

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

BEZKONTAKTNÍ ANALÝZA VLIVU TYPU TERMOPLASTU NA DEFORMACI PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE

NON-CONTACT ANALYSIS OF THE IMPACT ON TYPE OF
THERMOPLASTIC ON DEFORMATION IN A TENSILE TEST

Pavel Brdlík

KSP - TP - 815

Vedoucí diplomové práce:	Ing. Luboš Běhálek	- FS, TU v Liberci
	prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld	- FS, TU v Liberci
Konzultant diplomové práce:	Ing. Jiří Bobek	- FS, TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	68
Počet tabulek	18
Počet obrázků	79
Počet příloh	2

Datum: 5.6.2009

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Diplomant: Pavel Brdlík

Téma práce: Bezkontaktní analýza vlivu typu termoplastu na deformaci při tahové zkoušce

Non-contact analysis of the impact on type of thermoplastic on deformation in a tensile test

Číslo DP: KSP - TP - 815

Vedoucí DP: Ing. Luboš Běhálek - FS, TU v Liberci
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - FS, TU v Liberci

Konzultant DP: Ing. Jiří Bobek - FS, TU v Liberci

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá posouzením vlivu materiálu polymeru na poměrnou povrchovou deformaci a deformační vlastnosti vybraných částí povrchu zkušebního vzorku (posunutí a rychlost posunutí bodů) za působení jednoosého tahového namáhání pomocí optického měřicího systému ARAMIS. Pro zhodnocení vlivu materiálu na posuzované deformační vlastnosti jsou zkoumány polyolefiny PP Mosten GB 005, PE Liten MB 62 a dále polymerní směs PBT/ASA Ultradur S 4090 GX a amorfní polymer PMMA Plexiglas 7H.

Abstract:

The thesis deals with the assessment of the impact of polymer material on the relative surface deformation and deformation properties of selected parts of the surface of the test sample (displacement and speed of displacement of points) under the influence of the uniaxial tensile stress with the aid of optical measuring system ARAMIS. In order to assess the impact of material to the assessment of the deformation properties are examined polyolefins PP Mosten GB 005, PE Liten MB 62 and also polymer blend PBT/ASA Ultradur S 4090 GX and amorphous polymer PMMA Plexiglas 7H.

Místopřísežné prohlášení:

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

V Liberci, 5. června 2009

.....
Pavel Brdlík
Solec 12
294 02 Kněžmost

Poděkování:

V první řadě bych chtěl tímto poděkovat konzultantovi a vedoucímu diplomové práce Ing. Bobkovi a Ing. Běhálkovi za cenné rady a drahocenný čas strávený konzultacemi řešené problematiky. Dále pak Dr. Ing. Kotkovi z Ústavu makromolekulární chemie AV ČR za ochotu k prodiskutování daného tématu.

Rovněž velice děkuji členům KSP z oddělení tváření kovů a plastů, jmenovitě Ing. Sobotkovi za odborné rady při realizaci a vyhodnocení experimentálního měření.

Nesmím opomenout poděkovat všem ostatním, kteří mě podporovali po celou dobu tvorby diplomové práce.

OBSAH

1 ÚVOD	11
2 TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1 DEFORMACE POLYMERŮ	12
2.1.1 Vliv molekulární struktury na deformaci polymerů.....	12
2.1.1.1 Vliv chemického složení	12
2.1.1.2 Vliv vazebních sil působících v polymerech	13
2.1.1.3 Vliv velikosti makromolekul	17
2.1.1.4 Vliv tvaru makromolekul	18
2.1.1.5 Vliv stereoizomerického uspořádání	19
2.1.2 Vliv nadmolekulární struktury na deformaci polymeru	20
2.1.2.1 Vliv krystalinity	20
2.1.2.2 Vliv orientace	23
2.1.3 Vliv makroskopické struktury na deformaci polymerů.....	24
2.1.3.1 Vliv přísad na deformaci plněných plastů	24
2.1.3.2 Vliv makroskopické struktury kompozitů.....	25
2.1.3.3 Vliv makroskopické struktury polymerních směsí	26
2.1.4 Vliv teploty na deformaci polymerů	26
2.1.4.1 Vliv teploty na lineární amorfnní polymery	27
2.1.4.2 Vliv teploty na zesítené amorfnní polymery	28
2.1.4.3 Vliv teploty na semikrystalické polymery	28
2.1.4.4 Vliv teploty na polymerní směsi.....	29
2.1.5 Vliv viskoelastivity na deformaci polymerů.....	30
2.1.5.1 Ideální pružnost (elasticita)	30
2.1.5.2 Ideální viskoznní kapaliny (ideální plasticita)	31
2.1.5.3 Zpožděnně elastické deformační chování	32
2.2 METODY ANALÝZY DEFORAMCE POLYMERŮ	34
2.2.1 Analýza deformace pomocí tenzometrů	35
2.2.2 Analýza deformace pomocí extenzometrů	36
2.2.3 Analýza deformace pomocí optických metod	36
2.2.3.1 Měřící systém ARAMIS	37

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
3.1 ZKOUMANÉ MATERIÁLY	39
3.1.1 Mosten GB 005	39
3.1.2 Liten MB 62	40
3.1.3 Ultradur S 4090 GX	41
3.1.4 Plexiglas 7H.....	41
3.2 ANALÝZA POMĚRNÉ POVRCHOVÉ DEFORMACE A DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ ČÁSTÍ POVRCHU SYSTÉMEM ARAMIS....	42
3.2.1 Přípravné operace	43
3.2.1.1 Výroba zkušebních vzorků	43
3.2.1.2 Nanesení nepravidelného rastru	45
3.2.1.3 Kalibrace přístroje ARAMIS 2M.....	45
3.2.2 Postup měření	47
3.2.3 Hodnocení naměřených dat.....	48
3.2.3.1 Hodnocení poměrné povrchové deformace	49
3.2.3.2 Hodnocení deformačních vlastností vybraných částí povrchu.....	53
3.2.3.3 Hodnocení tahových vlastností.....	59
4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUSE.....	60
4.1 VYHODNOCENÍ POMĚRNÉ POVRCHOVÉ DEFORMACE	60
4.2 VYHODNOCENÍ DEFORMAČNÍCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH ČÁSTÍ POVRCHU	62
5 ZÁVĚR	66
6 LITERATURA	67
7 PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

C	- atom uhlíku
CL	- atom chloru
F	- atom fluoru
H	- atom vodíku
N	- atom dusíku
O	- atom kyslíku
S	- atom síry
Si	- atom křemíku
CCL ₄	- tetrachlormethan
CH ₂	- methylenová chemická skupina
CH ₃	- methylová chemická skupina
COOR	- esterová chemická skupina
OH	- hydroxylová chemická skupina
ASA	- akrylonitril-styrén-akrylát
ABS	- akrylonitril-butadien-styren
BR	- butadienový kaučuk
EPDM	- kopolymer ethylen-propylen-dien
HDPE	- vysokohustotní polyethylen
HPS	- houževnatý polystyren
IR	- isoprenový kaučuk
LDPE	- nízkohustotní polyethylen
MF	- melaminoformaldehydová pryskyřice
PA 6	- polyamid 6
PA 66	- polyamid 66
PAN	- polyakrylonitril
PBT	- polybutadien
PC	- polykarbonát
PCTFE	- polytrifluorchlorethylen
PE	- polyethylen
PETP	- polyethylentereftalát
PF	- fenolformaldehydová pryskyřice
PMMA	- polymethylmethakrylát
POM	- polyoxymethylen
PP	- polypropylen
PS	- polystyren

PTFE	- polytetrafluorethylen
PVAC	- polyvinylacetát
PVC	- polyvinylchlorid
SBR	- butadienstyrenový kaučuk
SV	- skelná vlákna
UP	- nenasycené polyestery
A	- povrchová vrstva
A1	- pseudoplastická kapalina
A2	- dilatantní kapalina
B	- přechodová vrstva
C	- celková povrchová vrstva
CCD	- Charge Coupled Device (zařízení s vázanými náboji)
d	- vzdálenost mezi optickými osami [mm]
dL	- prodloužení průtahoměru [mm]
D	- smyková rychlost [s^{-1}]
D_j	- jádro
E	- modul pružnosti [MPa]
E_t	- modul pružnosti v tahu [MPa]
E_v	- vazebná energie atomů [$kJ \cdot mol^{-1}$]
f	- ohnisková vzdálenost [mm]
F	- síla [N]
G	-smykový modul [MPa]
HDT	- tvarová stálost za tepla [$^{\circ}C$]
HKE	- hustota kohezní energie [$J \cdot m^{-3}$]
L	- ohnisko kamery 1
L_0	- počáteční hodnota průtahoměru [mm]
m	- konstanta mocninového zákona [-]
M	- molární hmotnost [$g \cdot mol^{-1}$]
$\bar{M}$	- střední hodnota molekulové hmotnosti [-]
$\bar{M}_n$	- číselně střední molekulová hmotnost [-]
$\bar{M}_w$	- hmotnostně střední molekulová hmotnost [-]
P	- měřený bod
$\bar{P}$	- polymerační stupeň [-]
r_0	- vzdálenost částic (atomů) [pm]
r	- vzdálenost středů interagujících částic [pm]
R	- ohnisko kamery 2

t_p	- tloušťka povrchové vrstvy [μm]
T	- teplota [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	- teplota tání krystalů [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	- teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	- teplota viskozního toku [$^{\circ}\text{C}$]
w_k	- stupeň krystalinity [-]
x_L	- souřadnice bodu L [mm]
x_R	- souřadnice bodu R [mm]
α	- polarizovatelnost molekul [$\text{A s}^4 \cdot \text{kg}^{-1}$]
γ	- smyková deformace [%]
γ_A	- úhel kamer [°]
$\dot{\gamma}$	- rychlost smykové deformace [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
δ	- parametr rozpustnosti [$\text{MJ}^{1/2} \cdot \text{m}^{-3/2}$]
ε	- deformace [%]
μ	- dipólový moment [$\text{C} \cdot \text{m}$]
η	- dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
σ	- normálové napětí [MPa]
τ	- smykové napětí [MPa]
Φ	- koeficient tekutosti [s^{-1} po úpravě]

1 ÚVOD

Na počátku jednadvacátého století jsou polymerní materiály jedním z dynamicky se rozvíjejících materiálů, jehož použití se v různých oblastech průmyslu (např. ve strojírenství, elektrotechnice, stavebnictví, dopravě, atd.) stále rozrůstá.

Při aplikaci jakéhokoliv polymerního materiálu v konstrukční praxi jsou důležité jeho deformační vlastnosti, které vyjadřují vztah mezi vnější silou a deformací. Makromolekulární látky se chovají při mechanickém namáhání rozdílně, např. nádoby z běžného polystyrénu jsou při standardní teplotě křehké, zatímco nádoby z polyamidu jsou oproti tomu velice houževnaté. Slabě zesíťovaný přírodní kaučuk se při protažení prodlouží o několik set procent a po odlehčení zaujme prakticky svůj původní tvar, naproti tomu deformace polymerů tvořených lineárními makromolekulami jsou při zatížení větším, než je mez kluzu téměř nevratné /1/. Deformační vlastnosti polymerů jsou výsledkem interakce řady faktorů ovlivňující více, či méně jejich výsledné deformační chování. Kromě materiálu závisí deformační chování polymerů rovněž na způsobu zatěžování (dynamické, statické), jeho velikosti, době i rychlosti zatěžování. Dalším faktorem ovlivňujícím významným způsobem deformaci polymerů jsou podmínky prostředí, tj. především teplota a relativní vlhkost /2/.

Důležitým aspektem k posouzení deformačního chování polymerů je metodika stanovení deformace. Způsobů stanovení, respektive hodnocení deformačních dějů existuje mnoho, ne všechny však jsou vhodné pro polymerní materiály. V rámci vědecko výzkumné činnosti katedry strojírenské technologie, jež byla finančně podporována výzkumným záměrem MSM 4674788501 „Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem“ se tato práce zabývá právě touto problematikou.

Cílem diplomové práce je pomocí optického měřicího systému ARAMIS posoudit vliv materiálu polymeru na poměrnou povrchovou deformaci a deformační vlastnosti vybraných částí povrchu zkušební vzorku (posunutí a rychlost posunutí bodů) za působení konstantního jednoosého tahového namáhání. Teoretická část je zaměřena na objasnění možných příčin rozdílných deformačních vlastností polymerních materiálů, především z hlediska vlivu materiálu a na metody používané k analýze deformace polymerních materiálů. V experimentální části je posuzována poměrná povrchová deformace a deformační vlastnosti vybraných částí povrchu zkoumaných materiálů pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS 2M. Pro zhodnocení vlivu materiálu na posuzované deformační vlastnosti byly vybrány polyolefiny PP Mosten GB 005, PE Liten MB 62 a dále polymerní směs PBT/ASA Ultradur S 4090 GX a amorfnní polymer PMMA Plexiglas 7H.

2 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část této práce je členěna do dvou kapitol. První část se zabývá objasněním možných příčin rozdílných deformačních vlastností polymerů a to především z hlediska vlastního materiálu. V druhé části jsou uvedeny způsoby stanovení a hodnocení deformačních vlastností polymerních materiálů. Jsou to metody, které se běžně používají v praxi, tedy stanovení deformace pomocí tenzometrů a extenzometrů (průtahoměrů), ale také moderní metoda stanovení deformace polymerních materiálů 3D optickým měřicím systémem ARAMIS.

2.1 DEFORMACE POLYMERŮ

Chování polymerů při deformaci je v základní rovině určeno druhem plastu, jeho chemickým složením, molekulární, nadmolekulární a také makroskopickou strukturou. Rovněž je třeba upozornit na skutečnost, že podobně jako u jiných materiálů závisí vlastnosti plastů na teplotě i relativní vlhkosti okolí. Vzhledem k tomu, že makromolekulární látky jsou látky viskoelastické, závisí také na čase, popřípadě rychlosti zatěžování /2/, /3/.

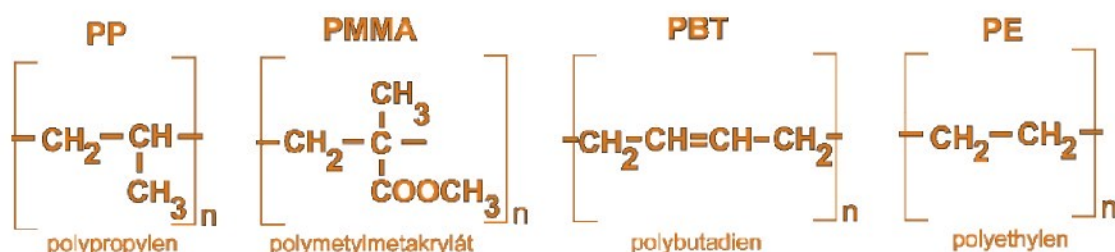
2.1.1 Vliv molekulární struktury na deformaci polymerů

Molekulová struktura se zabývá vlastnostmi makromolekuly jako samostatné jednotky. Zahrnuje především stavbu makromolekulárního řetězce, tedy jeho chemické složení, tvar, takticitu (stereoregularitu) a velikost makromolekuly, resp. velikost mezimolekulárních sil. Z hlediska deformačního chování se jedná o jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující jeho průběh.

2.1.1.1 Vliv chemického složení

Chemická struktura makromolekul určuje hlavní vlastnosti polymeru a to nejen vlastnosti chemické, mechanické (tedy i deformační), ale také tepelné, elektrické a další. Její podstatou je schopnost vázat atomy navzájem a vytvářet řetězce makromolekuly, kde jednotlivé atomy jsou na sebe vázány pomocí chemických nebo-li intramolekulárních sil, prostřednictvím nichž je ovlivňován mimo jiné také průběh deformace polymeru při zatěžování.

Nejčastějším prvkem vyskytujícím se v páteři řetězce je uhlík (viz obr. 2.1), méně často jsou zastoupeny jiné prvky jako kyslík, dusík a zcela ojediněle křemík, síra aj. Na páteř základního řetězce se váží další prvky, buď jako jednotlivé atomy (C, H, O, N, CL, F, aj.), anebo častěji v podobě různých chemických skupin (methylová – CH₃, hydroxylová – OH, esterová – COOR, aj.) /1/, /3/.



Obr. 2.1 Chemická struktura vybraných polymerů /4/

2.1.1.2 Vliv vazebních sil působících v polymerech

V makromolekulárních látkách působí síly intramolekulární (primární vazebné síly) a intermolekulární (sekundární vazebné síly). Tyto síly v závislosti na chemickém složení, velikosti a tvaru makromolekul ovlivňují zásadním způsobem deformační vlastnosti plastu.

Primární vazebné síly (hlavní vazebné síly)

Atomy v řetězci makromolekuly jsou navzájem spojeny primárními silami chemické povahy. Převažujícím typem primárních vazeb v polymerech jsou vazby kovalentní (homeopolární), jejichž základem je sdílení jednoho, dvou či tří elektronových párů ve valenčních sférách dvou sousedních atomů. Silové působení mezi částicemi je dalekého dosahu (je přímo úměrné r_0^{-2} , kde r_0 – je vzdálenost částic). Vazby jsou pevné a k jejich rozrušení je potřeba velké energie (disociační energie). Například délka běžných jednoduchých vazeb uhlíku s atomy H, N, O, F se pohybuje v rozmezí přibližně od 0,1 do 0,15 nm (viz tab. 2.1). Vazby mezi většími atomy (např. C-Cl, S-S, C-S, C-Si, Si-O) jsou poněkud delší /5/. Pro závislost mezi silovým působením a vzdáleností částic lze obecně konstatovat, že se vzrůstající vzdáleností částic klesá energie potřebná k přerušení této vazby a vazba se jeví jako méně pevná /5/, /6/, /7/.

Tab. 2.1 Délka vazby a vazebné energie některých dvouatomových molekul /7/

Molekula	r_0 [pm]	E_v [kJ/ mol]	Molekula	r_0 [pm]	E_v [kJ/ mol]
H ₂	75,1	436	Cl ₂	199,1	243
N ₂	110,0	945	HF	92,6	568
O ₂	121,1	498	HCL	128,4	432
F ₂	141,7	158	NO	115,1	632

Na velikost sil (vazebnou energii) mezi molekulami má vliv kromě jejich vzdálenosti i násobnost vzniklé vazby. Energie potřebná k přerušení dvojné, resp. trojné vazby je větší, než vazby jednoduché, ale jednotlivé vazby nejsou rovnocenné. Tab. 2.2 ukazuje porovnání vazebných energií a délek vazby na příkladu vazby dvou atomů uhlíku. Jedná se o průměrné hodnoty z několika různých sloučenin, neboť jak délka vazby, tak vazebná energie závisí i na druhu a počtu okolních atomů /7/.

Tab. 2.2 Délka vazby a vazebné energie jednoduché, dvojné a trojné vazby atomů uhlíku /7/

Vazba	r_0 [pm]	E_v [kJ/ mol]
C - C	153,6	348
C = C	133,7	615
C $\equiv$ C	120,4	812

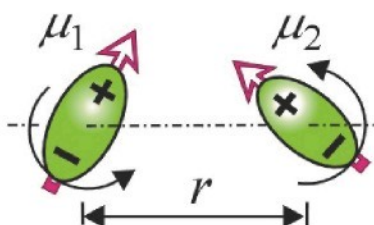
Sekundární vazebné síly (vedlejší vazebné síly)

Sekundární (kohezní) síly, označované také jako Van der Waalsovy, působí mezi molekulami složenými z kovalentně vázaných atomů. V polymerní molekule se uplatňují mezi makromolekulárními řetězci a způsobují tak vzájemnou soudržnost molekul. Jsou rozhodující pro krystalizaci (nadmolekulární strukturu), pevnost a všechny děje spojené se vzájemným působením molekul, jako např. orientaci polymerů. Silové působení mezi částicemi je blízkého dosahu a energie potřebná k přerušení vazeb je mnohem menší, než energie potřebná k přerušení primárních vazeb. Hlavní vazebné síly (kovalentní) jsou tedy značně silnější, než vazebné síly vedlejší (Van der Waalsovy) /3/, /5/, /8/.

Velikost mezimolekulárních sil ovlivňuje kromě mezimolekulární vzdálenosti také teplota a délka makromolekul. Zvyšováním teploty mezimolekulární síly klesají. Rovněž s rostoucí vzdáleností molekul velikost kohezní vazby klesá (nejčastěji s šestou mocninou) /6/. To znamená, že jakékoliv oddálení sousedních molekul, způsobené např. rozvětvením řetězců nebo molekulami změkčovadla, má za následek změnu mechanických vlastností - např. pokles pevnosti, nárůst poměrného prodloužení, apod. Síly se naproti tomu zvětšují se vzrůstající délkou molekul. U dlouhých makromolekul mohou nabýt hodnot srovnatelných s primární vazbou /3/. Se zvyšující se velikostí mezimolekulárních sil lze předpokládat, že působící namáhání na polymer nevyvolá při malém zvětšení známky plastické deformace a těleso se poruší křehkým lomem.

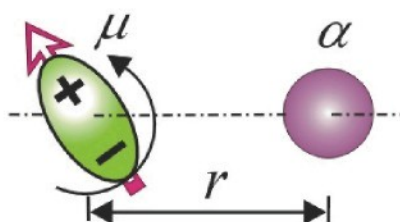
Z Van der Waalsových sil se u makromolekulárních látek uplatňují síly dipólové, indukované a síly disperzní. Tyto vedlejší vazební síly se odlišují existencí trvalého dipólu a velikostí vzniklé vazby.

Dipólové síly (Keesomovy síly): jedná se o síly elektrostatické povahy. Základem těchto orientačních interakcí je přítomnost trvalých (permanentních) elektrických dipólů v makromolekulách, které podmiňují vznik dipólového momentu a přitažlivých sil mezi makromolekulami. Na obr. 2.2 je znázorněn vznik trvalého dipólu, který se vytvoří pootočením záporného konce jedné makromolekuly směrem ke kladnému konci druhé makromolekuly. Dipólové síly se uplatňují u polárních polymerů a patří k nejsilnějším mezimolekulovým vazbám, jež zvyšují např. pevnost polymeru, snižují jeho poměrné prodloužení a deformaci [3], [5].



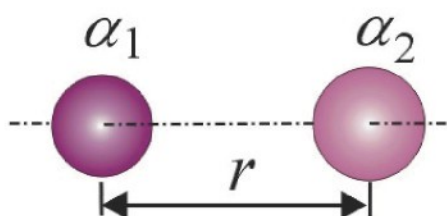
Obr. 2.2 Vznik trvalého dipólu [9]

Indukované síly (Debyeovy síly): jedná se taktéž o síly elektrostatické povahy. Vznikají účinkem molekul s trvalým dipólem na molekuly bez dipólu, kdy trvalý dipól může indukci způsobit posun nábojů v nepolární molekule (bez trvalého dipólu), viz obr. 2.3. To pak vede ke vzájemnému přitahování obou molekul. Tyto vedlejší vazební síly jsou slabší než dipólové. Indukční efekt je zpravidla velmi malý. Většího uplatnění nalézá v molekulách s dvojnou vazbou, jež se snadno polarizují, jako např. kaučuky [3], [5].



Obr. 2.3 Vznik indukovaných sil [9]

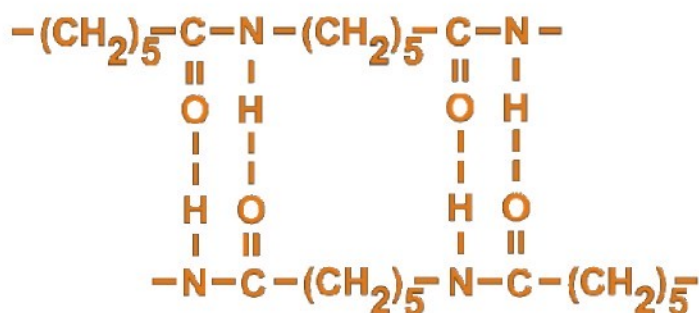
Disperzní síly (Londonovy síly): jejich původ sice spočívá také v polarizaci molekuly, ale příčinou polarizace je pohyb elektronů kolem atomových jader a neustálá změna vzájemné polohy jader a elektronů v atomech (viz obr. 2.4). Výsledkem této změny je vznik časově proměnného dipólového momentu v molekule a vznik přitažlivých sil mezi sousedními molekulami [3].



