

Studium mechanických vlastností polymerů metodami destruktivního a nedestruktivního testování

Pavel Koseček

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel KOSEČEK**
Osobní číslo: **T10762**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium mechanických vlastností polymerů
metodami destruktivního a nedestruktivního
testování**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši k tématu mechanické vlastnosti polymerů a možnosti jejich testování destruktivními a nedestruktivními metodami. Veškerou použitou literaturu adekvátně citujte.
2. Seznamte se s obsluhou univerzálního testovacího stroje Instron 3345 a normami k provádění tahových zkoušek plastů.
3. Připravte vzorky syntetických polymerů pro testování mechanických vlastností pomocí univerzálního testovacího stroje a pomocí polarizovaného světla. Proveďte vlastní testování mechanických vlastností u vybraných materiálů.
4. Získané výsledky vhodně prezentujte a proveďte jejich diskuzi.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN ISO 527-1, ČSN EN ISO 527-2
2. Raab M.: **Materiály a člověk**. Encyklopedický dům, Praha 1999
3. Tilley R.: **Understanding solids, The science of materials**. John Wiley and Sons, Chichester 2008
4. Mleziva J., Šňupárek J.: **Polymery, výroba, struktura, vlastnosti a použití**. Sobotáles, Praha 2000
5. Rybníkář F., Ditrych Z., Klácel Z., Ordelt O.: **Analýza a zkoušení plastických hmot**. SNTL, Praha 1665
6. Havlíček V., Osten M., Šňupárek J.: **Přehled plastických hmot**. SNTL, Praha 1959
7. Harper Ch.: **Handbook of plastics and elastomers**. McGraw-Hill, New York 1975
8. Brydson J.A.: **Plastics materials**. Ilife Books, London 1969

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Smolka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

24. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: KOSEČEK PAVEL

Obor: CHTM - MI

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 19.5.2013


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je především poskytnout přehled zkušebních metod použitelných pro testování mechanických vlastností polymerních a pokusit se o jejich aplikaci v praxi. Teoretická část se zabývá strukturou makromolekulárních látek a jejím vlivem na vlastnosti polymerů. Tato část také rozebírá nejpoužívanější metody pro zjišťování mechanických vlastností a uvádí možné způsoby vyhodnocení jejich výsledků. Praktická část je zaměřena na testování plastů pomocí destruktivních a nedestruktivních metod, jmenovitě měření pevnostních charakteristik, rázové houževnatosti a vyšetřování vnitřních pnutí v materiálu pomocí fotoelasticimetrie.

Klíčová slova:

Polymer, molekulární řetězec, struktura polymeru, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The aim of this bachelor work is to provide an overview of testing methods applicable for testing mechanical properties of plastics and to utilise them for testing of real plastic samples. The theoretical part deals with the structure of macromolecular matter and its influence on polymer properties. This part also lists the most frequent methods used for testing of mechanical properties and describes various approaches for results interpretation. The experimental part of the work consists of testing plastics materials in the means of destructive and non-destructive methods, namely the measuring of tensile characteristics, impact resistance and photoelastic stress patten measurement.

Keywords:

Polymer, molecular chain, polymer structure, mechanical properties

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Smolkovi, Ph.D. za odborné vedení, důležité rady a podklady při zpracování této práce. A dále chci poděkovat všem, co se na jejím vytvoření jakkoliv podíleli.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsou správně a úplně ocitovány. Tato bakalářská práce je majetkem Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a veškeré údaje v ní obsažené mohou být využity literárně, technicky a technologicky jen po společném souhlasu autora Pavla Kosečka a vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Smolky, Ph.D.

Prohlašuji, že odevzdaná a elektronická verze této práce nahrané do systému IS/STAG, jsou totožné.

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DEFINICE POLYMERU	12
2 STRUKTURA A VLASTNOSTI POLYMERŮ	13
3 CHEMICKÁ A FYZIKÁLNÍ STRUKTURA POLYMERŮ	14
3.1 KONSTITUCE MAKROMOLEKUL	14
3.2 KONFIGURACE MAKROMOLEKUL.....	15
3.3 KONFORMACE MAKROMOLEKUL	16
3.4 VLIV MOLEKULOVÉ HMOTNOSTI NA VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	17
3.5 VLIV KRYSTALINITY NA VLASTNOSTI POLYMERŮ	18
3.6 TERMICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	19
3.6.1 Chování amorfního polymeru nad teplotou T_g	21
3.6.2 Termické chování krystalického polymeru	21
3.7 MODUL PRUŽNOSTI E A LINEÁRNÍ ELASTICITA	22
3.8 ROVINNÁ NAPJATOST	23
4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ	24
4.1 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	25
4.1.1 Zkoušky statické.....	25
4.1.1.1 Zkouška pevnosti v tahu	25
4.1.1.2 Zkouška pevnosti v tlaku	28
4.1.1.3 Zkouška pevnosti v ohybu	29
4.1.1.4 Zkouška tvrdosti kuličkou	30
4.1.1.5 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	30
4.1.1.6 Zkouška tvrdosti podle Rockwella	30
4.1.1.7 Zkouška tvrdosti kuželem.....	31
4.1.1.8 Mikrotvrdost	31
4.1.2 Zkoušky dynamické	31
4.1.2.1 Metoda Charpy	32
4.1.2.2 Metoda Izod	33
4.1.2.3 Rázová zkouška tahem.....	33
4.1.2.4 Rázová zkouška padajícím závažím	33
4.1.2.5 Stanovení meze únavy materiálu	34
4.2 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	34
4.2.1 Fotoelasticimetrie	35
4.2.2 Zkouška rentgenovými paprsky	35
4.2.3 Zkouška ultrazvukem	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
5 EXPERIMENT	38
5.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA	38
5.1.1 Zkušební těleso.....	38
5.1.2 Popis zařízení	38
5.1.3 Podmínky zkoušky	38
5.1.4 Výsledky zkoušení	38

5.2	ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU	43
5.2.1	Popis vzorku	43
5.2.2	Vrubovací zařízení	44
5.2.3	Popis zkušebního stroje	44
5.2.4	Pracovní postup	44
5.2.5	Výsledky zkoušení	45
5.3	FOTOELASTICIMETRIE	48
5.3.1	Sledování napětí v součásti při tříbodovém ohybu	48
5.3.2	Sledování napětí v součásti v uniaxiálním tahu	51
ZÁVĚR		54
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		57
SEZNAM OBRÁZKŮ		58
SEZNAM TABULEK		60
SEZNAM GRAFŮ		61

ÚVOD

Úkolem této práce je především seznámení se zkoušením polymerních materiálů a jejich porovnání s klasickými konstrukčními materiály z hlediska použitelnosti v technické praxi.

V teoretické části se bude zabývat chemickou a fázovou strukturou makromolekulárních látek a vlivem molekulové hmotnosti na vlastnosti polymerů. Dále bude věnován prostor přehledu nepoužívanějších metod pro zjišťování mechanických vlastností materiálů, včetně způsobu vyhodnocení a zpracování výsledků.

Praktická část bude zaměřena na jednu statickou a jednu dynamickou zkoušku, jmenovitě zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu. Dále bude sledováno vnitřní pnutí v materiálu pomocí fotoelasticimetrie.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DEFINICE POLYMERU

Polymery jsou látky s dlouhými molekulárními řetězci, ve kterých se mnohonásobně opakuje základní „monomerní“ jednotka. Předpona *poly-* je řeckého původu a znamená mnoho nebo více, a *meros* znamená část.

Makromolekulární látky se připravují různými chemickými postupy. Mezi základní postupy lze zařadit *polymeraci*, *polykondenzaci* a *polyadici*. Při polymeraci spolu přímo reagují molekuly monomeru a spojují se do velkých polymerních řetězců. Z monomeru se tak stává tzv. monomerní jednotka. Takto vzniklé látky jsou nazývány právě podle monomeru, z něhož vznikly, např. polyetylen, polystyren a další. U polykondenzace se opět propojují malé molekuly monomerů do řetězců, ale při každém dalším připojení monomerní jednotky se současně odštěpuje vedlejší (odpadní) nízkomolekulární produkt, zpravidla voda. Další možností je polyadice, která je podobná polykondenzaci s tím rozdílem, že nevzniká vedlejší produkt, což je způsobeno odlišným reakčním mechanismem.

Pro svou velikost a složitý tvar se makromolekuly v pevném stavu nemohou dokonale uspořádat do takové struktury, která by byla analogická krystalovým zrnům jako u kovů. Pro tyto materiály je typická nekystalická, tj. amorfní fáze, vytvářející souvislou matici, ve které mohou, ale nemusí být uloženy krystalické oblasti. Při zvyšování teploty přecházejí amorfní polymery v určité teplotní oblasti postupně v taveninu, tj. nemají ostrý bod tání. Pokud jsou však molekuly propojeny do sítě (vulkanizací kaučuku nebo vytvrzováním epoxidových pryskyřic), tak se materiál nemůže nikdy zcela roztavit, ale pouze přejde při určité teplotě z tvrdého sklovitého materiálu na měkký kaučuk. Tato významná teplota je nazývána *teplotou skelného přechodu*. [1]

Polymerní materiály se na základě teplotního chování, dle působení teploty dělí na *termoplasty*, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi a *reaktoplasty*, které také v první fázi při ohřevu měknou a jsou schopné tváření, ale jen omezenou dobu do tzv. vytvrzení (sesíťování). Sesíťované reaktoplasty mají proti lineárním termoplastům obecně vyšší teplotní odolnost, ale nedají se svařovat a v rozpouštědle jenom nabobtnají a změní se v měkký gel. [1,2]

2 STRUKTURA A VLASTNOSTI POLYMERŮ

Vlastnosti polymerů jsou určovány třemi základními faktory: chemickou strukturou, molekulovou hmotností a fázovou strukturou. První dva zmíněné faktory jsou ovlivňovány již při přípravě polymeru a při následném zpracování a používání polymeru je ovlivňována fázová struktura. [3]

Struktura polymeru se vyznačuje řadou faktorů:

- Povahou základní strukturní jednotky makromolekuly, např. polární a nepolární molekuly, sterické vlivy a jiné
- Druhem a četností rozvětvení hlavního řetězce, např. krátké či dlouhé postranní řetězce a další
- Formou prostorového uspořádání, např. izotaktické, syndiotaktické nebo ataktické, či formou *cis* a *trans* u polydienů
- Chemickou nehomogeností (kopolymery)
- Vzájemným zesíťováním polymerních řetězců, tj. délkou spojovacích řetězců, pravidelností vzniklé prostorové sítě
- Velikostí střední molekulové hmotnosti
- Distribucí molekulových hmotností, např. polydisperzita
- Fázovou strukturou, tj. stupeň krystalinity; velikost, poloha a rozdělení krystalů, množství a tvar sférolitů

Při použití stejných výchozích látek může být struktura ovlivněna následujícími způsoby:

- a) Polyreakcí a zpracováním produktu
- b) Tepelným a mechanickým zpracováním připraveného polymeru, obzvláště u krystalujících polymerů
- c) Přípravou polymeru z roztoku

Druhy a množství přísad, či cizích látek významně ovlivňují vlastnosti výsledného produktu. Mezi cizí látky lze zahrnout nečistoty, jako jsou zbytky monomerů, tvrdidel, rozpouštědel, katalyzátorů, plniv a jiných. [4]

3 CHEMICKÁ A FYZIKÁLNÍ STRUKTURA POLYMERŮ

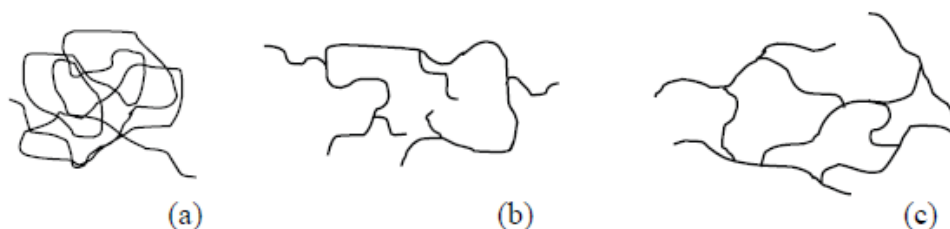
Celá řada vlastností jako jsou mechanické, elektrické, optické, nebo také odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí a povětrnostnímu stárnutí jsou určeny chemickou a fyzikální strukturou polymerů. Chemickou strukturou nazýváme konstituci, neboli typ a uspořádání strukturních jednotek v makromolekulách a dále konfigurace a konformace makromolekul. Chemická struktura polymerů podmiňuje možnosti vzájemného uspořádání makromolekul – fyzikální strukturu polymerů. [5]

3.1 Konstituce makromolekul

Při spojování molekul dvojfunkčního monomeru vzniká nejjednodušší typ makromolekul – makromolekuly *lineární* (a). V těchto makromolekulách je každá monomerní jednotka spojena pouze se dvěma sousedními jednotkami. Důsledkem otáčivosti atomů kolem jednoduchých vazeb mohou řetězce zaujímat různé konformace. Makromolekuly se z energetických důvodů vyskytují ve tvaru klubka.

Dalším typem jsou makromolekuly s postranními řetězci, které jsou označovány jako *větvené* (b). Ty mohou vznikat reakcí troj- nebo vícefunkčních monomerů, nebo také důsledkem vedlejších reakcí při polyreakci dvojfunkčního monomeru.

S rostoucí délkou a vyšší četností postranních řetězců ve větvených makromolekulách narůstá pravděpodobnost jejich vzájemného propojení. Vzájemným spojením všech řetězců v trojrozměrném prostoru vzniká polymer *sesíťovaný* (c). Prostorová polymerní síť může vznikat polyreakcí troj- a vícefunkčních monomerů, ale také spojováním lineárních, či větvených makromolekul, jako je tomu např. při vulkanizaci kaučuku. [5]

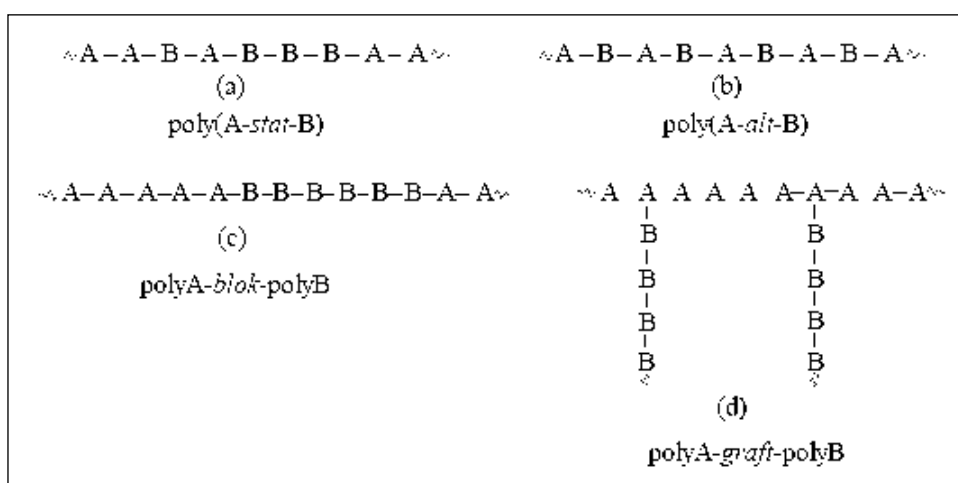


Obrázek 1: Typy makromolekulárních řetězců [5]

Polymery, vznikající polymerizací jednoho monomeru, obsahují pouze jeden druh monomerních jednotek a označují se jako *homopolymery*. Při současné polymerizaci dvou a více monomerů vznikají *kopolymery*. Ty jsou podle počtu druhů monomerních jednotek specifikovány jako bi-, ter- nebo quatro-polymery a dle struktury se dělí na (stejně jako

homopolymery) lineární, větvené a sesíťované. Bipolymery, tudíž kopolymery se dvěma typy monomerních jednotek (A, B) mohou být:

- Statistické – pořadí obou monomerních jednotek v makromolekule je náhodné
- Alternující – pravidelné střídání jednotek
- Blokové – makromolekuly jsou tvořeny vždy delšími úseky jednoho typu monomerní jednotky.
- Roubované – mají hlavní řetězec složený z jednoho typu monomeru a na něj jsou napojeny (naroubovány) postranní řetězce, tvořené jiným monomerem. [5]



Obrázek 2: Typy kopolymerů se dvěma typy monomerních jednotek [5]

3.2 Konfigurace makromolekul

Pojmem konfigurace se označuje vzájemné prostorové upořádání atomů a substituentů v makromolekulách. Toto uspořádání je trvalé a nelze jej změnit bez přerušení chemických vazeb. [6] Pokud se v makromolekulách vyskytují nesymetrické monomerní jednotky, které pocházejí z monosubstituovaných alkenů, stává se atom uhlíku se čtyřmi rozdílnými substituenty *stereoizomerním centrem*. To, jak jsou tyto centra uspořádána v hlavních řetězcích makromolekul, se nazývá *tacticita*, která má přímý dopad na vlastnosti materiálu. Polymer se stává *izotaktickým*, pokud mají všechna stereoizomerní centra v makromolekulách stejnou konfiguraci, tj. že substituenty jsou uspořádány na jedné straně roviny nataženého uhlíkového řetězce. U pravidelného střídání konfigurace stereoizomerních center v makromolekulách, kde se substituent nachází střídavě nad a pod rovinou řetězce, je polymer *syndiotaktický*. Pokud jsou substituenty rozmístěny náhodně podél řetězce, hovoříme o *ataktickém* polymeru. [5]

3.3 Konformace makromolekul

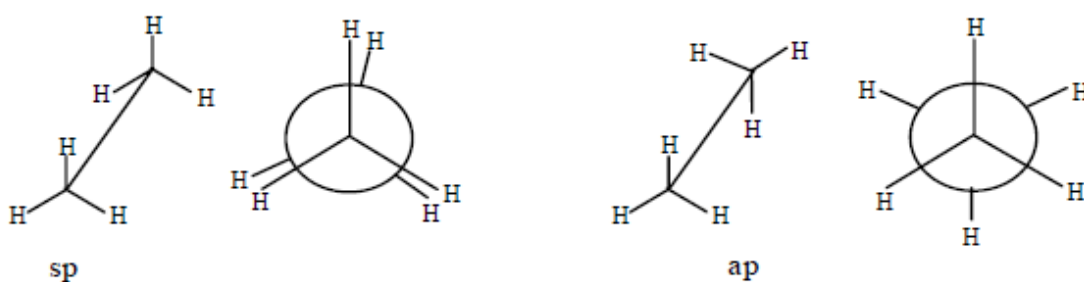
Konformací označujeme různá prostorová uspořádání atomů, nebo skupin atomů, která vznikají v důsledku rotace atomů kolem jednoduchých vazeb a při zachování valenčních úhlů. U řady případů je přechod z jednoho tvaru do jiného relativně snadný, řetězec je tzv. *ohebný*. Tato ohebnost se logicky snižuje, pokud jsou v hlavním řetězci například cyklické konstituční jednotky.

