

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní  
Obor 23 - 07 - 8

STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

zaměření

tváření kovů a plastických hmot

katedra tváření a plastů

VÝZKUM CHOVÁNÍ POLYSTYRÉNU V OBLASTI

TEPLOTY ZESKELNĚNÍ

KTP - 107

Jméno : Jaroslav MAZURA

Vedoucí práce : ing. Josef KREBS, CSc., VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh :

Počet stran	: 60
Počet příloh a tabulek	: 6
Počet obrázků	: 23
Počet výkresů	: -
Počet modelů nebo jiných příloh	: -

21.5.1984

Vysoká škola: strojní a textilní      Fakulta: strojní  
Katedra: tváření a plastů      Školní rok: 1983/84

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Jaroslava Mazuru  
obor strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Výzkum chování polystyrénu v oblasti  
teploty zaskelnění

### Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte vliv teploty na mechanické a optické vlastnosti polystyrénu.
2. Prostudujte princip polarizačně optické metody a jejího použití při hodnocení vnitřního stavu těles z polystyrénu.
3. Navrhněte experimentální postup umožňující stanovit modul pružnosti a konstantu optické citlivosti zkoumaného plastu, zejména v oblasti teploty zesklenní.
4. Proveďte měření a zhodnoťte dosažené výsledky.

Autorské právo se řídí směrnicemi  
MŠK pro státní záv. zkoušky č. j. 31  
727/62 III/2 ze dne 13. července  
1962 - Věstník MŠK XVII, sešit 24 ze  
dne 31. 8. 1962 § 19 out. z. č. 115/53 Sb.

V 178/84 S  
VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8  
PŠČ 461 17

KPT/TP

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy:

40 - 50 stran textu včetně obrázků  
a tabulek

Seznam odborné literatury:

1. Milbauer, M. - Perla, M. : Fotoelasticimetrické přístroje a měřicí metody. SNTL, Praha, 1959
2. Schill, F. a kol. : Chlazení skla a kontrola pnutí. SNTL, PRAHA, 1968
3. Krebs, J. : Teorie a technologie zpracování plastů. Skripta, VŠST, Liberec, 1981

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Josef Krebs, CSc.

Datum zadání diplomové práce:

3. 10. 1983

Termín odevzdání diplomové práce:

25. 5. 1984



Doc. Ing. Jaroslav Imeš, CSc.

Vedoucí katedry

Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc.

Děkan

V Liberci dne 22. 9. 1983

" Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci  
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury."

V Liberci, dne 21.5.1984

J. K. S. U. K. A.

## OBSAH

1. ÚVOD	5
2. TEORETICKÁ ČÁST	7 - 32
2.1 Závislost mechanických vlastností na teplotě	7 - 16
2.1.1 Fyzikální charakteristika mechanického chování plastů	7
2.1.2 Vliv teploty na mechanické chování plastů	11
2.1.3 Závislost modulu pružnosti polystyrénu na teplotě	13
2.1.4 Měření modulu pružnosti	15
2.2 Polarizačně optická metoda a její využití při zkoumání vnitřního stavu těles z polystyrénu	17 - 32
2.2.1 Charakteristika optických vlastností amorfních polymerů	17
2.2.2 Základní použité pojmy z teorie světla	18
2.2.3 Dočasný dvojlom makromolekulárních látek	23
2.2.4 Princip polarizačně optické metody	26
2.2.5 Fotoelasticimetrické přístroje	27
2.2.6 Výpočet konstanty optické citlivosti	29
2.2.7 Využití polarizačně optické metody při zkoumání vnitřního stavu těles z polystyrénu	31
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33 - 56
3.1 Měření závislosti modulu pružnosti materiálu Krasten 127 na teplotě	33 - 45
3.1.1 Cíl a význam měření	33
3.1.2 Podstata a podmínky měření	33
3.1.3 Zkušební vzorky	34
3.1.4 Zkušební zařízení	37
3.1.5 Postup měření	39
3.1.6 Vyhodnocení měření	40

3.1.7 Výsledky měření	41
3.2 Měření závislosti konstanty optické citlivosti na teplotě	46 - 55
3.2.1 Cíl a význam měření	46
3.2.2 Podstata a podmínky měření	46
3.2.3 Zkušební vzorky	47
3.2.4 Měřicí zařízení	47
3.2.5 Postup měření	47
3.2.6 Vyhodnocení měření	49
3.2.7 Výsledky měření	50
3.3 Problémy při měření	56 - 57
4. ZÁVĚR	58
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60

## Seznam použitých zkratek a symbolů

- $\alpha$  - úhel dopadu  
 $\beta$  - úhel lomu  
 $\gamma$  - zkos  
 $\Delta$  - dráhový rozdíl  
 $\mu$  - Poissonovo číslo  
 $\epsilon$  - poměrná deformace  
 $\eta$  - délka dráhy světla vzorkem  
 $\sigma$  - normální napětí  
 $\eta$  - dynamická viskozita  
 $\lambda$  - vlnová délka světla  
 $\tau$  - smykové napětí  
D - dvojlom  
E - Youngův modul pružnosti  
F - síla, zatížení  
G - modul pružnosti ve smyku  
I - moment setrvačnosti průřezu  
K - konstanta optické citlivosti  
 $M_0$  - ohybový moment  
T - teplota  
 $W_0$  - modul průřezu v ohybu  
b - šířka průřezu  
h - tloušťka průřezu  
l - vzdálenost podpor  
n - index lomu  
y - průhyb  
 $y_e$  - amplituda elektrické vlny světla  
 $y_m$  - amplituda magnetické vlny světla

## 1. ÚVOD

Současné období rozvoje světového hospodářství je označováno jako období vědeckotechnické revoluce, která sebou přináší rozsáhlé a mnohdy zásadní přeměny v životě a činnostech člověka. Nynější etapa vědeckotechnické revoluce je etapou prudkého rozvoje především v oblasti technologií výroby a využití nových pracovních předmětů tedy surovin a materiálů. Tato orientace je zapříčiněna skutečností, že současná průmyslová činnost lidské společnosti naráží na řadu nových dosud nepoznaných překážek. Jednou z nejzávažnějších se za současného stavu jeví problematika zmenšujících se zdrojů tradičních surovin jako je železná ruda, ropa, zemní plyn ... Na jedné straně se v souvislosti s tímto problémem řeší otázky bezodpadových technologií a na druhé straně se vytvářejí projekty technologií výroby nových materiálů z netradičních nebo netradičně získávaných surovin.