Obr. 2.4 Vznik disperzních sil /9/

Vodíkový můstek

Jedná se o zvláštní případ mezimolekulové síly, či slabé chemické vazby. Základem vodíkového můstku je vazba vodíku současně se dvěma elektronegativními atomy, přičemž každý z nich přísluší jiné molekule (viz obr. 2.5.) /3/. Oba tyto atomy musí nést poměrně silný záporný náboj. Přitažlivá síla je dostatečně velká, takže dochází k pevnému vzájemnému poutání obou molekul. V makromolekulárních látkách tvoří často vodíkové můstky skupiny OH a NH. Velký význam má např. u polyamidů, kde je příčinou vysoké pevnosti a nízké tažnosti /3/, /6/.



Obr. 2.5 Příklad vodíkového můstku v PA6 /3/

Soudržnost molekul lze vyjádřit hustotou kohezní energie (HKE), případně pomocí parametru rozpustnosti (δ). Podle stoupající mezimolekulové koheze můžeme polymery rozdělit na nepolární, polarizovatelné, polární a vysoce polární. U nepolárních polymerů (např. PP, PE, EPDM) převládají disperzní mezimolekulární síly, u polarizovatelných polymerů (např. PS, BR, IR, SBR) to jsou síly indukované. Pro polární polymery (obsahující skupiny etherové, esterové, nitridové, Cl, F) jsou charakteristické dipólové síly a pro vysoce polární polymery (obsahující skupiny amidové, aminové, karboxylové, hydroxylové) zajišťuje vysokou pevnost vodíkový můstek /3/.

Tab. 2.3 Parametr rozpustnosti vybraných polymerů /6/

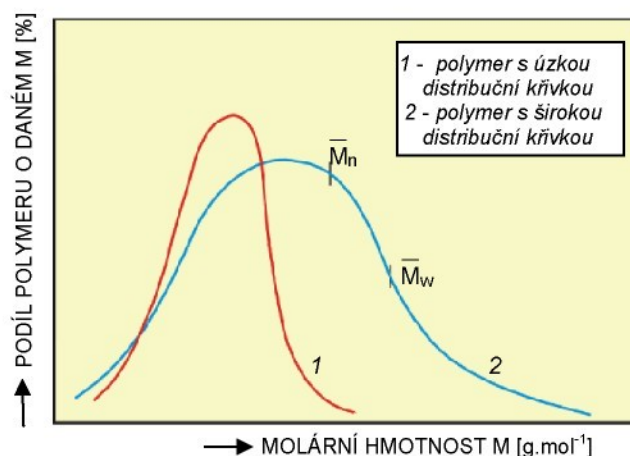
Polymer	$\delta / (\text{MJ}^{1/2} \cdot \text{m}^{-3/2})$	Polymer	$\delta / (\text{MJ}^{1/2} \cdot \text{m}^{-3/2})$
PTFE	12,7	PVC	19,2 ÷ 22,1
PE	15,8 ÷ 17,0	PVAC	19,0 ÷ 22,7
PP	16,8 ÷ 18,8	PETP	19,0 ÷ 21,9
PCTFE	14,7 ÷ 16,1	PMMA	18,6 ÷ 26,2
SBR	17,4	POM	20,9 ÷ 22,5
PS	17,4 ÷ 19,0	PA 66	27,2
IR	16,2 ÷ 17,0	PAN	25,6 ÷ 31,5

2.1.1.3 Vliv velikosti makromolekul

Důležitou vlastností makromolekul ovlivňující deformační chování polymerů je jejich velikost, která je vyjadřována polymerizačním stupněm, či molekulovou hmotností. Protože syntetické makromolekulární látky sestávají téměř výhradně ze směsi makromolekul rozdílných molekulových hmotností, je možné pro ně udávat pouze střední hodnotu molekulové hmotnosti ($\bar{M}$), či polymeračního stupně ($\bar{P}$). Tato nestejnorodost makromolekul co do jejich velikosti se označuje polydisperzita a znázorňuje se pomocí polydisperzních, resp. distribučních křivek (viz obr. 2.6).

Plasty vznikající polymerací vykazují vyšší polymerační stupeň (řádově 10^3), než polymery připravované polykondenzací nebo polyadací (řádově 10^2). Toto tvrzení se pochopitelně týká termoplastů, protože u reaktoplastů je hustota zesítení tak velká, že se molekulová hmotnost nedá experimentálně stanovit /3/.

Mezi velikostí makromolekuly a mechanickými vlastnostmi polymeru existuje přímá závislost. Čím je molekulová hmotnost větší, tím jsou silnější vazby mezi makromolekulami a polymer vykazuje lepší mechanické vlastnosti, roste pevnost, tuhost, ale klesá tažnost i projev plastické deformace a snižují se jeho reologické vlastnosti /1/, /3/.



Obr. 2.6 Rozdělení molárních hmotností polymerů a jejich střední hodnoty ($\bar{M}_n$, $\bar{M}_w$) /10/

Mnohé vlastnosti polymerů závisí nejen na střední molekulové hmotnosti, ale i na polydisperzitě. Příkladem je pevnost materiálu, kde je pro danou látku rozhodující objemové zastoupení krátkých molekul, neboť pevnost klesá s rostoucím obsahem defektních míst a jedním ze závažných defektů jsou konce původních makromolekul /5/. Z těchto důvodů je zapotřebí znát celé rozdělení molekulových hmotností (což zpravidla není možné) nebo alespoň jeho nejdůležitější charakteristiky. Čím je distribuční křivka užší, tím menší rozptyl vykazují molekuly kolem střední hodnoty a polymer je z hlediska velikosti molekul homogennější.

2.1.1.4 Vliv tvaru makromolekuly

V zásadě existují tři druhy polymerních makromolekul (lineární, rozvětvené a zesíťované, viz obr. 2.7), jež předurčují výsledné deformační vlastnosti plastů z hlediska molekulární struktury, ale také morfologii, tedy nadmolekulární strukturu aj. vlastnosti.

Lineární makromolekuly jsou tvořeny monomery obsahující minimálně dvě funkční skupiny. Z prostorových důvodů se mohou přiblížit více k sobě a vyplnit tak prostor kompaktněji. Snáze vytvářejí prostorově pravidelné shluky krystalických struktur, proto mají polymery obsahující tyto makromolekuly vyšší obsah krystalických podílů, vyšší pevnost v tahu i modul pružnosti a celkové deformace jsou za mezí kluzu téměř zcela nevratné (plastické) /3/, /11/.

Rozvětvené makromolekuly se vyznačují vazbou krátkých bočních řetězců tvořených malým počtem atomů na základní řetězec. Vlivem těchto bočních substituentů dochází ke zvětšování vzdálenosti mezi sousedními makromolekulami, což má za následek pokles mezimolekulárních sil. S poklesem mezimolekulárních (kohezních) sil klesá pevnost, tvrdost, modul pružnosti a další vlastnosti. Vliv rozvětvení na vlastnosti závisí nejen na velikosti bočních řetězců, ale i na jejich množství /1/, /11/.

Zesíťované makromolekuly vznikají z lineárních makromolekul spojením řetězců na různých místech příčnými chemickými vazbami, které vytvářejí můstky. Zesíťováním se zamezuje pohyblivost makromolekul jako celku. Pohyblivými zůstávají pouze úseky makromolekul mezi můstky, což způsobuje vyšší pevnost polymerů a proto při porušení těleso téměř nevykazuje známky plastické deformace /1/.

Prostorové makromolekuly vznikají růstem makromolekuly ve všech třech prostorových souřadnicích. Hustota prostorové sítě je tak velká, že lze považovat výlisek za jedinou ohromnou makromolekulu. Vytvořením prostorové sítě se zvyšuje pevnost, tvrdost, teplotní odolnost a naopak klesá houževnatost a schopnost krystalizace /1/.

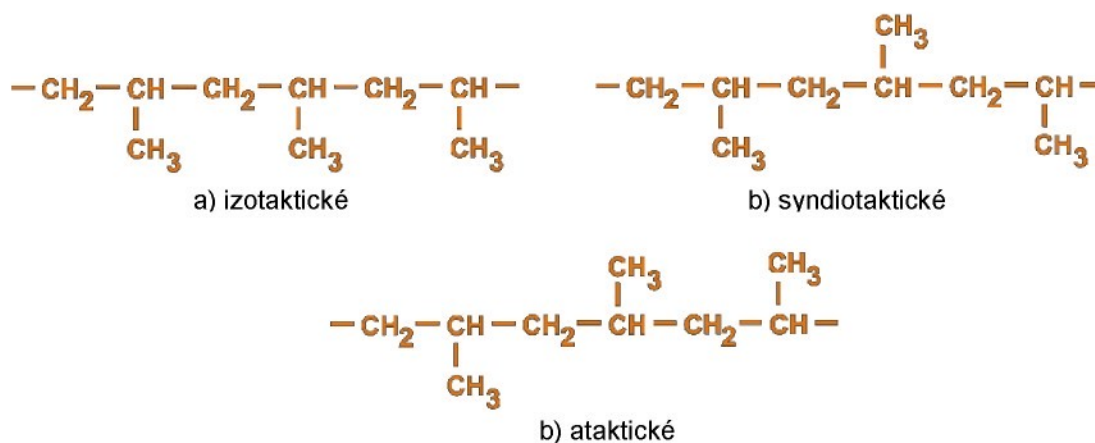


a) lineární makromolekuly b) rozvětvené makromolekuly c) zesíťované makromolekuly

Obr. 2.7 Uspořádání makromolekul v polymeru /12/

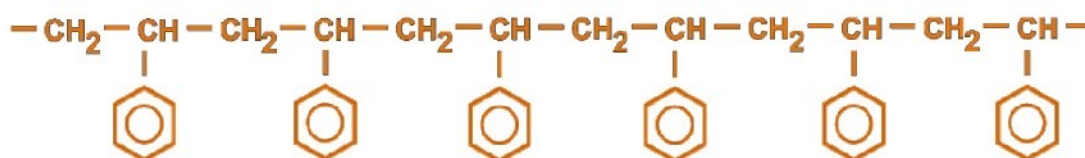
2.1.1.5 Vliv stereoizomerického uspořádání

Z hlediska vlivu prostorového uspořádání na deformační chování mají pro polymerní materiály velký význam stereoregulární (pravidelné) konfigurace, kde podle pravidelnosti uspořádání postranních substituentů rozlišujeme uspořádání ataktické, syndiotaktické a izotaktické (viz obr. 2.8). Ataktické uspořádání je charakteristické zcela nahodilým rozmístěním postranních skupin. U syndiotaktického uspořádání se substituent pravidelně střídá nad a pod rovinou řetězce. Z hlediska deformačních vlastností je nejvýhodnější uspořádání izotaktické, kde jsou postranní skupiny zapojeny do stejné polohy. Oproti předchozím uspořádáním (syndiotaktické, ataktické) se pak materiál vyznačuje vyšší schopností krystalizace, vyšší pevností, tuhostí a malou deformací /3/. Tyto ideální konfigurace se v praxi nevyskytují v čisté formě (samostatně). Prostřednictvím stereospecifických katalyzátorů lze vést polymeraci tak, že určité uspořádání převažuje, avšak vždy lze nalézt odchylky od tohoto uspořádání /5/.



Obr. 2.8 Sterické uspořádání polypropylénu /3/

Deformační chování polymerů souvisí rovněž s konformační (rotační) izomerií. Rotací kolem jednoduchých kovalentních vazeb vzniká prostorové uspořádání polymerního řetězce. Zvýšení tuhosti rovných úseků řetězce může být způsobeno sterickými zábranami (viz obr. 2.9), jako např. u polyvinylových sloučenin s objemovými postranními substituenty v řetězci, které brání volné rotaci a připouští tím pouze určité vzájemné polohy atomů v řetězci. Polymery se ztíženou (brzděnou) volnou otáčivostí jsou pak většinou tvrdé a křehké /5/.



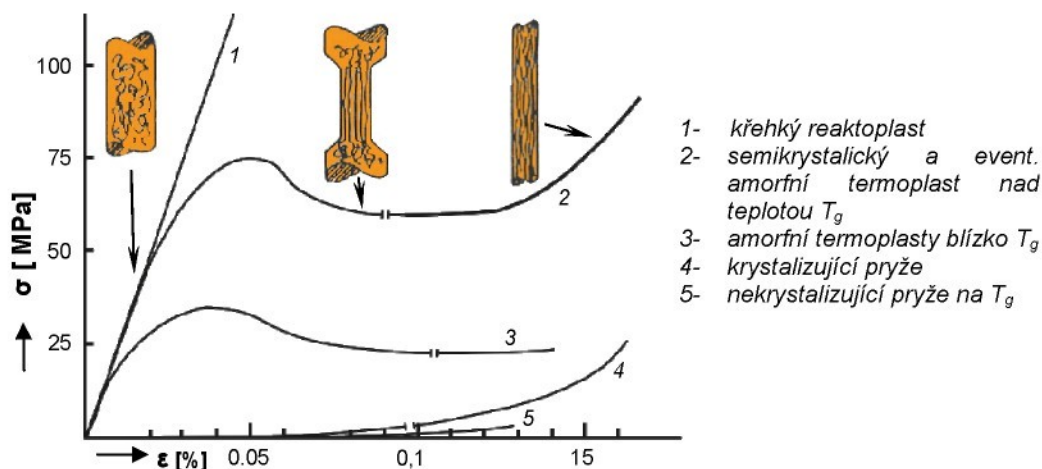
Obr. 2.9 Sterické zábrany způsobující tvrdost a křehkost polystyrénu /1/

2.1.2 Vliv nadmolekulární struktury na deformaci polymeru

Značný vliv na deformační vlastnosti polymeru má jejich nadmolekulární struktura, tedy vzájemné uspořádání makromolekul. Z hlediska vlivu polymeru na deformační chování je vhodné rozdělit nadmolekulární strukturu na dvě oblasti a to krystalinitu a orientaci /5/.

2.1.2.1 Vliv krystalinity

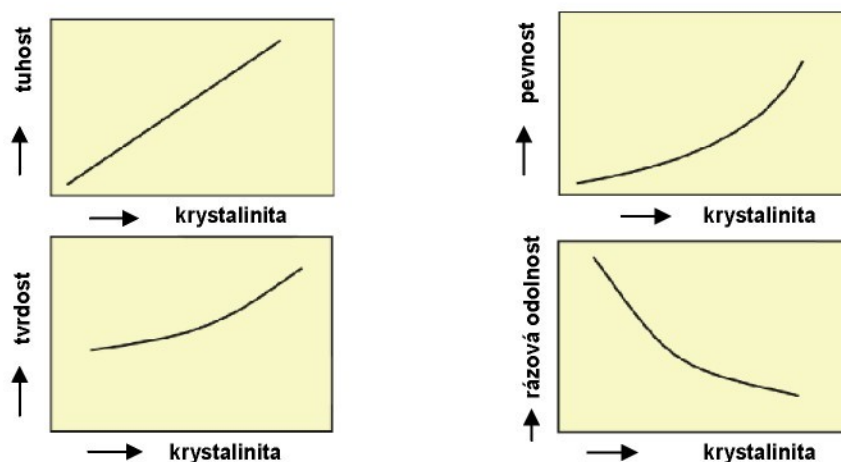
Makromolekuly mohou vytvářet více anebo méně uspořádanou nadmolekulární strukturu. Mezní stavy představují struktury amorfní, postrádající jakoukoliv uspořádanost a krystalické se znatelným stupněm uspořádání. U semikrystalických polymerů se vedle sebe vyskytují oba mezní stavy: amorfní i krystalický. Výsledný poměr obou fází (stupeň krystalinity) nám předurčuje budoucí vlastnosti plastu /3/. Na obr. 2.10 je znázorněna napěťově deformační charakteristika polymerů v závislosti na nadmolekulární struktuře.



Obr. 2.10 Napěťově deformační charakteristiky /4/

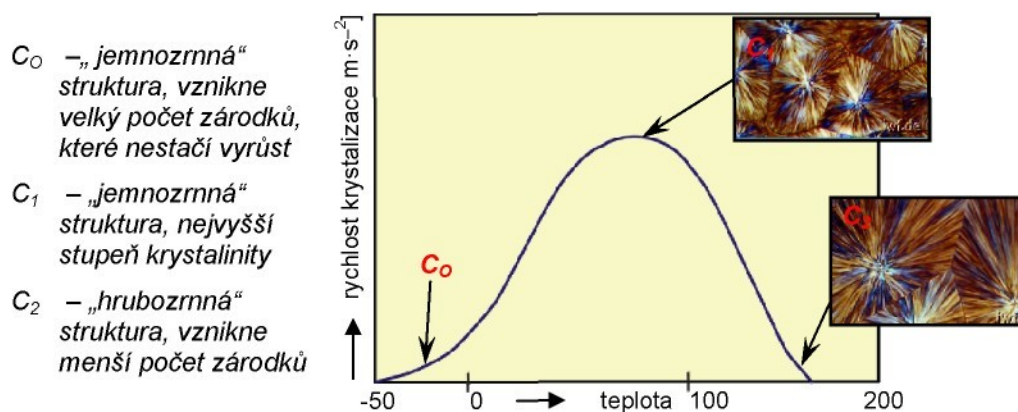
V semikrystalických materiálech se krystalické oblasti svými vlastnostmi výrazně liší od amorfních. Vlivem těsnějšího uspořádání makromolekul v krystalických oblastech a tím i větších soudržných (kohezních) sil má zvyšování krystalického podílu (stupně krystalinity) za následek zvýšení pevnosti, tuhosti a tvrdosti polymeru při současném snížení plastické deformace. Amorfni oblasti naopak přispívají ke zvyšování plastické deformace, tj. houževnatosti a tažnosti polymeru. Takovéto chování ovšem předpokládá určitý termodynamický stav hmoty, daný jeho teplotou /3/.

Vlastnosti amorfních i semikrystalických termoplastů při standardních podmínkách (tj. při teplotě 23°C a relativní vlhkosti vzduchu 50%) lze shrnout následovně: amorfni plasty jsou tvrdé, křehké, mají vysokou pevnost a vysoký modul pružnosti (vyšší než 10^3 MPa), zatímco semikrystalické plasty jsou houževnaté, jejich pevnost a modul pružnosti se zvyšuje se stupněm krystalinity (viz obr. 2.10) /3/.



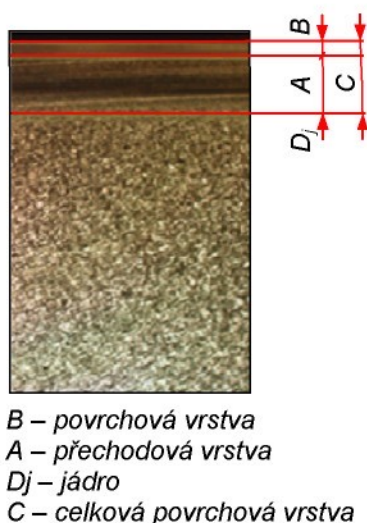
Obr. 2.10 Vliv stupně krystalinity na mechanické vlastnosti polymerů /13/

U semikrystalických polymerů je záhodno upozornit, že výsledné mechanické vlastnosti (tím i deformační) nezávisí pouze na stupni krystalinity, ale i na velikosti a objemovém zastoupení sférolitů. Obecně lze konstatovat, že lepší mechanické vlastnosti docílíme strukturou s malými sférolity s co nejvyšším stupněm krystalinity, než v případě větších sférolitů při stejném stupni krystalinity, jelikož tato struktura způsobuje křehkost materiálu. Strukturu s malými sférolity získáme vhodným časovým a teplotním průběhem krystalizace (viz obr. 2.11), případně přidáním práškových anorganických látek tzv. nukleačních přísad (např. talku), kterými se příznivě ovlivní množství krystalických zárodků. Tyto přísady tvoří heterogenní části, díky kterým se vytváří v polymeru více zárodků a materiál je poté tzv. „jemnozrnnější“ /13/.

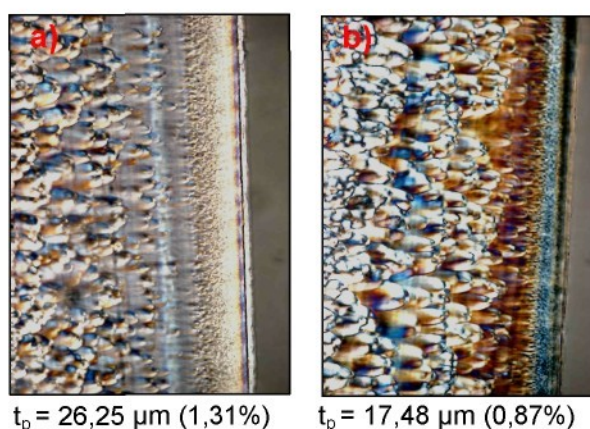


Obr. 2.11 Závislost rychlosti krystalizace polypropylenu na teplotě /3/, /13/

Nutno dále podotknout, že v reálných podmínkách není sférolitická struktura v důsledku nestejněmého tepelného působení rovnoměrná v celém objemu. V mikroprůřezu tloušťky výstřiku lze rozlišit tři oblasti (viz obr. 2.12), jejich poměrné zastoupení a strukturní podoba ovlivňuje také významným způsobem mechanické vlastnosti vstřikovaných dílů. V povrchové vrstvě dojde vlivem rychlého ochlazení ke vzniku velkého množství krystalizačních zárodků, ovšem bez jakéhokoliv nárůstu sférolitů. V jádru, kde obvykle panují opačné tepelné poměry v porovnání s povrchovou vrstvou, dojde naopak vlivem pomalejšího ochlazování ke vzniku menšího počtu krystalizačních zárodků a následnému nárůstu již makroskopicky pozorovatelných sférolitů. Stupeň krystalinity v jádru i na povrchu tělesa je přibližně stejný, ale mechanické vlastnosti se v důsledku rozdílné velikosti sférolitů odlišují /13/. Z výše uvedeného je tedy patrné, že mechanické vlastnosti semikrystalických polymerních materiálů lze výrazně ovlivnit i technologickými podmínkami výroby, konkrétně teplotou (viz obr. 2.13) a dobou temperace.



Obr. 2.12 Charakteristické mikrostrukturní složky průřezu výstřiku z PP /13/



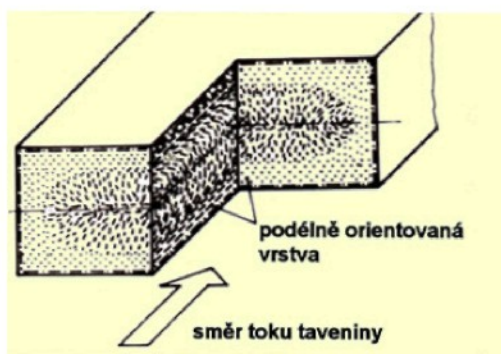
Obr. 2.13 Krystalická struktura výstřiku lineárního kopolymeru PE, při teplotě temperace formy: a) 20°C, b) 80°C s příslušnou tloušťkou povrchové vrstvy „ t_p “ /13/

2.1.2.2 Vliv orientace

K orientaci polymerních materiálů dochází při vlastním zpracování nebo cíleným zatěžováním (dloužením), kde se lineární polymery dostávají do orientovaného stavu účinkem vnější síly při teplotě umožňující skluz /3/. Vzhledem k zaměření této práce a skutečnosti, že při provozních podmínkách nemusí dojít u polymerů k překročení meze kluzu podmiňující počátek orientačního stavu, se bude další část zabývat výhradně orientací vzniklou při výrobě.

K orientaci vzniklé při výrobě dochází při zpracování termoplastů, u reaktoplastů se vlivem zesíťení neobjeví. Při zpracování, jako např. vstřikování, se chladnoucí tavenina plastu protlačuje vysokým tlakem vtokovým systémem a makromolekuly se v důsledku působení smykových sil narovnávají ve směru toku a v této nerovnovážné poloze ztuhnou. Čím více jsou makromolekuly vedle sebe, tím větší je stupeň orientace. Směr srovnání makromolekul určuje směr orientace. Výsledkem orientace je anizotropie vlastností, která má za následek mimo jiné vzrůst pevnosti ve směru orientace na úkor tažnosti a opačně pro směr kolmý na směr orientace /14/.

Stupeň orientace závisí na gradientu rychlosti a na viskozitě taveniny, ale také na vtokovém systému nástroje a na jeho rozměrech. S klesající smykovou rychlostí klesá i orientace. Pokud smykové napětí, vyvolávající orientaci, přestane působit dříve, než tavenina ztuhne, snaží se narovnané makromolekuly zaujmout zase svoji rovnovážnou polohu a orientace se neobjeví nebo pouze zčásti. Nastává dezorientace, nebo také snížení stupně orientace, která může nastat i dodatečně vlivem působení vyšších teplot /14/.