Volná rotace kolem jednoduchých vazeb je omezována různými interakcemi a přitažlivými či odpuzivými silami. Preferují se zejména energeticky nejvýhodnější konformace izomerů. Tyto izomery jsou identická chemická individua, a proto je nelze izolovat.

Nejllepší ilustraci konformačních izomerů, které se mohou vyskytovat díky tepelnému pohybu v molekule, nám poskytuje molekula ethanu. Izolací molekuly ve vakuu se tepelný pohyb realizuje v závislosti na absolutní teplotě ve třech úrovních:

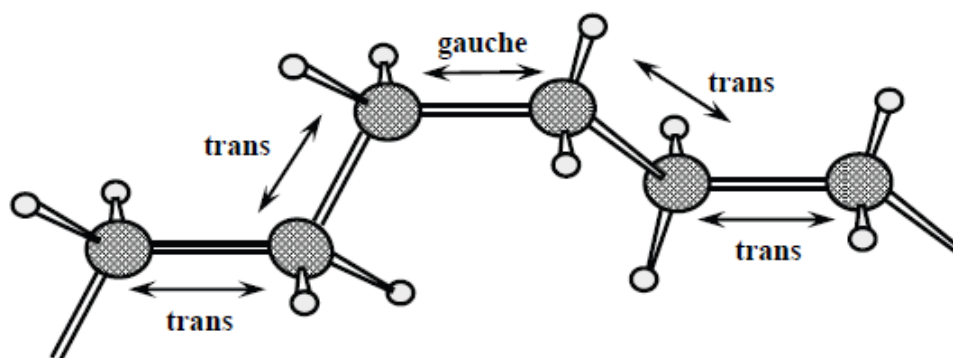
- Vibrací atomů kolem rovnovážných poloh,
- Rotací části molekuly kolem některé osy,
- Translačním pohybem molekuly v prostoru,

Dle rotačního pohybu kolem vazby C – C se v molekule ethanu mohou vyskytovat dvě limitní konformace. Může to být buď konformace zákrytová (synperiplanární – sp), a nebo vykloněná (antiperiplanární – ap). [5]



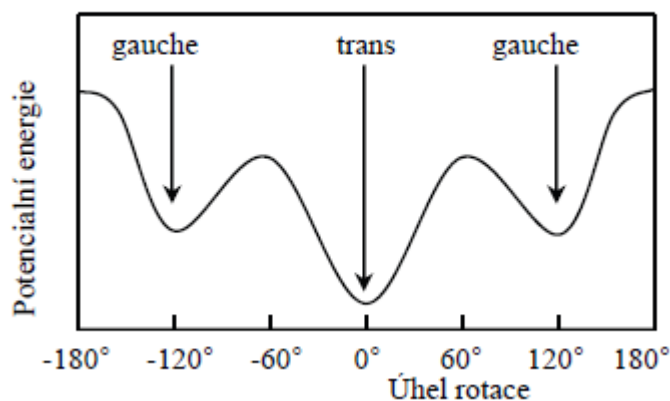
Obrázek 3: Zákrytová a vykloněná konformace [5]

Energeticky nejvýhodnější je vykloněná konformace, a proto je silně preferovaná. Mezi dvěma rotačními izomery s vykloněnou konformací není tak vysoká bariéra potenciální energie, aby rotací nedocházelo k přechodům z jednoho do druhého stavu s minimální vnitřní energií. [5]



Obrázek 4: Schéma konformace polyethylenového řetězce [5]

Ve zcela nataženém řetězci polyetylenu, jenž zaujímá planární „zig-zag“ konformaci, jsou od sebe všechny atomy vodíku v maximální vzdálenosti a s minimálními interakcemi mezi nimi. Všechny vazby se nacházejí v tzv. trans - konformaci. Rotace kolem jedné z vazeb C–C (60°) může způsobit, že se atomy vodíku na sousedících atomech uhlíku dostanou do zákrytové polohy, neboli do stavu s maximální potenciální energií. Další rotace může způsobit, že jeden z atomů vodíku zaujme polohu, která se nachází mezi dvěma vodíky na sousedících atomech uhlíku. [5]



Obrázek 5: Schéma závislosti potenciální energie na úhlu rotace u polyethylenového řetězce [5]

3.4 Vliv molekulové hmotnosti na vlastnosti polymerů

Molekulová hmotnost ovlivňuje všechny vlastnosti makromolekulárních látek. Kromě viskozity tavenin a roztoků se většina vlastností od určité hodnoty molekulové hmotnosti nemění. Proto je důležité uvádět hodnotu této veličiny, která charakterizuje daný polymer.

Polymery se skládají z různě dlouhých řetězců, což je nazýváno jako tzv. polymolekularita, která způsobuje rozdíly hodnot číselně středních (\overline{M}_n) a hmotnostně středních (\overline{M}_w) relativních molekulových hmotností. Tato různorodost se zjišťuje pomocí frakcionace a lze ji graficky znázornit distribučními křivkami. Poměr $\overline{M}_w / \overline{M}_n$ určuje tzv. *stupeň polydisperzity*. Je známo, že s rostoucí polydisperzitou se zhoršují mechanické vlastnosti u termoplastických polymerů. [4]

3.5 Vliv krystalinity na vlastnosti polymerů

Vzájemné uložení makromolekul v krystalické fázi je mnohem těsnější než ve fázi amorfní. Z toho je patrné, že s vyšším obsahem krystalické fáze v polymeru roste i jeho měrná hmotnost. Názorným příkladem mohou být dva typy polyethylenu, LDPE (low density PE) a HDPE (high density PE). [5]

	měrná hmotnost	obsah krystalické fáze
LDPE	0,92 g/cm ³	≈ 60 %
HDPE	0,97 g/cm ³	≈ 95 %

Obrázek 6: Měrná hmotnost a obsah krystalické fáze u dvou typů polyethylenu [5]

Měrná hmotnost je tedy určitým měřítkem stupně krystalinity daného polymeru.

Vzájemné uložení makromolekul má také vliv na rozpustnost polymeru. Makromolekuly jsou snadněji solvatovány molekulami rozpouštědla při „volnějším“ uložení řetězců v amorfní části polymeru.

Krystalické polymery jsou charakterizovány jako systémy o dvou fázích, ve kterých je krystalická fáze dispergovaná v amorfní matici. Proto jsou také optické vlastnosti značně ovlivněny přítomností krystalické fáze, přičemž je část procházejícího světla rozptýlena na rozhraní mezi dvěma fázemi s rozdílným indexem lomu. Čisté, zcela amorfní polymery jsou transparentní (průhledné), avšak ve směsi s plnivými nebo jinými přísadami mohou i amorfní polymery ztrácet transparentci. Pro představu dokonale transparentního polymeru může být např. komerční polystyren, jenž má ataktickou strukturu a je proto zcela amorfní.

Stejnou molekulovou strukturu má pěnový polystyren, ten je však bílý, protože světlo prochází prostředím o dvou fázích – ataktickým polystyrenem a vzduchovými bublinami.

Se zvýšenou uspořádaností makromolekul v polymeru se zvyšuje jeho pevnost a tuhost. Například stereoregulární polypropylen je krystalický, tuhý polymer, nacházející uplatnění v aplikacích s velkými nároky na pevnost materiálu (strojní, automobilový průmysl). Kdežto amorfní, ataktický polypropylen může být v závislosti na molární hmotnosti voskovitý materiál, nebo dokonce viskózní olejovitá kapalina. [5]

3.6 Termické vlastnosti polymerů

Nadmolekulová struktura polymerů je podmíněna již zmíněnou konstitucí a konfigurací makromolekul. Polymery se v závislosti na teplotě mohou vyskytovat ve stavu krystalickém, sklovitém, kaučukovitém nebo plastickém. Teplotní rozmezí výskytu daného polymeru v určitém fyzikálním stavu, popřípadě teplota přechodu z jednoho stavu do druhého je také určena jeho chemickou strukturou. Existují polymery, které jsou při pokojové teplotě tvrdé, tuhé a sklovité. Jiné polymery mohou být za stejných podmínek měkké, ohebné, kaučukovité. Například zahřátím polymetylmetakrylátu nebo polystyrenu na teplotu okolo 125 °C získají oba polymery typické kaučukovité vlastnosti. Naopak ochlazením vzorku polymeru (na teplotu kapalného dusíku), který je za pokojové teploty kaučukovitý, stane se tuhým, sklovitým a při nárazu se roztříští. Uvažujeme teplotu, nebo úzké rozmezí teplot, pod níž je amorfní polymer sklovitý a nad ní se chová kaučukovitě. Hovoříme zde o *teplotě skelného přechodu* T_g , která je jednou z nejdůležitějších charakteristik polymeru.

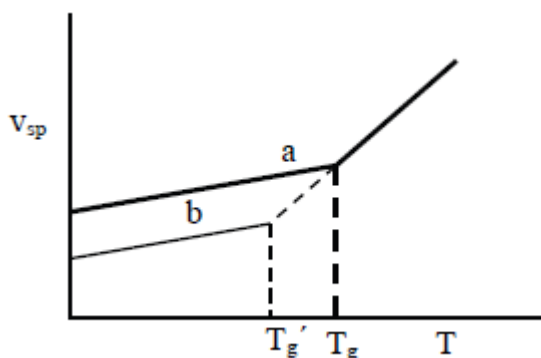
Chování polymeru v závislosti na teplotě je podmíněno tepelným pohybem makromolekulárních řetězců či jejich segmentů. U amorfního polymeru se tento pohyb uskutečňuje na čtyřech úrovních:

- 1) translačním pohybem celých makromolekul, umožňujícím tok materiálu
- 2) pohybem segmentů makromolekul, který umožňuje ohyb či rozbíjení jejich částí způsobující elasticitu materiálu
- 3) pohybem několika atomů hlavního řetězce nebo postranních skupin na hlavním řetězci makromolekuly
- 4) rovnovážnou vibrací atomů [5]

V amorfních polymerech atomy segmentů makromolekul ve sklovitém stavu obsazují určitý prostor, tzv. *vyložený objem*. V neobsazeném prostoru mezi nimi vibrují atomy kolem rovnovážných poloh v určité kleci, tvořené sousedními atomy. Vibracemi vymezují *volný objem* kolem obsazeného prostoru. Se stoupající teplotou narůstá volný objem důsledkem větší amplitudy vibrací a souvisí s koeficientem teplotní roztažnosti materiálu.

Teplota skelného přechodu není spojena s fázovým přechodem polymeru. Rozdíl mezi stavem nad teplotou T_g a pod ní je, že pod teplotou skelného přechodu nedokáže tepelný pohyb překonat mezimolekulární interakce, bránící pohybu segmentů makromolekul.

Po překročení T_g se více či méně výrazně mění všechny fyzikální vlastnosti polymeru, např. specifický objem, specifická kapacita, index lomu, dielektrická konstanta a také jeho mechanické vlastnosti (modul pružnosti). [5]



Obrázek 7: Závislost specifického objemu na teplotě u amorfního polymeru a dosažení teploty skelného přechodu při rychlém (a) a pomalém (b) ochlazení vzorku [5]

Faktory ovlivňující hodnotu teploty skelného přechodu jsou tedy:

- volný objem polymeru
- mezimolekulární interakce
- vnitřní pohyblivost řetězců (rotace kolem vazeb)
- molární hmotnost polymeru [5]

Strukturní rysy polymeru vedoucí k omezení pohyblivosti segmentů makromolekul, způsobují posun T_g k vyšším hodnotám. Jsou to především polární skupiny a aromatické

konstituční jednotky v hlavním řetězci, neohebné makromolekuly, objemné skupiny, nesymetrické substituenty nebo vysoké hodnoty kohezni energie.

Naopak na snižování T_g má vliv ohebnost makromolekul, slabé mezimolekulární interakce a popřípadě symetrické substituenty. [5]

3.6.1 Chování amorfního polymeru nad teplotou T_g

Uspořádání řetězců amorfního polymeru je určeno konformací náhodných, navzájem propletených klubek. [7] Jak již bylo dříve zmíněno, nad T_g jsou tepelným pohybem překonávány mezimolekulární síly. Díky tomu se mohou segmenty makromolekul v místech navázání sekundárními vazbami ohýbat, nebo volně otáčet. Při vysokém polymeračním stupni jsou k sobě řetězce fixovány i fyzikálně. Polymerní klubka jsou vzájemně propletena a segmenty mezi těmito zapleteninami jsou nad teplotou T_g pohyblivé. Při zatížení vzorku polymeru za těchto podmínek může dojít k jeho výrazné deformaci. Přestane-li však zatěžující síla působit, klubka se vlivem tepelného pohybu vrátí do svého nejpravděpodobnějšího tvaru. Hovoříme tak o *kaučkovitě elastickém chování*.

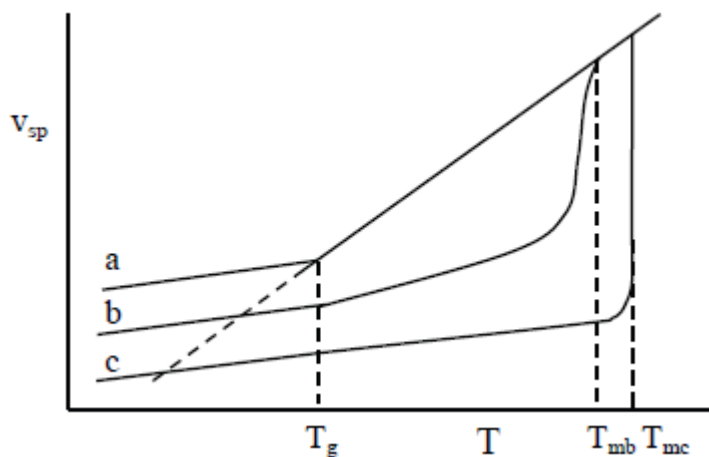
Pokud však působí napětí na lineární polymer dostatečně dlouho, uvolní se zapleteniny a po odlehčení napětí již nemohou klubka zaujmout svůj původní tvar. Zde se už nejedná o čistě elastickou deformaci. V důsledku částečného toku materiálu dochází k posunu makromolekul vzájemně vůči sobě, což vede ke vzniku určité trvalé, zbytkové deformace (tzv. creep). Toto chování polymerů bývá označováno jako *viskoelastické*.

Dalším zvyšováním teploty se v amorfním polymeru dále uvolňují ne vazebné interakce mezi makromolekulami až do jejich úplného vymizení. Tímto jsou makromolekuly vůči sobě vzájemně pohyblivé jako celek a polymer přechází do *stavu plastického*, tj. viskózně tekutého. Teplota tohoto přechodu se nazývá *teplota tečení* T_f a nad touto teplotou jsou již všechny deformace polymeru nevratné. Převod polymerů do plastického stavu je nutný pro jejich další zpracování, jako např. vytlačování, válcování, vstřikování, lisování. [5]

3.6.2 Termické chování krystalického polymeru

V krystalické fázi polymeru jsou segmenty makromolekul pravidelně uspořádány a fixovány ne vazebnými interakcemi. Takové uspořádání neumožňuje jiný tepelný pohyb než rovnovážné vibrace atomů, popřípadě pohyb několika málo atomů v hlavním řetězci nebo jejich substituentů.