Těmito skutečnostmi je stále více ovlivňováno i využití plastů ve všech oblastech činností a života člověka. Po počátečním bouřlivém rozvoji a rozšiřování, použití výrobků z plastů se v současnosti projevují určité tendence přehodnocovat technologie jejich zpracování. Toto přehodnocování se však tolik nedotýká vyráběného objemu výrobků z plastů, kdy světová produkce těchto výrobků rok od roku roste v souvislosti s jejich stále širším uplatněním, jako spíše dokonalejšího a hospodárnějšího využití základní suroviny. Uvedený proces se děje cestou propracování primárních technologií výroby polotovarů s cílem maximálního zhodnocení výchozí suroviny nebo cestou dokonalého poznání závislostí a zákonitostí zpracování těchto polotovarů na finální výrobky, za předpokladu snížení především energetické náročnosti procesu.



Tato diplomová práce napomáhá realizaci druhé z výše uvedených cest rozvoje. Týká se totiž studia mechanických a optických vlastností polystyrénu v závislosti na teplotě. Tyto závislosti patří do komplexu ukazatelů dávajících obraz o vnitřním stavu a struktuře výrobků, jejich poznání limituje použití výrobků v praxi a podává obraz o vhodnosti použitého materiálu popřípadě parametrů výroby.

Celá práce je rozčleněna do dvou základních částí, teoretické a experimentální. V teoretické části jsou v její první kapitole popsány charakteristiky a mechanismy, chování plastů při mechanickém namáhání a závislost tohoto chování na teplotě. Ve druhé kapitole jsou uvedeny zákonitosti optických vlastností plastů při zatížení též v závislosti na teplotě. Celá část byla zpracována na základě studia uvedené literatury. V experimentální části jsou popsány metody a zařízení jejichž prostřednictvím lze stanovit výše uvedené závislosti. Tato část byla zpracována především na základě literatury /3/, ČSN 64 0614 a za použití vlastních poznatků při provádění měření. V poslední kapitole této části jsou uvedeny hlavní problémy, které se při přípravě a provádění měření vyskytly a je zde uveden i návrh na jejich odstranění.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Závislost mechanických vlastností na teplotě

#### 2.1.1 Fyzikální charakteristika mechanického chování plastů/4,5/

Mechanické vlastnosti makromolekulárních látek jsou v první řadě závislé na jejich chemické struktuře, ve druhé řadě na jejich vnitrofázové struktuře. Chemická struktura podmiňuje mechanickou charakteristiku tj. určuje mezní hodnoty mechanických veličin, vnitrofázová struktura pak posouvá tyto hodnoty tím nebo oním směrem. Například krystalické oblasti mají vyšší modul pružnosti, pevnosti atd. než oblasti amorfni.

Při volbě a použití materiálu v konstrukční praxi jsou rozhodující jeho deformační vlastnosti, které vyjadřují odolnost proti změnám tvaru nebo objemu působením vnějších sil. Za mezní případy jsou považována ideálně elastická tělesa a ideálně viskózní kapaliny.

Deformace ideálně elastických těles je definována Hookeovým zákonem, který říká, že pro izotropní těleso jsou složky tenzoru napětí úměrné složkám tenzoru deformace.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z) \}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \mu (\sigma_z + \sigma_x) \}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \mu (\sigma_y + \sigma_x) \}$$

$$\gamma = \frac{1}{G} \tau$$

Chování izotropního ideálně elastického - hookeovského tělesa - je tedy charakterizováno dvěma konstantami, Youngovým modulem pružnosti  $E$  a Poissonovým poměrem  $\mu$ . Třetí konstanta, modul pružnosti  $G$  smyku, je pak definován vztahem

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

Charakteristickým znakem ideálně elastického tělesa je, že deformace se ustaví okamžitě, jakmile začne působit vnější napětí, po jeho zrušení se těleso vrací ihned přesně do tvaru před deformací.

Chování ideálně viskózní kapaliny vyjadřuje Newtonův viskózní zákon - složky napětí jsou úměrné složkám rychlosti deformace (platí pro nestlačitelnou kapalinu).

$$\sigma_x = 2\eta \dot{\epsilon}_x$$

$$\sigma_y = 2\eta \dot{\epsilon}_y$$

$$\sigma_z = 2\eta \dot{\epsilon}_z$$

$$\tau_{xy} = \eta \dot{\gamma}_{xy}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

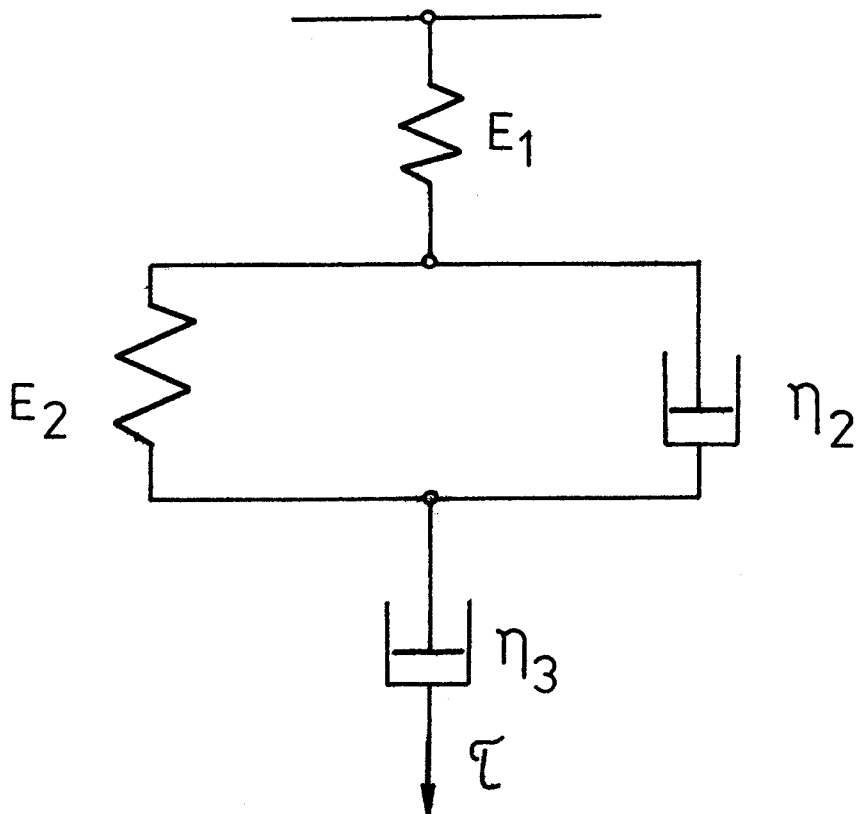
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

Ideálně viskózní kapaliny popisuje tedy jediná materiálová konstanta - dynamická viskozita  $\eta$ . Charakteristickým znakem ideálně viskózní kapaliny je, že při posuvu vnější síly dochází k posuvu jednotlivých vrstev kapaliny bez ustavení rovnováhy, jakmile napětí přestane působit, nevracejí se vrstvy do výchozí polohy a deformovaný stav zůstává zachován, deformace je dokonale nevratná.