Obr. 2.14 Orientovaná textura vstřikovaného dílce /15/

Podmínky pro vznik orientované struktury nejsou ve všech místech výstřiku stejné, a proto se stupeň orientace ve výstřiku mění jednak ve směru tloušťky stěny, ale také se vzdáleností od vtoku (viz obr. 2.14). Tenká vrstvička plastu, která se

vytvoří na stěně formy zatuhne dříve, než na ní začnou působit smyková napětí a zůstane neorientovaná. Stupeň orientace v ostatních vrstvách závisí na velikosti smykového napětí v daném místě. Smyková napětí jsou největší ve vrstvě těsně sousedící se ztuhlou povrchovou vrstvou. Nacházejí se tedy v určité vzdálenosti pod povrchem výstřiku. Směrem k ose smyková napětí klesají až k nule. Stejně se mění i orientace makromolekul. Největší je těsně pod povrchem, v ose není žádná nebo malá /14/.

Obsahuje-li hmota vláknité plnivo, jsou vlákna vlivem smykových sil rovněž orientována do směru toku taveniny. Vlákna jsou ukládána ve hmotě velice složitým způsobem, kdy se vytváří vícevrstvá struktura s různou orientací vláken. V optimálním případě lze na průřezu nalézt čtyři vrstvy. Na povrchu je vrstva, ve které jsou vlákna uložena zcela chaoticky a nevykazuje tedy žádnou přednostní orientaci. Ve vrstvě pod ní jsou vlákna orientována ve směru toku, protože zde převládá podélné proudění. Třetí, přechodová vrstva, je opět bez přednostní orientace a uprostřed se nachází vrstva, ve které jsou vlákna orientována kolmo ke směru tečení. To proto, že v této vrstvě je určující příčné proudění. Výsledné vlastnosti výstřiku závisí na poměru tloušťek vrstev s podélnou a příčnou orientací /14/.

2.1.3 Vliv makroskopické struktury na deformaci polymerů

V souvislosti s deformačním chováním polymerů je vhodné zmínit se o makroskopické struktuře, která rovněž výrazným způsobem tento děj ovlivňuje. Makroskopická čili fázová struktura nabývá na významu pro plněné polymery, kompozity a polymerní směsi.

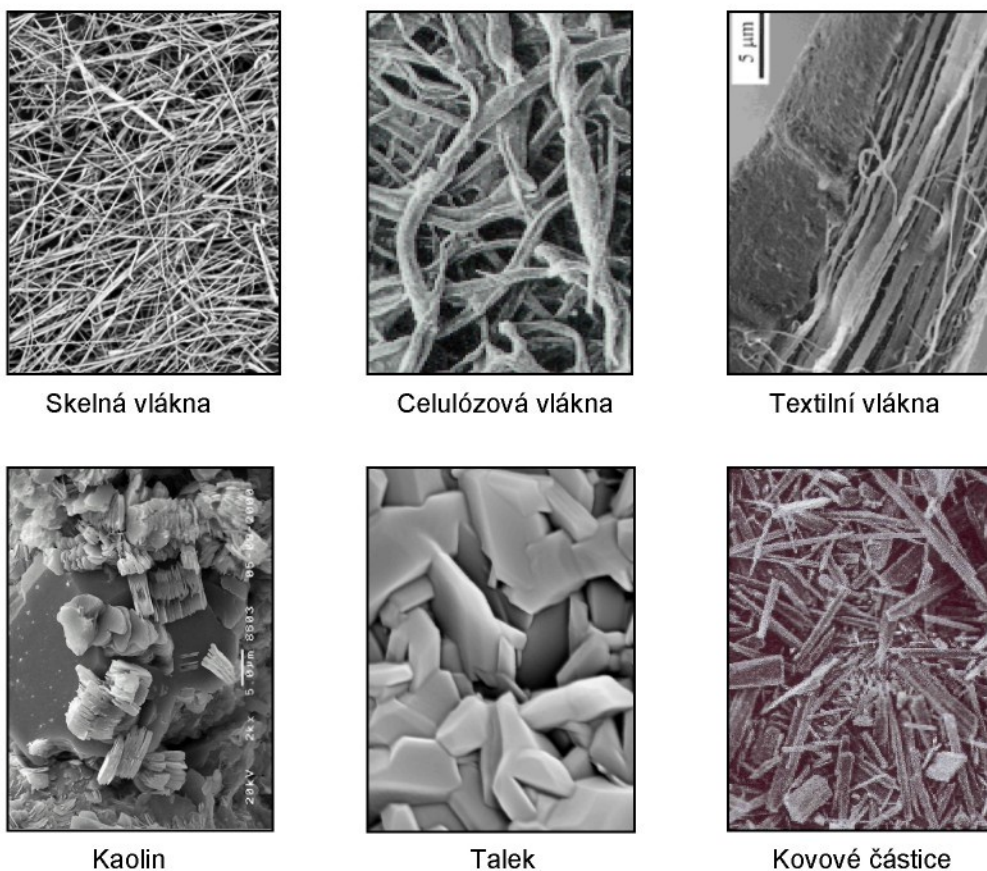
2.1.3.1 Vliv přísad na deformaci plněných polymerů

Pro výrobky z plastů se v běžné praxi nepoužívají pouze čisté polymerní materiály, nýbrž téměř vždy jsou do nich přidávány různé přísady, které v širokém rozsahu ovlivňují jejich výsledné vlastnosti. Z přísad mají pro deformační vlastnosti největší význam plniva (viz obr. 2.15). Ty lze vzhledem k účinku na mechanické vlastnosti plastu rozdělit na vyztužující a nevyztužující.

Přítomnost vyztužujících plniv se projevuje především zvýšením houževnatosti hmoty, dochází ovšem i k nárůstu dalších mechanických vlastností jako modulu pružnosti a pevnosti v tahu. Míru ovlivnění těchto vlastností určuje vzájemné působení polymerního materiálu (matrice) a plniv, u kterých je rozhodujícím faktorem jejich tvar, velikost, objemové zastoupení a použitý materiál. Z hlediska

deformačního chování jsou pro polymerní materiály nejvýznamnější skleněná nebo uhlíková vyztužující plniva ve formě kratších, či delších vláken. Méně účinná jsou vlákna bavlněná, či textilní, aj. Při porovnání délky vláken lze konstatovat, že lepší mechanické vlastnosti zajišťují vlákna dlouhá, která ovšem způsobují anizotropii vlastností vlivem jejich orientace vzniklé při výrobě (viz kap. 2.1.2.2) /3/.

Nevyztužující plniva se používají nejčastěji ve formě prášku (rozemletá břidlice, kaolin, aj.) a v některých případech mohou také zvýšit modul pružnosti a tvrdost plastu, ale houževnatost a tažnost, či pevnost zůstávají na úrovni samotného polymeru anebo se snižují /3/, /15/.



Obr. 2.15 Přísady používané v plastech /15/, /16/

2.1.3.2 Vliv makroskopické struktury kompozitů

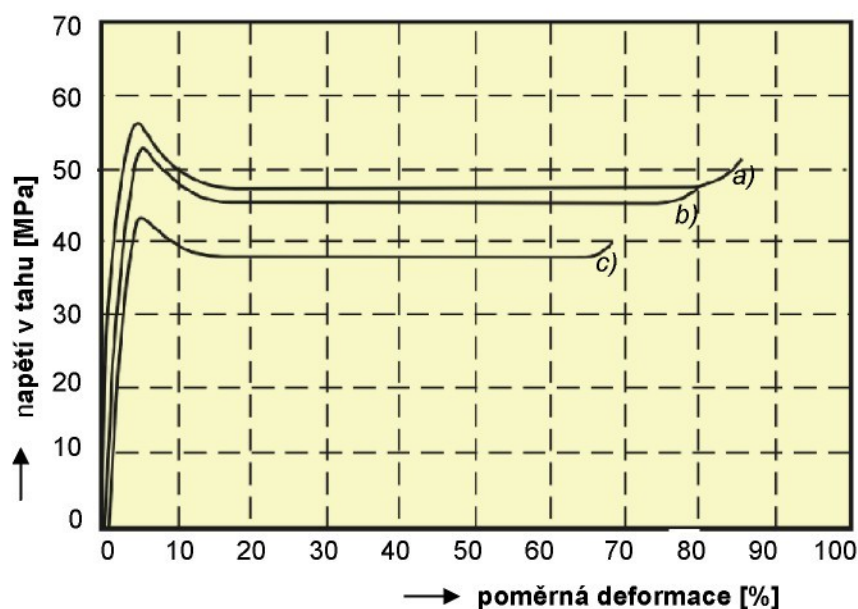
Deformační vlastnosti kompozitních materiálů obdobně jako vlastnosti plněných polymerů závisí na vlastnostech materiálových složek (polymeru a plniva), jejich distribuci (objemovém zastoupení a uspořádání), geometrickém tvaru a velikosti plniva, na jejich interakci s okolím, apod. Pro vyšší mechanické vlastnosti jsou opět výhodnější skleněná, či uhlíková dlouhovláknová plniva (viz tab. 2.4) /3/.

Tab. 2.4 Vliv materiálu dlouhých vláken v PP matrici na mechanické vlastnosti /17/

PP matrice	Pevnost v tahu [MPa]	Rázová houževnatost [kJ·m ⁻²]
30% skelných vláken	79,65	55,59
100% lnu	24,28	23,29
50% lnu, 50% sisalu	34,43	22,01
20% PES, 30% lýka	17,24	16,84
30% konopí, 30% bamb.vl.	18,42	10,33

2.1.3.2 Vliv makroskopické struktury polymerních směsí

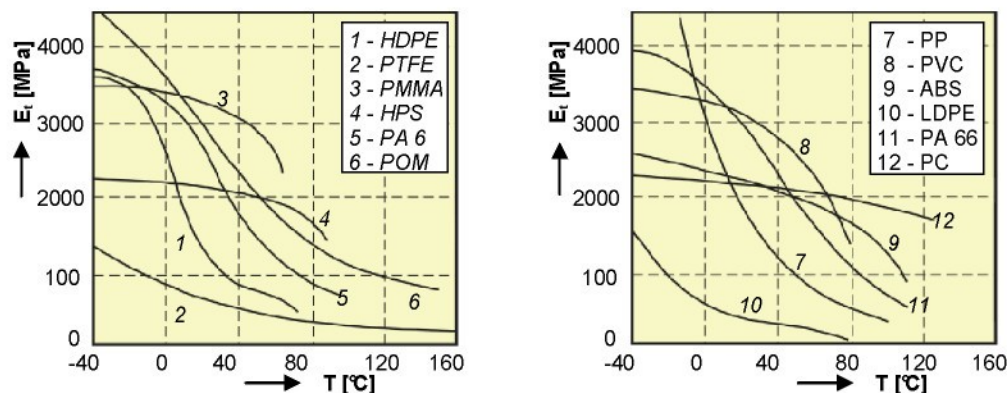
Deformační vlastnosti polymerních směsí jsou dány vlastnostmi jednotlivých polymerních složek, jejich objemovým zastoupením (viz obr. 2.16), ale také podmínkami přípravy. Jednotlivé složky si na rozdíl od kopolymerů uchovávají i ve směsi individuální vlastnosti /3/.



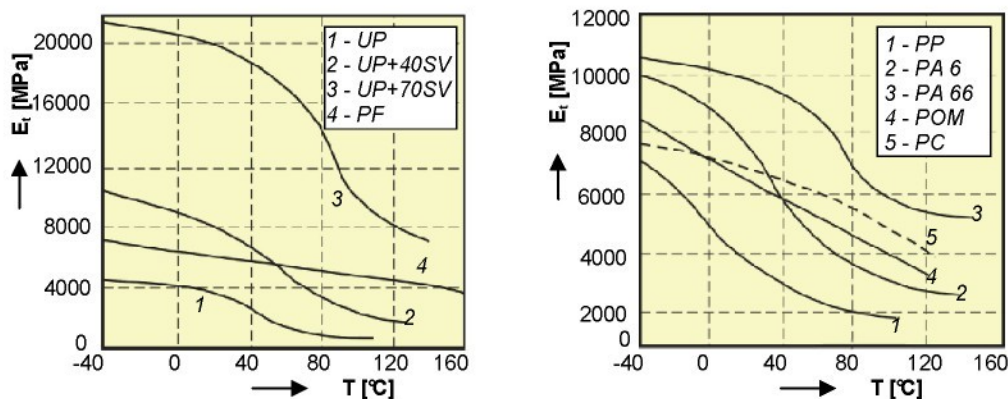
Obr. 2.16 Vliv jednotlivých složek polymerní směsi ABS+PC na mechanické vlastnosti /17/
a) PC 85 hmot. %, b) PC 65 hmot. %, c) PC 45 hmot. %

2.1.4 Vliv teploty na deformaci polymerů

Podobně jako u jiných materiálů jsou deformační vlastnosti plastů závislé na teplotě. Např. pevnost v tahu, modul pružnosti (viz obr. 2.17 až 2.19), tvrdost, zvyšováním teploty klesají, naproti tomu tažnost se s rostoucí teplotou zvyšuje. V určitých oblastech teplot (přechodových pásmech) se tyto změny vlastností zrychlují a mohou měnit skokem /3/.



Obr. 2.17 Závislost modulu pružnosti v tahu E_t na teplotě pro vybrané termoplasty /3/

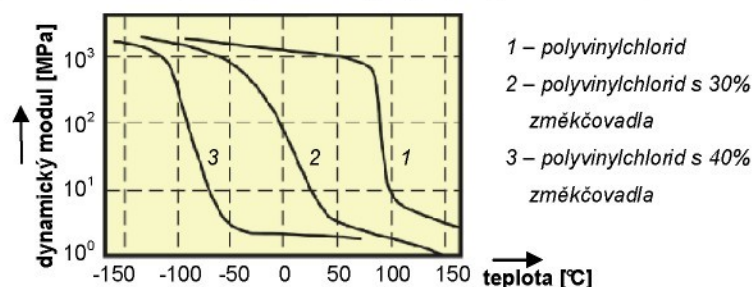


Obr. 2.18 Závislost E_t v tahu na teplotě vybraných reaktoplastů /3/

Obr. 2.19 Závislost E_t v tahu na teplotě některých vyztužených termoplastů s 30% obsahem skelných vláken /3/

2.1.4.1 Vliv teploty na lineární amorfnní polymery

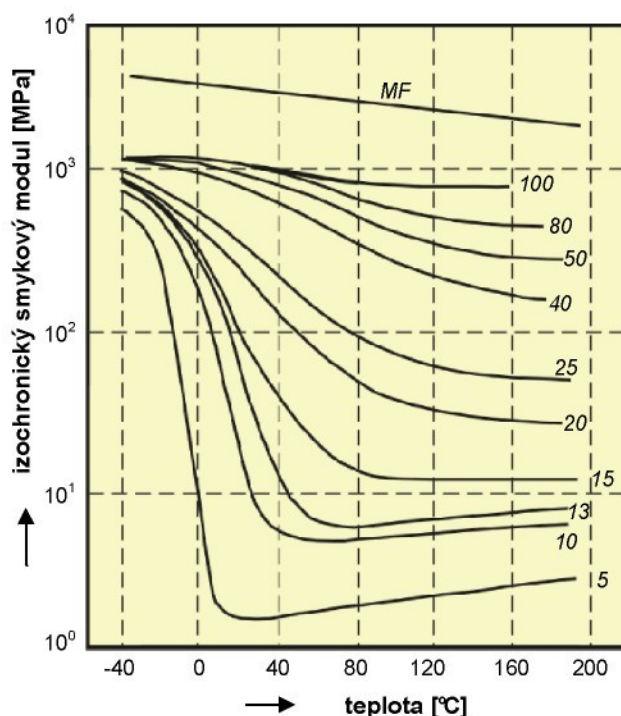
U amorfnních lineárních polymerů dochází k výrazné změně vlastností při teplotě označované jako teplota skelného přechodu (T_g). Pod T_g se polymer nachází ve sklovitém stavu a je tvrdý, křehký a má vysoký modul pružnosti. Nad teplotou T_g je ve stavu kaučukovitém a modul pružnosti výrazně klesá (až o tři řády), i malá napětí zde způsobují deformace až několik set procent /3/. Teplota zesklennění z hlediska molekulárních parametrů závisí na ohebnosti řetězce, na symetričnosti základních článků makromolekuly a na velikosti mezimolekulárních sil. Čím je ohebnost řetězců větší a mezimolekulární soudržnost menší, tím je teplota zesklennění nižší. Velikost mezimolekulárních sil je možné snížit přidávkem změkčovadel (viz obr. 2.20) nebo kopolymerací takových monomerů, kterými se zvyšuje pohyblivost makromolekul /3/



Obr. 2.20 Teplotní závislost dynamického smykového modulu polyvinylchloridu a jeho směsí se změkčovadlem ethylhexyljantaranem /6/

2.1.4.2 Vliv teploty na zesíťované amorfní polymery

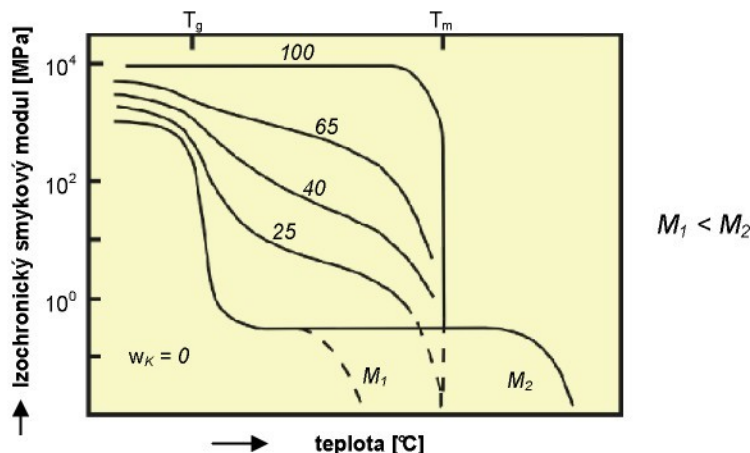
Zesíťované amorfní polymery se chovají ve srovnání s lineárními odlišně. Tuhá síť chemických vazeb způsobuje, že u nich při zvyšování teploty můžeme nalézt jen náznak kaučukovité pružnosti. Modul pružnosti má relativně vysokou hodnotu, která zůstává na vysoké úrovni až do teploty rozkladu. Závislost hustoty zesíťení na teplotě je patrná z obr. 2.21 /3/.



Obr. 2.21 Vliv stupně zesíťování na teplotní závislosti izochronického smykového modulu /6/
MF – melaminofermaldehydová pryskyřice. Ostatní křivky: jsou kopolymer ethylakrylátu s ethylenglykoldimethakrylátem, čísla na křivkách udávají (molární %) zastoupení druhé složky

2.1.4.3 Vliv teploty na semikrystalické polymery

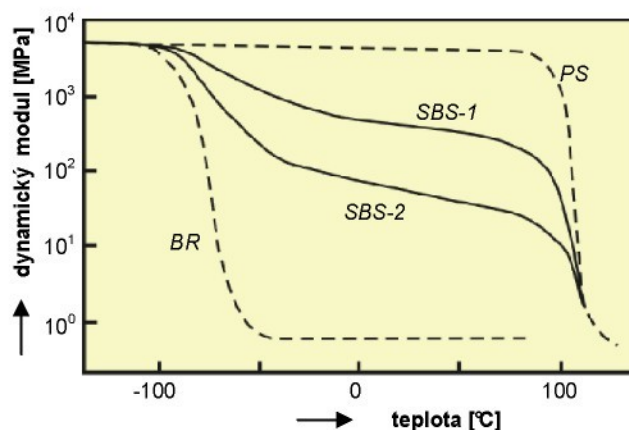
U semikrystalických polymerů dochází k nejrychlejším změnám vlastností v oblasti teplot, kterou charakterizuje teplota tání (T_m). Samotná výše teploty tání závisí na velikosti makromolekul, tedy její molekulové hmotnosti a na velikosti mezimolekulárních přitažlivých sil. Zvětšení obou veličin má za následek zvyšování teploty tání. Protože semikrystalické polymery obsahují určité množství amorfních podílů, lze u nich stanovit i teplotu zesíťování charakterizovanou výraznější změnou vlastností. Tyto změny se ovšem dotýkají pouze amorfní složky hmoty, tudíž čím polymer vykazuje vyšší stupeň krystalinity, tím jsou změny při T_g méně patrné (viz obr. 2.22) /3/.



Obr. 2.22 Vliv stupně krystalinity na tvar teplotních závislostí izochronického modulu /6/

2.1.4.4 Vliv teploty na polymerní směsi

U polymerních směsí je závislost vlastností na teplotě dána vlastnostmi polymerních složek (objemovým zastoupením, podmínkami přípravy). Na obr. 2.23 je znázorněna teplotní závislost dynamického modulu pro směs polystyrenu s polybutadienem. Obě vzniklé fáze se chovají více méně nezávisle a každá fáze vykazuje svůj hlavní přechod (T_g a T_m). Intenzita přechodu závisí na zastoupení fází. Směs SBS-1 se připraví odpařením roztoku polymeru v methylethylketonu, který je dobrým rozpouštědlem polystyrenu a termodynamicky horším rozpouštědlem polybutadienu. Po odpaření vzniká struktura s převažující fází polystyrénovou. Tato směs pak vykazuje v teplotní oblasti mezi oběma přechodovými teplotami téměř desetkrát vyšší tuhost než směs SBS-2, jenž se připraví v roztoku CCL_4 , který je dobrým rozpouštědlem pro polybutadien. Chování podobného typu, s dvěma teplotami T_g a dvěma přechodovými oblastmi, vykazuje řada dalších dvoufázových systémů, jako např. směsi vzájemně nerozpustných nemísitelných polymerů /6/.



Obr. 2.23 Teplotní závislost dynamického modulu /6/

PS – polystyren, BR – polybutadienový kaučuk, SBS 1– blokový polymer odpařený z roztoku methylethylketonu, SBS 2 – odpařený z roztoku v CCL_4

2.1.5 Vliv viskoelasticity na deformaci polymerů

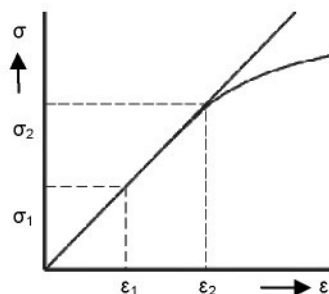
Viskoelastická ovlivňuje a to do větší, či menší míry chování plastů při mechanickém namáhání. Způsob ovlivnění závisí na teplotě, použitém materiálu a také na době působení zatížení, resp. rychlosti zatěžování. Při deformaci obecného materiálu rozeznáváme dva mezní případy deformace a to ideálně pružné těleso (ideální elasticitu) a ideálně viskózní kapalinu (ideální plasticitu). Složitá struktura polymerů se však projevuje v jejich komplikovanějším deformačním chování. Makromolekulární látky totiž na vnější namáhání reagují tak, že deformace většinou zahrnuje současně složku elastickou (okamžitou deformaci valenčních úhlů, vazeb a mezimolekulových vzdáleností), plastickou (viskózní tok) a navíc ještě tzv. deformaci zpožděně elastickou /3/.

2.1.5.1 Ideální pružnost (ideální elasticita)

Deformace ideálně pružného tělesa se projevuje tak, že se těleso deformuje o určitou hodnotu, která nezávisí na době působení síly. Při zatížení se atomy vykloní ze své klidové polohy, jejich atomová vzdálenost se zvětší. Po odlehčení se těleso okamžitě vrací do původního tvaru, atomy zaujmou opět svoji klidovou polohu. Z reologických modelů tento děj lze popsat modelem ideální pružiny (viz obr. 2.25) /1/, /5/.



Obr. 2.25 Reologický model Ideální pružiny /5/



Obr. 2.26 Stanovení meze linearity u elastické látky /5/

Pro deformaci ideálně pružného tělesa platí Hookeův zákon (2.1), podle něhož jsou napětí a deformace úměrné. Hodnotou úměrnosti je modul pružnosti (E), který je v oblasti lineární elasticity (viz obr. 2.26) konstanta závisící na druhu materiálu, čase (době a rychlosti zatěžování), prostředí a teplotě. Porovnáme-li hodnoty modulu pružnosti jednotlivých materiálů (viz tab.2.5) dojdeme k závěru, že E je mírou pružnosti daného materiálu. Dále pak lze konstatovat, že čím je E menší, tím vyšší je tažnost polymerů /1/, /3/.

$$\sigma = E_t \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Kde je σ – normálové napětí [MPa]; E_t – modul pružnosti v tahu [MPa]; ε – deformace [%] /5/.