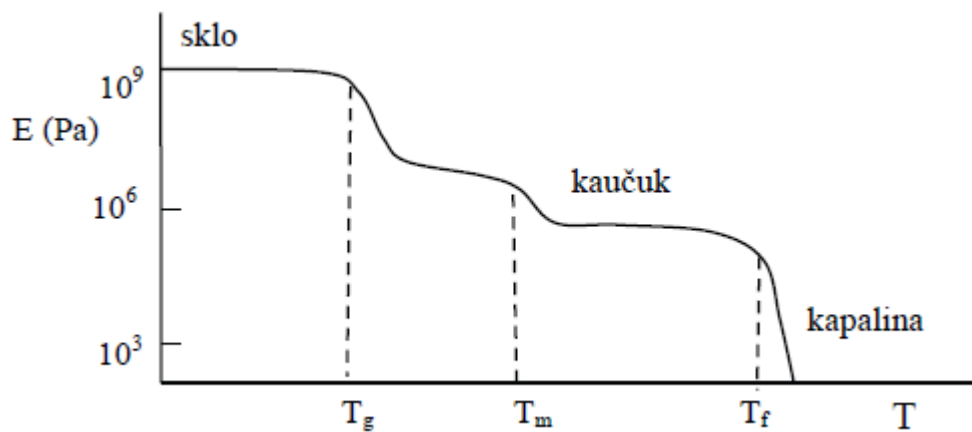
V reálných krystalických polymerech je vždy obsažena vedle krystalické fáze určitá část fáze amorfní. Tomu pak odpovídají možnosti tepelného pohybu segmentů v závislosti na teplotě. Ochlazením taveniny semikrystalického polymeru na teplotu tání T_m se segmenty krystalizujícího podílu zafixují na místa v krystalických strukturách, čímž je jejich další tepelný pohyb vyloučen. Segmenty makromolekul, které jsou součástí amorfní fáze, se při dalším ochlazení realizují až do teploty skelného přechodu, kdy jejich pohyb ustává. [5]



Obrázek 8: Závislost specifického objemu na teplotě u zcela amorfního (a), částečně krystalického (b) a hypoteticky 100 % krystalického (c) materiálu [5]

3.7 Modul pružnosti E a lineární elasticita

V oblasti malých deformací existuje přímá úměrnost mezi působící silou a vznikající deformací. Elastická deformace u polymerů je závislá na čase a na teplotě a dá se určit z *Hookeova zákona*. Takováto elasticita se nazývá *lineární* nebo *hookeovská*. Hookeův zákon se formuluje jako přímá úměrnost mezi napětím a poměrnou deformací. Konstanta úměrnosti v tomto případě nezávisí na rozměrech tělesa. Nazývá se modul pružnosti E , nebo také Youngův modul a je při určité teplotě vlastností materiálu, ze kterého je těleso vyrobeno. Hookeův zákon pro jednosměrné protažení se vyjadřuje jako $\sigma = E \cdot \varepsilon$, kde σ je normálové napětí, ε je poměrné prodložení a E již zmíněný modul pružnosti. [8]

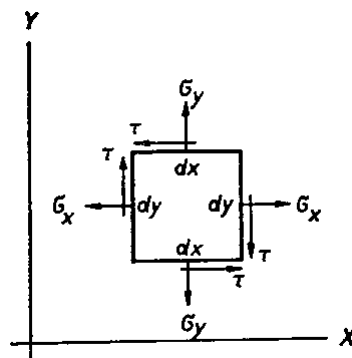


Obrázek 9: Závislost modulu pružnosti na teplotě u částečně krystalického polymeru [5]

3.8 Rovinná napjatost

Pro popis rovinné napjatosti je třeba si představit element o rozměrech dx a dy vyříznutý z rovinné desky a položený do systému souřadnic x a y , kde osy x a y leží v rovině modelu. Tloušťka desky t je totožná s osou z a je tedy kolmá k rovině xy . Na plochy elementu $t \cdot dx$ a $t \cdot dy$ působí normálová napětí σ_x a σ_y a smyková napětí τ_{xy} a τ_{yx} , pro které platí věta o jejich vzájemnosti, a tato napětí jsou podél tloušťky t podél rovinného modelu konstantní.

Podél rozměrů dx a dy působí ve směru kolmém normální napětí a ve směru tangenciálním zase napětí smyková. Z mnoha řezů, které můžeme vést bodem kolmo k rovině modelu, existují pouze dva vzájemně kolmé řezy, v nichž vymizí smyková napětí a normální napětí nabývají maximálních či minimálních hodnot. Tyto řezy jsou nazývány hlavními a příslušná napětí v těchto řezech σ_1 a σ_2 se označují jako hlavní napětí. [9]



Obrázek 10: Rovnováha sil v pravoúhlém elementu [9]

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ

Plasty se svými vlastnostmi přibližují vlastnostem tuhých látek, které jsou charakteristické elasticitou, ale také vlastnostem viskózních kapalin, jenž jsou charakterizovány viskozitou v závislosti na teplotě a době používání. [10] Mechanické vlastnosti materiálů obecně vyjadřují schopnost daného materiálu odolávat mechanickému namáhání. Metody pro zjišťování základních mechanických vlastností spočívají na principu působení vnějších sil na zkušební těleso, zhotovené ze zkoušeného materiálu.

Vzájemným působením čtyř základních faktorů (zatížením, zkušebním tělesem, materiálem zkušebního tělesa a podmínkami zkoušky) je dána reakce zkoušeného materiálu na působení vnějších sil.

Zatížení je určeno definovanou vnější silou, která v tělese vyvolá stav napjatosti a působí na jednu či více ploch zkušebního tělesa.

Zkušebním tělesem je tuhé těleso definovaných rozměrů a tvarů, které je dohodnutým způsobem vyráběné ze zkoušeného materiálu.

Materiál zkušebního tělesa je charakterizován mikrostrukturou a svým chemickým složením.

Podmínky zkoušky jsou určovány teplotou zkoušky a definovaným zkušebním postupem vlastní zkoušky.

Zkoušky mechanických vlastností rozdělujeme podle několika charakteristik.

Dle stavu napjatosti na zkoušky při *jednoosém stavu napjatosti* a při *víceosém stavu napjatosti*.

Dle způsobu zatížení na zkoušky *tahem, tlakem, ohybem*.

Dle časového průběhu zatěžující síly, která působí na zkoušené těleso, dělíme zkoušky na *statické, dynamické, krátkodobé* a *dlouhodobé*.

Dle účinků zatížení, které působí na zkušební těleso, zkoušky rozdělujeme na *destruktivní* (kdy se zkušební těleso deformuje či poruší) a *nedestruktivní* (kdy nedochází k trvalé změně tvaru, rozměrů, chemického složení, struktury a další). [11]

4.1 Destruktivní zkoušky mechanických vlastností

Jsou takové zkoušky, u kterých dochází k porušení zkušební tělesa vlivem působení vnějších sil.

4.1.1 Zkoušky statické

Při těchto zkouškách je zkušební vzorek zatěžován statickou silou, která se během zkoušky mění jen nepatrně.

Statické zkoušky dále členíme na:

- Zkoušky pevnosti, pomocí nichž zjišťujeme např. pevnost materiálu v tahu, tlaku, ohybu.
- Zkoušky tvrdosti, kterými ověřujeme tvrdost materiálu. [12]

4.1.1.1 Zkouška pevnosti v tahu

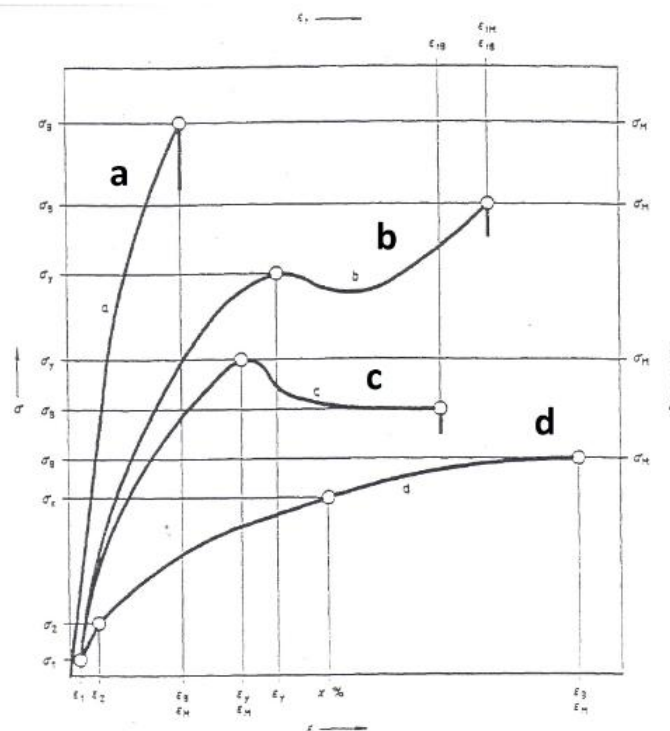
Tahová zkouška je nejdůležitější statickou zkouškou, která se provádí u téměř všech technických materiálů a získané hodnoty se dále užívají k pevnostním výpočtům a kontrolám strojních součástí.

Před započítáním samotné zkoušky je testovaný vzorek upnut mezi dvě čelisti. Jedna čelist je spojena se siloměrným čidlem, druhá (pohyblivá) čelist je spojena s mechanickým nebo hydraulickým pohonem. Během zkoušky se pohyblivá čelist oddaluje od pevné, čímž se zkušební těleso postupně deformuje (prodlužuje). Současně se zaznamenává síla, která je v tělese při deformaci vyvolána. Deformační rychlost lze měnit v poměrně širokém intervalu. Elektronicky řízené trhací stroje umožňují volbu mezi různými zkušebními režimy a také vyrovnávají vlastní deformaci zatěžovacího rámu.

Jako výsledek tahové zkoušky je získána závislost mezi silou a protažením, která je znázorněna pracovním diagramem napětí – deformace. Rostoucí deformace je nezávisle proměnná a vynáší se na vodorovnou osu. Napětí je reakcí materiálu na deformaci a vynáší se na osu svislou.

Tvar křivky pracovního diagramu je důležitou výpovědí o materiálu. Počáteční část diagramu, kde platí přímá úměrnost mezi napětím a deformací, udává rozsah hookovské oblasti. Směrnice přímky této závislosti je již zmíněný Youngův modul. Místo, ve kterém se začíná křivka odchylovat od ideální přímky, se nazývá *mez úměrnosti*. Při dalším

deformování materiálu pak napětí může dosáhnout maxima a pak opět klesat. Napětí odpovídající tomuto maximu, se nazývá *mez kluzu*, která se u některých materiálů definuje smluvně jako napětí, u něhož se experimentální křivka výrazně odchýlí od počáteční přímky. Deformace do meze úměrnosti jsou vratné, tzv. *elastické deformace*, kdežto za mezí kluzu nastává deformace trvalá, tj. *plastická deformace*. Důležitý je také bod, jenž odpovídá přetržení zkušební vzorku. Napětí v tomto bodě se nazývá *pevnost v tahu* a jemu odpovídající deformace je takzvaná *tažnost* materiálu. Jestliže se zkušební vzorek poruší ještě před dosažením meze kluzu, jedná se o *křehký lom*. Naopak lom za mezí kluzu, jemuž předchází *plastická deformace*, se nazývá *tvárný lom*. Plocha mezi vodorovnou osou a křivkou napětí-deformace vyjadřuje deformační práci, kterou je nutné vynaložit k deformaci objemové jednotky materiálu až do jeho přetržení. Což může být mírou *houževnatosti* materiálu. [1]



Obrázek 11: Křivky závislosti napětí na poměrném prodloužení pro křehké materiály (a), houževnaté materiály s mezí kluzu (b), (c) a houževnaté materiály bez meze kluzu (d) [13]

Při tahovém namáhání vznikají v namáhaném materiálu vnitřní síly, bránící přetržení vzorku. V materiálu vzniká působením vnějších sil napětí, které může být *normálové* σ nebo *tečné* τ . Hodnotu napětí σ vypočteme jako podíl zatěžující síly F v newtonech a

plochy průřezu zkušebního tělesa S v milimetrech čtverečních. Hodnota napětí se pak uvádí v Pascalech (MPa). [12]

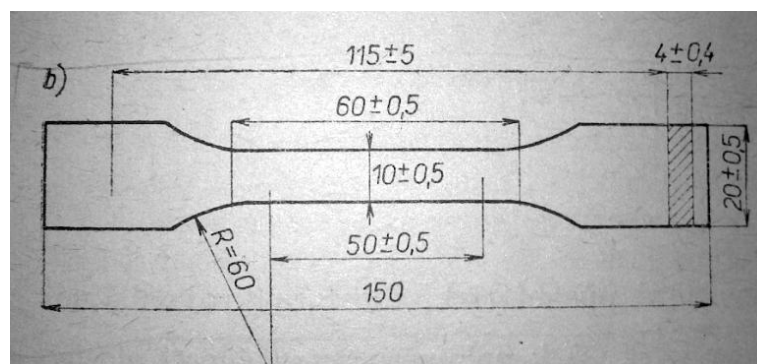
Průběh křivky pracovního diagramu nezávisí pouze na druhu zkoušeného materiálu, ale podstatně také na podmínkách zkoušky. Těmi jsou především teplota a rychlost deformace, případně vlhkost. Rychlost deformace se volí spíše menší, aby se mohly v plné míře projevit charakteristické vlastnosti daného polymeru.

U polymerů se vyskytuje víceméně pět typů pracovních diagramů pro polymery s:

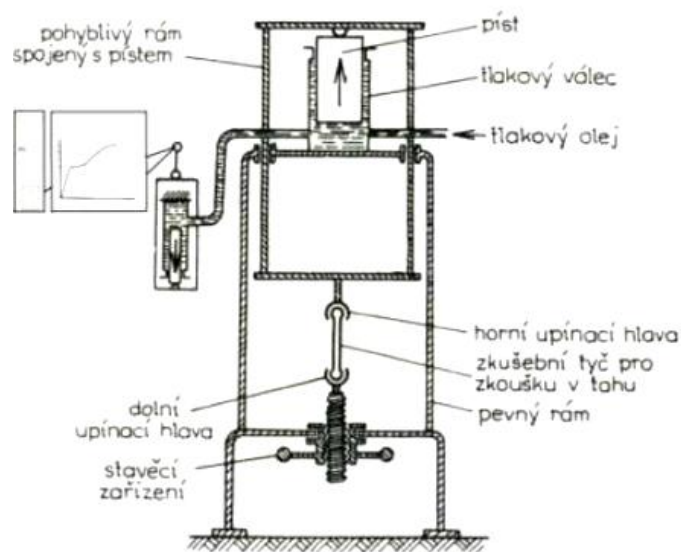
- malou průtažností, např. polystyren
- houževnatější, kde dochází k přetržení vzorku po překročení meze úměrnosti
- velkou průtažností, kde pracovní křivka nemá vyznačenu mez kluzu
- horní a dolní mezi kluzu
- mechanickými vlastnostmi, které se prodloužením zlepšují [3]

Vzorky pro tahovou zkoušku nesmí být nijak zkrouceny a musí mít vzájemně rovnoběžné povrchy bez viditelných vad, škrábanců apod. Upnutí vzorku do čelistí trhacího stroje je takové, aby nedocházelo k jeho vyklouznutí nebo předčasnému lomu.

Tvar vzorku pro tahovou zkoušku je normalizován. Na rozdíl od zkušebního tělesa pro kovy je vzorek plochý a jeho rozměry jsou definovány následovně.



Obrázek 12: Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [3]



Obrázek 13: Schéma trhacího zařízení [12]

4.1.1.2 Zkouška pevnosti v tlaku

Průběh křivky zkoušky pevnosti v tlaku je u polymerů obdobou průběhu tahové křivky. Obecně jej můžeme vyjádřit třemi typy pro:

- křehké polymery
- polymery s horní a dolní mezí kluzu v tlaku
- houževnaté polymery

Při zkoušení křehkých polymerů stoupá napětí v tlaku rovnoměrně až do okamžiku, kdy se zkušební vzorek náhle poruší. Horní mez kluzu je zároveň pevností v tlaku. Tímto typem jsou především reaktoplasty.

Druhý typ je charakteristický přítomností horní a dolní meze kluzu. Překročením dolní meze kluzu napětí stále roste, zkušební těleso se deformuje, aniž by docházelo k viditelnému porušení. Do této skupiny patří většina polymerů.

U houževnatých materiálů se neobjevuje mez kluzu. Zkušební těleso se plynule tlakem deformuje, ale k viditelnému porušení nedochází ani při vysokých tlacích. Ve zkušebním vzorku vzniká značné množství mikro- i makrotrhlinek, které jsou způsobeny tečením materiálu za teplot sklovité oblasti. Do této skupiny patří většinou polyamidy, polyolefiny atd.

Hodnoty tlakových napětí se získají podílem odpovídajících zatížení k původnímu průřezu zkušebního tělesa. Modul pružnosti v tlaku je určen tangentou směrnic k počáteční části křivky závislosti napětí σ na poměrném stlačení ε .

Tlaková zkouška se provádí na klasických trhacích strojích. Síla musí působit v ose zkušebního tělesa, tj. musí být kolmá k jeho tlačné ploše. Tlaková síla stroje je přenášena na zkušební těleso deskami. Předpokládá se, že tlačná síla je rovnoměrně rozložena po celém průřezu. Mezi dotykovými plochami zkušebního tělesa s tlačnými deskami dochází ke tření, které zamezuje příčnému roztahování materiálu. Důsledkem toho se část zkušebního tělesa, která je ve styku s tlačnými deskami rozšiřuje pomaleji než jeho střed. Těleso nabývá tvaru soudku. [3]

4.1.1.3 Zkouška pevnosti v ohybu

Zkouška ohybem se provádí jednak na principu vetknutého trámce, nebo na principu nosníku, jenž je volně položen na dvou podpěrách.