Na působení vnějšího namáhání reagují plasty tak, že jejich chování vykazuje současně složku elastickou tak i viskózní a jejich celková deformace závisí nejen na velikosti působící

cího napětí, ale i na době jeho působení. Plasty proto zařazujeme mezi materiály viskózně elastické a jejich deformační chování označujeme jako viskoelastické. Toto chování lze z kvalitativního pohledu znázornit Tucketovým modelem na obr.1/5/

- elastická deformace je znázorněna pružinou
- viskózní deformace je znázorněna válcem s kapalinou o viskózitě  $\eta$ , do něhož zasahuje netěsný píst



obr. 1 - Znázornění deformace viskoelastického tělesa

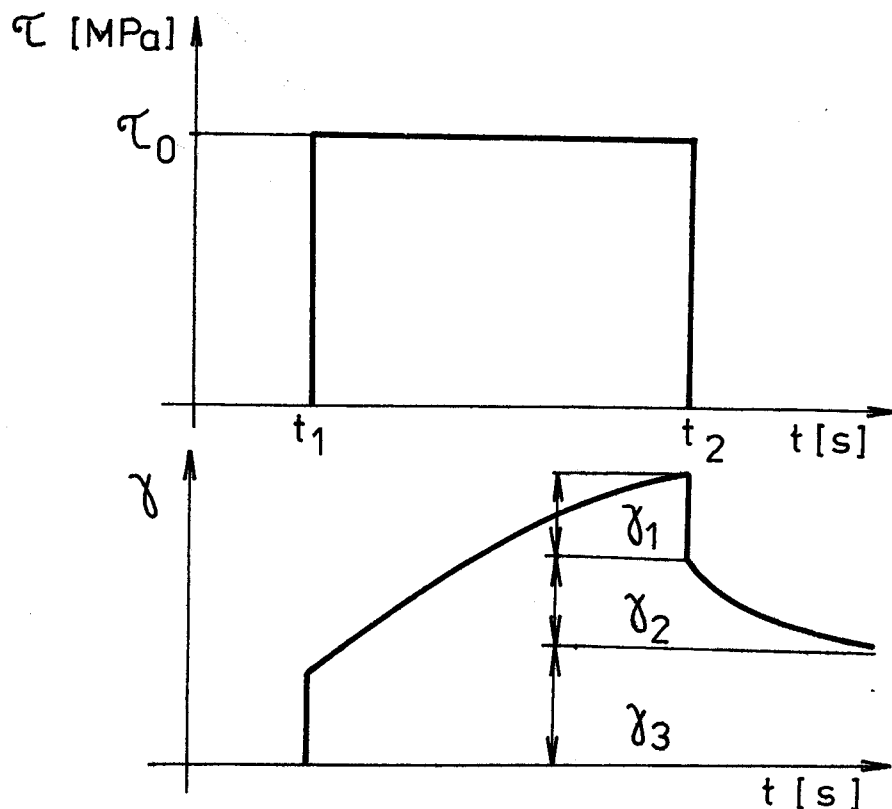
Model je tvořen třemi členy:

1. člen představuje ideálně elastickou deformaci
2. člen představuje zpožděně elastickou deformaci
3. člen představuje plastickou deformaci

Celková deformace je pak dána vztahem / 2.1.1.1 /

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \quad / 2.1.1.1 /$$

Deformace  $\gamma_1, \gamma_2$  jsou vratné,  $\gamma_3$  je nevratná a má trvalý charakter ; deformace  $\gamma_2, \gamma_3$  jsou funkcí času.



obr.2-Závislost deformace na napětí a čase jeho působení

Po zapůsobení napětí  $\tau_0$  v čase  $t_1$  se okamžitě objeví pružná deformace  $\gamma_1$ , při dalším působení napětí narůstá s časem deformace druhého a třetího členu  $\gamma_2$  a  $\gamma_3$ , po zrušení napětí v čase  $t_2$  ihned zmizí deformace  $\gamma_1$  a po určité době i deformace  $\gamma_2$  zůstane pouze deformace členu 3  $\gamma_3$ .

Viskoelastické chování plastů je charakterizováno těmito znaky: 1. deformace je funkcí nejen napětí, ale i času a je vratná jen částečně

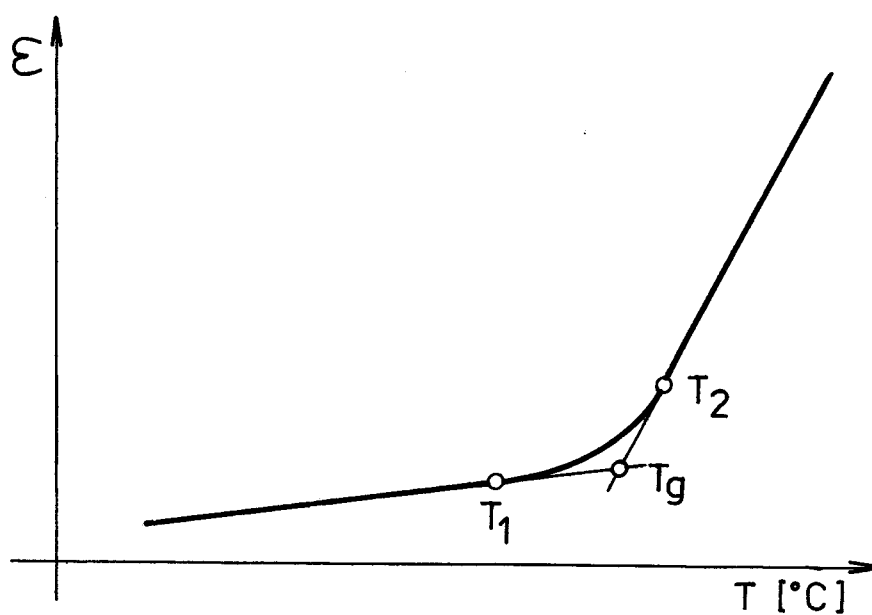
2. práce potřebná na deformaci se zčásti ukládá jako potenciální energie a zčásti se ztrácí ve formě tepla

3. poměr mezi napětím a deformací není materiálovou konstantou, ale je vždy funkcí času

4. deformace tělesa je brzděna vnitřními viskózními odpory ve hmotě a proto se nemůže realizovat okamžitě

### 2.1.2 Vliv teploty na mechanické chování plastů /2,4/

Mechanické vlastnosti plastů jsou ve větší či menší míře závislé na teplotě. V určitém intervalu teplot však tato změna mechanických vlastností probíhá větším tempem někdy dokonce skokem, tyto teploty jsou označovány jako přechodové, kdy hmota přechází z jednoho stavu do druhého. Obecně lze označit dva intervaly těchto přechodových teplot bod zvratu II. řádu a bod zvratu I. řádu. U polystyrénu jako zástupci amorfních plastů je z hlediska studia mechanických vlastností na teplotě významné jeho chování při přechodu přes teplotu bodu zvratu II. řádu, která je označována jako teplota zeskelnění -  $T_g$ . Při této teplotě přechází polystyrén ze stavu sklovitého do stavu kaučukovitě elastického, kdy změna stavu také výrazně poznamenává jeho mechanické vlastnosti, obraz o jejich průběhu dává závislost deformace na teplotě.