Tab. 2.5 Hodnoty modulu pružnosti materiálů stanovených při $T=23^{\circ}\text{C}$ /3/

Materiál	Modul pružnosti	
Neorientované krystalické polymery	$E = 100 \div 2\,000$	MPa
Lineární amorfnní plasty s teplotou pod T_g	$E = 2\,500 \div 4\,000$	MPa
Amorfnní polymery se zesíťovanou strukturou	$E = 4\,000 \div 10\,000$	MPa
Plasty s vláknitými plnivy	$E = 20\,000 \div 50\,000$	MPa
Vyztužené plasty s termoplastickou maticí	$E = 20\,000$	MPa

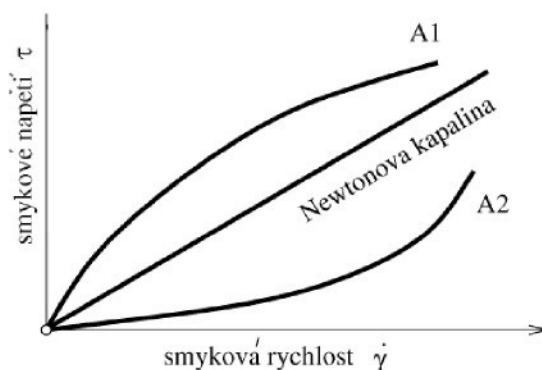
Elastická deformace se projevuje především při teplotách hluboko pod T_g , kde se materiál nachází ve sklovitém stavu. Je tedy charakteristická především pro amorfnní lineární a zesíťené polymery. Naopak u vysoce krystalických polymerů je elastická deformace velmi malá (několik %). Z hlediska časového faktoru se uplatňuje především při velmi malých časech měření /3/.

2.1.5.2 Ideální viskoznní kapaliny (ideální plasticita)

Při deformaci ideálně viskoznní kapaliny dochází vlivem působení vnějšího napětí k posuvu jednotlivých vrstev kapaliny, nastává tok. Mezi napětím a deformací se rovnováha neustaví, nýbrž deformace narůstá po celou dobu působení síly. Po zrušení napětí zůstane zachován deformovaný stav, který závisí na hodnotě smykového napětí, době působení síly, teplotě a materiálu polymeru. V modelové technice ideálně viskoznní kapalinu znázorňuje válec s netěsným pístem pohybujícím se v kapalině s viskozitou η (viz obr. 2.27) /3/, /5/.



Obr. 2.27 Reologický model ideálně viskoznní kapaliny – ideální píst /2/



Obr. 2.28 Tokové křivky pro: A1 - pseudoplastickou kapalinu, A2 - dilatantní kapalinu /18/

Viskozní kapaliny lze rozlišit dle průběhu deformačního chování vyvolaného smykovým napětím na newtonské a nenewtonské (viz obr. 2.28). Newtonské kapaliny se řídí Newtonovým zákonem (2.3), kde je rychlost toku (deformace) přímo úměrná napětí. Tato lineární závislost je splněna jen u některých látek, jako například u sklovitých, či velmi tvrdých plastů /1/. Z uvedeného zákona je patrné, že pro chování Newtonské kapaliny za působení smykového napětí je důležitým faktorem dynamická viskozita, která je při dané teplotě materiálovou konstantou (nezávisí na rychlosti deformace ani čase) /5/.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau}{\eta} \quad (2.3)$$

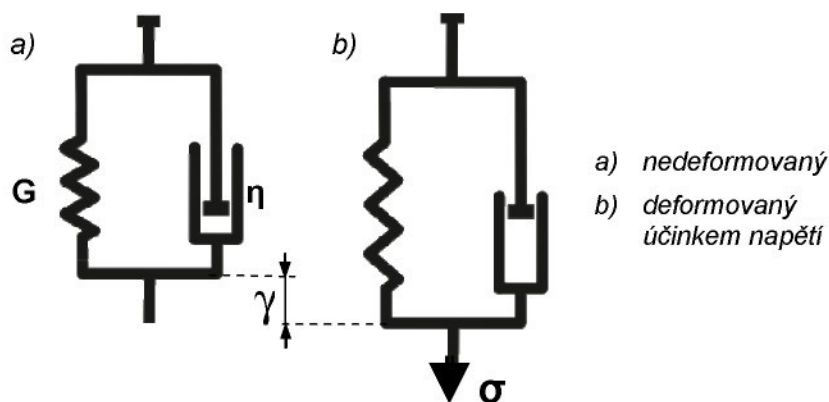
$$D = \phi \cdot \tau^m \quad (2.4)$$

Kde je: $\frac{d\gamma}{dt}$ - rychlost smykové deformace [m.s^{-1}], τ - smykové napětí [Pa]; η - dynamická viskozita [Pa.s]; D - smyková rychlost [s^{-1}]; Φ - koeficient tekutosti [s^{-1} po úpravě]; m - konstanta mocninového zákona [-].

V případě nenewtonských kapalin dobře vyhovuje reologickému popisu mocninový zákon (2.4). Míra výskytu trvalé deformace je výrazně ovlivněna termodynamickým stavem a časovým faktorem zatěžování. Je-li materiál ve sklovitém stavu (T_g), lze považovat trvalou deformaci za zanedbatelnou, s postupným nárůstem teploty se uplatnění plastické deformace zvětšuje až při teplotě T_f , resp. T_m převládá. Z hlediska časového faktoru se projevuje především, působí-li síla po dlouhou dobu, aby se deformace mohla plně rozvinout /3/.

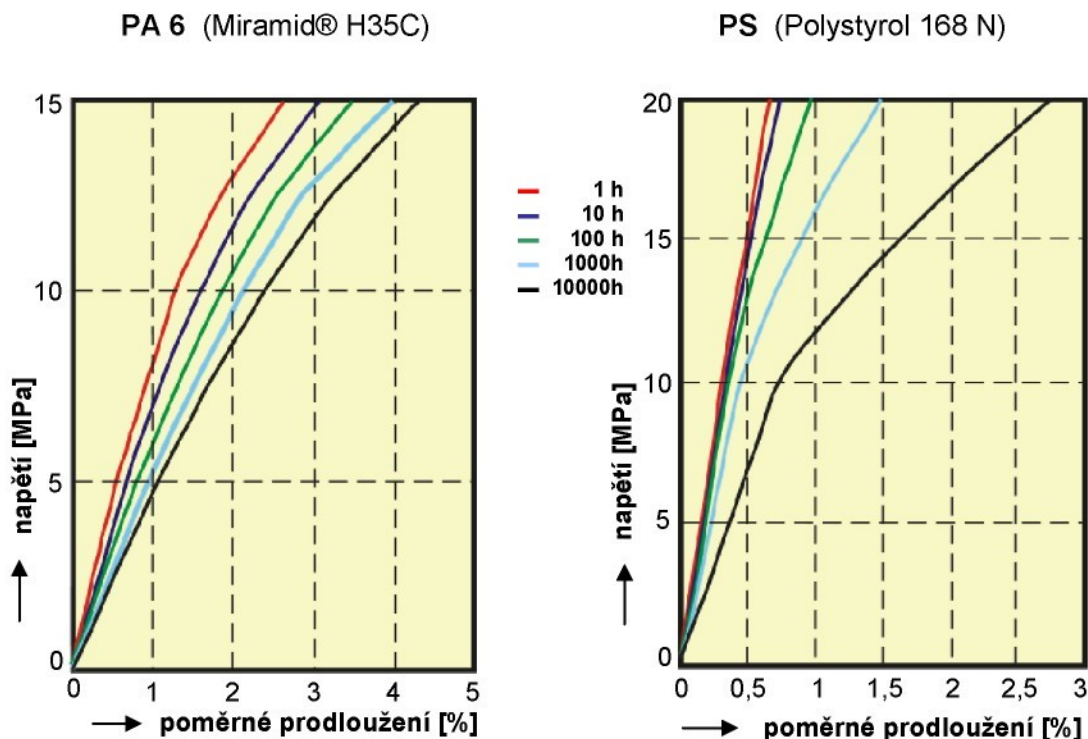
2.1.5.3 Zpožděně elastické deformační chování

Působí-li na polymerní látku konstantní smykové napětí τ , vznikne smyková deformace γ , která je závislá na čase složitějším způsobem než u dokonale pružných a ideálně viskózních látek. Těleso se po odlehčení nevrátí ihned do výchozí polohy, tento proces trvá určitou dobu. U tělesa současně působí časově nezávislé pružné (elastické) a časově závislé viskosní vlastnosti /3/. Pro popis deformačního chování pomocí reologických modelů je tedy nutné vzájemné propojení obou mezních modelů (viz obr. 2.29).



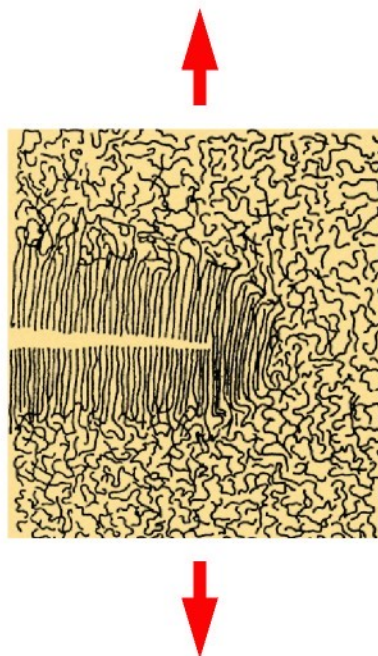
Obr. 2.29 Kelvinův model představující zpožděně elastické chování /6/

Jak již bylo řečeno makromolekulární látky se projevují poněkud komplikovanějším deformačním chováním, než-li bylo uvedeno v předcházejících řádcích. Ve skutečnosti se v polymerech v závislosti na teplotě, době zatěžování a materiálu vyskytují všechny zmiňované stavy. Z hlediska materiálu je velmi důležitým prvkem nadmolekulární struktura materiálu, která je při standardních podmínkách charakteristická určitým stavem (sklovitý, kaučukovitý) ovlivňujícím míru zastoupení jednotlivých deformací. Viskoelastické vlastnosti lze posuzovat například pomocí izochronních křivek, kde u semikrystalických polymerů dochází k výraznějšímu přírůstku protažení s ohledem na čas, než je tomu u amorfních polymerů (viz obr. 2.30).



Obr. 2.30 Izochronní křivky semikrystalického PA 6 a amorfního PS /19/

V důsledku viskoelastického chování jsou vzniklé deformace, a to i při malém napětí, závislé na době působení. Při nižších teplotách a v krátkém čase se objevuje větší podíl elastického chování, zatímco při vyšších teplotách a delších časech se chování plastů blíží vazkým kapalinám s plastickými vlastnostmi. Podstata plastické deformace je vysvětlována mikrodeformacemi typu křezu a smykového pásu. Křezy (viz obr. 2.31) jsou objemovou vadou, které vznikají při deformaci polymeru. Jedná se o deskovité útvary orientované kolmo na tahové napětí, ve kterých došlo k výraznému vytažení polymerních řetězců, fibril a tím k snížení lokální měrné hmotnosti polymeru. Porušováním fibril a vzájemnou interakcí křezů se formují trhliny [20].



Obr. 2.31 Mechanismus molekulární orientace během lomu (Berry⁶²) [20]

2.2 METODY ANALÝZY DEFORMACE POLYMERŮ

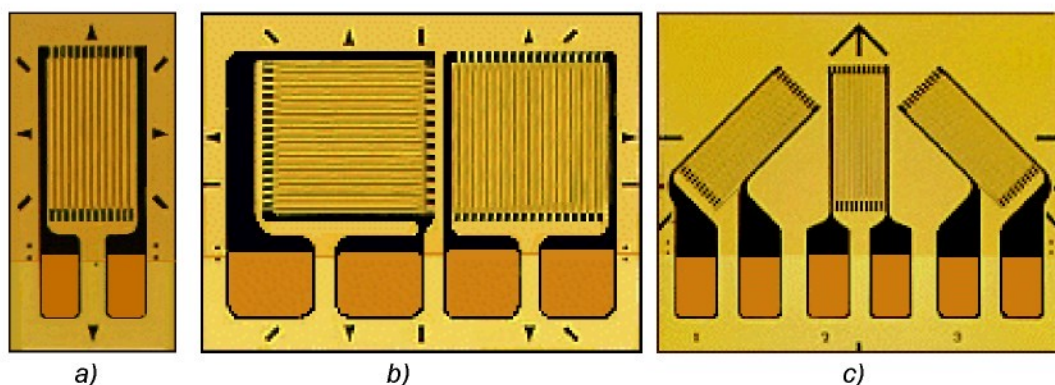
Způsobů stanovení a hodnocení deformace existuje mnoho, ale ne všechny lze použít pro polymerní materiály. Metody běžně používané pro kovy, např. metody deformačních sítí nebo některé optické měřicí systémy pracují na principu posuzování deformace síťového rastru (mřížky) naneseného na zkoumaný objekt mechanicky nebo leptáním. Tento způsob přípravy zkušebního vzorku je pro plasty nepřijatelný, jelikož by došlo k ovlivnění povrchových vlastností a tím ke zkreslení celkových výsledků. Pro polymery se proto používá měření deformace např. pomocí tenzometrů, extenzometrů nebo vhodných optických metod.

2.2.1 Analýza deformace pomocí tenzometrů

Měřením změn rozměrů zkoumaného objektu pomocí tenzometrů získáme hodnoty povrchové deformace deformačního pole. Z celého spektra tenzometrů (mechanické, optické, elektrické) se pro stanovení deformace nejvíce používají tenzometry elektrické pizorezistivní (odporové), které lze dále dělit na kovové a polovodičové (např. křemíkové) /21/.

Kovové i polovodičové tenzometry napájené stejnosměrným nebo střídavým proudem, jsou-li vystaveny mechanické deformaci, mění ohmický odpor. U kovových tenzometrů je změna ohmického odporu způsobena změnou průřezů drátků měřicí mřížky a její délky. U polovodičových tenzometrů je způsobena především změnou jejího měrného odporu – což je primární projev piezorezistentního jevu /22/.

Měřicí mřížky kovových tenzometrů (viz obr. 2.32) jsou nejčastěji vinuty z konstantanového drátku o průměru $2 \cdot 10^{-2}$ až $1 \cdot 10^{-2}$ mm nebo jsou leptány z konstantanové fólie na tloušťku např. 10^{-3} mm. Přesnost měření pozitivně ovlivňuje nízký teplotní součinitel elektrického odporu konstantanu $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}/\text{K}$. Např. v rozsahu teplot -10°C až 40°C je u nejlepších snímků celková chyba vztažená ke jmenovité hodnotě senzoru menší než $10^{-2} \%$. Vedle tenzometrů pro měření povrchové deformace v tahu a tlaku v určeném směru jsou vyráběny např. tenzometry s mřížkami vzájemně pootočenými o 45° určené k měření torzní povrchové deformace /22/, /23/.



Obr. 2.32 Fóliové mřížky kovových tenzometrů:

a) pro měření deformací v tahu a tlaku, b) deformací v rovině, c) torzní povrchové deformace /22/

Polovodičové tenzometry se k měření deformačních polí používají pouze výjimečně v případech, kdy je třeba měřit extrémně malé deformace na malé ploše. Jejich předností je vysoká citlivost, která je přibližně 60krát větší, než u kovových tenzometrů /22/.

Při použití odporových tenzometrů je třeba upozornit na některé nepříznivé jevy, které mohou způsobit odchylky naměřených a reálných hodnot. Většina používaných materiálů pro tenzometrické snímače jsou citlivé na teplotní změny a mají sklon měnit odpor s časem. Přesnost snímače je kromě materiálu tenzometru ovlivněna i jeho tvarem, případně způsobem výroby (tepelným zpracováním), atd. Také přichycení tenzometru pomocí tenké vrstvy tmelu (nejčastěji epoxidové pryskyřice), která zároveň vytváří izolační odpor, může určitým způsobem ovlivnit správnost výsledků /22/, /23/.

2.2.2 Analýza deformace pomocí extenzometrů

Extenzometr, nebo-li průtahoměr je zařízení měřící délku protažení zkoumaného objektu. Vzhledem k dobrému poměru ceny a přesnosti měření se v běžné praxi používají nejvíce extenzometry mechanické (viz obr.2.33), které standardně dosahují citlivosti 10^{-3} mm. Jedná se o snadno demontovatelná jednoduchá zařízení, u kterých se posouvá funkční část v závislosti na prodloužení zatěžovaného objektu. Kromě mechanických extenzometrů se používají i extenzometry elektrické, optické, aj. /24/.



Obr. 2.33 Manuální extenzometr firmy LaborTech s.r.o /24/

Pomocí prodloužení extenzometru upnutého na trhačím zařízení lze stanovit hodnotu poměrné deformace v příslušném směru namáhání. Jistou nevýhodou mechanických extenzometrů je určité negativní ovlivnění přesnosti naměřených dat. Nepřesnost zde může způsobit např. prokluz upnutého zkušebního vzorku, ztrátový zdvih, hmotnost a setrvačnost použitých prvků, atd.

2.2.3 Analýza deformace pomocí optických metod

Optické metody snímání deformace společně s počítačovým zpracováním naměřených dat představují výkonný a přesný způsob měření deformací. Optických metod k stanovení deformačních vlastností existuje několik. Pro polymerní materiály je nejvýhodnější měřicí metodou aktivní, či pasivní triangulace. Představitelem takového řešení je měřicí systém ARAMIS německé firmy GOM GmbH.

2.2.3.1 Měřicí systém ARAMIS

ARAMIS je bezkontaktní měřicí systém pro měření reálných 3D deformací. Systém pracuje na principu pasivní triangulační techniky, která zahrnuje různé druhy digitální fotogrammetrie. „Pasivní“ znamená, že není uvažováno geometrické uspořádání osvětlení.



Obr. 2.34 Snímací zařízení (CCD kamery) měřicího systému ARAMIS /25/

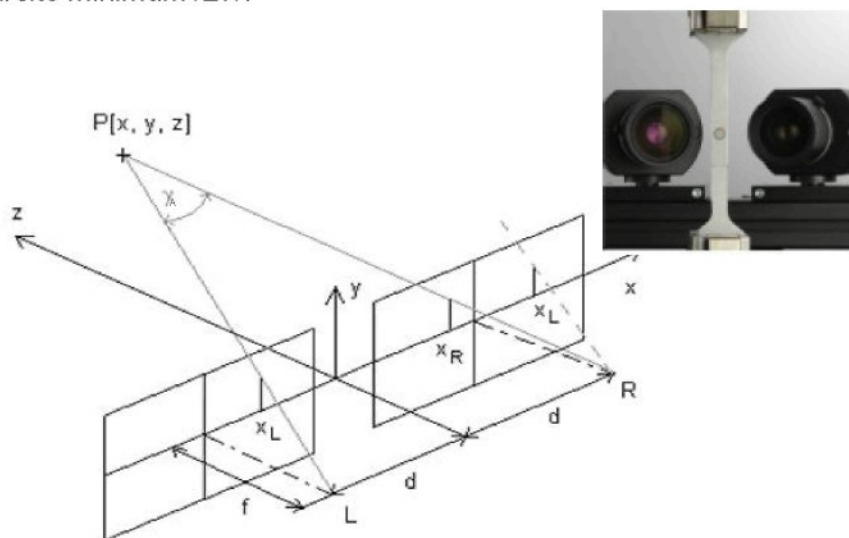


Obr. 2.35 Nepravidelný rastr na zkoumaném objektu /25/

Princip měření spočívá v nanesení nepravidelného, případně pravidelného rastru na zkoumaný objekt, který se deformuje zároveň s objektem. Nanášení stochastického (náhodného) rastru (viz obr.2.45) je snadnější a jeho vyhodnocení přesnější. Vzorek je deformován a současně snímán kamerami (viz obr.2.34), které obsahují CCD (Charge Coupled Device) čip. CCD čip je polovodičový prvek obsahující fotocitlivou plošku rozdělenou na bodový rastr, který je schopen měřit intenzitu na něj dopadajícího světla. Proces měření (zachycení snímku deformovaného rastru) může být spouštěn v pravidelných časových intervalech (např. s prodlevou 1s) nebo se může řídit externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje). Použitím systému HS (high speed), lze dosáhnout maximální rychlost snímkování až 120 000 snímků za sekundu. Ze snímků jsou pomocí tzv. „Image processingu“ vypočteny 3D souřadnice bodů rastru. Porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá 3D posuvy, tvar deformovaného objektu, 3D deformace, aj. /26/, /27/.

Systém ARAMIS využívá pro 3D měření jednoduché a často používané techniky – stereovidění. Tento princip vychází z poznatku, že lidské oko vytváří středový obraz pozorovaného předmětu na sítnici. Pokud pozorujeme předměty oběma očima, vidíme je prostorově nebo stereoskopicky. Je to dáno tím, že pravé a levé oko vytváří na sítnici vždy samostatný obraz. Tyto obrazy jsou odlišné. Sdružené zorné paprsky se protínají v příslušném bodě v prostoru. Techniky založené na stereovidění se snaží napodobit lidský zrakový systém. Místo očí

používají dva snímače (CCD kamery) s rovnoběžnými optickými osami, jejichž vzájemná vzdálenost středů je asi 65 mm (přibližně stejná jako vzdálenost očí). Snímáním zkoumaného objektu se získají dva stereoskopické snímky (dva perspektivní obrazy). Důležitý je úhel, který svírají oba sdružené paprsky, tzv. úhlová paralaxa (viz úhel γ_A na obr. 2.36). Bod P je měřený bod a body L a R jsou ohniska kamer. Pro body bližší pozorovateli je paralaxa větší, než pro body vzdálenější. Aby se prostorové vidění náležitě uplatnilo, nesmí její velikost klesnout pod určité minimum /27/.



Obr. 2.36 Princip stereoskopického (3D) vidění /25/, /27/

Systém ARAMIS je systém s vysokou časovou přesností, s vysokým lokálním rozlišením a širokou možností použití. Jeho výhodou je velký rozsah měření, kde lze měřit objekty od velikosti 1mm do 1000 mm, možnost měření deformace od 0,05% až do stovek %. Další výhodou je jednoduchá příprava povrchu objektu (nepravidelný i pravidelný rastr), vysoká hustota naměřených dat (bodů na povrchu objektu), mobilita (systém lze jednoduše přenášet), flexibilita (snadná změna velikosti záběru a rozlišitelnosti systému) /25/, /26/.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je analýza vlivu materiálu na poměrnou povrchovou deformaci, která do určité míry reprezentuje deformační chování v rámci tloušťky zkušební tělesa a posouzení deformačních vlastností vybraných částí povrchu vzorku (posunutí a rychlost posunutí vybraných bodů) za působení jednoosého tahového namáhání pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS. Experimentální část je rozdělena do dvou hlavních kapitol. V první části jsou definovány použité materiály, v druhé je uveden popis a hodnocení experimentálního měření poměrných povrchových deformací, posunutí a rychlostí posunutí vybraných částí povrchu přístrojem ARAMIS 2M.

3.1 ZKOUMANÉ MATERIÁLY

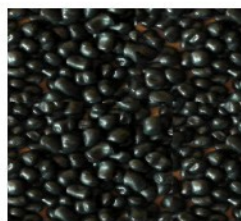
V rámci analýzy vlivu materiálu na poměrnou povrchovou deformaci, či deformační chování vybraných částí povrchu, byly posuzovány polyolefiny PP Mosten GB 005, PE Liten MB 62 a dále polymerní směs PBT/ASA Ultradur S 4090 GX a amorfní polymer PMMA Plexiglas 7H (viz obr. 3.1).



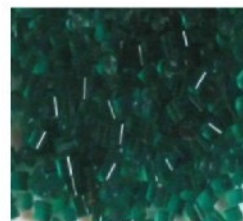
Mosten GB 005



Liten MB 62



Ultradur S 4090 GX



Plexiglas 7H

Obr. 3.1 Zkoumané polymerní materiály

3.1.1 Mosten GB 005

Polypropylen Mosten GB 005 je víceúčelový homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností a základní aditivací. Používá se především k výrobě fólií s následným tvarováním pro potravinářské účely. Další využití nalézá pro vstřikované díly, pro výrobu tkacích pásků, provazů, motouzů atd. V tab. 3.1 jsou uvedeny typické hodnoty fyzikálních vlastností. Jedná se o údaje informativního charakteru, které netvoří meze specifikací [28].