U prvního případu působí síla F na volném konci trámce, která způsobuje jeho ohyb. Napětí v průřezu je rozloženo takovým způsobem, že horní vlákna od neutrální osy jsou namáhána napětím tahovým a dolní polovina průřezu napětím tlakovým. Neutrální vrstva leží při dodržení určitých podmínek uprostřed průřezu a napětí je zde nulové. Naopak maximální napětí je na povrchových vláknech.

Ve druhém případě působí na podepřený trámec buď jedna síla uprostřed mezi podpěrami, nebo dvě stejně velké síly mezi podpěrami, přičemž jejich vzdálenost od podpěr je stejně velká.

Ohybová zkouška se s výhodou používá pro stanovení modulu pružnosti E , především u polymerů s malou tažností.

Podle ohybových vlastností lze rozdělit polymerní materiály na křehké (lámavé) a houževnaté. Zkušební vzorek z křehkého polymeru praskne při určitém průhybu. Na rozdíl od toho houževnatý materiál nepraskne vůbec. Zkušební tělesa pro zkoušku ohybem jsou obdélníkového průřezu z důvodu jejich snadné přípravy.

Grafickým znázorněním ohybové zkoušky je diagram napětí – průhyb. Ten se však sestavuje zřídka, protože vypočtené napětí se liší od skutečného.

Důležitou hodnotou je smluvní mez kluzu v ohybu, která se nedá určit z pracovního diagramu, ale zjišťuje se měřením trvalých deformací krajních vláken. Mez kluzu se pak stanoví z průhybu, při kterém byla naměřena první trvalá deformace vnějšího vlákna namáhaného na tah. [3]

4.1.1.4 Zkouška tvrdosti kuličkou

Tato zkouška tvrdosti je u polymerů nejrozšířenější. Je založena na vtlačování ocelové kuličky daného průměru do zkušebního materiálu určitou silou. Tvrdost materiálu je pak dána podílem zatěžující síly a plochy vtisku.

U polymerů se musí tvrdost počítat z hloubky vtisku, která se měří při zatížení. Do celkové hloubky se tedy počítá i pružná deformace zkušebního tělesa, která závisí na druhu materiálu, vlhkosti, teplotě apod. Se zvětšující se tloušťkou zkušebního tělesa roste i absolutní hodnota pružné deformace. Proto se musí dodržovat určitá, stále stejná tloušťka zkušebního tělesa. [3]

4.1.1.5 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Princip této zkoušky je založen na vtlačování diamantového čtyřbokého jehlanu, jenž má vrcholový úhel 136° , do zkoušeného materiálu. Po odlehčení zatěžující síly se měří úhlopříčka vtisku, pomocí které lze vypočítat jeho povrch. Tvrdost podle Vickerse je pak dána poměrem zatížení a plochy vtisku.

Zkouška se provádí takovým způsobem, že na diamantový jehlan působíme předepsanou silou po určitou dobu. Pak se pomocí mikroskopické lupy proměří obě úhlopříčky vtisku, jejichž délky by se neměly lišit o více než 5 % a určí se střední hodnota. Při měření se musí dodržet minimální tloušťka zkušebního vzorku. [3]

4.1.1.6 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Pro učení tvrdosti u této metody není měřítkem plocha vtisku, ale jeho hloubka. Do zkušebního materiálu vtlačujeme kuličku z kalené oceli. Měřením zjišťujeme číslo tvrdosti, jehož jednotkou je hloubka vtisku 0,002 mm. Tvrdost se stanovuje dvěma postupy. Prvním postupem se stanovuje hloubka vytlačené stopy po odlehčení hlavního zatížení. Touto metodou se testují polymery se sklonem k tečení nebo takové, u kterých nemůže být zanedbána pružná deformace, vyvolaná celkovým zatížením. Pro ostatní polymery se používá takové metody, při níž se měří hloubka vytlačené stopy při zatížení. [3]

4.1.1.7 Zkouška tvrdosti kuželem

Zde se tvrdost stanovuje tak, že do materiálu se vtlačuje určitou silou kužel a následně se zjišťuje plocha vtisku, při které přestane kužel vnikat do zkoušeného polymeru. Odpovídající napětí nám určuje tvrdost daného materiálu zjištěnou kuželem.

Kužel je vyroben z tvrdé oceli a měl by mít vrcholový úhel $53^{\circ}08'$ a při tomto úhlu je hloubka vniku rovna průměru plochy vtisku. Z důvodu nemožnosti zhotovení kuželu s dokonalým vrcholem, je proto kužel obroušen 0,2 mm od vrcholu. Tímto je umožněno lepší odečítání vrcholového bodu a je zaručena větší životnost hrotu.

Zatížení se volí v určitém rozmezí dle tvrdosti daného polymeru. Tloušťka zkoušeného tělesa bývá 2 až 10 mm. Zkušební vzorek se položí pod kužel, který je zatížen zvoleným zatížením. Zpočátku je vnikání kužele do materiálu rychlé, postupně se zpomaluje, až se téměř zastaví. Po uplynutí jedné minuty je odečten údaj indikátoru. Hloubka vniknutí je vypočtena z rozdílu údaje na indikátoru před zatížením a po jednodominutovém působení síly. U výpočtu plochy se musí k naměřené hloubce vniknutí ještě přičíst hodnota obroušení vrcholu (0,2 mm). Z hloubky vniku je pak určena plocha a tvrdost materiálu. [3]

4.1.1.8 Mikrotvrdoměr

Krystalické polymery občas obsahují sférolity. U měření tvrdosti běžnými metodami nelze měřit tvrdost jednotlivých fází odděleně. Stopa měřicího elementu (kuličky, jehlanu) je příliš velká a může se rozprostírat přes část sférolitu, ale také přes amorfní fázi, která jej obklopuje. V tomto případě se s výhodou používá metoda mikrotvrdoměru.

Je to obdoba Vickersovy zkoušky, avšak jehlan je tak malý, že se jeho úhlopříčky měří v mikrometrech. Zatížení jsou také velmi malá. Používá se mikrotvrdoměr v kombinaci s mikroskopem, na kterém se zároveň měří úhlopříčky.

Povrch zkoušeného tělesa se musí dokonale obrousit a vyleštit. U většiny polymerů však nelze dosáhnout vhodného povrchu pro tuto zkoušku. Metoda se používá pro studium anizotropie. [3]

4.1.2 Zkoušky dynamické

Porušení materiálu polymeru nárazem je spjato s jeho deformační schopností, tj. schopností deformovat se určitou rychlostí. Při pomalém zvyšování napětí, např. v ohybu, se bude houževnatý materiál značně deformovat a zkušební těleso se nezlomí buď vůbec,

nebo se zlomí až při velkém průhybu. Dalším zvyšováním rychlosti ohybu se bude namáhaný materiál jevit jako křehký.

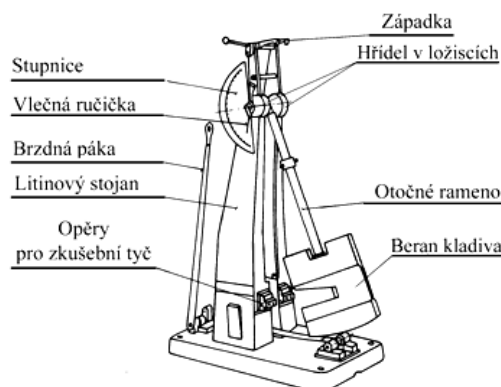
Zkoušky rázem poskytují určité informace o chování polymerů, avšak jejich výsledky nelze všeobecně přenášet na různé tvary výrobků. Podle způsobu namáhání je můžeme rozdělit na zkoušky:

- rázové v tahu a tlaku
- rázové v ohybu
- rázové v krutu

Nejvíce se používá rázová zkouška v ohybu, při níž kyvadlo přenáší svou kinetickou energii na zkušební vzorek. Ten se nejprve deformuje pružně, avšak v zápětí se deformuje plasticky do takové míry, že dochází k jeho porušení. [3]

4.1.2.1 Metoda Charpy

U této metody se zjišťuje rázová energie pomocí otočně zavěšeného kyvadlového kladiva, které má ve své horní poloze H jistou potenciální energii. Po uvolnění kladivo padá, přičemž prochází bodem maximální kinetické energie, která je v něm rovna té potenciální. Do tohoto bodu je umístěn střed zkušebního vzorku, na který tedy působí největší kinetická energie, jenž má hodnotu danou energií polohy v zavěšení. Výška kladiva je v kterémkoliv okamžiku měřítkem energie. Energie polohy se při pádu kladiva přeměňuje na energii kinetickou. Část kinetické energie je spotřebována na přeražení a odmrštění zkušebního vzorku a část se spotřebuje na tření. Zbývající část energie se spotřebuje na vykývnutí kladiva na druhou stranu do polohy h . Výsledkem metody je rázová houževnatost daného materiálu. [3]



Obrázek 14: Schéma Charpyho kladiva [14]

4.1.2.2 *Metoda Izod*

Tato metoda se liší od metody Charpy jejím uspořádáním. Zkušební vzorek opatřený vrubem ve tvaru V o úhlu 45° má jeden konec pevně uchycený v upínací čelisti přístroje. Kladivo, které je otočně uchycené naráží na stranu opatřenou vrubem v určité vzdálenosti od volného konce.

Metodu lze provádět dvěma postupy. První postup je založen na podobném principu jako u metody Charpy, kde energie potřebná k přeražení je dělena šířkou zkušební vzorku. U druhé metody je zjišťována čistá energie, které je potřeba k přeražení zkoušeného tělesa. Zjišťuje se tedy potřebná energie k odmrštění uražené poloviny zkušební vzorku. Tato uražená polovina je umístěna na část uchycenou v čelisti a poté je proveden úder jako při rázové zkoušce, ale z takové výšky, aby zkušební těleso bylo odmrštěno zhruba takovou rychlostí jako u rázové zkoušky. energii, kterou je potřeba k odmrštění přeražené části, nazýváme *rázovým faktorem*. Rozdílem rázové energie a rázového faktoru se zjišťuje čistá rázová práce. [3]

4.1.2.3 *Rázová zkouška tahem*

Tato zkouška se používá pro zkoušení příliš houževnatých polymerů, nebo pro polymery ve tvaru folií, u nichž nelze zkoušet rázovou houževnatost ohybem. Ke zkoušce se používají zkušební vzorky dvou rozměrů, které se navzájem liší délkou měřené části, což umožňuje sledovat vliv prodloužení na výsledek.

Je nutno sledovat protažení zkušební vzorku. Práce, která je vynaložena na přetržení měřené části, je rovna součinu působící síly a prodloužení. Z čehož je patrné obdržení stejného výsledku u dvou různých materiálů, kde jeden materiál bude mít malé protažení a velkou absorpci rázové práce, naopak druhý materiál bude mít velké protažení a malou absorpci rázové práce. [3]

4.1.2.4 *Rázová zkouška padajícím závažím*

Je založena na principu volně padajícího tělesa, s možností zvolení různé hodnoty kinetické energie, jejíž velikost záleží na hmotě tělesa a na počáteční výšce.

Nárazník je ve tvaru ocelové polokoule, do které je vetknuta tyč pro upevnění v elektromagnetu. Pomocí tyče je zároveň uchyceno přídavné závaží. Těleso nárazníku je zavěšeno v určité vzdálenosti od zkoušené fólie, která je upnuta pneumaticky do kruhového rámu. Pokud při dopadu nárazníku zkoušený vzorek nepraskne, zvýší se

hmotnost závaží o 15 kg. Jestli praskají všechny zkušební vzorky, tak se ubere přídavné závaží 15 kg. Pro každou hmotnost tělesa se vždy zkouší 10 vzorků, až se najde taková zátěž, při které praskne 50 % vzorků. Vyhodnocení výsledků se provede tak, že počet prasklých vzorků při jednotlivých hmotnostech tělesa je vyjádřen v procentech. [3]

4.1.2.5 Stanovení meze únavy materiálu

Mez únavy je zjišťována na normalizovaných zkušebních tělesech. Obdržené hodnoty se vztahují jen na určitou metodu a nemohou tedy být zobecněny. Pro studium konkrétních únavových jevů je používáno zkušebních těles, která jsou přizpůsobena studovanému případu.

Podstatou stanovení meze únavy je zjištění počtu cyklů, při kterém se zatěžované zkušební těleso poruší. Počet cyklů, kterého je potřeba k porušení zkoušeného tělesa, je závislý na hodnotě absolutně nejvyššího napětí a také na jeho amplitudě. Nejpoužívanější metodou stanovení meze únavy je metoda Wöhlerova. Při této metodě se zkouší pět až šest zkušebních těles, u kterých je namáhání odstupňováno. Začíná se s napětím, jež je vyšší než očekávaná mez únavy a následně se pro každé další těleso napětí snižuje. Poslednímu tělesu je uděleno takové napětí, při němž by nemělo dojít k jeho porušení.

Získané hodnoty se vynášejí do grafu, kde se na svislou osu vyznačuje nejvyšší napětí a na vodorovnou osu počet cyklů, při nichž došlo k porušení vzorku. Spojením bodů obdržíme experimentální křivku, jež se asymptoticky přibližuje k určité hodnotě napětí, které je hledanou mezí únavy. [3]

4.2 Nedestruktivní zkoušky mechanických vlastností

Zkoušení materiálu bez jeho porušení, se nazývá *defektoskopie*. Používá se zejména u hotových výrobků, kde je nežádoucí jejich poškození vlastní zkouškou. Má význam pro ověřování kvality již zhotovených součástí a s jejíž pomocí zjišťujeme:

- vady na povrchu materiálu
- skryté vady uvnitř materiálu

Existuje mnoho různých metod, které se mohou vzájemně doplňovat, protože žádná z nich nám nedává stoprocentní možnost zjištění všech vad. Z tohoto důvodu je nutno použít vždy několika metod, abychom mohli vyšetřit veškeré vady, které se v daném materiálu

vyskytují. Zkoušky se provádí buď v laboratořích, nebo i ve výrobě, případně také přímo na místě montáže. [15]

4.2.1 Fotoelasticimetrie

Fotoelasticimetrie je optická metoda ke zjišťování rozdělení napětí uvnitř materiálu. Využívá fyzikálního jevu zvaného dočasný dvojlom. To znamená, že materiály (např. sklo, perspex a jiné umělé hmoty), které jsou v nezatíženém stavu isotropní, nabývají vlivem zatížení a jeho působením z optického hlediska povahy krystalických látek. Jejich optické osy jsou shodné s osami hlavních napětí v modelu a po odlehčení se opět stávají isotropními.

Přístroje pro fotoelasticimetrii se zpravidla skládají ze zdroje světla a dvou za sebou postavených polarizačních soustav. Měřený model se umístí mezi dva polarizační filtry, které mají vzájemně kolmé polarizační roviny. Filtr, který je blíže ke světelnému zdroji se nazývá *polarizátor*, naopak vzdálenější filtr *analyzátor*. Polarizátorem se přeměňuje světlo na přímkově polarizované a analyzátozem se detekují změny, které v něm vznikly po průchodu zkoumaným modelem. K vytvoření kruhově polarizovaného světla se mezi model a polarizační filtry vkládají čtvrtvlnové desky.

Při vložení nezatíženého modelu mezi polarizační filtry zůstává zorné pole tmavé. Zatížením modelu se zorné pole vyjasní a zároveň vyvstávají černé pruhy, tzv. *izoklíny*, což jsou křivky, kde jejich body určují sklon hlavních napětí. S rostoucím napětím vznikají další barevné pruhy, které označujeme jako *izochomy*, definující místa bodů stejných rozdílů hlavních napětí. [9]

4.2.2 Zkouška rentgenovými paprsky

U této metody se využívá schopnosti krátkovlnného záření prostupovat materiálem, v němž se zeslabuje jeho intenzita vlivem absorpce. Samotné zeslabení záření je závislé na hustotě daného materiálu a také na jeho tloušťce a je zaznamenáváno na rentgenový film, citlivý na jeho působení.

Pokud je v materiálu vnitřní vada (např. póry, nečistoty apod.), pak v tomto místě je skutečná tloušťka vzorku menší o rozměr vady ve směru záření. Také hustota materiálu je v daném místě menší, a tudíž intenzita prošlého záření je zeslabována méně než v okolí této vady. Na film, který je umístěný na opačné straně předmětu dopadá tedy intenzivnější

záření. Vady se na vyvolaném snímku (rentgenogramu) projevují jako tmavá místa na světlejším pozadí.

Rentgenový přístroj, jenž je umístěn v ochranném krytu, vyzařuje svazek paprsků přes filtr a clonu na zkoušený materiál. Místa, která nemají být ozářena, jsou zakrytá olověnou maskou. Kazeta s filmem se nachází těsně za zkoumaným vzorkem. Z důvodu rozpoznání vad na skutečném předmětu se používá olověných značek nebo písmen, jejichž poloha je na vzorku trvale označena a na snímku jsou pak tyto značky světlé. Na přivrácenou stranu k předmětu je zabudována kontrolní drátová měrka, která má různě odstupňované průměry a slouží k určení rozeznatelnosti vad. Dosažená rozeznatelnost se udává v procentech prozářené tloušťky a bývá v rozmezí od 1 do 2%. [15]

4.2.3 Zkouška ultrazvukem

Je moderním způsobem testování materiálů. Zkoušení je zdravotně nezávadné, rychlé a použitelné pro materiály o tloušťce i několika metrů. Pro tyto zkoušky užíváme impulsní defektoskopy, jež jsou založeny na principu radaru. Skládají se buď z jedné sondy, pracující střídavě jako vysílač i přijímač, nebo naopak ze dvou sond, tedy sonda vysílací a sonda přijímací.