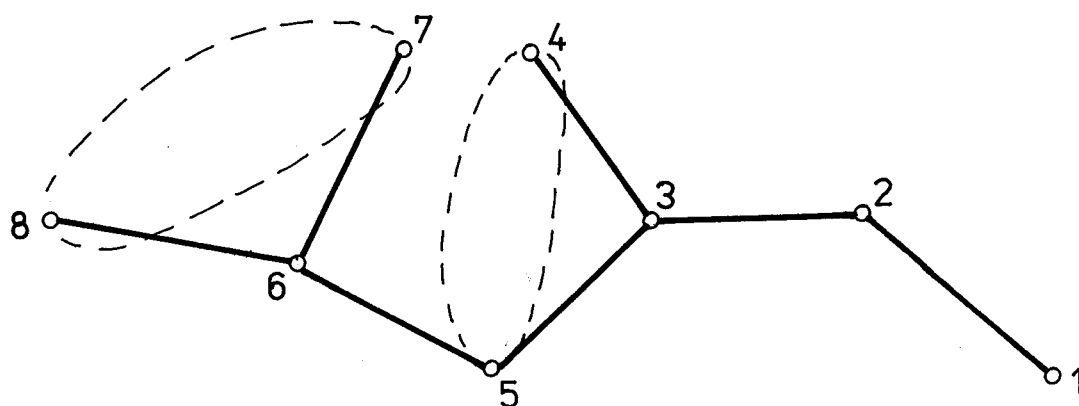


obr. 3- Závislost deformace na teplotě

Diagram vystihuje jednotlivé typy chování amorfních plastů při konstantním zatížení bez uvažování časových vlivů. Původní lineární průběh charakteristický pro pružnou deformaci přechází při teplotě  $T_1$  v nelineární, charakteristický pro viskoelastickou deformaci, později při vyšší teplotě  $T_2$  přechází závislost opět v lineární odpovídající plastické deformaci.

Interval teplot  $T_1 T_2$  se nazývá přechodovou oblastí. Průsečík prodloužení lineárních větví diagramu promítnutý na vodorovnou osu udává bod zvratu II. řádu - teplotu zeskelnění  $T_g$ .

Všechny tři deformace lze z makromolekulárního hlediska charakterizovat změnou stupňů volnosti makromolekul, které mohou vykonávat pohyby, jejichž velikost závisí na teplotě. Pod bodem  $T_1$  nemají makromolekuly možnost volného pohybu, neboť jsou fixovány v plné míře intermolekulárními a intramolekulárními silami. Jestliže při těchto teplotách makromolekulární hmotu zatížíme, vyvolané deformace bude sestávat především z deformace pružné, kdy se nemění konformace molekul, tyto mění pouze vzdálenosti mezi sebou. Proces se děje formou změny volné energie hmoty, dochází k napřimování jednotlivých chemických skupin a následkem toho ke změně úhlů, které jednotlivé skupiny mezi sebou svírají (valenční úhly). V přechodové oblasti vlivem vyšší teploty dochází k rozkmitání kratších molekulárních úseků - segmentů, tím se zvýší možnost pohybu makromolekul a segmenty vykonávají rotační pohyb dle fixovaných poloh dle obr.4, jsou zde částečně narušeny intermolekulární síly. Při zatížení v tomto intervalu teplot je pro výslednou deformaci určující deformace viskoelastická, rozhodující význam pro její uskutečnění má mikrobrownovský pohyb, kdy segmenty pod vlivem



obr.4 - Rotace segmentů molekul kolem fixovaných poloh

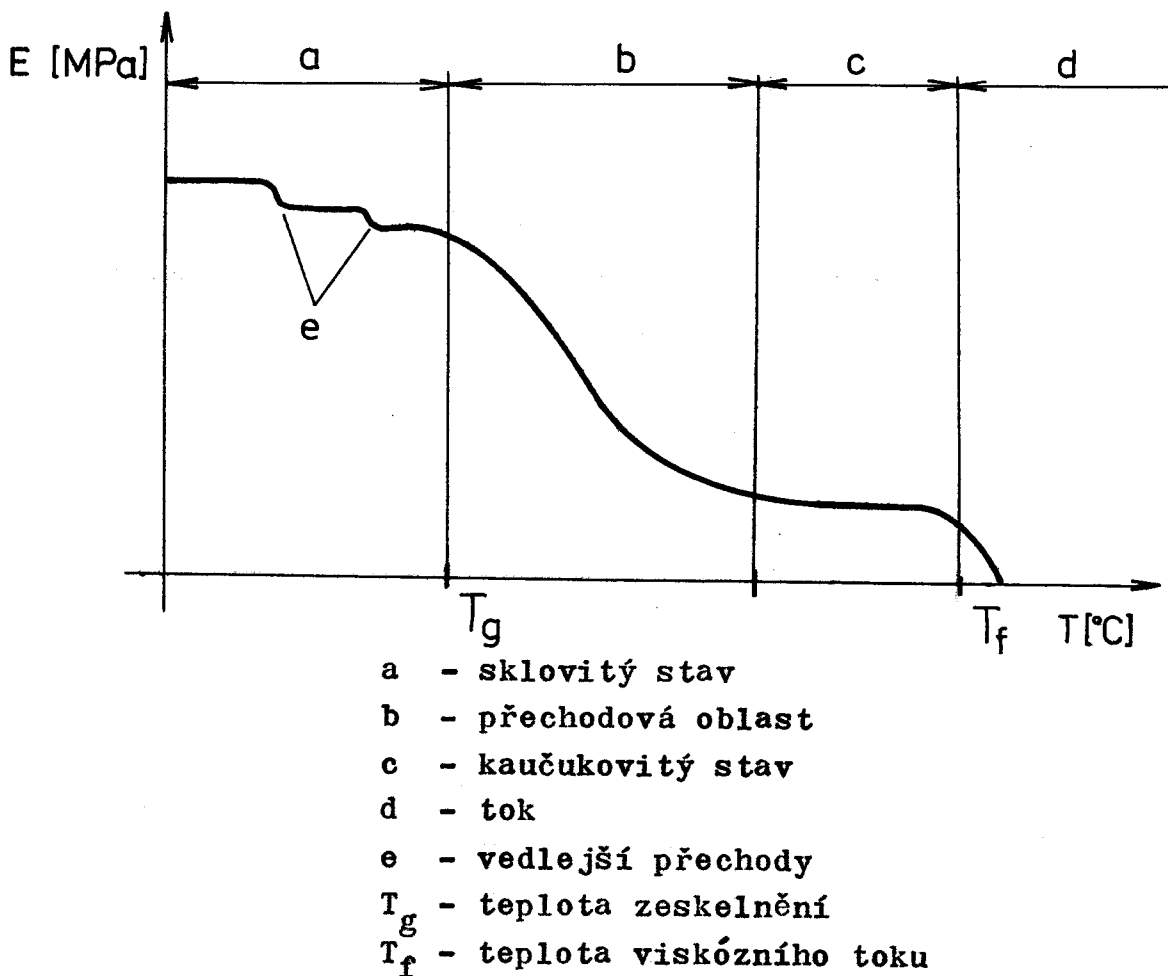
deformující síly mění své polohy, avšak k posuvům ještě nedochází. V bodě  $T_g$  jsou plně uvolněny rotační stavy, nad bodem  $T_2$  jsou vazebné síly mezi makromolekulami zrušeny a ty vykonávají značné pohyby. Při zatížení za těchto teplot je pro mechanické chování charakteristická plastická deformace, které snáze podléhají dlouhé makromolekuly. Pro její uskutečnění je důležitý makrobrownovský pohyb, kdy se mění konformace molekul a jejich vzájemná poloha.