Tab. 3.1 Fyzikální vlastnosti materiálu Mosten GB 005 /28/

Fyzikální vlastnosti	Podmínky měření	Hodnota	Jednotka	Norma
Hustota	-	904	kg.m ⁻³	ISO 1183
Hmotnostní index toku taveniny	230°C/2.16 kg	5	g/10 min	ISO 1133
Modul pružnosti v ohybu	2 mm/min	1550	MPa	ISO 178
Napětí na mezi kluzu v tahu	50 mm/min	34	MPa	ISO 527-2
Poměrné prodloužení na mezi kluzu	50 mm/min	>100	%	ISO 527-2
Vrubová houževnatost dle Charpy	+23°C	4	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eA
Vrubová houževnatost dle Charpy	-20°C	-	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eA
Tvarová stálost za tepla HDT	1.80 MPa	56	°C	ISO 75-2
Teplota měknutí dle Vicata	A (10N)	157	°C	ISO 306
Doporučená teplota taveniny pro zpracování	-	220-280	°C	-
Doporučená teplota temperačního média		20-60	°C	-

3.1.2 Liten MB 62

Polyetylen Liten MB 62 je homopolymer vhodný pro vstřikování konstrukčních dílů, další využití nalézá např. k výrobě obalů pro farmaceutické produkty. Hodnoty typických fyzikálních vlastností jsou uvedeny v tab. 3.2 /29/.

Tab. 3.2 Fyzikálních vlastností materiálu Liten MB 62 /29/

Fyzikální vlastnosti	Podmínky měření	Hodnota	Jednotka	Norma
Hustota	-	960	kg.m ⁻³	ISO 1183
Hmotnostní index toku taveniny	190°C/2.16 kg	6	g/10 min	ISO 1133
Modul pružnosti v ohybu	2 mm/min	900	MPa	ISO 178
Napětí na mezi kluzu v tahu	50 mm/min	24	MPa	ISO 527-2
Poměrné prodloužení na mezi kluzu	50 mm/min	10	%	ISO 527-2
Vrubová houževnatost dle Charpy	+23°C	6,3	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eA
Vrubová houževnatost dle Charpy	-20°C	-	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eA
Teplota měknutí dle Vicata	A (10N)	122	°C	ISO 306
Doporučená teplota taveniny pro zpracování	-	200-295	°C	-
Doporučená teplota temperačního média		20-60	°C	-

3.1.3 Ultradur S 4090 GX

Ultradur S 4090 GX je polymerní směs vzniklá mícháním a následným vytlačováním částí krystalických polyesterů PBT a amorfních styrenů ASA, s přídavkem 14% skelných vláken. Vzniklá směs vyniká vysokou odolností vůči vysokým teplotám (viz tab. 3.3), vysokou rozměrovou stabilitou výrobků a výbornou odolností proti stárnutí (díky ASA). Používá se pro automobilový průmysl, konkrétně pro části interiéru (přístrojové desky), díly v domácnosti, např. zásuvky, aj. /30/.

Tab. 3.3 Fyzikálních vlastností polymerní směsi Ultradur S 4090 GX /30/

Fyzikální vlastnosti	Podmínky měření	Hodnota	Jednotka	Norma
Hustota	-	1330	kg.m ⁻³	ISO 1183
Hmotnostní index toku taveniny	275°C/2.16 kg	23	g/10 min	ISO 1133
Napětí na mezi kluzu v tahu	5 mm/min	100	MPa	ISO 527-2
Poměrné prodloužení po přetržení	5 mm/min	3,2	%	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu	1 mm/min	5500	MPa	ISO 527-2
Vrubová houževnatost dle Charpy	+23°C	8	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eA
Vrubová houževnatost dle Charpy	-20°C	-	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eA
Rázová houževnatost dle Charpy	+23°C	52	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eU
Rázová houževnatost dle Charpy	-20°C	-	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eU
Tvarová stálost za tepla HDT	0.45 MPa	210	°C	ISO 75-2
Tvarová stálost za tepla HDT	1.80 MPa	170	°C	ISO 7 5-2
Doporučená teplota taveniny pro zpracování	-	250-275	°C	-
Doporučená teplota temperačního média		60-80	°C	-

3.1.4 Plexiglas 7H

PMMA Plexiglas 7H je amorfní termoplastický polymerní materiál, který se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi (viz tab. 3.4): vysokou tvrdostí, tuhostí a pevností, jakož i výbornou kvalitou povrchu (vysokým leskem, odolností proti poškrábání) a možností leštění. Dále se vyznačuje vynikající tepelnou odolností, dobrými elektrickými i dielektrickými vlastnostmi a výbornou odolností proti povětrnostnímu stárnutí. Lze jej dobře zpracovávat i následně mechanicky opracovávat. Použití nalézá především pro vytlačované optické profily (např. okenní profily), desky, či vícevrstvé desky a trubky. Lze jej rovněž použít pro výrobu šroubů a na podobné účely /31/.

Tab. 3.4 Fyzikálních vlastností materiálu Plexiglas 7H /31/

Fyzikální vlastnosti	Podmínky měření	Hodnota	Jednotka	Norma
Hustota	-	1190	kg.m ⁻³	ISO 1183
Hmotnostní index toku taveniny	230°C/ 3,8 kg	1,4	g/10 min	ISO 1133
Napětí na mezi kluzu v tahu	5 mm/min	76	MPa	ISO 527-2
Poměrné prodloužení po přetržení	5 mm/min	5,5	%	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu	1 mm/min	3200	MPa	ISO 527-2
Rázová houževnatost dle Charpy	+23°C	20	kJ.m ⁻²	ISO 179/1 eU
Tvarová stálost za tepla HDT	0.45 MPa	210	°C	ISO 7 5-2
Tvarová stálost za tepla HDT	1.80 MPa	210	°C	ISO 75-2
Teplota měknutí dle Vicata	B (50 N)	103	°C	ISO 306
Doporučená teplota taveniny pro zpracování	-	220 -260	°C	-
Doporučená teplota temperačního média		60-80	°C	-

3.2 ANALÝZA POMĚRNÉ POVRCHOVÉ DEFORMACE A

DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ ČÁSTÍ POVRCHU SYSTÉMEM ARAMIS

Tato kapitola se zabývá posouzením poměrné povrchové deformace a deformačního chování vybraných částí povrchu polymerních materiálů (viz kap. 3.1) v závislosti na působení jednoosého tahového namáhání a to pomocí 3D optického měřicího systému ARAMIS.



Obr. 3.2 Optický měřicí systém ARAMIS 2M /26/

Měření bylo provedeno pomocí měřicího systému ARAMIS 2M firmy Gom Optical Measuring Techniques (viz obr. 3.2). Systém ARAMIS je složen ze snímacího zařízení (dvou CCD kamer), příslušného hardwarového a softwarového vybavení a počítače (notebooku) umožňující jejich vzájemnou komunikaci, případně světelného zdroje. Parametry přístroje jsou uvedeny v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Technické parametry přístroje ARAMIS 2M /26/

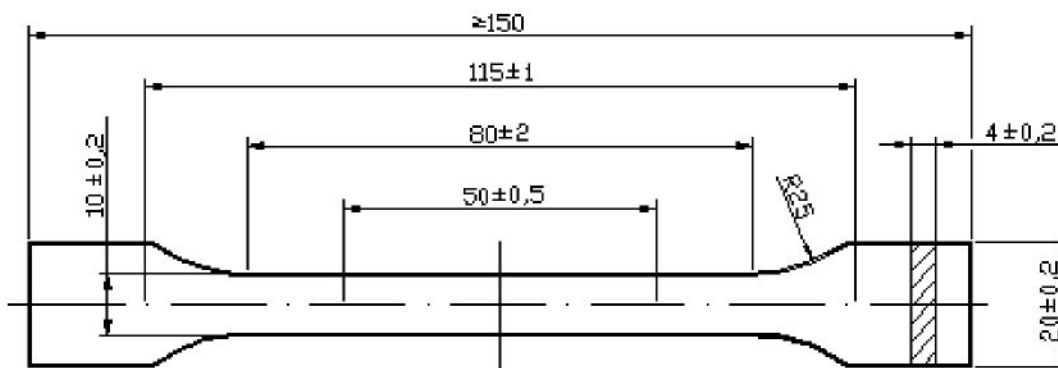
ARAMIS 2M		
Snímkovací frekvence při plném rozlišení	Hz	55 až 440
Měřicí rozsah (deformace)	%	0,01 až několik set
Přesnost měření (deformace)	%	0,01
Rozlišení	px	2 000 000

3.2.1 Přípravné operace před měřením

Před měřením relativní povrchové deformace a deformačních vlastností vybraných částí povrchu (posunutí a rychlosti posunutí bodů) bylo nutné nejprve zhotovit zkušební vzorky, nanést na vzorky nepravidelný rastr a zkalibrovat měřicí zařízení ARAMIS 2M.

3.2.1.1 Výroba zkušebních vzorků

Zkušební vzorky z jednotlivých materiálů (Mosten GB 005, Liten MB 62, Ultradur S 4090 GX, Plexiglas 7H; viz obr. 3.4 až obr. 3.8) byly zhotoveny technologií vstřikování do dvojnásobné formy na vstřikovacím stroji ENGEL ES 25/50 v souladu s ČSN EN ISO 294 /32/. Technologické podmínky výroby zkušebních těles z daných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.6. Pro objektivnost měření deformace byly použity vždy vzorky ze stejné tvarové dutiny formy. Rozměry vzorků odpovídají normě ČSN EN ISO 527-2 a ČSN EN ISO 3167 (viz obr. 3.3).



Obr. 3.3 Rozměry normalizovaného zkušební vzorku /33/

Tab.3.6 Technologické parametry vstřikovacího stroje pro zhotovení jednotlivých vzorků

Parametr	Materiál vzorku			
	Mosten GB 005	Liten MB 62	Ultradur S4090 GX	Plexiglas H7
Teplota tavicí komory [°C]	160/140/120	160/140/120	180/160/140	180/160/140
Teplota taveniny [°C]	235	235	255	255
Teplota temperačního média [°C]	60	60	60	60
Hydraulický vstřikovací tlak [MPa]	5	5	5	6
Zpětný tlak [MPa]	5	5	6	5
Doba vstřiku a dotlaku [s]	20	20	10	10
Doba plastikace [s]	13	14	9	15
Doba chlazení po plastikaci [s]	15	15	15	25
Doba cyklu [s]	60	60	60	60



Obr. 3.4 Zkušební vzorek z materiálu Mosten GB 005



Obr. 3.5 Zkušební vzorek z materiálu Liten MB 62



Obr. 3.6 Zkušební vzorek z polymerní směsi Ultradur S 4090 GX



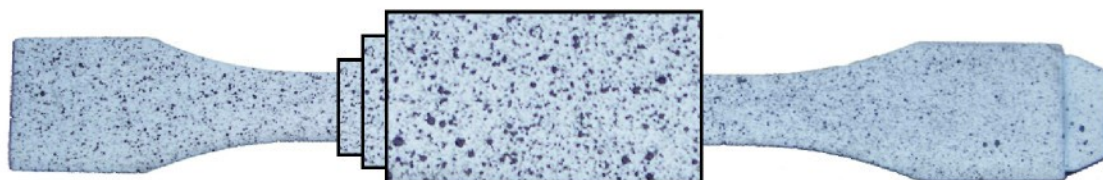
Obr. 3.7 Zkušební vzorek z materiálu Plexiglas 7H

3.2.1.2 Nanesení nepravidelného rastru

Optický měřicí systém ARAMIS snímá při deformaci zkušební tělesa posunutí naneseného nepravidelného, popřípadě pravidelného rastru. Pro experimentální měření bylo na zkušební vzorek použito nanášení nepravidelného (náhodného) rastru, jelikož je snadněji aplikovatelné a především vede k přesnějším výsledkům měření. Před nanášením rastru byl zkušební vzorek nejprve očištěn, poté na něj byla nanesena kontrastní bílá barva (viz obr. 3.8) a po zaschnutí této barvy byl na vzorek pomocí černého spreje nanesen požadovaný nepravidelný rastr (viz obr 3.9).



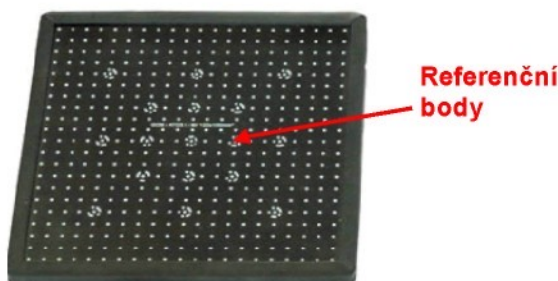
Obr. 3.8 Vzorek s nanesenou kontrastní bílou barvou



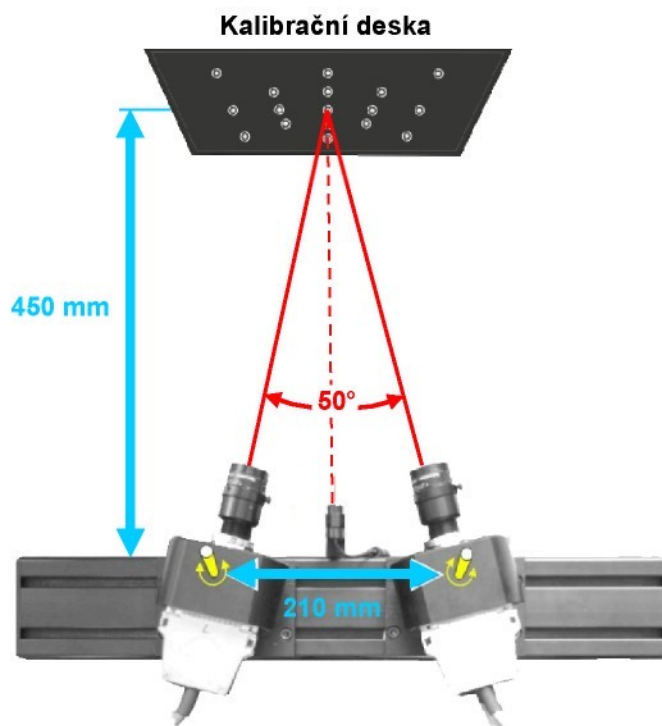
Obr. 3.9 Vzorek s naneseným nepravidelným povrchovým rastrem

3.2.1.3 Kalibrace přístroje ARAMIS 2M

Před vlastním měřením poměrné povrchové deformace, či deformačních vlastností vybraných částí povrchu bylo nutné přístroj ARAMIS 2M zkalibrovat. Pro kalibraci se použila kalibrační deska CP 20 90 x 72 (viz obr. 3.10) obsahující referenční body. Nejprve se dle manuálu výrobce /34/ ustavila poloha kamer (jejich vzájemná vzdálenost a úhel mezi ohnisky) a umístila kalibrační deska do příslušné vzdálenosti (viz obr. 3.11). Následně byla kalibrační deska postupně pootáčena a posouvána podle kalibračního postupu, který je uveden v příloze práce (viz P1) a jednotlivé referenční body desky byly snímány CCD kamerami a identifikovány softwarem. Výsledná zkalibrovaná přesnost je uvedena v tab. 3.7.

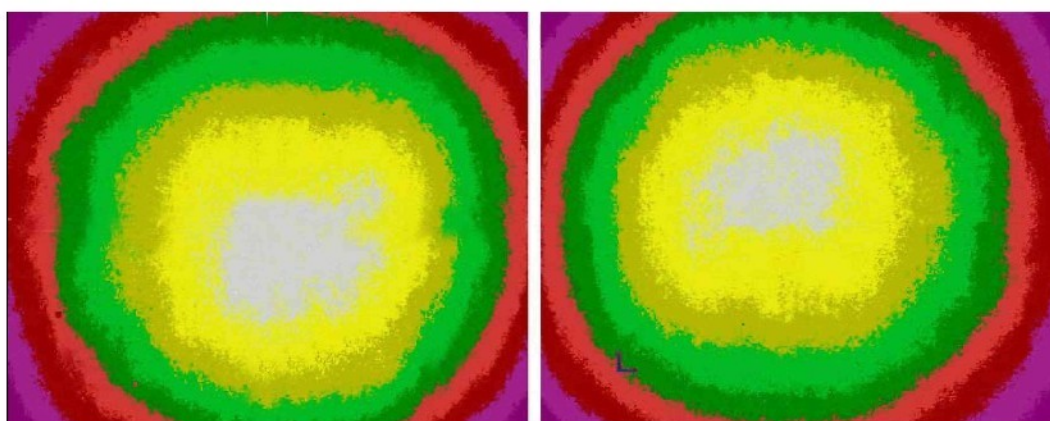


Obr. 3.10 Kalibrační deska CP 20 90 x 72



Obr. 3.11 Kalibrační uspořádání pro kalibraci přístroje ARAMIS 2M

V dalším kroku byly zaostřeny objektivy kamer pomocí fokusační (zaostřovací) šablony, nastaveny clony tak, aby obraz obou kamer ukazoval barevné rozlišení znázorněné na obr. 3.12.



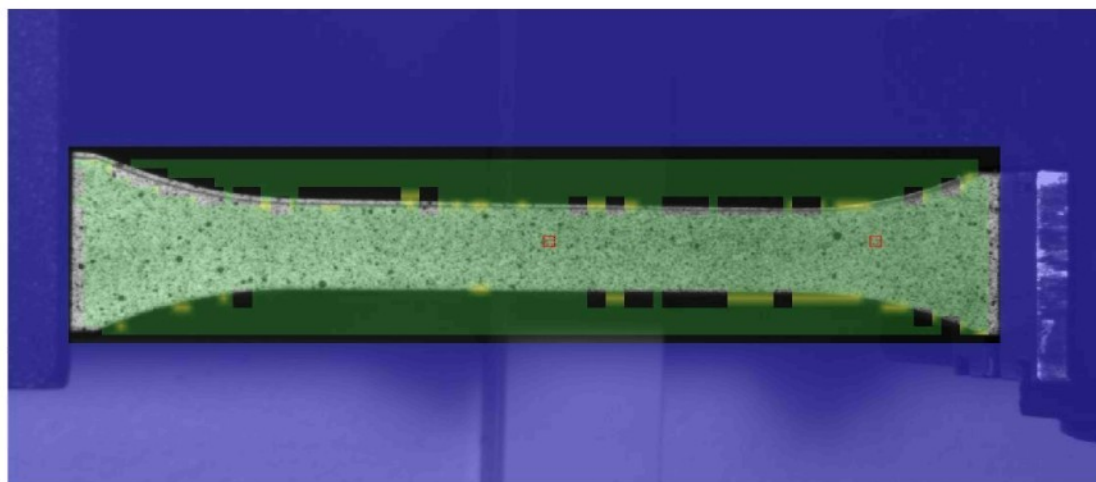
Obr. 3.12 Optimální nastavení barevného rozlišení clon při kalibraci přístroje ARAMIS 2M

Tab. 3.7 Výsledky kalibrace systému ARAMIS

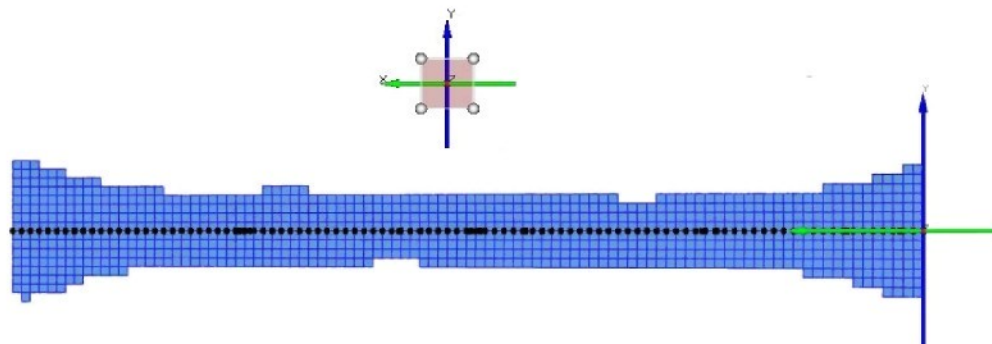
Výsledky kalibrace		
Kalibrační odchylka	0,028	Pixels
Zkalibrovaná přesnost	0,001	mm
Úhel kamer	25,5	°
Měřicí vzdálenost	135 / 105 / 85	mm

3.2.2 Postup měření

Zkušební vzorky byly upnuty do čelistí trhačního zařízení Hounsfield H 10 KT s řídicím programem QMAT (viz obr. 3.15), tak aby podélná osa vzorku byla vždy kolmá na osu trhačního stroje a vzorek byl umístěn vždy vtokem nahoru (do pohyblivé čelisti). Pomocí příslušného softwaru byly pro daný materiál definovány podmínky zkoušení a konstantní rychlost zatěžování (rychlost pohybu čelistí) 50 mm/min. Prostřednictvím laseru umístěného ve středu rozpětí kamer se ustavilo optické zařízení ARAMIS 2M na zkalibrovanou vzdálenost. Dále byla v programovém vybavení ARAMISU zvolena frekvence snímkování a definován zkoumaný materiál. Před spuštěním snímání se ověřila kvalita zobrazené sítě (kvalita připravovaného nepravidelného rastru), viz obr. 3.13 a obr. 3.14. Poté bylo spuštěno měření, současně na trhačním stroji i optickém měřicím systému ARAMIS, kde obě CCD kamery v určitých časových intervalech (dle zvolené frekvence) snímaly a zaznamenávaly změny polohy jednotlivých bodů naneseného rastru.



Obr. 3.13 Zkušební vzorek mezi čelistmi trhačního zařízení s naneseným rastru pro optické měření deformace



Obr. 3.14 Vytvořená síť zkoumané oblasti povrchové deformace vzorku



Obr. 3.15 Vzorek s naneseným nepravidelným rastrem upnutý do čelistí trhačského zařízení Hounsfield H 10 KT

3.2.3 Hodnocení naměřených dat

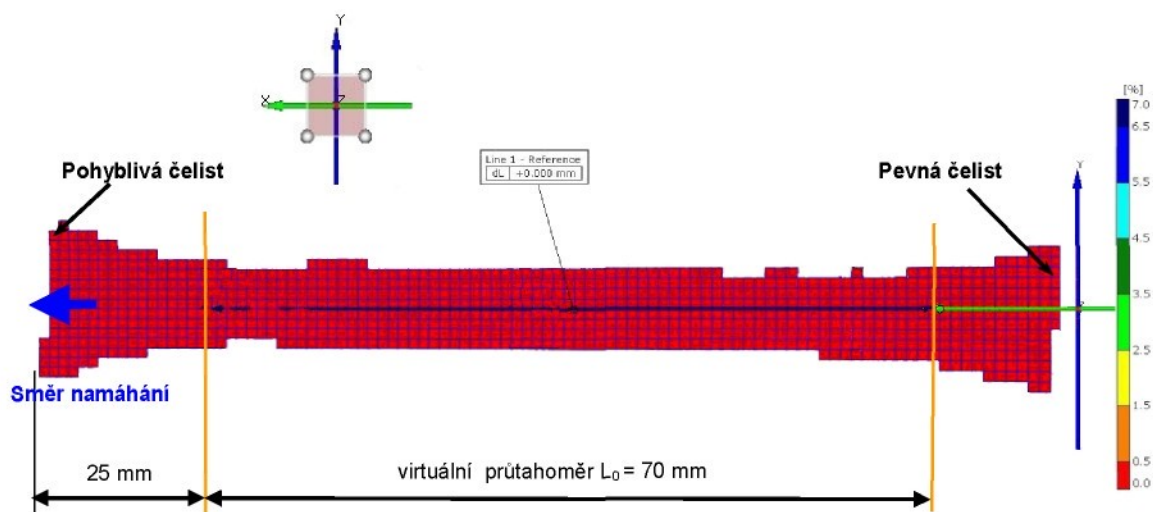
Ze zaznamenaných snímků tahového zatěžování zkušebních vzorků s naneseným rastrem byly v softwaru ARAMIS v6. 1-1-5 pomocí tzv. „Image processingu“ (pomocí algoritmů a matematicko početních operací) vypočteny souřadnice bodů rastru. Porovnáním odpovídajících si bodů v příslušných úrovních zatížení systém vypočetl posunutí jednotlivých bodů deformovaného rastru. Z posunutí jednotlivých bodů rastru byla v daných časových okamžicích vyhodnocena poměrná povrchová deformace a deformační vlastnosti vybraných částí povrchu (posunutí a rychlost posunutí částí povrchu).