Nejvíce používanou z těchto zkoušek je tzv. *odrazová metoda*, u které je do zkoušeného materiálu vysílán krátkodobý ultrazvukový impuls. Ten se odráží od protější stěny nebo od vady a na stejné straně, na kterou je vysílán, se opět přijímá. Působící řídicí impuls rozkmitá oscilační obvod generátoru. Kmity jsou přeneseny na křemenný krystal ve vysílači a ten vyšle do zkoušeného předmětu svazek ultrazvukových vln. Přes zesilovač se zavede část budícího impulsu do oscilografu, kde se na jeho stínítku objeví kmit, tzv. *základní echo*. Materiálem prostupuje svazek složený z ultrazvukových vln, který narazí na protilehlou stěnu, kde se odráží a vrací zpět do přijímače, v důsledku čehož se rozkmitá krystal materiálu. Tímto vznikají elektrické kmity, které vedou přes zesilovač do oscilografu, kde se na jeho stínítku objeví *koncové echo*. Pokud je v materiálu vada, část ultrazvukových vln se od ní odrazí. Tyto vlny se dostanou do přijímače dříve, čímž se na stínítku oscilografu objeví jako tzv. *echo poruchové*. Další zkouškou je průchodová metoda, kde se vysílají ultrazvukové vlny do zkoušeného předmětu z jedné strany a ze strany protilehlé se přijímají. Pokud se v materiálu nachází vada, ultrazvukové vlny se na její ploše odrážejí, čímž vzniká za vadou *ultrazvukový stín*. [15]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENT

Záměrem této části bakalářské práce bylo stanovení základních pevnostních charakteristik předložených vzorků vybranými metodami testování a následné vyhodnocení výsledků. Materiálem pro zkoušení byl polystyren ve třech barevných odstínech a samotné měření bylo provedeno tahovou zkouškou na trhacím zařízení a zkouškou rázem v ohybu pomocí Charpyho kladiva. Během testování byly fotoaparátem pořízeny snímky vzorků přes polarizační filtr ke zjištění průběhu napětí uvnitř materiálu.

5.1 Tahová zkouška

Účelem zkoušky bylo stanovení tahových vlastností vzorku plastu dle evropské normy ČSN EN ISO 527-1.

5.1.1 Zkušební těleso

Materiálem pro samotné zkoušení byly vzorky z polystyrenu ve třech barevných odstínech; zcela transparentní, světle a tmavě žlutě zbarvené. Zkušební tělesa z tohoto materiálu byla normovaného tvaru a byla vyrobena vstřikováním ve formě.

5.1.2 Popis zařízení

Zařízením pro testování byl zkušební stroj INSTRON 3345 s pneumatickými čelistmi a se snímačem síly s rozsahem 5000 N, připojený k osobnímu počítači. Čelisti byly upevněny pomocí centrovacích kolíků a zapojeny do pneumatického systému ovládaného pedálem.

5.1.3 Podmínky zkoušky

Rychlost zatěžování byla v metodě příslušného softwaru nastavena na 10 mm/min a citlivost detekce porušení vzorku na 40%. Čelisti byly od sebe vzdáleny 115 mm a tato hodnota sloužila pro výpočet relativního prodloužení.

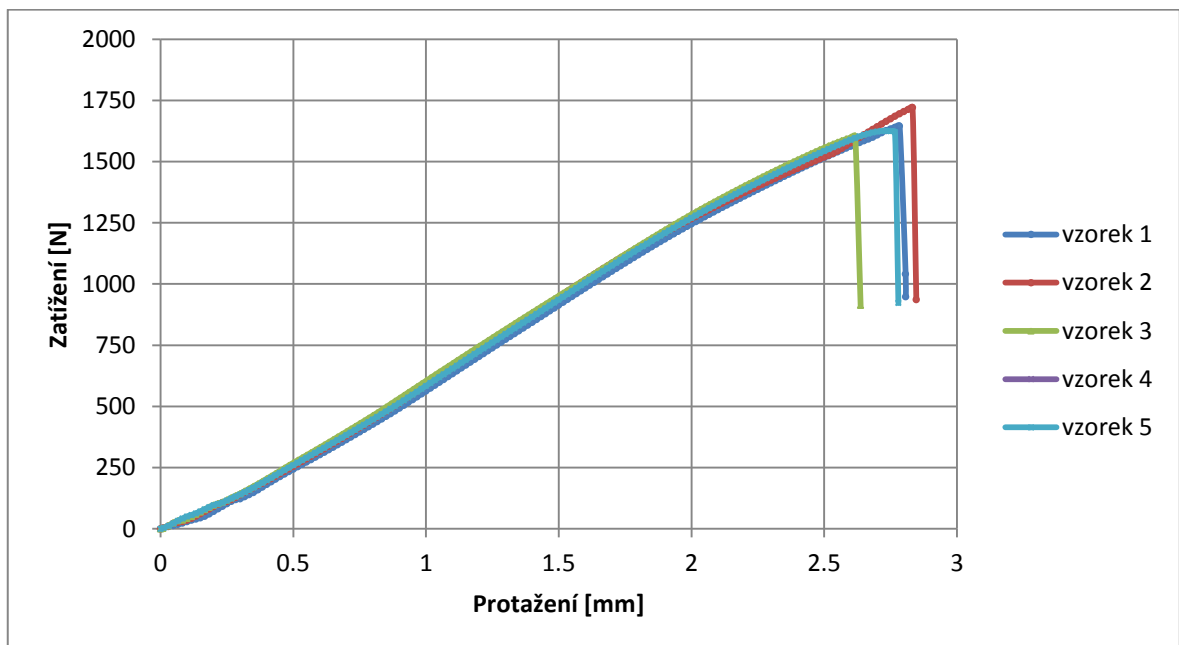
5.1.4 Výsledky zkoušení

Během zkoušení byly pořízeny snímky zkoušených těles pomocí kompaktního digitálního fotoaparátu Panasonic Lumix GF1 s polarizačním filtrem s kruhovou polarizací za použití stativu.

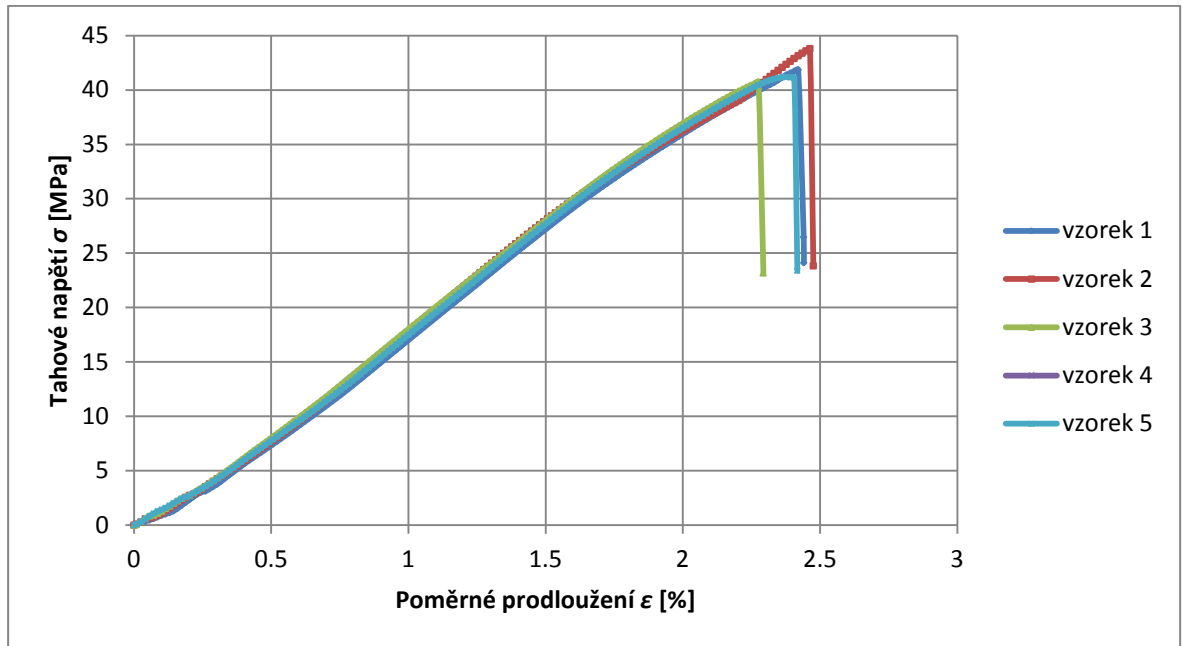
Transparentní polystyren (PS):

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro transparentní PS

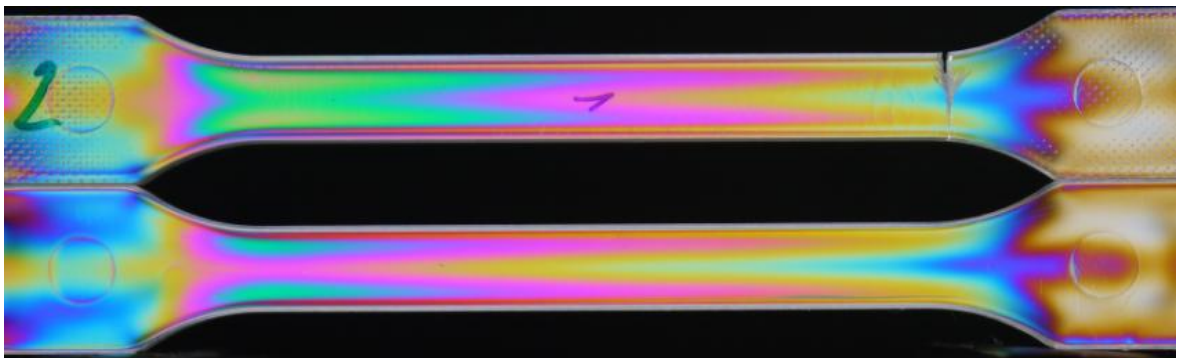
Číslo vzorku	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Tahové protažení [mm]	Tahové napětí σ [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Youngův modul pružnosti E [MPa]
1	10,11	3,89	2,37	36,8	2,06	2058
2	10,13	3,88	2,42	37,7	2,10	2111
3	10,13	3,89	2,20	35,6	1,91	2078
4	10,11	3,88	2,28	36,1	1,99	2095
5	10,15	3,89	2,35	37,2	2,04	2060
		Průměr	2,32	36,7	2,02	2080
		Chyba	0,04	0,4	0,04	10



Graf 1: Závislost zatížení – protažení u transparentních vzorků PS



Graf 2: Závislost tahové napětí – poměrné prodloužení u transparentních vzorků PS

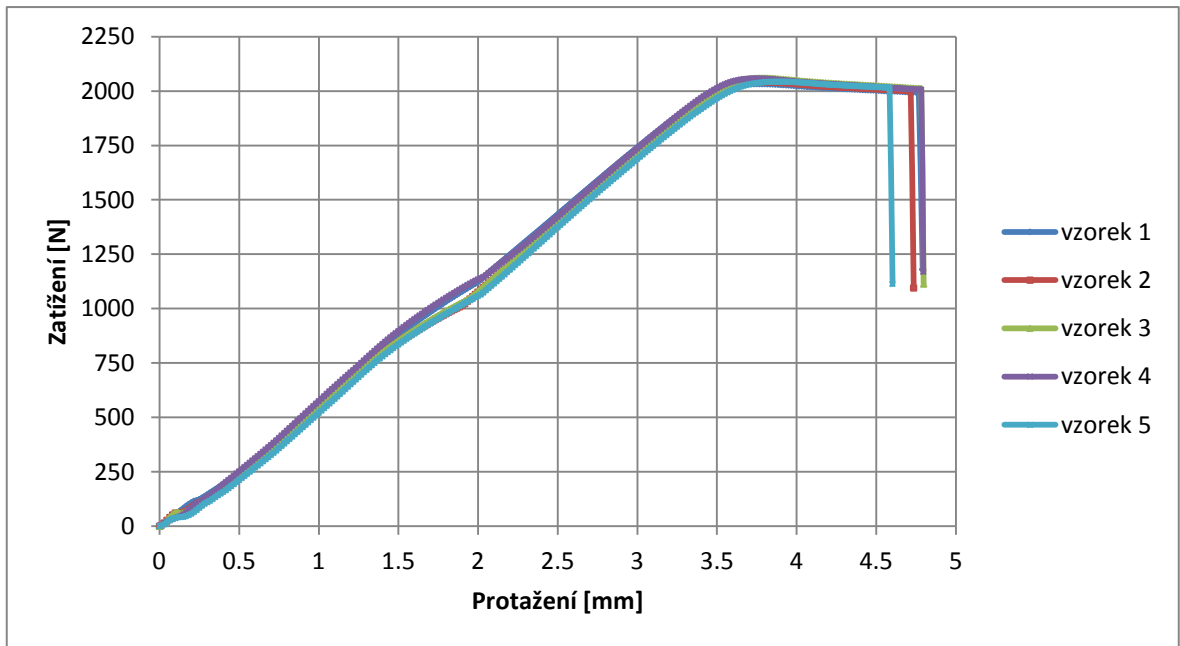


Obrázek 15: Přetržený a původní transparentní vzorek PS v polarizovaném světle

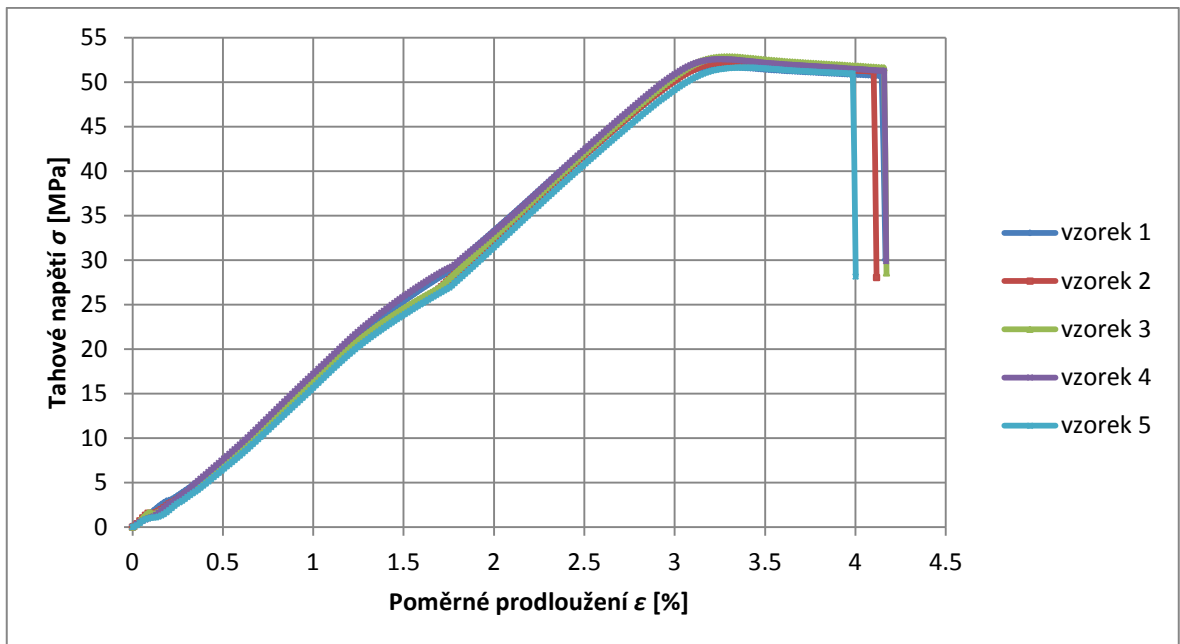
Světle žlutý PS:

Tabulka 2: Naměřené hodnoty pro světle žlutý PS

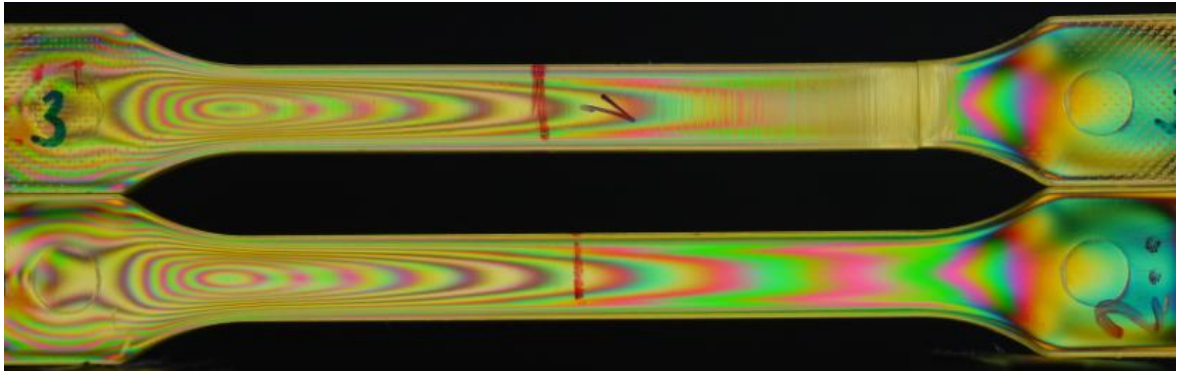
Číslo vzorku	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Tahové protažení [mm]	Tahové napětí σ [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Youngův modul pružnosti E [MPa]
1	10,11	3,89	4,13	51,3	3,59	1967
2	10,07	3,88	4,20	51,8	3,65	2026
3	10,10	3,86	4,20	52,2	3,65	2039
4	10,09	3,88	4,13	52,0	3,59	1986
5	10,07	3,93	4,17	51,3	3,62	1938
		Průměr	4,17	51,7	3,62	1991
		Chyba	0,02	0,2	0,02	20