### 2.1.3 Závislost modulu pružnosti polystyrénu na teplotě /4,5/

Modul pružnosti je jednou z materiálových charakteristik, jeho velikost a změny jsou dány strukturou, změnami a mechanismy změn této struktury materiálu. U lineárních amorfních polymerů, mezi které řadíme i polystyrén, je průběh ovlivňován především v intervalu přechodové oblasti, ve které dochází ke kvantitativním a kvalitativním změnám mechanických vlastností. Při charakterizování průběhu závislosti na obr.5 byl vyloučen

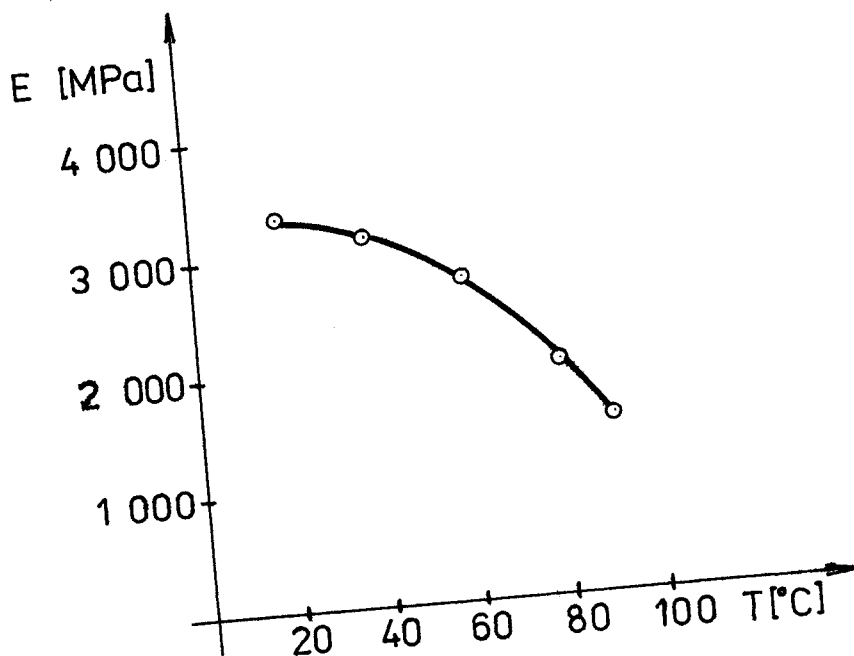


vliv času.



obr.5 - Závislost modulu pružnosti na teplotě

V oblasti sklovitého stavu je modul pružnosti s rostoucí teplotou téměř konstantní. Dochází zde pouze k vedlejším přechodům, ve kterých se uvolňují rotační pohyby menších snadno přemístitelných skupin atomů, tyto přechody mají na velikost modulu pružnosti nepodstatný vliv. S rostoucí teplotou se začíná uplatňovat viskoelastická povaha polymerů, v přechodové oblasti poklesne jeho hodnota až o tři řády. V oblasti kaučukovitého stavu má hodnotu konstantní do teploty odpovídající teplotě viskózního toku, nad touto teplotou jeho hodnota klesá na nulu. Na obr.6 je uvedena závislost modulu pružnosti polystyrénu na teplotě dle /4/.



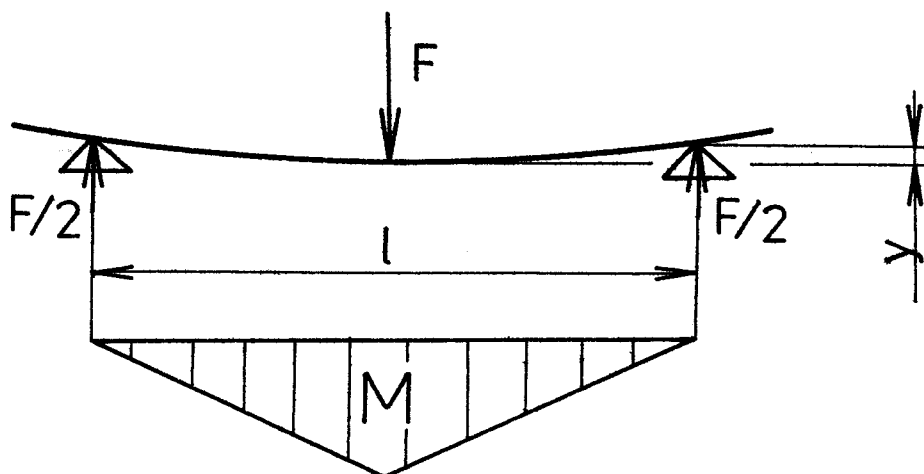
obr.6 - Závislost modulu pružnosti polystyrénu na teplotě

#### 2.1.4 Měření modulu pružnosti

Metodika měření je obsažena v ČSN 64 0614 - Stanovení modulu pružnosti ze zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Norma předepisuje způsoby měření modulu pružnosti v tahu a v tlaku, při jeho zjišťování zkouškou tahem, tlakem a ohybem na standardních tělesech za předepsaných podmínek. Zkušební tělesa jsou zatěžována v oblasti, v níž vykazují lineární závislost deformace na zatížení. Z hlediska požadavku získat závislost modulu pružnosti na teplotě jsme v diplomové práci zvolili jako zkušební metodu zkoušku ohybem, která svou povahou poměrně snadno umožňuje uspořádat měření při různých teplotách.