Pro eliminaci vlivu proklouznutí vzorku v čelistech byl zaveden na vyhodnocované snímky virtuální průtahoměr. Jedná se o vytvořenou hranici ($L_0=70\text{mm}$), od které se bude stanovovat hodnota prodloužení vzorku. Průtahoměr byl umístěn pomocí souřadného systému vždy do stejného místa vytvořené sítě (viz obr. 3.16). Jelikož zkoumáme vzorky z rozdílných materiálů, odlišující se deformačními schopnostmi, je nutné pro porovnatelnost vyhodnocovaných dat stanovit určitou posuzovací hranici. Tato hranice byla zvolena s ohledem

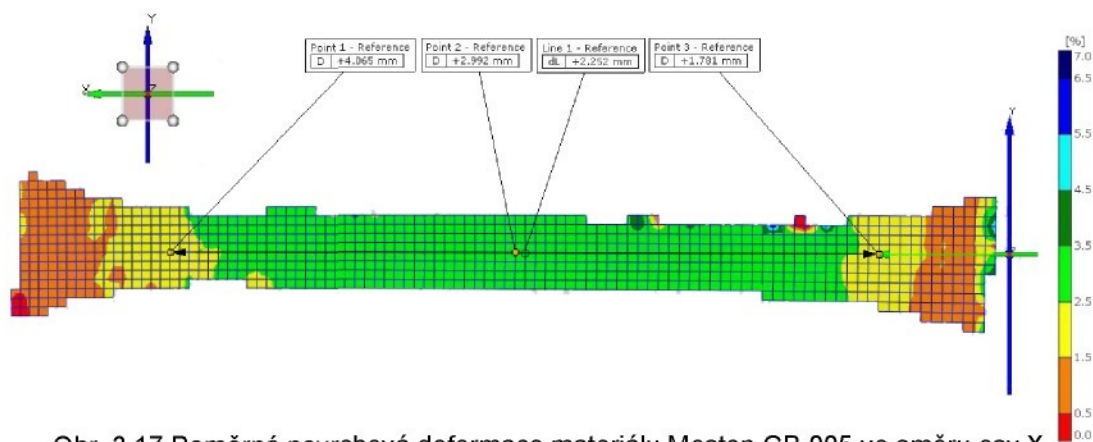
na materiál Plexiglas 7H, který se poruší nejrychleji ze zkoumaných materiálů (při prodloužení virtuálního průtahoměru ve směru osy X větším jak 2,250 mm). Srovnávaným stavem pro všechna tělesa byl tedy stav, kdy virtuální průtahoměr vykazoval prodloužení $dL=2,250$ mm. Pro posouzení deformačních vlastností jednotlivých částí povrchu byla vybrána tři místa, která byla umístěna do vyhodnocované sítě (viz obr. 3. 27).

3.2.3.1 Hodnocení poměrné povrchové deformace

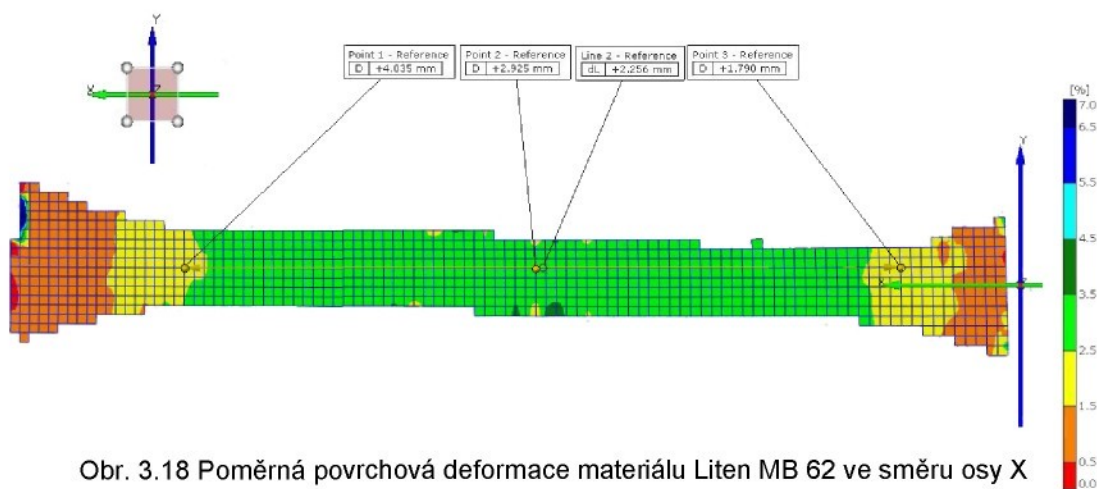
Poměrná povrchová deformace byla vzhledem ke způsobu zatěžování (jednoosé tahové namáhání) hodnocena ve směru namáhání vzorku, tj. v ose X a ve směru osy Y, která je kolmá na směr namáhání, tedy ve směru, kde při tahové zkoušce dochází ke zúžení průřezu vzorků. Na obr. 3.17 až obr. 3.24 je názorně zobrazen deformovaný stav vzorků materiálů v jednotlivých osách při stanovené porovnávací hodnotě prodloužení průtahoměru. Dále jsou zde uvedeny grafické závislosti (obr. 3.25 a obr. 3.26) zachycující průběh poměrné deformace v délce zkušební vzorku. Z hlediska statistického vyhodnocení naměřených dat jsou v tab. 3.8 uvedeny příklady hodnot poměrné povrchové deformace s příslušnými směrodatnými odchylkami, které jsou charakteristické pro celou měřenou oblast.



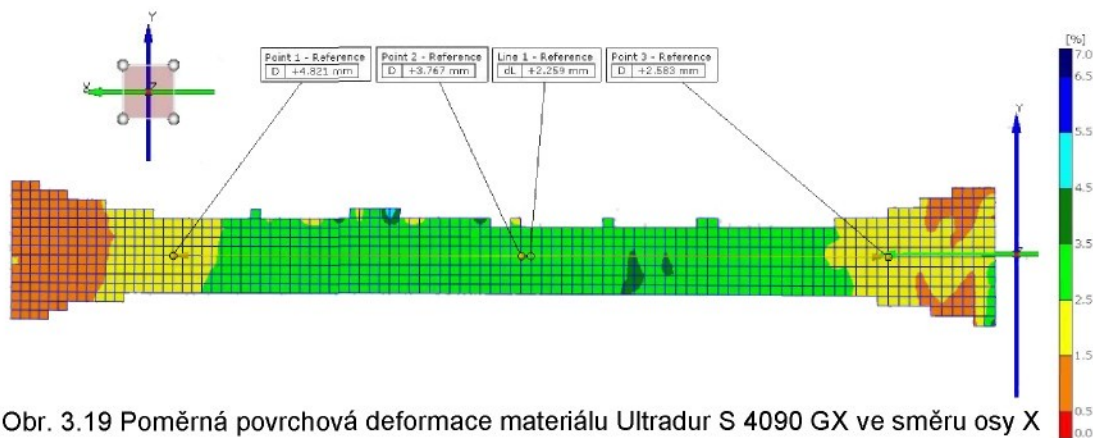
Obr. 3.16 Počáteční nedeformovaný stav se zavedeným průtahoměrem



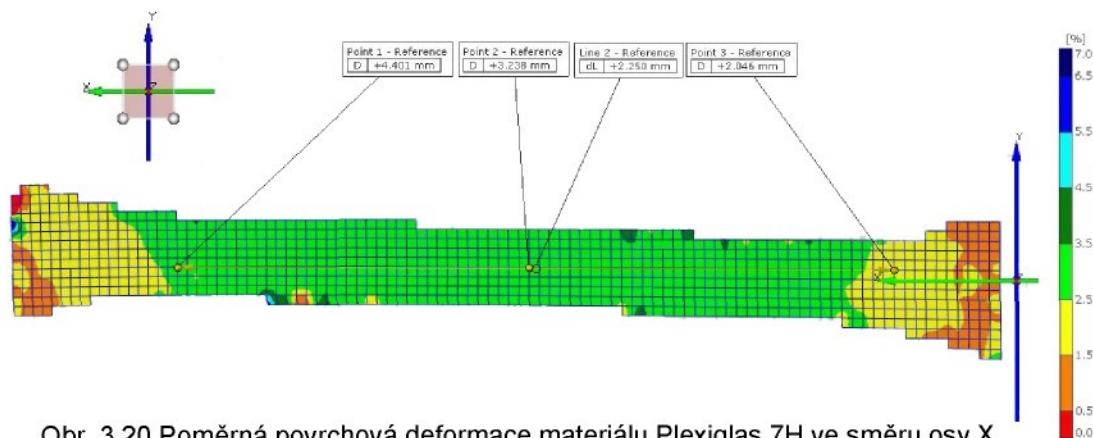
Obr. 3.17 Poměrná povrchová deformace materiálu Mosten GB 005 ve směru osy X



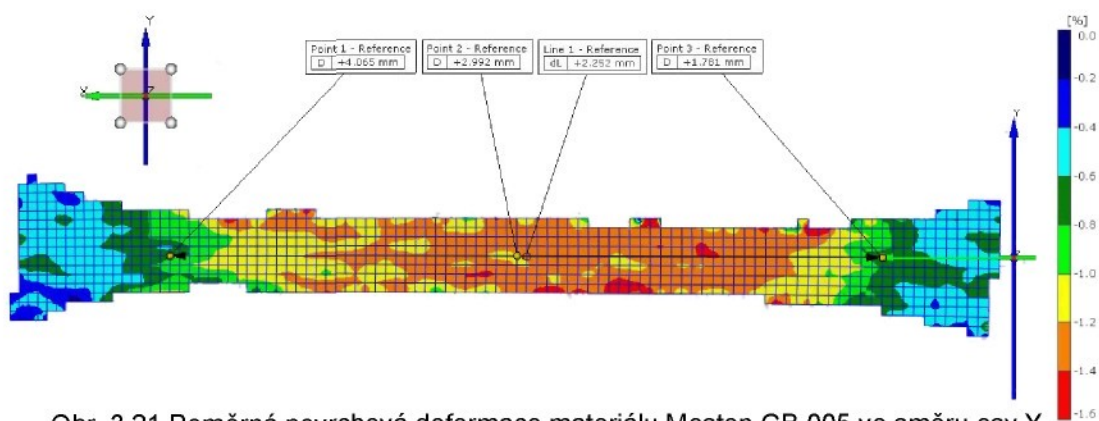
Obr. 3.18 Poměrná povrchová deformace materiálu Liten MB 62 ve směru osy X



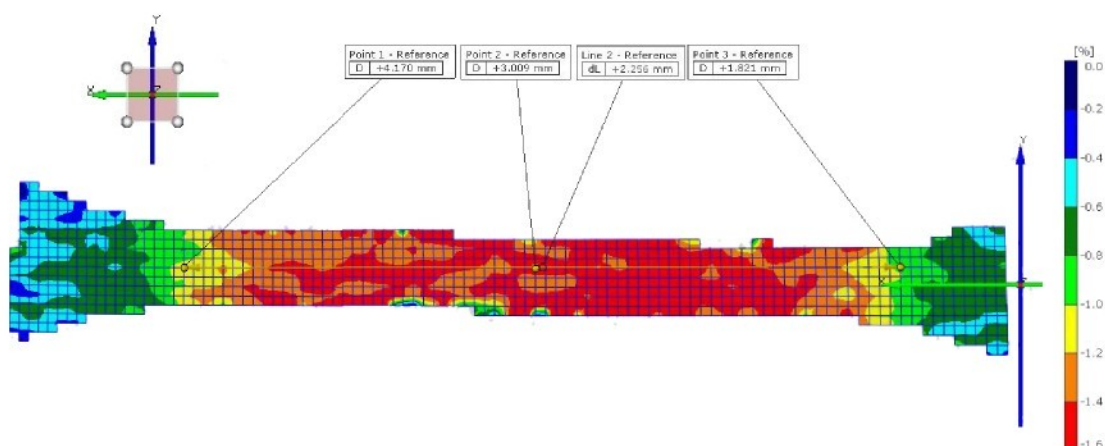
Obr. 3.19 Poměrná povrchová deformace materiálu Ultradur S 4090 GX ve směru osy X



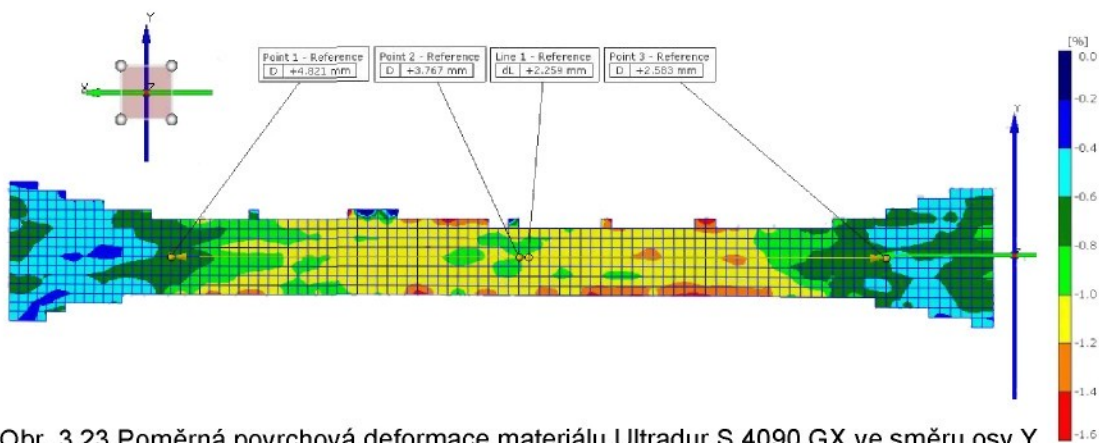
Obr. 3.20 Poměrná povrchová deformace materiálu Plexiglas 7H ve směru osy X



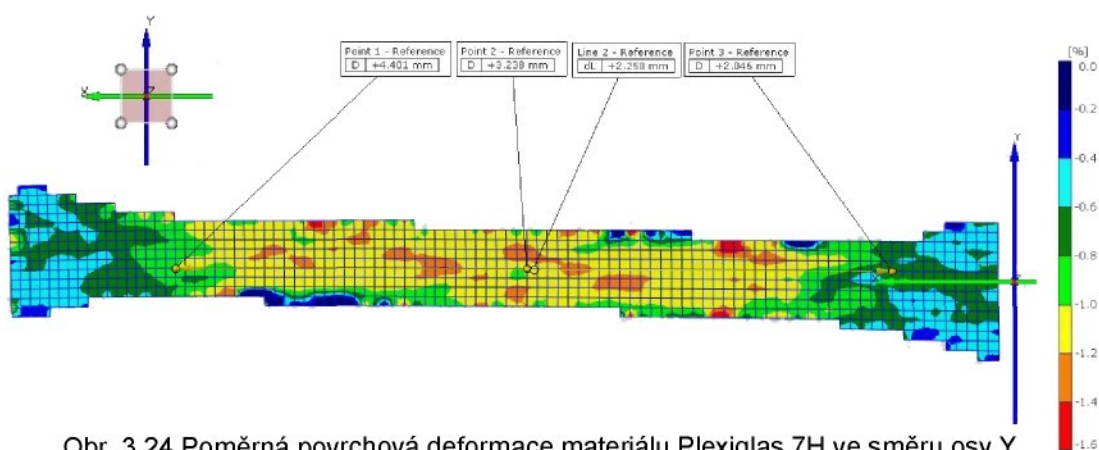
Obr. 3.21 Poměrná povrchová deformace materiálu Mosten GB 005 ve směru osy Y



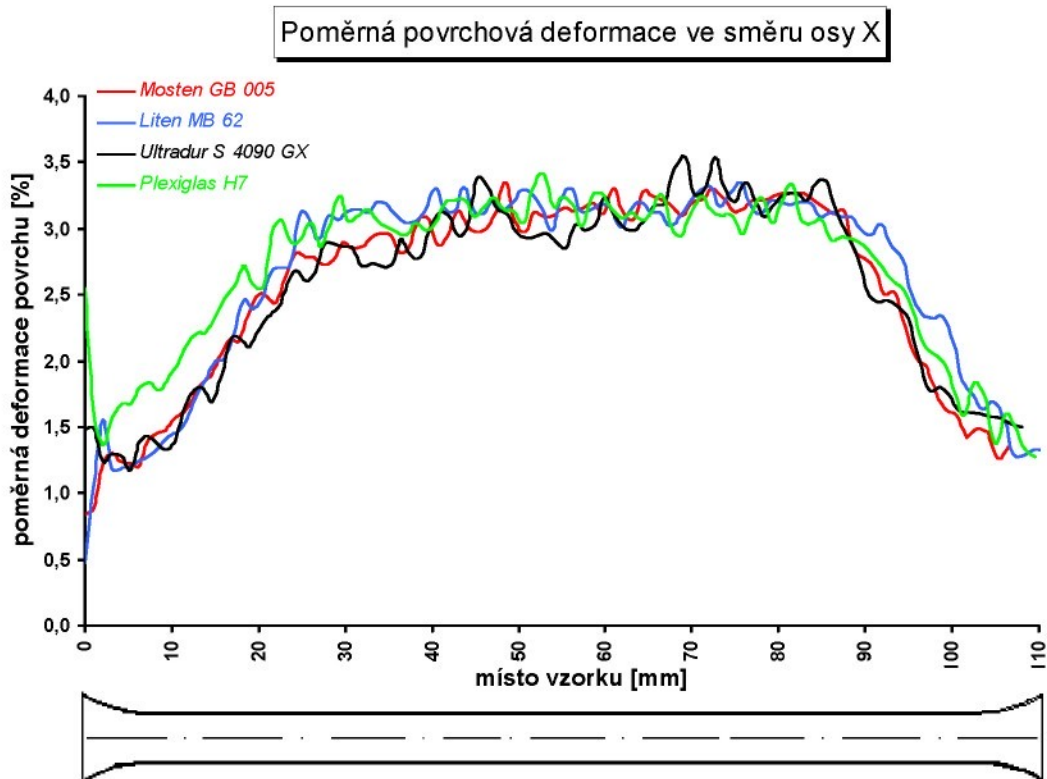
Obr. 3.22 Poměrná povrchová deformace materiálu Liten MB 62 ve směru osy Y



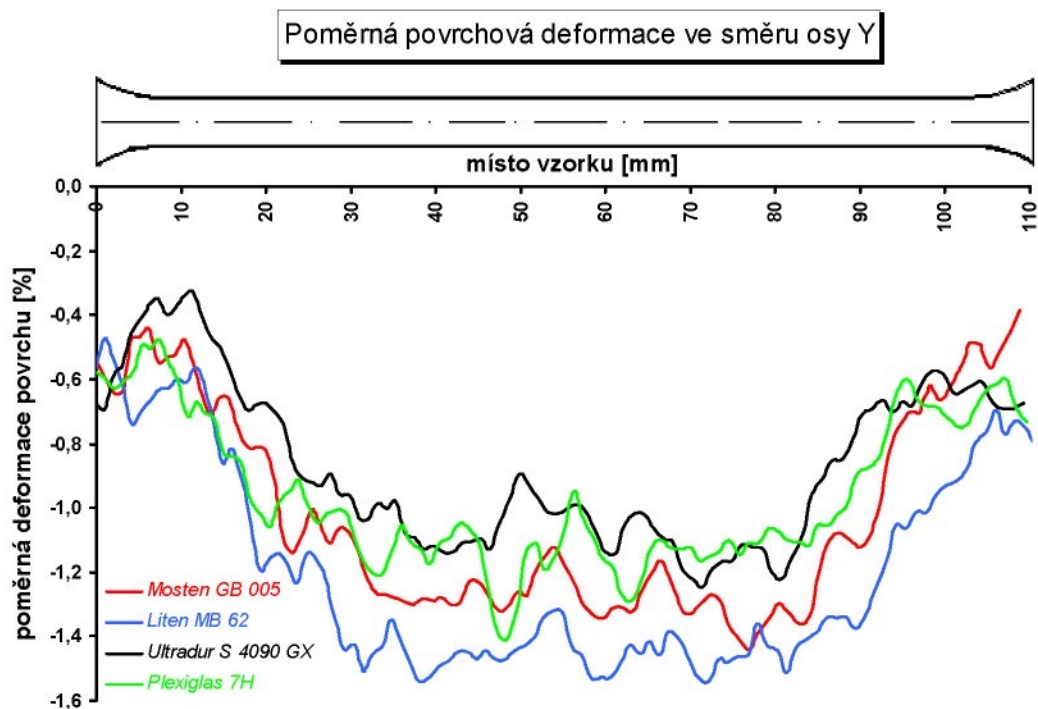
Obr. 3.23 Poměrná povrchová deformace materiálu Ultradur S 4090 GX ve směru osy Y



Obr. 3.24 Poměrná povrchová deformace materiálu Plexiglas 7H ve směru osy Y



Obr. 3.25 Průběh závislosti poměrné deformace povrchu na místě zkušebního vzorku ve směru osy X



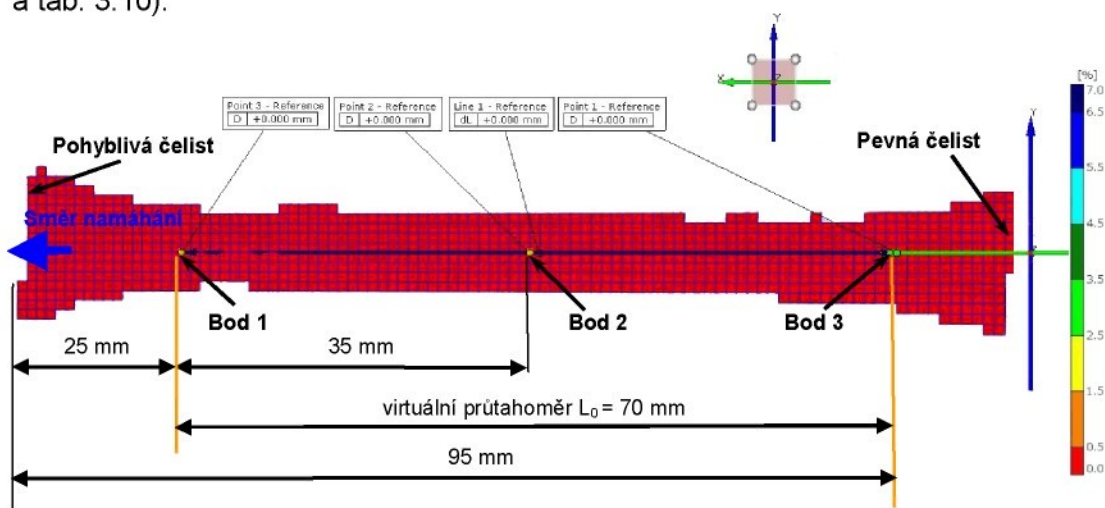
Obr. 3.26 Průběh závislosti poměrné deformace povrchu na místě zkušebního vzorku ve směru osy Y