Graf 3: Závislost zatížení – protažení u světle žlutých vzorků PS



Graf 4: Závislost tahové napětí – poměrné prodloužení u světle žlutých vzorků PS

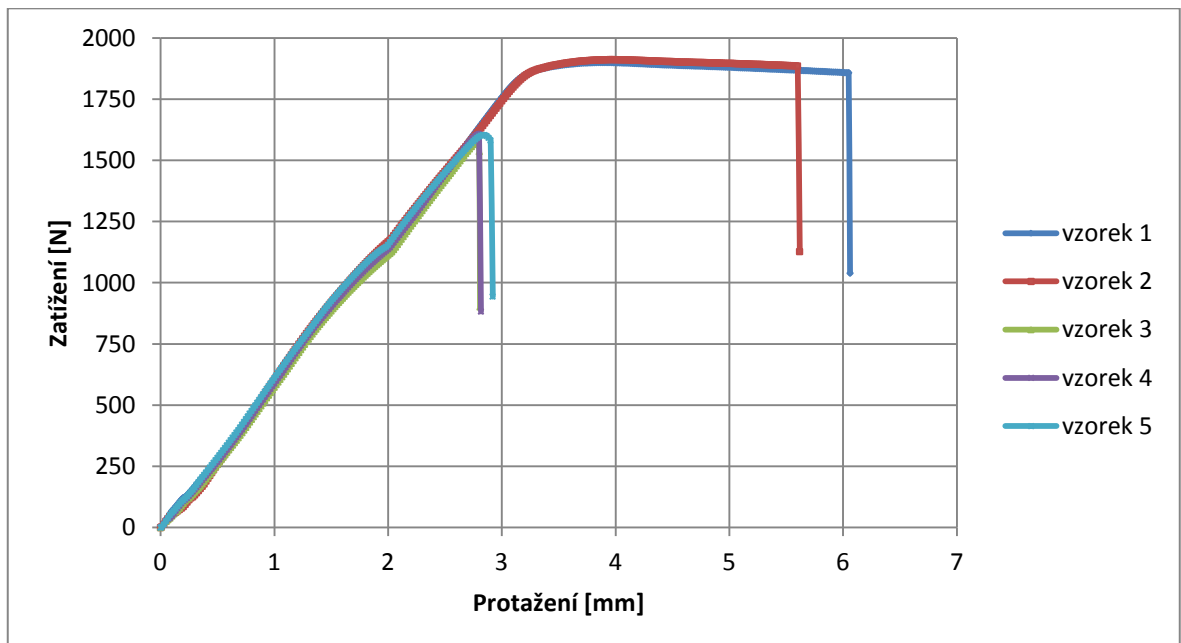


Obrázek 16: Přetržený a původní světle žlutý vzorek PS v polarizovaném světle

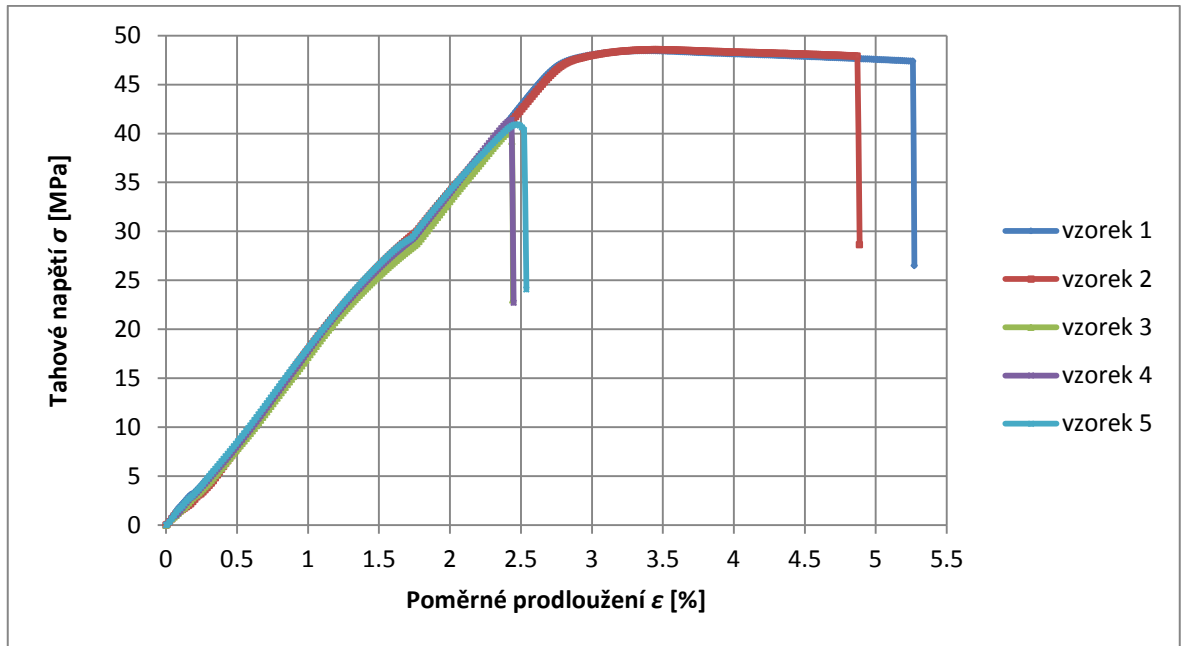
Tmavě žlutý PS:

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro tmavě žlutý PS

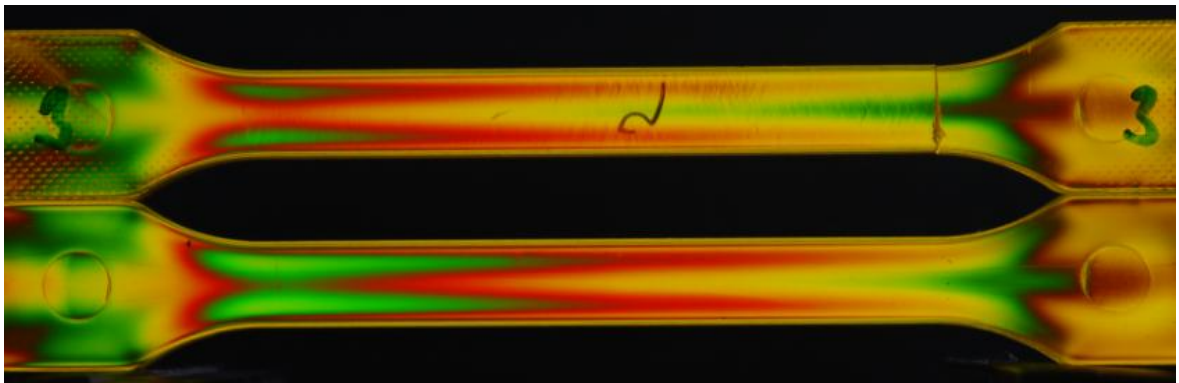
Číslo vzorku	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Tahové protažení [mm]	Tahové napětí σ [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]	Youngův modul pružnosti E [MPa]
1	10,13	3,87	4,3	48	3,75	1989
2	10,12	3,89	4,4	48	3,78	2040
3	10,13	3,87	2,4	34	2,07	1949
4	10,09	3,85	2,4	35	2,07	1985
5	10,13	3,87	2,5	37	2,16	1969
Průměr			3,2	40	2,8	1990
Chyba			0,5	4	0,5	20



Graf 5: Závislost zatížení – protažení u tmavě žlutých vzorků PS



Graf 6: Závislost tahové napětí – poměrné prodloužení u tmavě žlutých vzorků PS



Obrázek 17: Přetržený a původní tmavě žlutý vzorek PS v polarizovaném světle

5.2 Zkouška rázem v ohybu

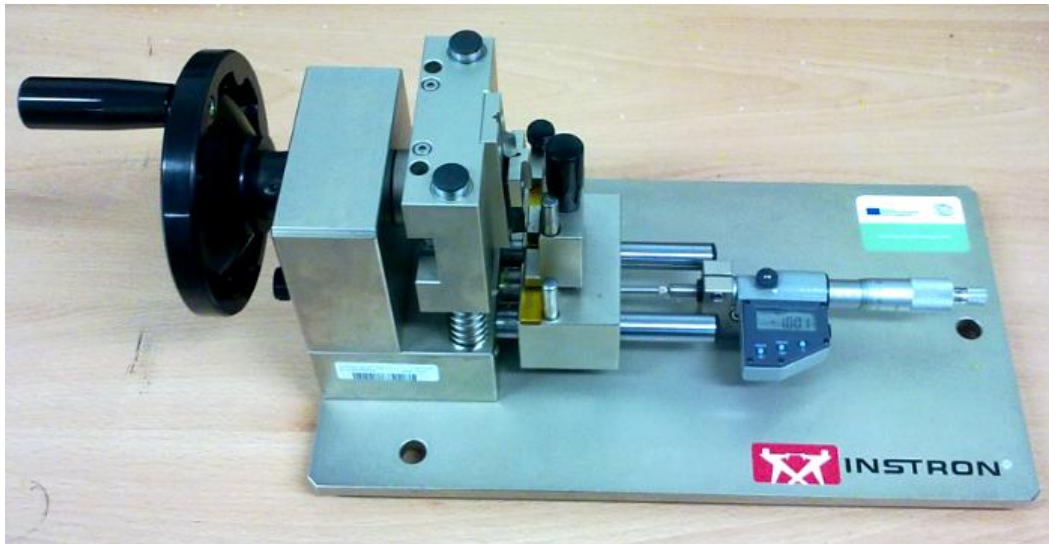
Předmětem daného testování bylo stanovení rázové houževnatosti plastu metodou Charpy dle normy ČSN EN ISO 179.

5.2.1 Popis vzorku

Vzorky pro tuto zkoušku byly z polystyrenu jako u předchozí metody, ale pouze ve tmavě žlutém a transparentním provedení. Zkušební tělesa byla normalizovaného tvaru a část z nich byla opatřena V vrubem typu B (hloubka vrubu 0,5; 1 a 1,5 mm).

5.2.2 Vrubovací zařízení

Vrubby byly zhotoveny na vrubovacím zařízení INSTRON Notchvis, určeném pro manuální přípravu definovaných vrubů do zkušebních těles, které se testují na rázovou houževnatost. Umožňuje tvorbu různého tvaru vrubu (V i U vrubování, Charpy, Izod).



Obrázek 18: Vrubovací zařízení INSTRON Notchvis

5.2.3 Popis zkušebního stroje

Zkušebním strojem bylo kyvadlové kladivo Charpy s tuhou litinovou konstrukcí s délkou otočného ramena 220 mm a beranem kladiva o hmotnosti 0,937 kg. Součástí zařízení je stupnice, na které se přímo odečítala hodnota nárazové práce potřebné k přeražení zkušebního tělesa.

5.2.4 Pracovní postup

Před testováním byla změřena tloušťka a šířka zkoušených vzorků na více místech a byly vypočítány průměrné hodnoty. Poté bylo kyvadlo zajištěno v horní poloze a následně se pětkrát za sebou provedl slepý pokus bez vzorku ke zjištění ztrát energie třením a tyto hodnoty se zaznamenaly. Pak bylo zkušební těleso umístěno na podpěry stroje tak, aby břit beranu kyvadla dopadal do středu a na užší podélnou plochu vzorku. Po uvolnění kyvadla došlo k přeražení vzorku a na stupnici byla odečtena hodnota nárazové energie. Podílem této hodnoty a průřezu zkušebního tělesa byla vypočtena rázová houževnatost.

5.2.5 Výsledky zkoušení

Slepým pokusem byly zjištěny korekce k určení ztrát energie třením na $0,947 \pm 0,01$ J a tato hodnota dále sloužila ke korigování naměřené nárazové energie.

Zkoušení vzorků bez vrubu:

Tabulka 4: Výsledky měření pro transparentní vzorek bez vrubu

		Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Průřez [mm ²]	Korig. energie W [J]	Rázová houževn. a_{cU} [kJ/m ²]
Vzorek 1	Průměr	10,17	3,924	39,9	0,53	13,2
	Chyba	0,01	0,004	0,1		
Vzorek 2	Průměr	10,18	3,918	39,90	0,50	12,4
	Chyba	0,01	0,004	0,02		
Vzorek 3	Průměr	10,18	3,92	39,9	0,51	12,7
	Chyba	0,01	0,01	0,2		
				Průměr	0,51	12,8
				Chyba	0,01	0,3

Pro transparentní vzorek vycházela korigovaná průměrná energie spotřebovaná k přeražení $W = 0,51 \pm 0,01$ J a průměrná rázová houževnatost $a_{cU} = 12,8 \pm 0,3$ kJ/m².

Tabulka 5: Výsledky měření pro tmavě žlutý vzorek bez vrubu

		Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Průřez [mm ²]	Korig. energie W [J]	Rázová houževn. a_{cU} [kJ/m ²]
Vzorek 1	Průměr	10,18	3,93	40,0	0,62	15,5
	Chyba	0,01	0,01	0,1		
Vzorek 2	Průměr	10,17	3,916	39,8	0,57	14,4
	Chyba	0,01	0,004	0,1		
Vzorek 3	Průměr	10,16	3,93	39,9	0,70	17,6
	Chyba	0,02	0,01	0,1		
				Průměr	0,6	16
				Chyba	0,1	1

Pro tmavě žlutý vzorek vycházela korigovaná průměrná energie spotřebovaná k přeražení $W = 0,6 \pm 0,1$ J a průměrná rázová houževnatost $a_{cU} = 16 \pm 1$ kJ/m².

Zkoušení vzorků s vrubem:

Tabulka 6: Výsledky měření pro transparentní vzorek s vrubem

Vrub	Číslo vzorku		Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Průřez [mm ²]	Korig. energie W [J]	Rázová houževn. a_{cN} [kJ/m ²]	
1,5 mm	Vzorek 1	Průměr	8,67	3,92	34,0	Vzorek praskl před zkoušením		
		Chyba	0,02	0,01	0,1			
	Vzorek 2	Průměr	8,69	3,92	34,1	0,32	9,38	
		Chyba	0,01	0,01	0,1			
						Průměr	0,32	9,38
						Chyba	-	-
1 mm	Vzorek 3	Průměr	9,18	3,92	36,0	0,38	10,6	
		Chyba	0,01	0,01	0,1			
	Vzorek 4	Průměr	9,18	3,914	36,0	0,41	11,4	
		Chyba	0,01	0,001	0,1			
						Průměr	0,39	11,0
						Chyba	0,03	0,7
0,5 mm	Vzorek 5	Průměr	9,68	3,92	38,0	0,48	12,6	
		Chyba	0,01	0,01	0,1			
	Vzorek 6	Průměr	9,67	3,92	38,0	0,47	12,4	
		Chyba	0,01	0,01	0,1			
						Průměr	0,48	12,5
						Chyba	0,01	0,2

U transparentních vzorků opatřených vrubem vycházely hodnoty korigované průměrné energie potřebné k přeražení a rázové houževnatosti následovně:

V – vrub typu B, hloubka 1,5 mm:

$$W = 0,32 \text{ J}$$

$$a_{cN} = 9,38 \text{ kJ/m}^2$$

V – vrub typu B, hloubka 1 mm:

$$W = 0,39 \pm 0,03 \text{ J}$$

$$a_{cN} = 11,0 \pm 0,7 \text{ kJ/m}^2$$

V – vrub typu B, hloubka 0,5 mm:

$$W = 0,48 \pm 0,01 \text{ J}$$

$$a_{cN} = 12,5 \pm 0,2 \text{ kJ/m}^2$$

Tabulka 7: Výsledky měření pro tmavě žlutý vzorek s vrubem

Vrub	Číslo vzorku		Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Průřez [mm ²]	Korig. energie W [J]	Rázová houževn. a_{cN} [kJ/m ²]	
1,5 mm	Vzorek 1	Průměr	8,67	3,93	34,0	0,13	3,3	
		Chyba	0,01	0,01	0,1			
	Vzorek 2	Průměr	8,67	3,93	34,0	0,15	3,8	
		Chyba	0,01	0,01	0,1			
						Průměr	0,14	3,6
						Chyba	0,02	0,4
1 mm	Vzorek 3	Průměr	9,17	3,92	36,0	0,23	6,4	
		Chyba	0,02	0,01	0,1			
	Vzorek 4	Průměr	9,17	3,93	36,0	0,17	4,7	
		Chyba	0,02	0,02	0,1			
						Průměr	0,20	6
						Chyba	0,05	1
0,5 mm	Vzorek 5	Průměr	9,67	3,918	37,89	0,35	9,2	
		Chyba	0,01	0,002	0,01			
	Vzorek 6	Průměr	9,65	3,916	37,79	0,34	9,0	
		Chyba	0,02	0,002	0,1			
						Průměr	0,35	9,1
						Chyba	0,01	0,2

Hodnoty korigované průměrné energie nutné k přeražení a hodnoty rázové houževnatosti pro tmavě žluté vzorky opatřené vrubem:

V – vrub typu B, hloubka 1,5 mm:

$$W = 0,14 \pm 0,02 \text{ J}$$

$$a_{cN} = 3,6 \pm 0,4 \text{ kJ/m}^2$$

V – vrub typu B, hloubka 1 mm:

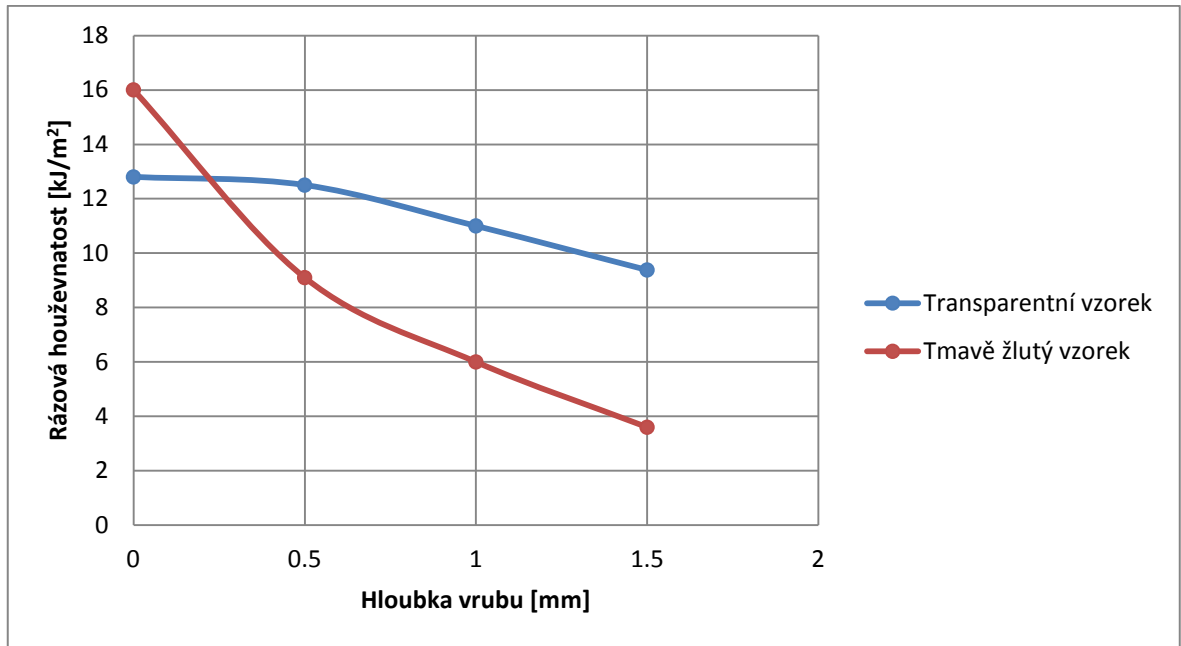
$$W = 0,20 \pm 0,05 \text{ J}$$

$$a_{cN} = 6 \pm 1 \text{ kJ/m}^2$$

V – vrub typu B, hloubka 0,5 mm:

$$W = 0,35 \pm 0,01 \text{ J}$$

$$a_{cN} = 9,1 \pm 0,2 \text{ kJ/m}^2$$



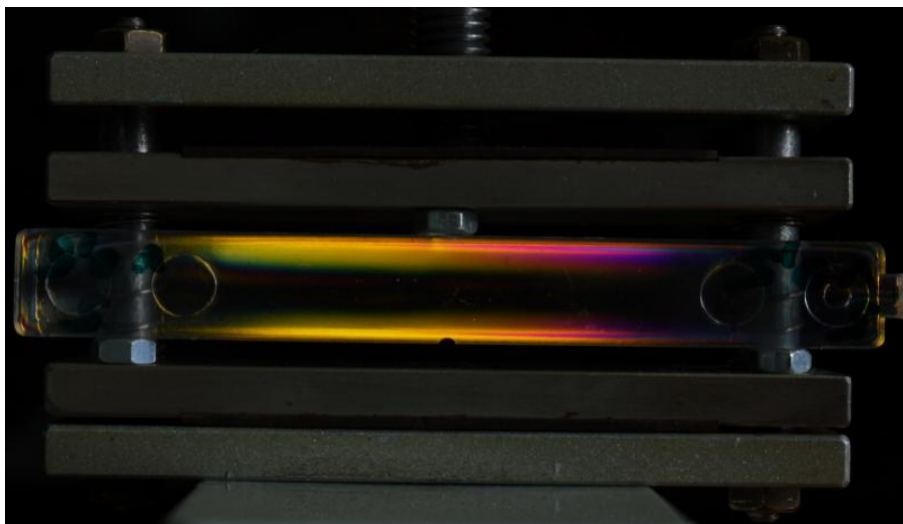
Graf 7: Závislost rázové houževnatosti na hloubce vrubu

5.3 Fotoelasticimetrie

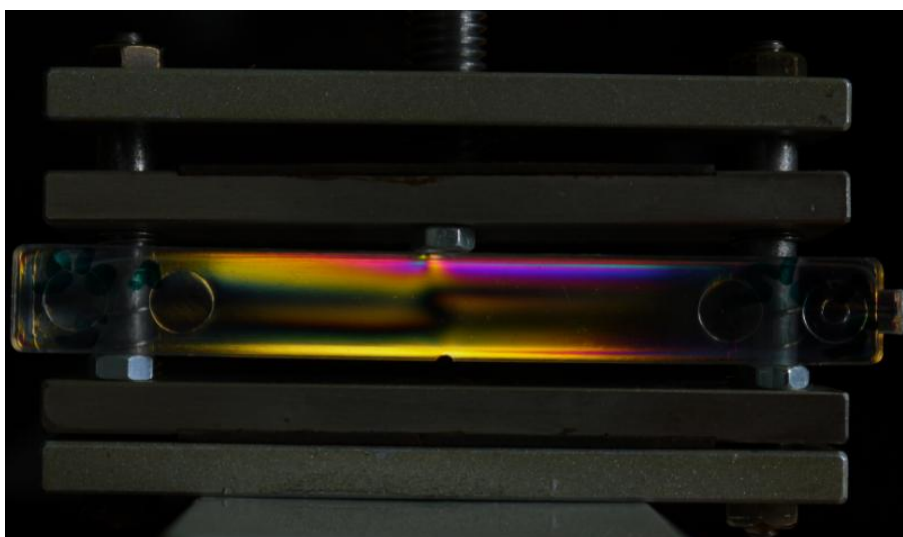
Jak již bylo zmíněno v teoretické části, slouží tato metoda k určování rozložení napětí v tělesech pomocí polarizace světla. Byly uspořádány dva experimenty pro zjištění průběhu napětí ve zkoušených vzorcích.

5.3.1 Sledování napětí v součásti při tříbodovém ohybu

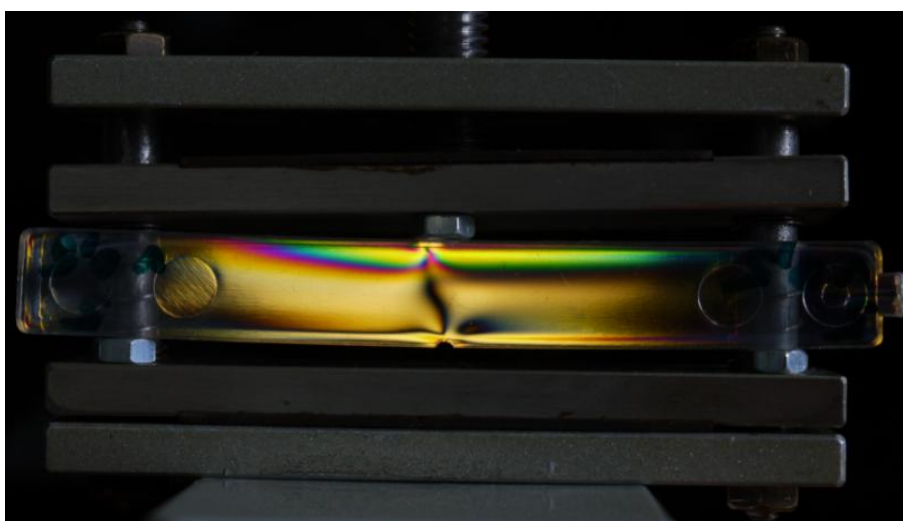
Tříbodový ohyb byl simulován jednoduchým experimentem, kde se vzorek umístil do čelistí pružinové svorky a byl podepřen na dvou místech na okrajích ve spodní části a uprostřed nad vrubem v horní části vzorku. Napětí se sledovalo na vzorcích určených pro zkoušku rázem v ohybu. Postupně jsem zvětšoval zatěžující sílu a při tom pořizoval fotoaparátem (Panasonic GF1) snímky přes polarizační filtr s kruhovou polarizací.



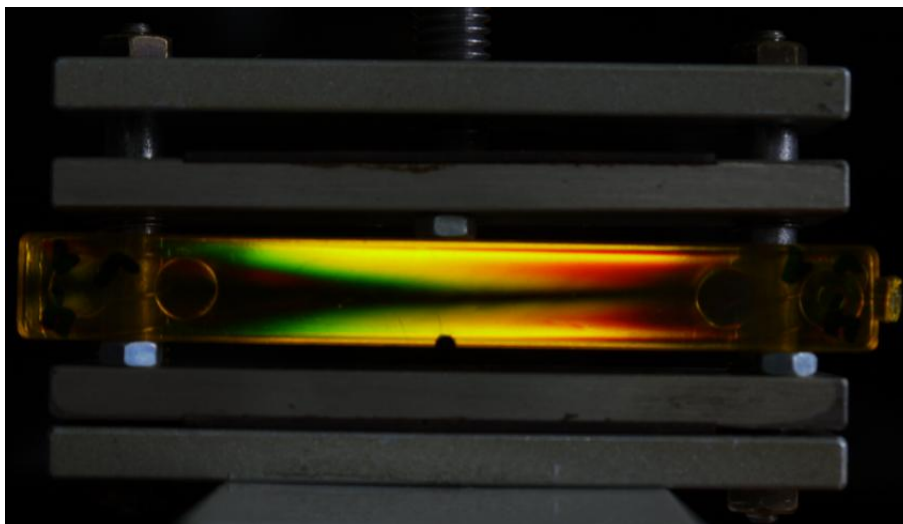
Obrázek 19: *Nezatížený transp. vzorek v polarizovaném světle*



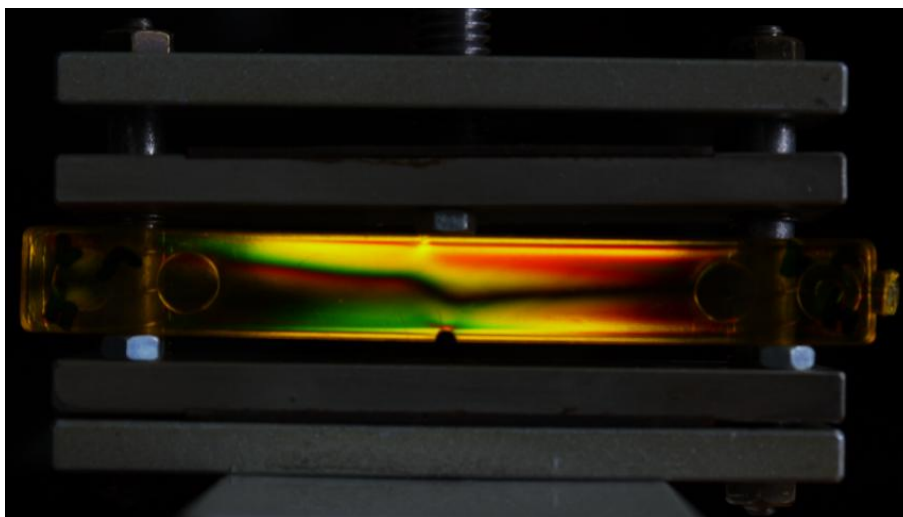
Obrázek 20: *Mírně zatížený transp. vzorek v polarizovaném světle*



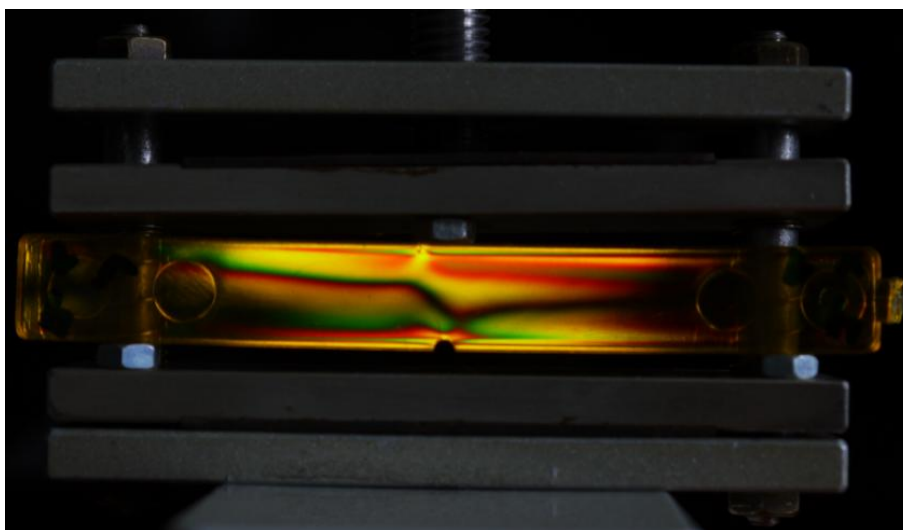
Obrázek 21: *Více zatížený transp. vzorek v polarizovaném světle*



Obrázek 22: *Nezatížený tm. žlutý vzorek v polarizovaném světle*



Obrázek 23: *Mírně zatížený tm. žlutý vzorek v polarizovaném světle*



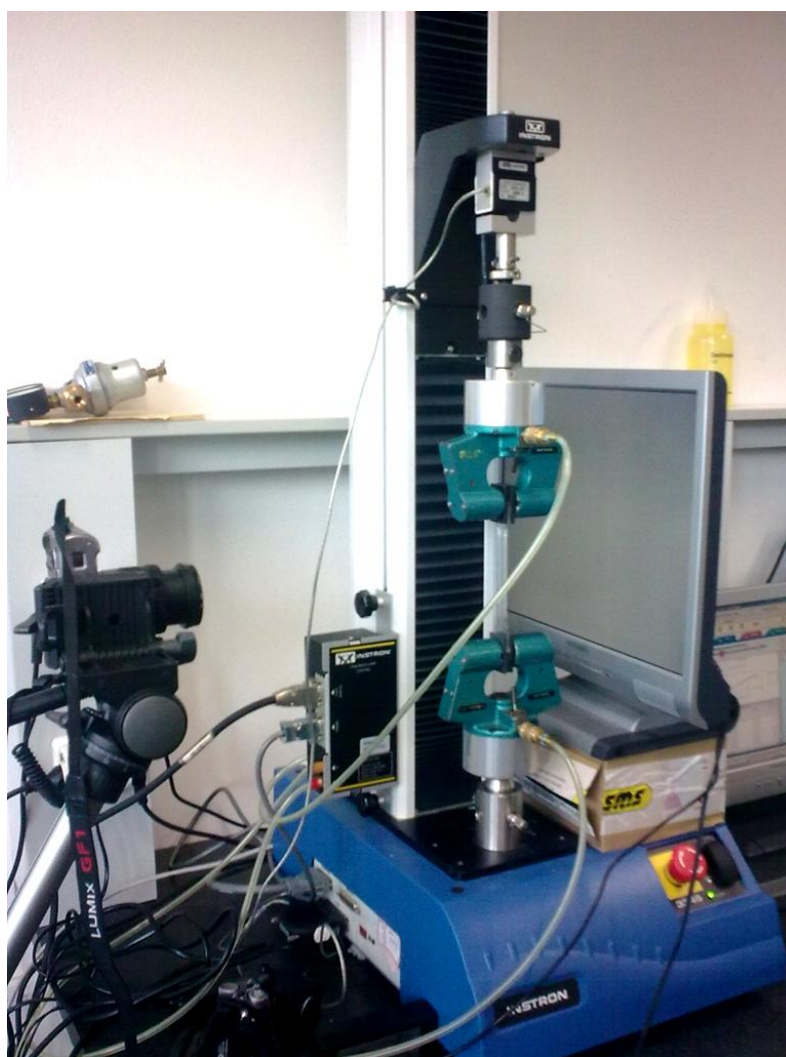
Obrázek 24: *Více zatížený tm. žlutý vzorek v polarizovaném světle*

Z obrázků je patrný posun izoklín při různých průhybech. Při vyšším průhybu se tyto tmavé čáry koncentrují a zaostřují v okolí vrubu.

5.3.2 Sledování napětí v součásti v uniaxiálním tahu

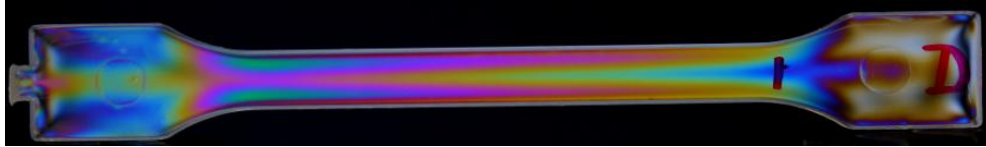
Daný experiment se prováděl opět na trhacím zařízení jako u tahové zkoušky. Během tažení se zaznamenávaly snímky průběhu napětí uvnitř vzorku.

Uspořádání bylo takové, že za vzorek upnutý v čelistech se umístil počítačový monitor jako zdroj světla a fotoaparát za použití polarizačního filtru a stativu se pořídily snímky průběhu napětí ve zkoušeném tělese.