Při stanovení modulu pružnosti zkouškou ohybem jsou zjišťovány vzájemně si odpovídající hodnoty průhybu zkušebního tělesa a zatížení.

- zkušební tělesa:  $( 130 \pm 2 ) \times ( 10 \pm 0,5 ) \times ( 4 \pm 0,2 )$  mm  
kolísání průřezu tělesa nesmí v žádném místě překročit 2 %.



obr. 7 - Schéma zkoušky ohybem

Před vlastní zkouškou nejprve proměříme tloušťku  $h$  a šířku  $b$  zkušebního tělesa nejméně na pěti místech měřené délky s přesností  $0,01\text{mm}$  a z naměřených hodnot vypočteme aritmetický průměr, který použijeme při vyhodnocení. Zkušební těleso se zatěžuje tlačným trnem v polovině vzdálenosti  $l$  mezi oběma podporami, průhyb je měřen v půlícím bodě vzdálenosti mezi oběma podporami. V tomto případě lze velikost průhybu odečíst z údajů o posuvu pohyblivé části zatěžovacího mechanismu.

Výpočet a vyjádření výsledků: jako výsledek se získávají hodnoty dvojice veličin zatížení  $F$  a jím vyvolaného průhybu  $y$ , z přímkové části závislosti těchto dvou parametrů se zvolí přírůstek síly  $\Delta F$  a odečte jemu odpovídající přírůstek průhybu  $\Delta y$ . Modul pružnosti ze zkoušky ohybem je definován ze vztahu pro průhyb zkušebního tělesa ( nosníku ) na dvou podporách zatíženého ohybovým momentem, silou působící uprostřed vzdálenosti mezi podporami. Vztah / 2.1.4.1 / je odvozen za předpokladu zachování rovinnosti průřezu, platnosti Hookeova

zákona a zanedbání vlivu posouvajících sil.

$$E = \frac{F \cdot l^3}{I \cdot y \cdot 48} = \frac{l^3}{I \cdot 48} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad / 2.1.4.1 /$$

kde moment setrvačnosti  $I = \frac{b \cdot h^3}{12} / 2.1.4.2 /$

## 2.2 Polarizačně optická metoda a její využití při zkoumání vnitřního stavu těles z polystyrénu

### 2.2.1 Charakteristika optických vlastností amorfních polymerů/4/

Optické vlastnosti amorfních polymerů jsou určeny jejich charakteristickou vnitřní strukturou a při praktickém použití hrají ve spojení s příznivými vlastnostmi mechanickými významnou roli.

Čisté amorfní plasty bez příměsí ( plniv, pigmentů ) jsou čiré a průhledné, nažloutlá barva některých je způsobena buď stopami nečistot, jejichž přimísení při výrobě se nelze vyhnout, nebo vzniká rozkladným účinkem kyslíku obsaženého ve vzduchu a ultrafialových paprsků slunečního záření. Index lomu se pohybuje dle typu plastů od hodnoty 1,49 do 1,6, jeho velikost je téměř nezávislá na vlnové délce světla. Významnou charakteristikou optických vlastností je propustnost světla a její závislost na vlnové délce procházejícího světla. V amorfních plastech určitých optických vlastností lze působením vnějších sil vyvolat dvojlom, který se projeví rozkladem procházejícího polarizovaného paprsku na dvě složky. Dvojlom je pak charakterizován určitým dráhovým rozdílem těchto dvou složek, jev lze využít při zkoumání povahy a velikosti napětí dráhový rozdíl způsobující. Významnou konstantou podávající obraz o chování různých druhů amorfních plastů při vyvolání dvojlomu je konstanta optické citlivosti, jejím prostřednictvím lze tuto schopnost

vzájemně porovnávat.

Polystyrén svými optickými vlastnostmi plně odpovídá zařazení mezi amorfni plasty, je bezbarvý, čirý, a propustnost světla je udávána 88 až 92%, index lomu je 1,59.

### 2.2.2 Základní použité pojmy z teorie světla /1/

Prvé teorie vykládající vznik a podstatu světla byly vytvořeny v 17. století - Huygensova vlnová teorie pokládala světlo za podélné vlnění velmi řídkého prostředí

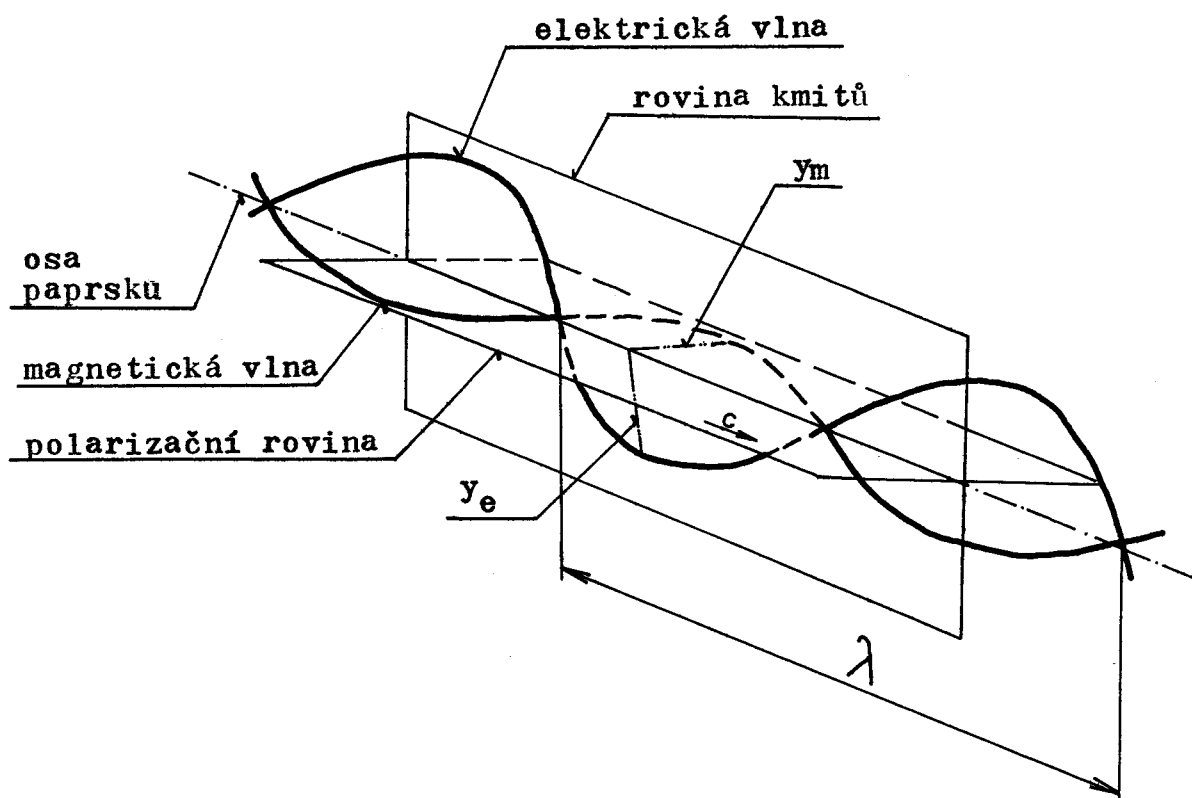
- Newtonova emanační teorie předpokládá, že světlo je složeno z rychle letících částic vysílaných světelným zdrojem