Tab.3.8 Příklad naměřených dat poměrné povrchové deformace ve směru osy X a Y

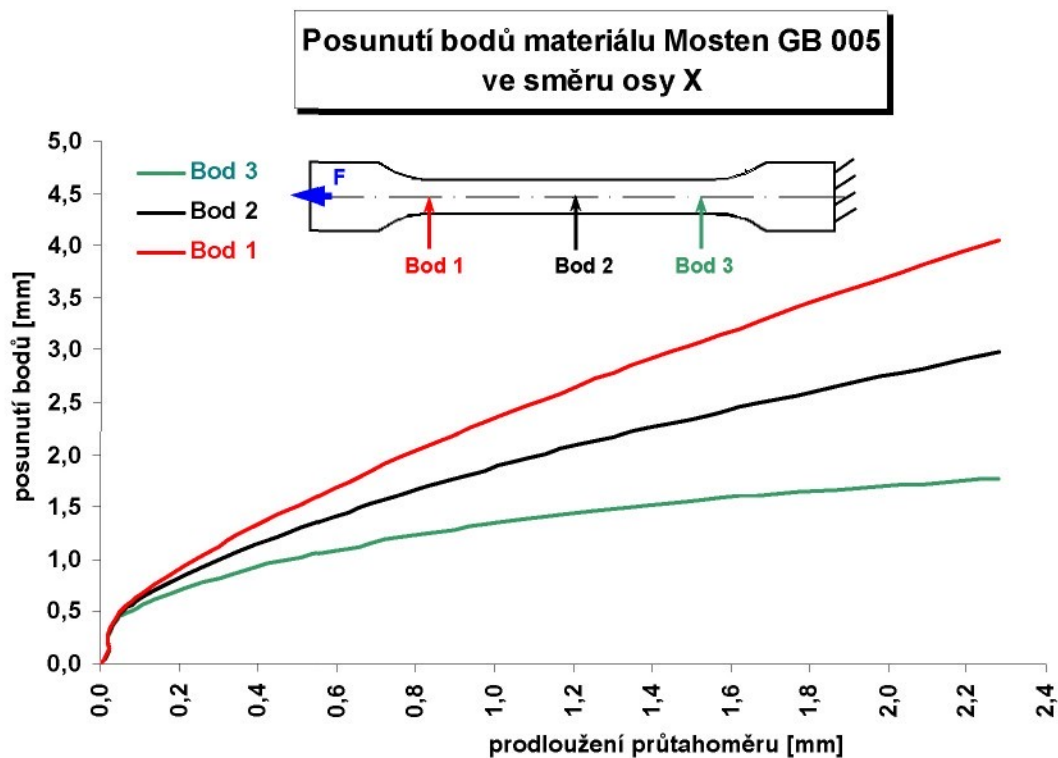
Místo vzorku [mm]	Prům. hodnota deformace ve směru osy Y [%]	Prům. hodnota deformace ve směru osy X [%]	Prům. hodnota deformace ve směru osy Y [%]	Prům. hodnota deformace ve směru osy X [%]
Liten MB 62			Mosten GB 005	
15,316	-0,860 ± 0,026	1,991 ± 0,080	-0,659 ± 0,093	1,909 ± 0,142
76,582	-1,362 ± 0,032	3,193 ± 0,114	-1,441 ± 0,061	3,209 ± 0,089
91,899	-1,243 ± 0,063	3,036 ± 0,147	-1,076 ± 0,073	2,498 ± 0,276
Ultradur S 4090 GX			Plexiglas 7H	
15,316	-0,578 ± 0,042	-0,578 ± 0,042	-0,839 ± 0,074	1,879 ± 0,089
76,582	-1,123 ± 0,067	-1,123 ± 0,067	-1,111 ± 0,041	3,197 ± 0,101
91,899	-0,785 ± 0,093	-0,785 ± 0,093	-0,877 ± 0,068	2,441 ± 0,271

3.2.3.1 Hodnocení deformačních vlastností vybraných částí povrchu

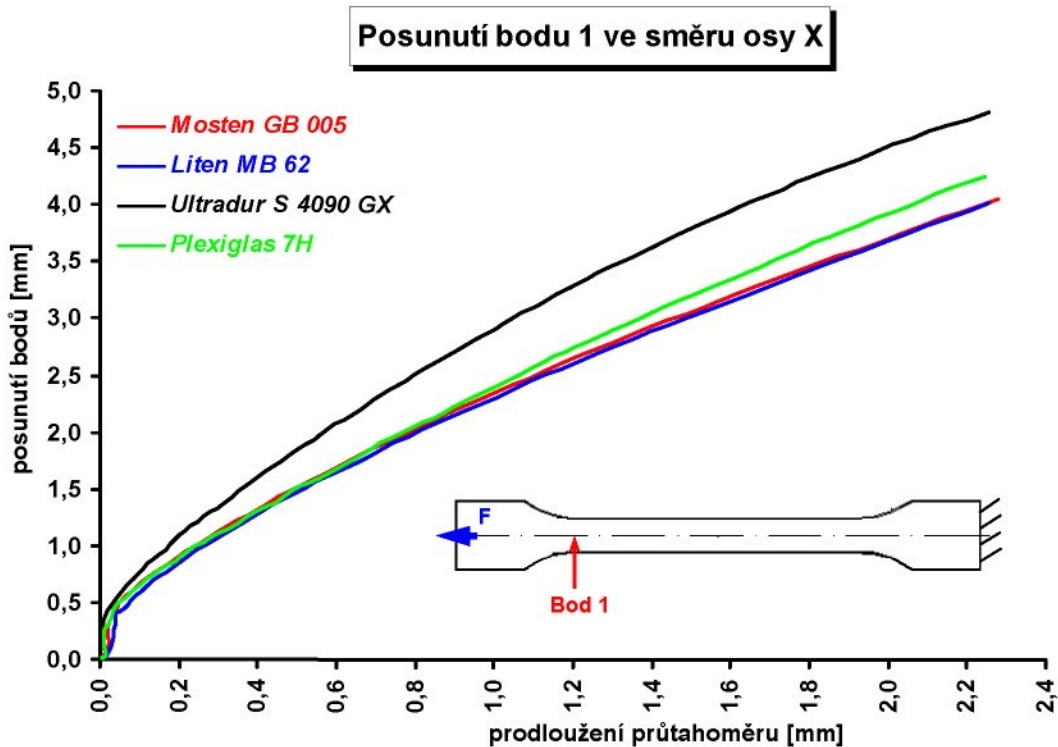
Jak již bylo uvedeno, deformační vlastnosti povrchu zkoumaných vzorků zatěžovaných tahem jsou posuzovány pomocí tří bodů (viz obr. 3.27), u kterých je hodnocena závislost posunutí a rychlost posunutí na prodloužení vzorku ve směru tahového namáhání (ose X). Jelikož všechny zkoumané materiály vykazují stejnou charakteristiku průběhů, je zde uveden vždy pouze jeden zástupce materiálů charakterizující příslušnou závislost (viz. obr. 3.28 a obr. 3.32), ostatní jsou uvedeny v příloze této práce (viz P2). Pro posouzení vlivu materiálu na deformační vlastnosti částí povrchu bylo srovnáno posunutí a rychlost posunutí bodů jednotlivých materiálů (viz obr. 3.29 až obr. 3.31 a obr. 3.33 až obr. 3.35). Dále jsou zde obdobně jako u hodnocení poměrné povrchové deformace uvedeny příklady naměřených hodnot (posunutí a rychlosti posunutí vybraných bodů) s příslušnými směrodatnými odchylkami, které jsou charakteristické pro celý průběh (viz tab. 3.9 a tab. 3.10).



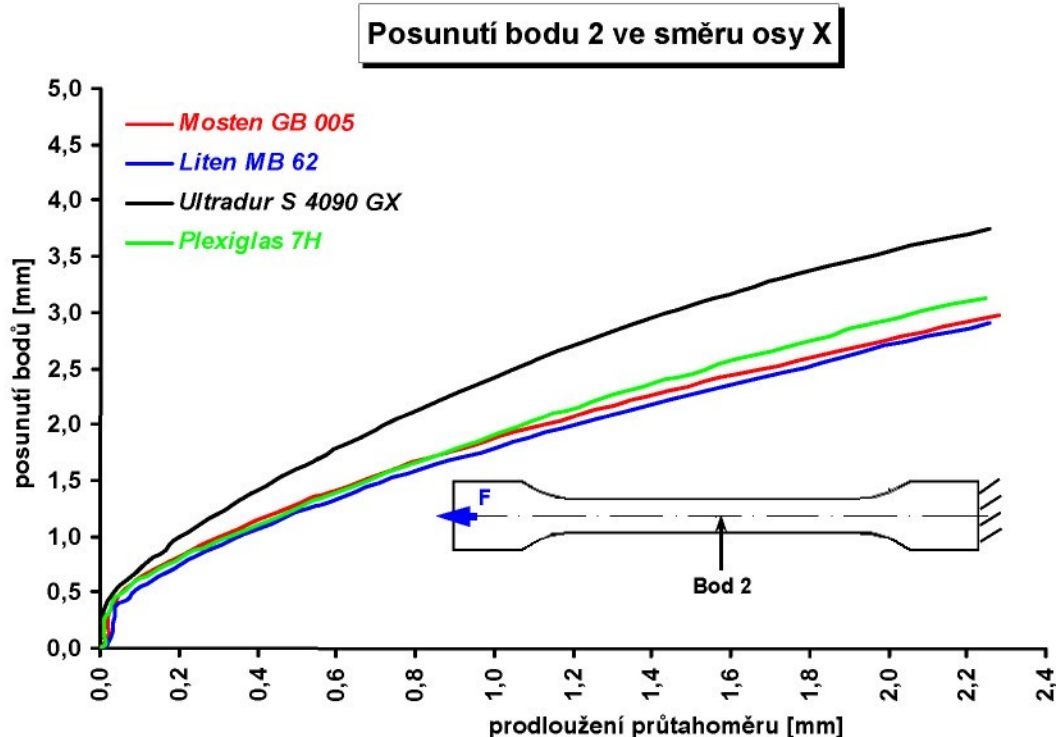
Obr. 3.27 Počáteční nedeformovaný stav s vyznačeným průtahoměrem a body pro zkoumání deformačních vlastností v různých částech povrchu



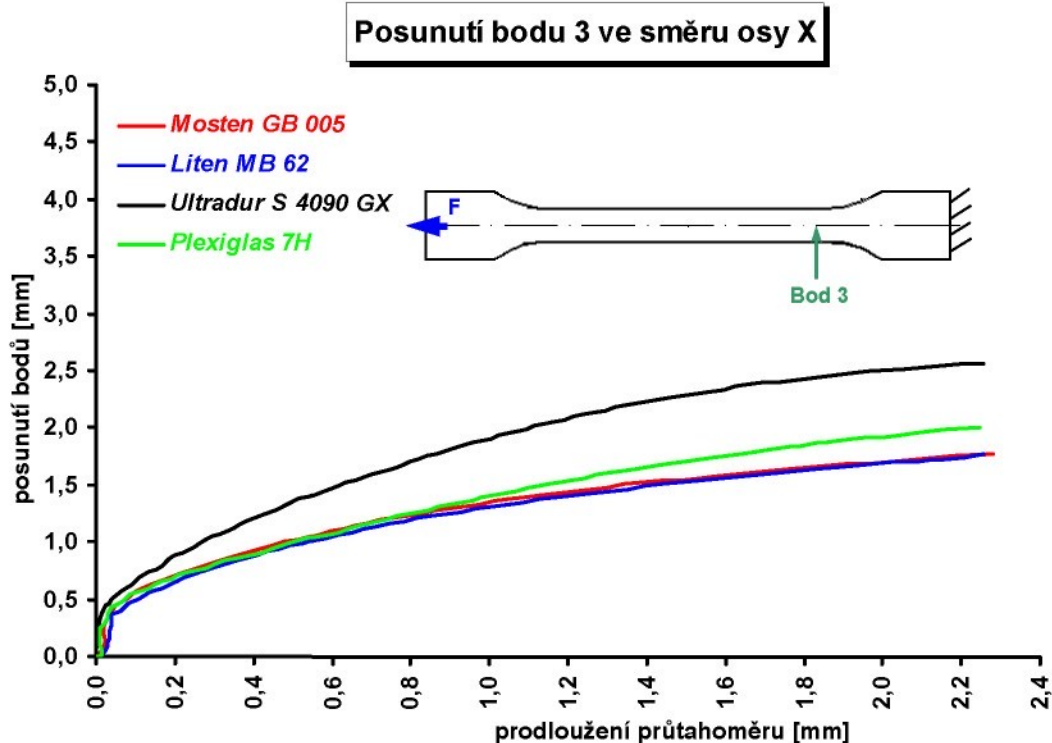
Obr. 3.28 Průběh posunutí bodů materiálu Mosten GB 005 na povrchu tělesa ve směru osy X (ve směru tahového působení)



Obr. 3.29 Průběh posunutí bodu 1 povrchu tělesa ve směru osy X pro hodnocené polymery



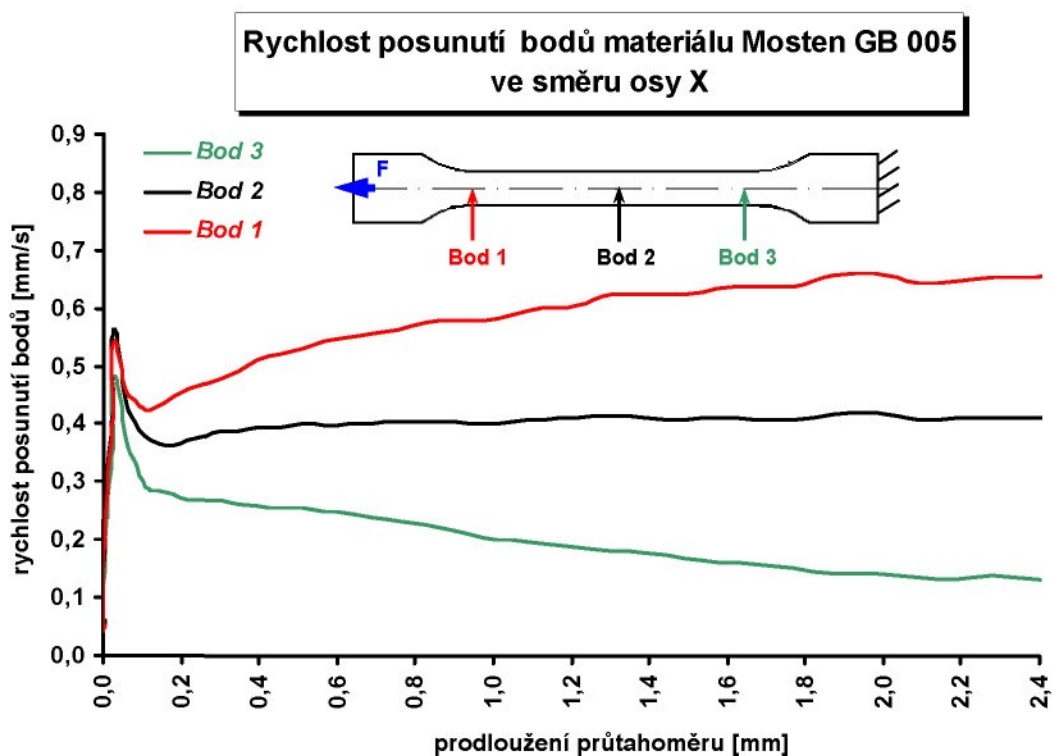
Obr. 3.30 Průběh posunutí bodu 2 povrchu tělesa ve směru osy X pro hodnocené polymery



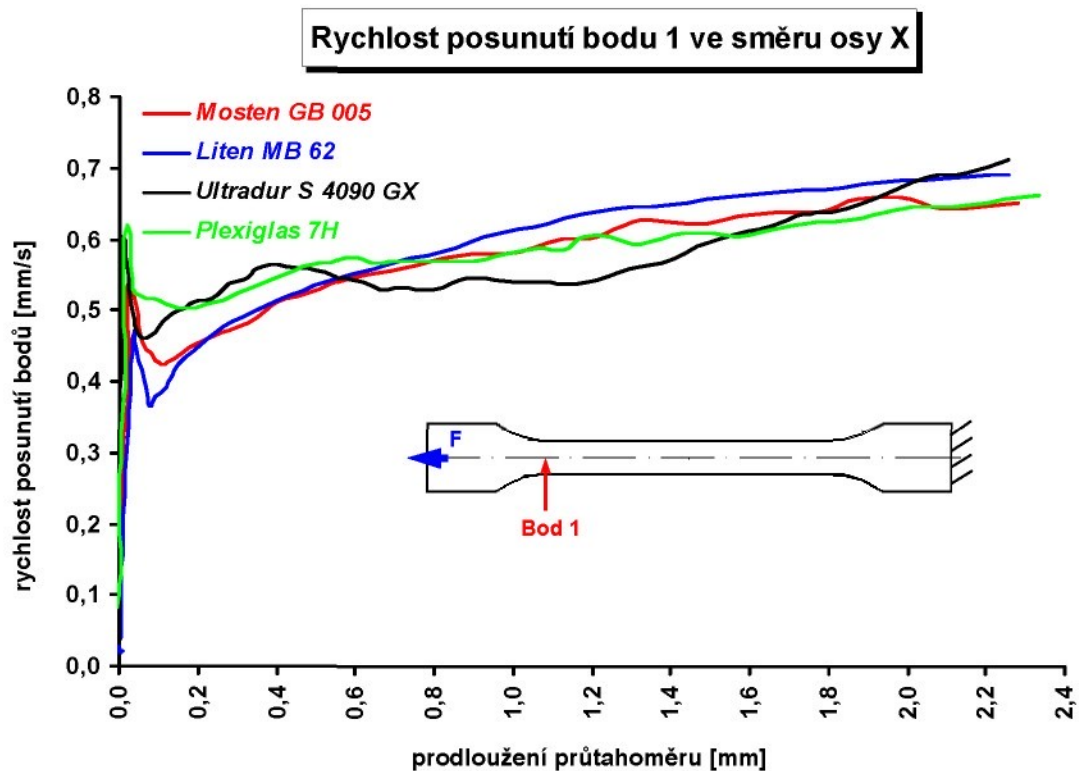
Obr. 3.31 Průběh posunutí bodu 3 povrchu tělesa ve směru osy X pro hodnocené polymery

Tab.3.9 Příklad naměřených dat posunutí bodů povrchu ve směru osy X

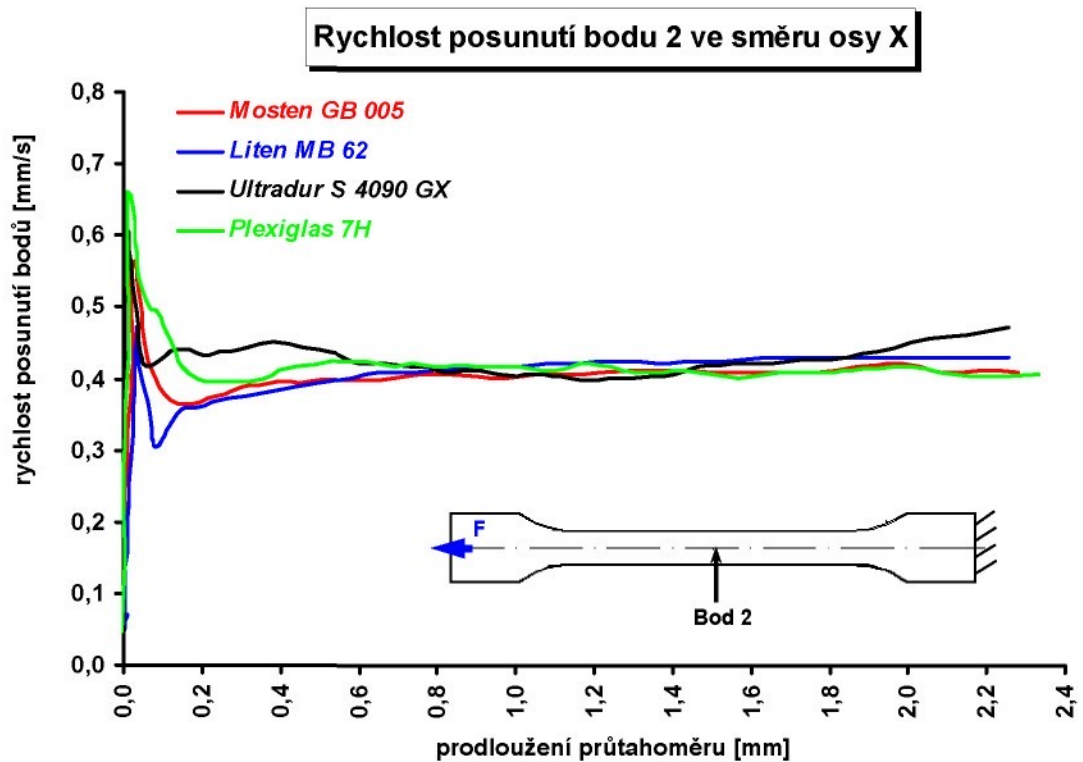
dL [mm]	Průměrná hodnota posunutí na ose X [mm]			Průměrná hodnota posunutí na ose X [mm]		
	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 1	Bod 2	Bod 3
Liten MB 62				Mosten GB 005		
1,172	2,256±0,112	1,972±0,048	1,395±0,073	2,666±0,187	2,095±0,104	1,452±0,056
1,639	3,209±0,096	2,395±0,196	1,574±0,131	3,284±0,156	2,495±0,212	1,613±0,149
2,215	3,885±0,201	2,822±0,107	1,735±0,087	3,943±0,221	2,913±0,173	1,754±0,038
Ultradur S 4090 GX				Plexiglas 7H		
1,172	3,176±0,188	2,628±0,076	2,039±0,156	2,711±0,189	2,128±0,095	1,532±0,056
1,693	4,039±0,254	3,237±0,209	3,238±0,219	3,513±0,172	2,666±0,210	1,810±0,161
2,215	4,699±0,221	3,676±0,173	2,548±0,168	4,147±0,237	3,076±0,184	1,988±0,115



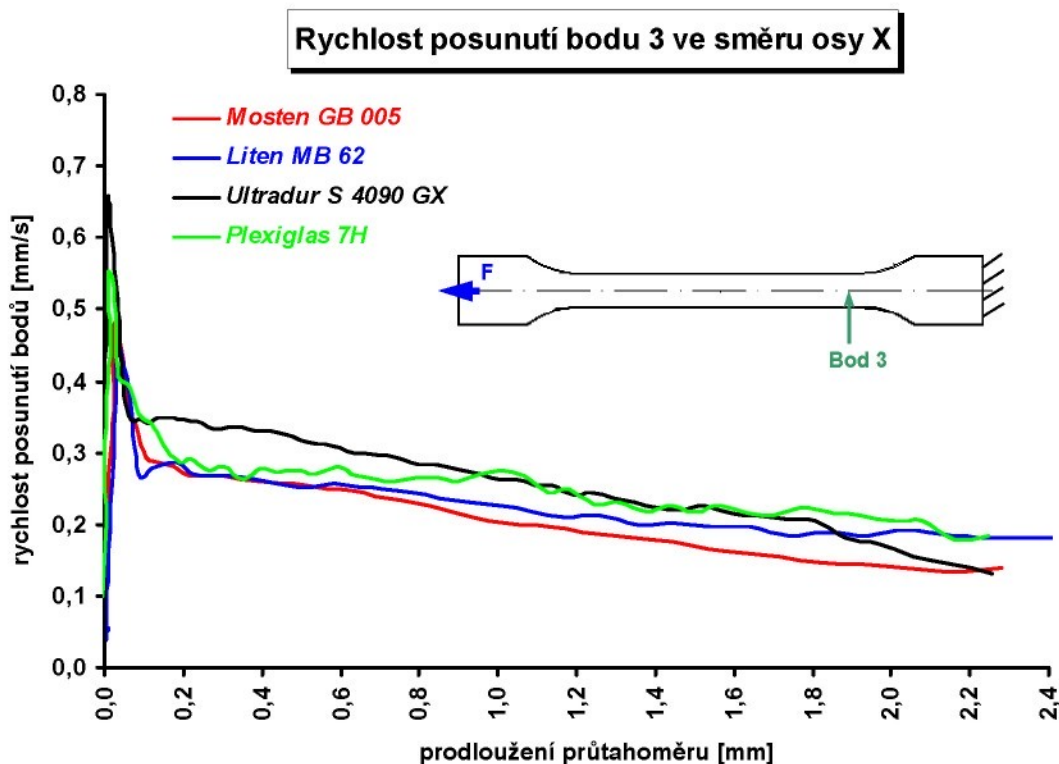
Obr. 3.32 Průběh rychlostí posunutí bodů materiálu Mosten GB 005 na povrchu tělesa ve směru osy X (ve směru tahového působení)



Obr. 3.33 Průběh rychlostí posunutí bodu 1 povrchu tělesa ve směru osy X pro hodnocené polymery



Obr. 3.34 Průběh rychlostí posunutí bodu 2 povrchu tělesa ve směru osy X pro hodnocené polymery



Obr. 3.35 Průběh rychlostí posunutí bodu 3 povrchu tělesa ve směru osy X pro hodnocené polymery