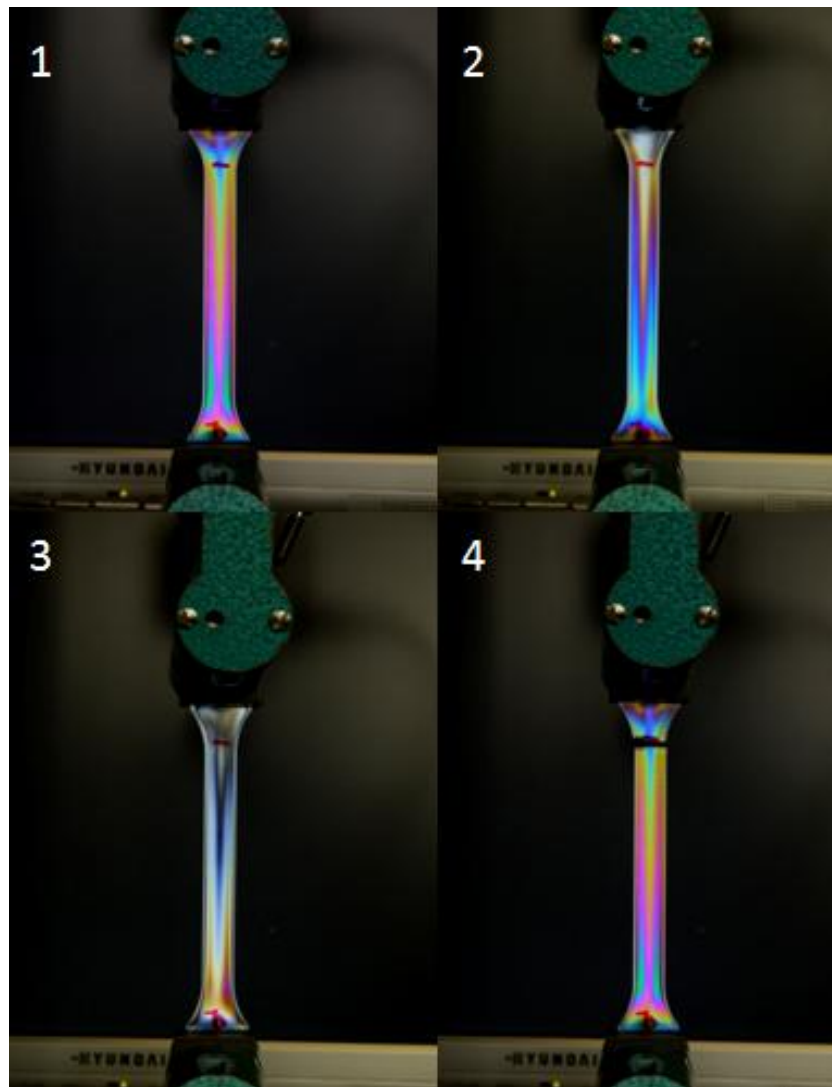
Obrázek 25: Uspořádání experimentu při sledování napětí v součásti v uniaxiálním tahu

Průběh napětí byl sledován u transparentních zkušebních těles. Z těchto vzorků byly vybrány takové, které měly odlišné rozložení vnitřního pnutí pro porovnání. Na vzorku se pak označilo místo, ve kterém mělo pravděpodobně dojít k přetržení, což se také potvrdilo.



Obrázek 26: *Predikce místa lomu u transparentního vzorku D*

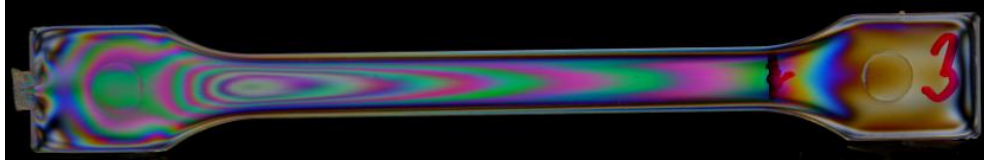
Následující obrázek je vizualizací průběhu napětí v transparentním vzorku při konstantně rostoucím zatížení 10 mm/min až do jeho porušení.



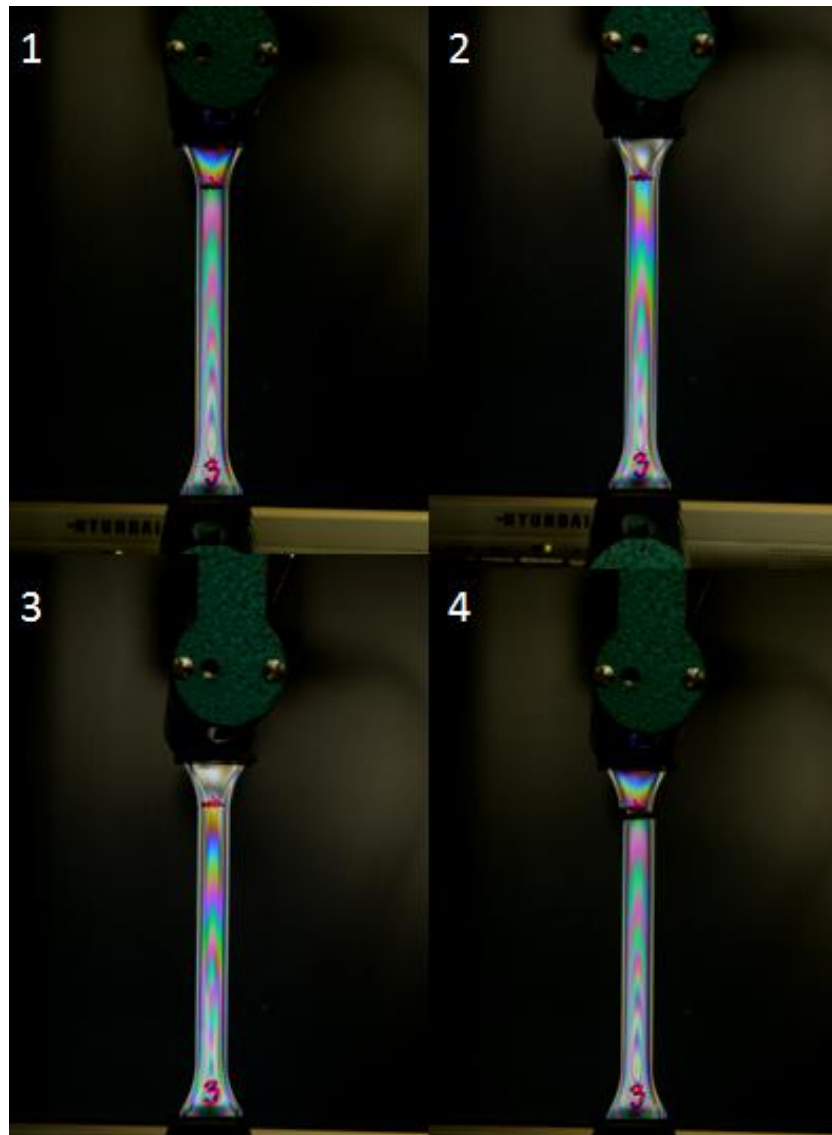
Obrázek 27: *Průběh napětí v transparentním vzorku D při tažení*

Při pohledu na obrázek je vidět, že od horní čelisti postupuje modrý „cíp“ až do místa, kde součást nakonec praskla. Podle těchto barevných čar lze odhadnout budoucí místo lomu.

Druhý transparentní vzorek měl jiné rozložení vnitřního pnutí. Opět se označilo místo, kde jsme předpokládali lom a pak se daný vzorek podrobil zkoušení stejnou rychlostí zatěžování jako u předchozího pokusu.



Obrázek 28: *Predikce místa lomu u transparentního vzorku 3*



Obrázek 29: *Průběh napětí v transparentním vzorku 3 při tažení*

ZÁVĚR

Hlavní myšlenkou této práce bylo ve stručnosti objasnit, jaké faktory ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti polymerního materiálu. Jsou zde uvedeny některé důležité parametry, které mají význam pro uplatnění těchto látek ve výrobním průmyslu.

Úvod teoretické části se zabývá základními pojmy problematiky makromolekulárních látek. Dále je věnován prostor především obecnému popisu struktury a vlastností polymerů a v jakém prostorovém uspořádání se mohou tyto látky vyskytovat. Práce uvádí také vliv molekulové hmotnosti a krystalinity na výsledné vlastnosti materiálu. Popisuje termické chování těchto materiálů kolem významné teploty skelného přechodu a v jakém stavu se nachází v oblastech, oddělených touto teplotou. Nemalý význam má podkapitola věnovaná modulu pružnosti, důležitého parametru, kterým se zabývá druhá část teorie, která je věnována samotným zkouškám mechanických vlastností. Ta je rozvržena na dvě hlavní kapitoly zkoušek destruktivních a nedestruktivních, kde jsou uvedeny nejpoužívanější metody.

Úkolem praktické části bylo stanovení tahových vlastností a rázové houževnatosti testovaného polystyrenu ve třech barevných provedeních. Během měření byla k dispozici sada polarizátorů a fotoaparát s polarizačním filtrem, s jejichž pomocí mohla současně probíhat i nedestruktivní zkouška – fotoelasticimetrie.

Vyhodnocením tahové zkoušky, byly usneseny tyto závěry. Transparentní polystyren vykazoval nejvyšší hodnotu modulu pružnosti ze všech barevných provedení, a ten vycházel $E = 2080 \pm 10$ MPa, při poměrném prodloužení $\varepsilon = 2,02 \pm 0,04$ %. U světle žlutého vzorku byl modul nižší $E = 1991 \pm 20$ MPa a $\varepsilon = 3,62 \pm 0,015$ %. Poslední, tmavě žlutý vzorek měl hodnotu modulu pružnosti nejnižší, a to $E = 1990 \pm 20$ MPa, kde poměrné prodloužení $\varepsilon = 2,8 \pm 0,5$ %.

Ke stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy byl opět polystyren, ale jen ve dvou provedeních. Tmavě žlutý měl vyšší rázovou houževnatost u vzorků bez vrubu, avšak u zkušebních těles opatřených vrubem, měl naopak vyšší hodnotu rázové houževnatosti vzorek transparentní.

Pomocí fotoelasticimetrie bylo možné sledovat vnitřní napětí ve zkušebních tělesech během zkoušení, ale také podle tvaru čar určit budoucí místo lomu, ještě před samotným zatěžováním.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: (netradiční úvod do současné materiálové vědy)*. 1. vyd. Praha: Encyklopedický dům, 1999, 228 s. ISBN 8086044130.
- [2] Technologie II. *Zpracování plastů* [online]. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní [cit.2013-05-22].
- Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [3] RYBNÍKÁŘ, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 418 s.
- [4] MLEZIVA, Josef. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Vyd. 1. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 8090157041.
- [5] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2. Praha: VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3
- [6] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [7] STOKLASA, Karel. *Makromolekulární chemie I*. Zlín: UTB, 2005, 106 s.
- [8] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [9] MILBAUER, Miloš. *Fotoelasticimetrie: a její použití v praxi*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953, 134 s.
- [10] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materialu*. Vyd. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2011, 408 s. ISBN 978-80-213-2236-3
- [11] STRÁNSKÝ, L., MOLLIKOVÁ, E., SEDLÁČEK, J. *Zkouška tahem*. Brno: VÚT, 2002, 23 s.
- [12] MÜLLER, M., PETRŽELA, Z. *Strojírenská technologie: část I.-II*. Olomoucký kraj: 2010/2011, 121 s.
- [13] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty-stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997.

[14] ČSN EN 10045–2. *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho: Část 2: Ověřování zkušebních strojů (kyvadlových kladiv)*. Praha: Český normalizační institut, 1996.

[15] VELIČKOVÁ, Eva. *Stroje a zařízení: Nauka o materialu*. Ostrava: VŠB, 2002, 52 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

\overline{M}_n	Číselně střední relativní molekulová hmotnost
\overline{M}_w	Hmotnostně střední relativní molekulová hmotnost
<i>LDPE</i>	Low density PE (nízkohustotní polyetylen)
<i>HDPE</i>	High density PE (vysokohustotní polyetylen)
T_g	Teplota skelného přechodu
T_f	Teplota tečení
T_m	Teplota tání
E	Youngův modul pružnosti
σ	Normálové napětí; tahové napětí
τ	Smykové (tečné) napětí
ε	Poměrné prodloužení
F	Síla
S	Plocha, průřez
H	Počáteční výška beranu kladiva
h	Konečná výška beranu kladiva; tloušťka vzorku
b	Šířka vzorku
W	Energie spotřebovaná k přeražení vzorku (nárazová práce)
a_{cU}	Rázová houževnatost pro zkušební tělesa bez vrubu
a_{cN}	Rázová houževnatost pro zkušební tělesa s vrubem

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: <i>Typy makromolekulárních řetězců [5]</i>	14
Obrázek 2: <i>Typy kopolymerů se dvěma typy monomerních jednotek [5]</i>	15
Obrázek 3: <i>Zákrytová a vykloněná konformace [5]</i>	16
Obrázek 4: <i>Schéma konformace polyethylenového řetězce [5]</i>	17
Obrázek 5: <i>Schéma závislosti potenciální energie na úhlu rotace u polyethylenového řetězce [5]</i>	17
Obrázek 6: <i>Měrná hmotnost a obsah krystalické fáze u dvou typů polyethylenu [5]</i>	18
Obrázek 7: <i>Závislost specifického objemu na teplotě u amorfního polymeru a dosažení teploty skelného přechodu při rychlém (a) a pomalém (b) ochlazování vzorku [5]</i>	20
Obrázek 8: <i>Závislost specifického objemu na teplotě u zcela amorfního (a), částečně krystalického (b) a hypoteticky 100 % krystalického (c) materiálu [5]</i>	22
Obrázek 9: <i>Závislost modulu pružnosti na teplotě u částečně krystalického polymeru [5]</i>	23
Obrázek 10: <i>Rovnováha sil v pravoúhlém elementu [9]</i>	23
Obrázek 11: <i>Křivky závislosti napětí na poměrném prodloužení pro křehké materiály (a), houževnaté materiály s mezí kluzu (b), (c) a houževnaté materiály bez meze kluzu (d) [13]</i>	26
Obrázek 12: <i>Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [3]</i>	27
Obrázek 13: <i>Schéma trhacího zařízení [12]</i>	28
Obrázek 14: <i>Schéma Charpyho kladiva [14]</i>	32
Obrázek 15: <i>Přetržený a původní transparentní vzorek PS v polarizovaném světle</i>	40
Obrázek 16: <i>Přetržený a původní světle žlutý vzorek PS v polarizovaném světle</i>	42
Obrázek 17: <i>Přetržený a původní tmavě žlutý vzorek PS v polarizovaném světle</i>	43
Obrázek 18: <i>Vrubovací zařízení INSTRON Notchvis</i>	44
Obrázek 19: <i>Nezatížený transp. vzorek v polarizovaném světle</i>	49
Obrázek 20: <i>Mírně zatížený transp. vzorek v polarizovaném světle</i>	49
Obrázek 21: <i>Více zatížený transp. vzorek v polarizovaném světle</i>	49
Obrázek 22: <i>Nezatížený tm. žlutý vzorek v polarizovaném světle</i>	50
Obrázek 23: <i>Mírně zatížený tm. žlutý vzorek v polarizovaném světle</i>	50
Obrázek 24: <i>Více zatížený tm. žlutý vzorek v polarizovaném světle</i>	50

Obrázek 25: <i>Uspořádání experimentu při sledování napětí v součásti v uniaxiálním tahu</i>	51
Obrázek 26: <i>Predikce místa lomu u transparentního vzorku D</i>	52
Obrázek 27: <i>Průběh napětí v transparentním vzorku D při tažení</i>	52
Obrázek 28: <i>Predikce místa lomu u transparentního vzorku 3</i>	53
Obrázek 29: <i>Průběh napětí v transparentním vzorku 3 při tažení</i>	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: <i>Naměřené hodnoty pro transparentní PS.....</i>	39
Tabulka 2: <i>Naměřené hodnoty pro světle žlutý PS.....</i>	40
Tabulka 3: <i>Naměřené hodnoty pro tmavě žlutý PS.....</i>	42
Tabulka 4: <i>Výsledky měření pro transparentní vzorek bez vrubu.....</i>	45
Tabulka 5: <i>Výsledky měření pro tmavě žlutý vzorek bez vrubu.....</i>	45
Tabulka 6: <i>Výsledky měření pro transparentní vzorek s vrubem.....</i>	46
Tabulka 7: <i>Výsledky měření pro tmavě žlutý vzorek s vrubem.....</i>	47

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: <i>Závislost zatížení – protažení u transparentních vzorků PS</i>	39
Graf 2: <i>Závislost tahové napětí – poměrné prodloužení u transparentních vzorků PS</i>	40
Graf 3: <i>Závislost zatížení – protažení u světle žlutých vzorků PS.....</i>	41
Graf 4: <i>Závislost tahové napětí – poměrné prodloužení u světle žlutých vzorků PS</i>	41
Graf 5: <i>Závislost zatížení – protažení u tmavě žlutých vzorků PS</i>	42
Graf 6: <i>Závislost tahové napětí – poměrné prodloužení u tmavě žlutých vzorků PS.....</i>	43
Graf 7: <i>Závislost rázové houževnatosti na hloubce vrubu</i>	48