V 19. století nezávisle na optice úvahami o elektromagnetickém poli došel J.C. Maxwell k závěru, že světlo je způsobeno velmi krátkými elektromagnetickými vlnami. Touto teorií se dají vysvětlit všechny jevy týkající se šíření světla, ale selhává při výkladu jeho absorpce. Pro moderní fyziku bylo zjištěno, že světlo má další zvláštní vlastnosti, při jejichž objasňování se ukázaly předchozí teorie nevyhovující. M. Planck roku 1900 vytvořil novou teorii - teorii kvantovou, která říká, že světlo může být pohlcováno nebo vyzařováno jen ve zcela určitých dávkách - kvantech.

Pro vysvětlení optických dějů plně vyhovuje Maxwelllova teorie. Podle ní se šíří ve světelném paprsku současně dvě vlny, vlny elektrická a magnetická, jejich vektory jsou navzájem kolmé a současně kolmé na osu paprsku / obr.8 /. Charakteristickým znakem elektromagnetického vlnění je jeho vlnová délka  $\lambda$  a kmitočet (frekvence)  $f$ , které jsou vázány vztahem.

$$c = \lambda \cdot f \quad / 2.2.2.1 /$$

kde  $c$  je rychlost šíření vlnění



obr. 8 - Schematické znázornění světla

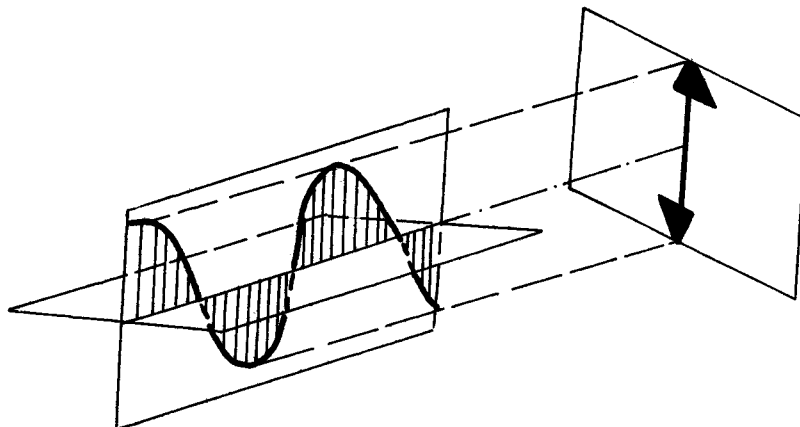
Podle hodnoty vlnové délky můžeme elektromagnetické vlnění dělit do tří skupin: 1. ultrafialové -  $\lambda < 400$  nm  
2. viditelné -  $\lambda = 400 - 800$  nm  
3. infračervené -  $\lambda > 800$  nm

Viditelné záření - bílé světlo je směsí záření různých vlnových délek, které přísluší různým barvám a lze jej rozložit na řadu monochromatických barev - spektrum. Monochromatické světlo obsahuje elektromagnetické vlnění pouze jedné vlnové délky.

Obě navzájem kolmé vlny světelného paprsku nezaujímají pevnou polohu, ale v rychlém střídání se nepravidelně stáčíjí kolem směru šíření paprsku při zachování vzájemné kolmosti. Jestliže určitým způsobem toto stáčení uspořádáme získáme

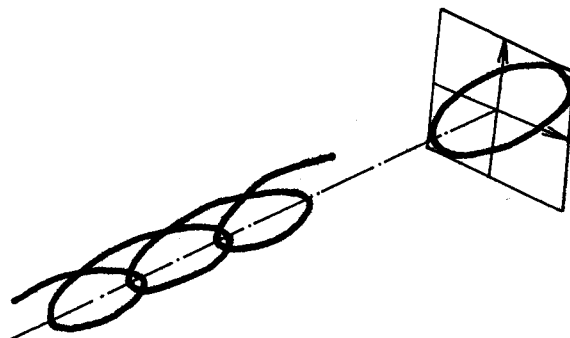
světlo polarizované. Dle charakteru uspořádání rozlišujeme světlo lineárně, elipticky a kruhově polarizované. Pro zjednodušení je v dalším výkladu uvažována jako určující složka elektrická vlna.

1. Lineárně polarizované světlo má všechny kmity uspořádány do jedné roviny / obr. 9 /.



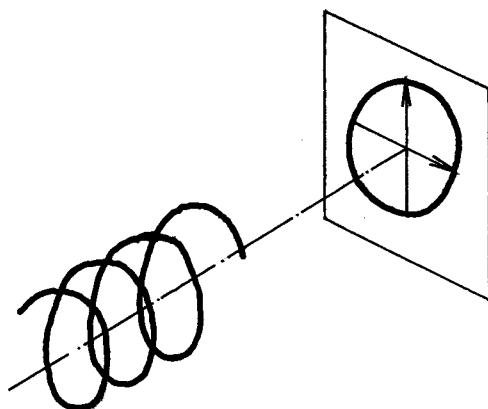
obr. 9 - Lineárně polarizované světlo

2. Elipticky polarizované světlo vzniká složením dvou navzájem posunutých lineárně polarizovaných paprsků, které kmitají v rovinách navzájem kolmých a jsou charakterizovány určitým dráhovým rozdílem  $\Delta$ . Koncový bod světelného vektoru opisuje dráhu ve tvaru šroubové spirály s eliptickou základnou /obr.10/.



obr. 10 - Elipticky polarizované světlo

3. Kruhově polarizované světlo vzniká tehdy, když jsou amplitudy obou lineárně polarizovaných paprsků stejné a dráhový rozdíl  $\Delta = \frac{\lambda}{4} \cdot (2k - 1)$  pro  $k = 1, 2, 3, \dots$

