princip [7]

4.2.2 Zkušební stroj:

Pro zkušební stroj (obr. 4.4, [7]) platí stejné podmínky, jako pro stroje, na kterých se provádějí zkoušky tahem. Musí tedy odpovídat podmínkám ISO 5893 a musí být schopen vyvinout požadovanou rychlost zkoušení. Rovnoběžnost podpěr a trnu musí být v rozmezí $\pm 0,02 \text{ mm}$. Rozpětí podpěr L musí být nastavitelné a musí platit $L = (16 \pm 1)h$ [7].

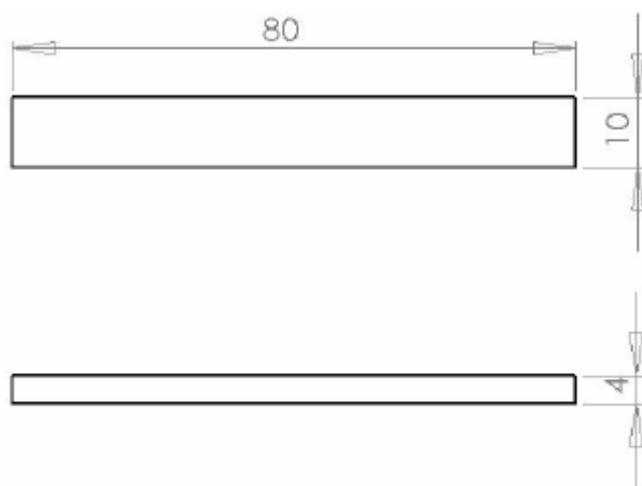
Poloměr trnu R_1 a poloměry podpěr R_2 musejí být následující [7]:

$$R_1 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$R_2 = 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm} \text{ pro tloušťky tělesa } \leq 3 \text{ mm}$$

$$R_2 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm} \text{ pro tloušťky tělesa } > 3 \text{ mm}$$

4.2.3 Zkušební těleso



Rozměry vzorků musejí být v souladu s příslušnou materiálovou normou; jsou používána tzv. přednostní zkušební tělesa nebo ostatní zkušební tělesa, pro která však platí některá omezení [7].

Přednostní typ tělesa (obr. 4.5, [7]):

délka $l = (80 \pm 2)$ mm

šířka $b = (10 \pm 0,2)$ mm

tloušťka $h = (4 \pm 0,2)$ mm

Obr. 4.5: Přednostní typ zkušební tělesa pro ohyb [7]

Ostatní zkušební tělesa:

Délka a tloušťka zkušební tělesa musí být ve stejném poměru jako u přednostního tělesa, tj. $l/h = (20 \pm 1)$ mm.

Vzorky nesmí být zkroucený a musí mít vzájemně kolmé respektive rovnoběžné dvojice povrchů. Okraje a hrany musí být bez rýh, důlků, vyštípnutí a propadlin. Splnění těchto požadavků se kontroluje vizuálně. Tělesa vykazující nedodržení jednoho nebo více parametrů musí být před zkouškou vyřazena nebo dodatečně opracována na správný tvar a rozměr.

V každém požadovaném směru musí být zkoušeno minimálně 5 vzorků. Z hodnocení jsou vyřazena tělesa, která se zlomí mimo střední třetinu rozpětí podpěr [7].

Nominální tloušťka h [mm]	Šířka b [mm]
$3 < h \leq 5$	$10 \pm 0,5$
$5 < h \leq 10$	$15 \pm 0,5$
$10 < h \leq 20$	$20 \pm 0,5$
$20 < h \leq 35$	$35 \pm 0,5$
$35 < h \leq 50$	$50 \pm 0,5$

Tab. 4.1: Poměr tloušťky a šířky zkušební tělesa pro ohyb [7]

Závěr:

V této práci byla ukázána souvislost mezi vnitřní strukturou polymerních materiálů a jejich výslednými mechanickými vlastnostmi. Materiál ovlivňuje nejen jeho struktura, ale také významné faktory okolí, jakými jsou například teplota okolí nebo rychlost zatěžování. Na závěr byly uvedeny dvě základní zkoušky mechanických vlastností - zkouška tahem a zkouška ohybem. U zkoušky tahem bylo rozebráno, které významné napěťové a deformační meze jsou při zkoušce určovány.

Seznam použitých zdrojů

- [1] http://cs.wikipedia.org/wiki/Makromolekul%C3%A1rn%C3%AD_chemie
- [2] Belka, M: Základní mechanické vlastnosti kompozitu PP + Mg(OH)₂, bakalářská práce FSI VUT v Brně. Brno 2002
- [3] Molliková, E.: Konstrukční plasty, studijní opora předmětu. Brno 2004
- [4] Hidwéghy, J: Nekomové konstrukční materiály. Košice 1993
- [5] Askeland, D. R., Phulé, P. P: The Science and Engineering of Materials, Thomson Brooks/Cole, U.S.A 2003. ISBN 0-534-95373-5
- [6] Molliková, E: Úvod do materiálových věd a inženýrství; studijní opora předmětu. Brno 2005
- [7] Šimek, J.: Hodnocení pevnostních parametrů součástí vytvořených metodami rapid prototyping; diplomová práce FSI VUT v Brně. Brno 2008
- [8] ČSN EN ISO 527-1. Plasty- Stanovení tahových vlastností. Praha, 1997.