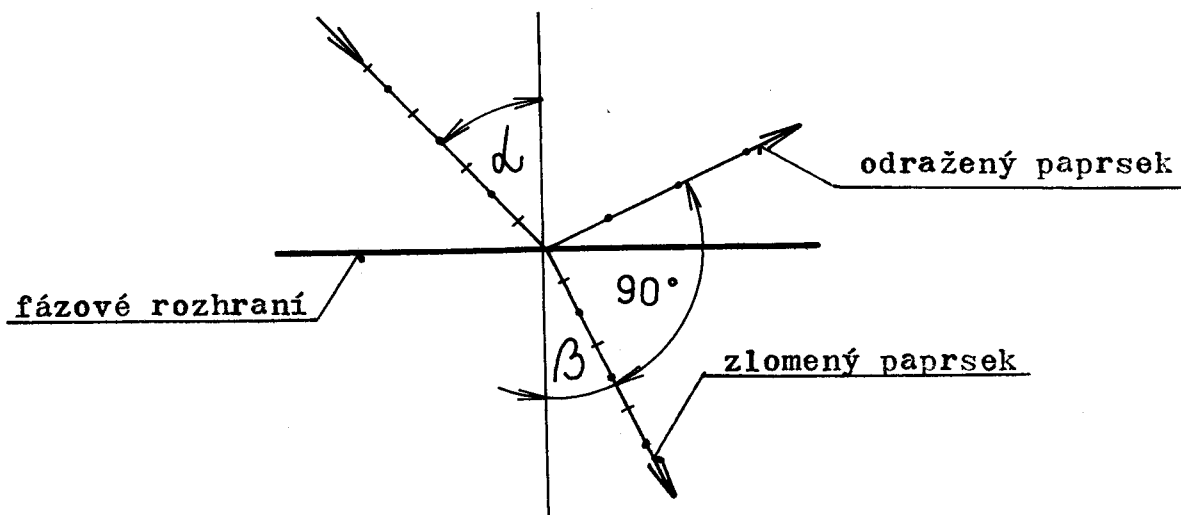


obr. 11 - Kruhově polarizované světlo

Polarizované světlo lze získat odrazem, lomem, dvojlomem a absorpcí.

#### 1. Polarizace odrazem a lomem

Při dopadu paprsku světla na fázové rozhraní se jeho část odrazí a část lomí, vzájemný podíl obou složek je dán úhlem dopadu  $\alpha$ . Obě složky jsou lineárně polarizovány, lomený paprsek je vždy jen částečně polarizován a stupeň polarizace závisí na úhlu dopadu.



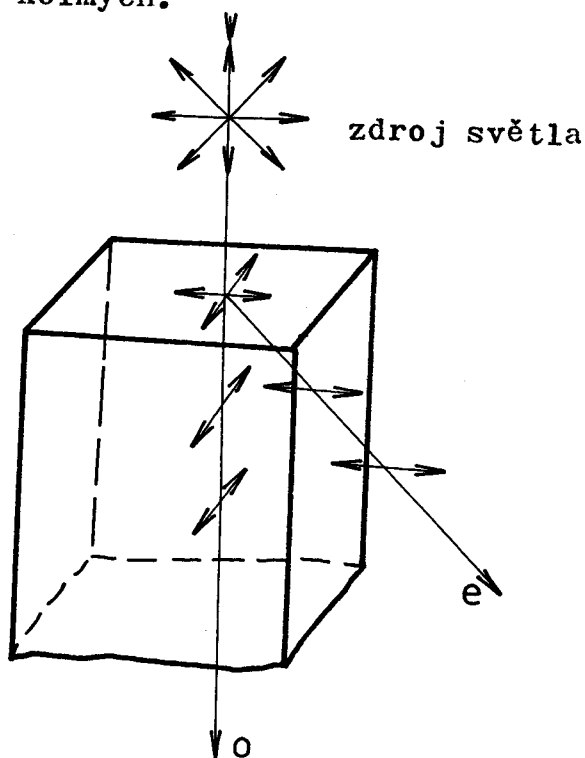
obr. 12 - Polarizace lomem a odrazem



Odražený paprsek kmitá v rovině kolmé na rovinu dopadu, může však být plně polarizován pokud  $\text{tg}\varphi = n$  kde  $n$  je index lomu odrážejícího prostředí.

## 2. Polarizace dvojlomem

V opticky izotropních látkách se světlo šíří všemi směry stejnou rychlostí, v opticky anizotropních látkách se dopadající světelný paprsek štěpí na dva, šířící se různými směry, dochází k dvojlomu světla. Nově vzniklé paprsky označujeme jako paprsek řádný -  $o$  a mimořádný -  $e$ , tyto se šíří prostředím různou rychlostí a oba jsou úplně lineárně polarizovány v rovinách vzájemně kolmých.



obr. 13 - Dvojlom světla

Řádný paprsek -  $o$  se šíří vždy stejnou rychlostí nezávisle na směru průchodu jako v izotropním prostředí, je polarizován v rovině hlavního řezu ( rovinu proložená optickou osou a dopadajícím paprskem ) a tedy kmitá v rovině k ní kolmé, index lomu  $n_o$ . Mimořádný paprsek -  $e$  se neřídí zákonem lomu a vybočuje z roviny dopadu stranou od původního směru, je pola-

rizován v rovině kolmé k rovině hlavního řezu neboli kmitá v rovině řezu. Jeho index lomu  $n_e$  závisí na směru šíření. Velikost dvojlomu je vyjádřena rozdílem indexů lomu obou paprsků.

$$D = n_e - n_o \quad / 2.2.2.2 /$$

Odstraníme-li jeden ze dvou paprsků získáme světlo dokonale lineárně polarizované, jeho intenzita bude rovna 50% celkové intenzity dopadajícího světla.

### 3. Polarizace absorpcí

Některé dvojlomné látky pohlcují jeden z obou paprsků vzniklých dvojlomem, tato vlastnost se nazývá dichroismus a využívá se jí při výrobě polarizačních filtrů. Intenzita polarizovaného světla je o něco nižší než 50% původní, protože se absorbuje i část paprsků procházejících filtrem.

Paprsky vzniklé dvojlomem polarizovaného světla kmitají v rovinách k sobě kolmých nejsou tedy koherentní a neinterferují spolu obvyklým způsobem, ale skládají se obecně na světlo elipticky resp. kruhově polarizované. Interferují-li spolu paprsky bílého světla při určitém dráhovém rozdílu některé vlnové délky (barvy) se zesilují jiné zeslabují až mizí. Původně bílé světlo se po interferenci změní ve světlo barevné, kdy barvy výsledného světla závisí na velikosti vyvolaného dráhového rozdílu, tak vznikají barvy směsné obsahující různé vlnové délky - interferenční barvy. Zvětšujeme-li postupně dráhový rozdíl interferenční barvy se po určitých intervalech opakují, ale sestupně jsou méně syté, tyto skupiny opakujících se barev oddělených od sebe červenou se nazývají řády.

### 2.2.3 Dočasný dvojlom makromolekulárních látek /2/