Tab.3.10 Příklad naměřených dat rychlosti posunutí bodů povrchu ve směru osy X

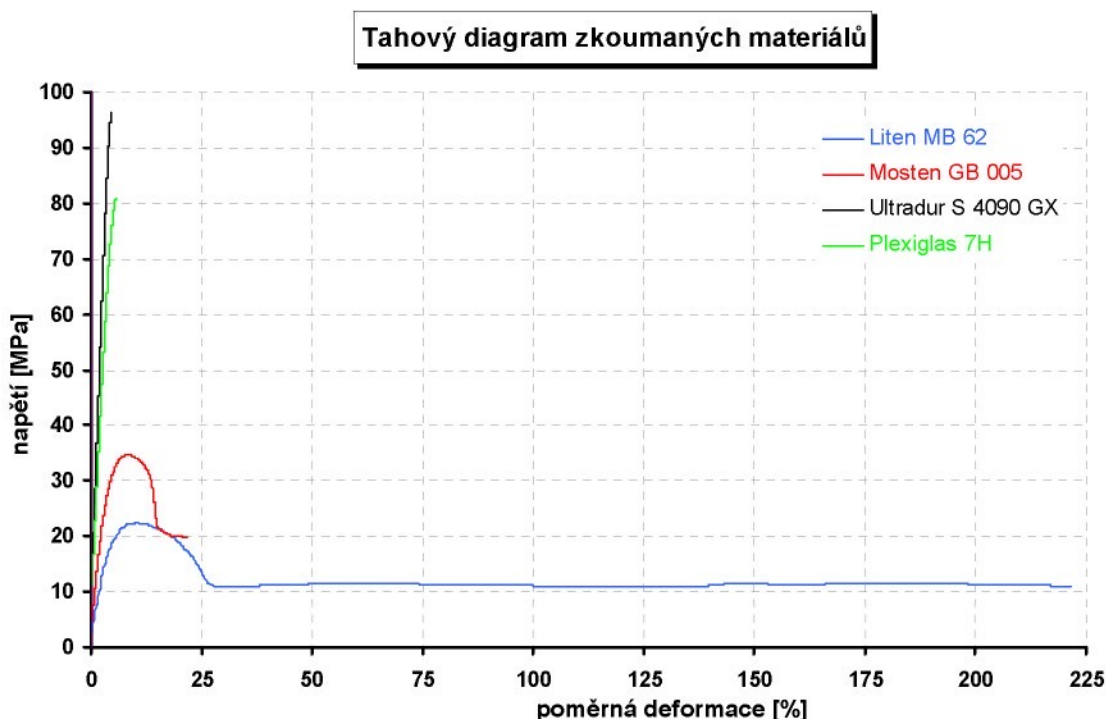
dL [mm]	Průměrná hodnota rychlosti posunutí ve směru osy X [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]			Průměrná hodnota rychlosti posunutí ve směru osy X [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]		
	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 1	Bod 2	Bod 3
Liten MB 62				Mosten GB 005		
0,710	0,568±0,040	0,409±0,017	0,250±0,007	0,557±0,011	0,401±0,009	0,240±0,003
1,272	0,643±0,012	0,424±0,004	0,212±0,021	0,605±0,002	0,410±0,015	0,188±0,019
2,155	0,689±0,023	0,421±0,025	0,185±0,003	0,647±0,031	0,411±0,018	0,133±0,001
Ultradur S 4090 GX				Plexiglas 7H		
0,710	0,533±0,011	0,417±0,0	0,294±0,007	0,570±0,005	0,416±0,005	0,262±0,011
1,272	0,550±0,009	0,401±0,017	0,244±0,022	0,604±0,022	0,425±0,018	0,229±0,002
2,155	0,694±0,031	0,461±0,005	0,143±0,002	0,648±0,010	0,404±0,001	0,178±0,006

3.2.3.3 Hodnocení tahových vlastností

Z výsledků tahových zkoušek pro hodnocené materiály lze stanovit jejich pevnostní i deformační chování (viz tab. 3.11) při spojitém zvětšování vnějších sil konstantní rychlostí zkoušení (50mm/min). Z tahových diagramů (viz obr. 3.36) je stanoveno napětí na mezi kluzu, na mezi pevnosti v tahu (u semikrystalických materiálů je totožné s napětím na mezi kluzu) i při přetržení (u křehkých materiálů je shodné s mezí pevnosti). Z deformačních charakteristik je určeno jmenovité poměrné prodloužení, tj. zvětšení délky vztažené na jednotku původní vzdálenosti mezi čelistmi, na mezi kluzu, pevnosti a při přetržení. Modul pružnosti v tahu je stanoven v souladu s ČSN EN ISO 527 jako změna rozdílu napětí, odpovídající rozdílu poměrného prodloužení při $\varepsilon_1=0,25\%$ a $\varepsilon_2=0,05\%$.

Tab. 3.11 Vyhodnocení mechanických vlastností v tahu při rychlosti zatěžování 50 mm/min

Materiál	σ_y [MPa]	ε_y [%]	σ_B [MPa]	ε_B [%]	E [MPa]
Liten MB 62	22,97± 0,40	9,89± 0,14	10,60± 0,34	221,75± 55,90	400± 32
Mosten GB 005	34,70± 0,18	8,00± 0,26	21,70± 1,01	19,3± 2,91	650± 43
Plexiglas 7H	79,32± 1,61	6,01± 0,41	79,32± 1,61	6,01± 0,41	1325± 80
Ultradur S 4090 GX	96,07± 1,86	4,69± 0,46	96,07± 1,86	4,69± 0,46	2475± 198

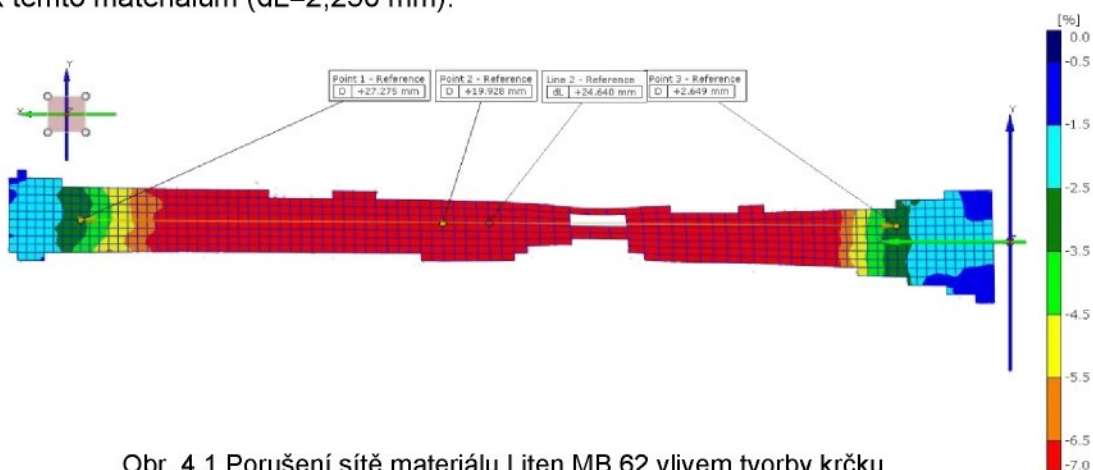


Obr. 3.36 Tahový diagram pro jednotlivé materiály při rychlosti zatěžování 50 mm/min

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUSE

V obdobném pojetí jako experimentální část diplomové práce je členěno také vyhodnocení výsledků a jejich diskuse. V první části je zhodnocen vliv materiálu (Mosten GB 005, Liten MB 62, Ultradur S 4090 GX a Plexiglas 7H) na poměrnou povrchovou deformaci. V druhé části je posuzováno deformační chování materiálů ve vybraných místech (bodech) povrchu a to posunutí a rychlost posunutí těchto bodů.

Jelikož jsou zkoumány polymerní materiály rozdílných deformačních schopností je důležitým faktorem k porovnání deformačních dějů stanovení porovnávací hranice. Optický měřicí systém ARAMIS vytváří z naneseného nepravidelného rastru síť (viz obr. 3.13 a obr. 3.14), která se vlivem působení jednoosého tahového namáhání deformuje. U houževnatých polymerních materiálů vytvářejících při tahovém namáhání krček (Mosten GB 005, Liten MB 62) docházelo v části krčku vlivem dloužení k porušení deformované sítě a měření dalšího zatěžování vzorku bylo nemožné (viz obr.4.1). Materiály Ultradur S 4090 GX a Plexiglas 7H praskly ještě dříve, než se tato závislost začala u výše uvedených materiálů projevovat, a proto jsme porovnávací hranici prodloužení zkoumaných vzorků zvolili vzhledem k těmto materiálům ($dL=2,250$ mm).

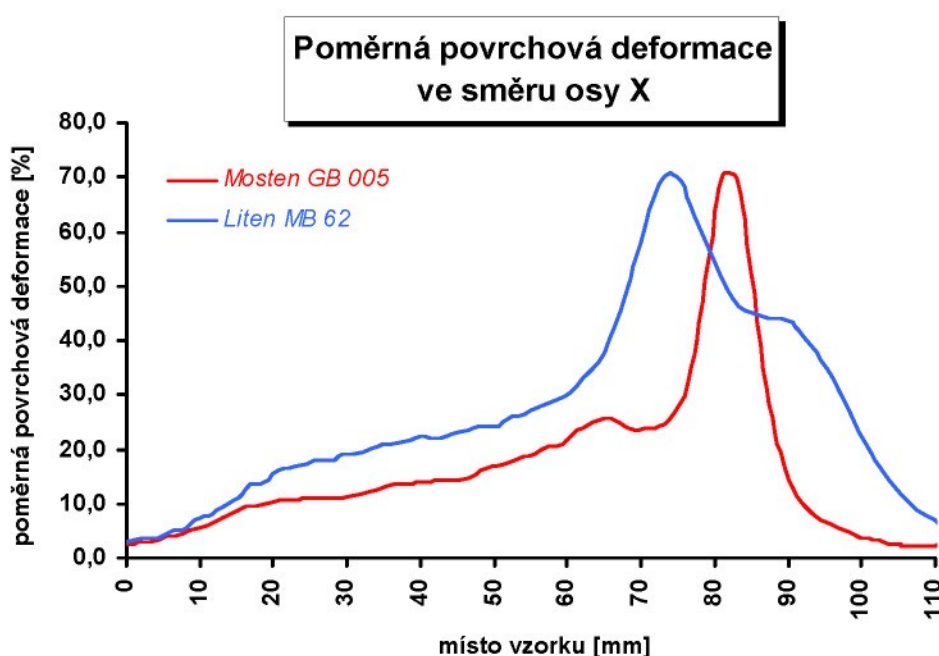


Obr. 4.1 Porušení sítě materiálu Liten MB 62 vlivem tvorby krčku

4.1 VYHODNOCENÍ POMĚRNÉ POVRCHOVÉ DEFORMACE

Posuzujeme-li průběhy poměrné povrchové deformace v délce zkušebních vzorků ve směru tahového namáhání (v ose X), dojdeme k závěru, že všechny zkoumané materiály vykazují při zvolené porovnávací hranici prodloužení obdobný průběh (viz obr. 3.25). Poměrná povrchová deformace od místa upnutí vzorků roste, až se v určité vzdálenosti ustaví na téměř konstantní hodnotě. Přesto lze tvrdit, že

v této oblasti existuje nepatrné maximum poměrné deformace, které předurčuje místo budoucího porušení, či vzniku krčku. Následně začne průběh poměrné deformace směrem k druhé čelisti opět klesat. Poloha místa vzniku krčku, či porušení vzorku je ovlivněna především jeho nehomogenitou, kterou může způsobit např. rozdílná orientace makromolekul, nerovnoměrné smrštění vzorku vlivem nestejnoměrného teplotního pole při temperaci, aj. Vzhledem k popsanému průběhu poměrné deformace je nutno podotknout, že se pohybujeme v oblasti velmi malých deformací. Pro názornost jsou na obr. 4.2 uvedeny průběhy materiálů Liten MB 62 a Mosten GB 005 při vyšších hodnotách deformace, kde je zřetelně rozpoznatelná oblast budoucího vzniku krčku.



Obr. 4.2 Poměrná povrchová deformace materiálů Mosten GB 005 a Liten MB 62 ve směru osy X při vyšších hodnotách deformace

Jak již bylo řečeno průběhy poměrné povrchové deformace v délce vzorků jsou u všech materiálů téměř shodné. Vliv materiálu se zde však projevuje ve velikosti napětí potřebného k vytvoření deformovaného stavu. Obecně lze konstatovat, že pro stejnou hodnotu deformace je potřeba většího napětí u materiálů s vyšším modulem pružnosti, než u materiálů s modulem menším. Vzhledem k uvedené rešerši, tedy z průběhů tahové zkoušky námi zkoumaných materiálů (viz obr. 3.36) vyplývá, že pro zvolenou porovnávací hranici prodloužení vzorků bude zapotřební největšího napětí pro materiál Ultradur S 4090 GX, menší napětí bude potřebné pro materiály Plexiglas 7H, Mosten GB 005 a Liten MB 62. Tuto skutečnost jsme potvrdili stanovením hodnot napětí vzorků, při porovnávací hodnotě prodloužení průtahoměru (viz tab. 4.1).

Tab. 4.1 Napětí potřebné k prodloužení průtahoměru na porovnávací hranici

Prodloužení průtahoměru [mm]	Napětí [MPa]			
	Mosten GB 005	Liten MB 52	Ultradur S 4090 GX	Plexiglas 7H
2,250	29,48	20,65	95,76	75,32

U průběhů poměrné deformace v délce vzorku materiálů ve směru kolmém na směr namáhání (ose Y) nalezneme obdobnou závislost průběhů jako u poměrné deformace v ose X. Zpočátku deformace roste, než se ustaví na téměř konstantní hodnotě a následně opět klesá k nule. Na rozdíl od průběhů poměrné deformace v ose X se zde velikosti poměrné deformace (poměrného zúžení) jednotlivých materiálů viditelně liší. Teoreticky lze předpokládat míru poměrného příčného zúžení jednotlivých materiálů na základě poissonova poměru. Mezi poissonovým poměrem a modulem pružnosti materiálu platí nepřímá úměra. U materiálů s vyšším modulem pružnosti je tedy poissonův poměr nižší, než poissonův poměr materiálů s modulem pružnosti menším. Z tohoto předpokladu tedy vyplývá, že pro námi zkoumané materiály by největšího poměrného příčného zúžení měl dosáhnout materiál Liten MB 62, dále pak Mosten GB 005, Plexiglas 7H a nejmenšího zúžení polymerní směs Ultradur S 4090 GX, jenž má nejvyšší hodnotu modulu pružnosti. Tento teoretický předpoklad potvrzují průběhy poměrné deformace jednotlivých materiálů, viz obr. 3.26. Pro názornost byly stanoveny hodnoty poissonova poměru (viz tab. 4.2) v posuzovaných bodech povrchu (viz obr. 3.27).

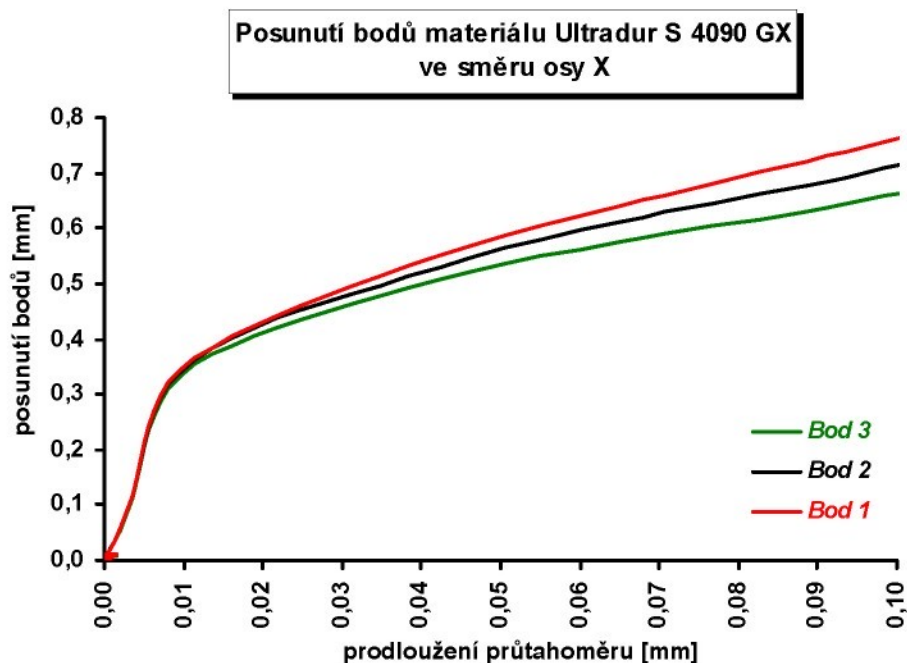
Tab. 4.2 Hodnoty poissonova poměru ve zkoumaných bodech

Materiál	Poissonův poměr		
	Bod 1	Bod 2	Bod 3
Mosten GB 005	0,361	0,433	0,330
Liten MB 62	0,368	0,478	0,424
Ultradur S 4090 GX	0,338	0,349	0,289
Plexiglas 7H	0,353	0,354	0,297

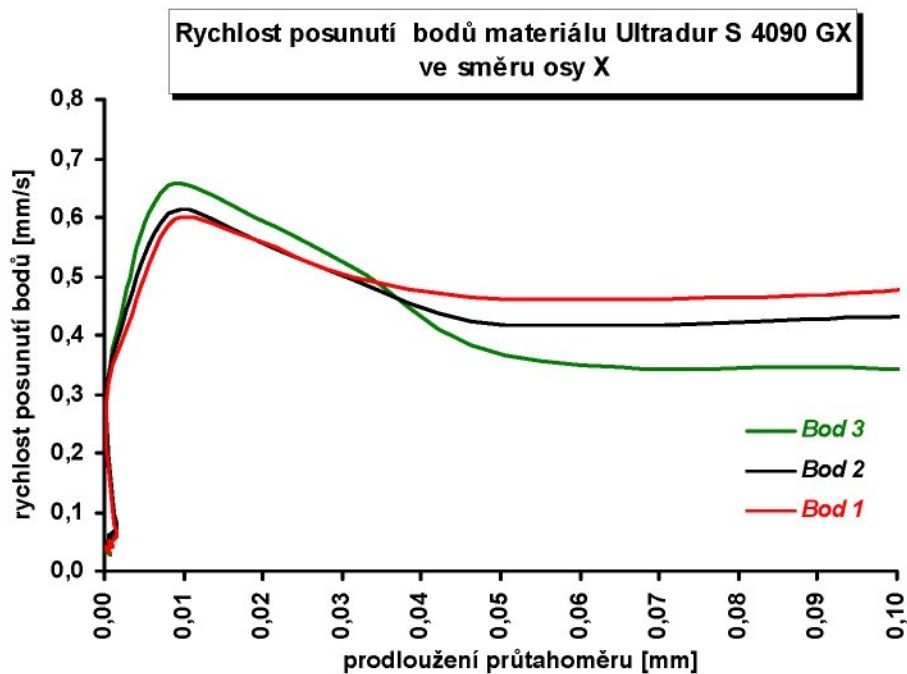
4.2 VYHODNOCENÍ DEFORMAČNÍCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH ČÁSTÍ POVRCHU

Z průběhů posunutí a rychlosti posunutí vybraných míst (bodů) povrchu v závislosti na prodloužení průtahoměru je na počátku prodloužení průtahoměru (s ohledem na další průběh těchto závislostí) patrná určitá nestejnoměrnost. Tuto odlišnost (viz obr. 4.3 a obr. 4.4) lze vysvětlit nepatrným posunutím vzorku

v čelistech, při jeho současném deformování. Ke vzniku tohoto jevu však dochází při velmi malé hodnotě deformace (protažení průtahoměru) a z hlediska vlivu na posuzované deformační vlastnosti jej lze považovat za zanedbatelný.



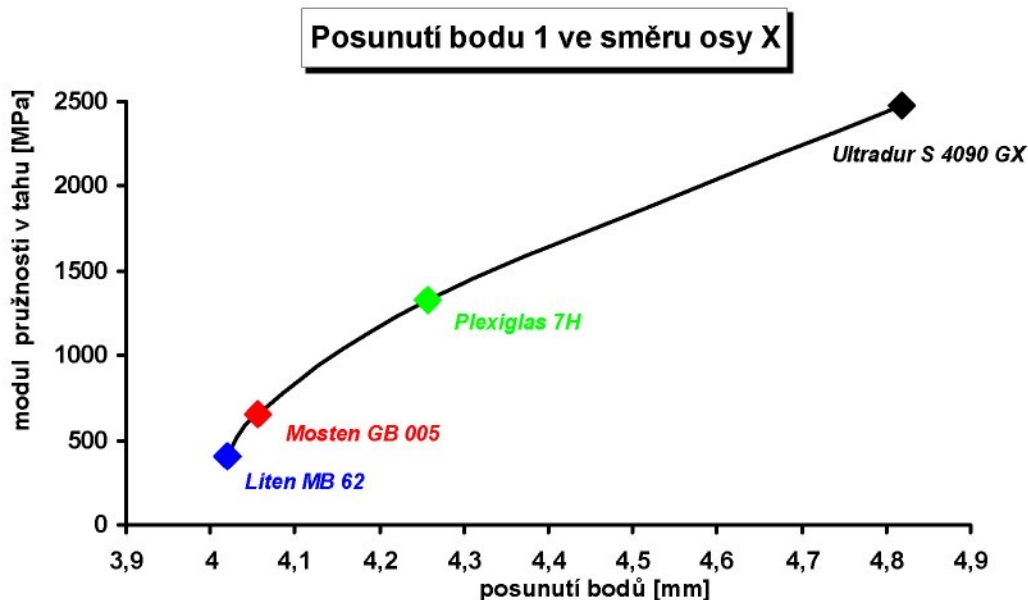
Obr. 4.3 Počátek posunutí bodů materiálu Ultradur S 4090 GX na povrchu tělesa ve směru osy x



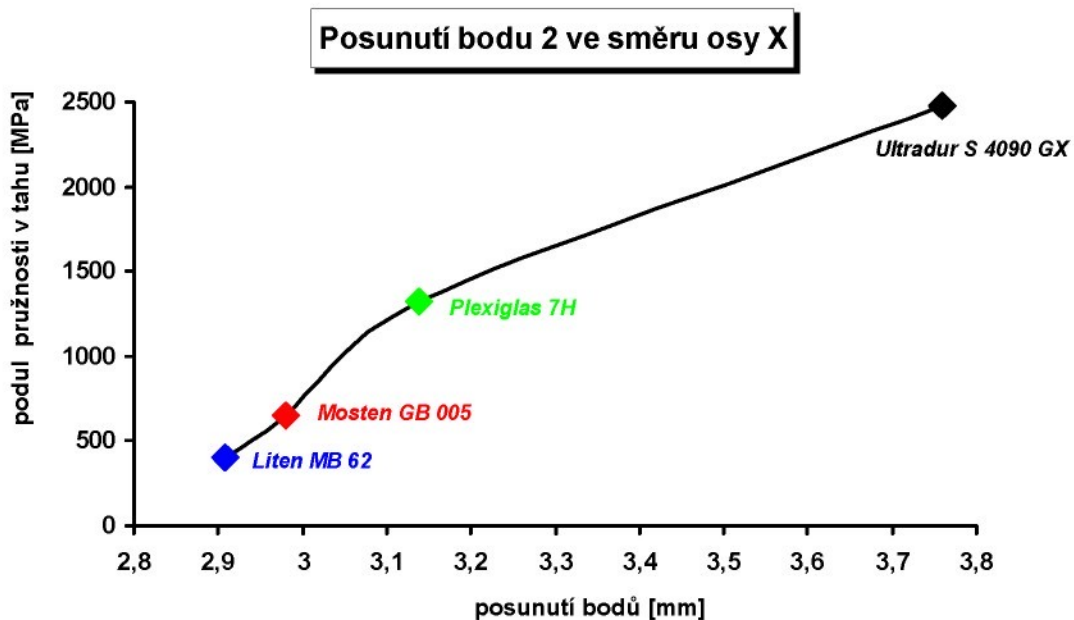
Obr. 4.4 Počátek rychlosti posunutí bodů materiálu Ultradur S 4090 GX na povrchu tělesa ve směru osy x

Na posunutí a rychlost posunutí vybraných míst (bodů) povrchu vzorku má zásadní vliv oblast maximální deformace, čili oblast budoucí tvorby krčku, či prasknutí vzorku. Z uvedených grafů (obr. 3.25 a obr. 3.26) toto maximum sice není vždy jednoznačně patrné, ale vzhledem k vyznačeným místům porušení vzorků a naměřeným průběhům (obr. 3.28 až 3.35) lze konstatovat, že posunutí a rychlost posunutí bodů umístěných před oblastí maximální deformace se směrem k pohyblivé čelisti s rostoucím prodloužením vzorků zvyšuje. Opačnou závislost vykazují body umístěné za oblastí maxima směrem k pevné čelisti, kde posunutí a rychlost posunutí s prodloužením vzorku klesá. Čím blíže bychom umísťovali body k místu maximální deformace, tím více by se jejich průběhy rychlostí blížili konstantní křivce.

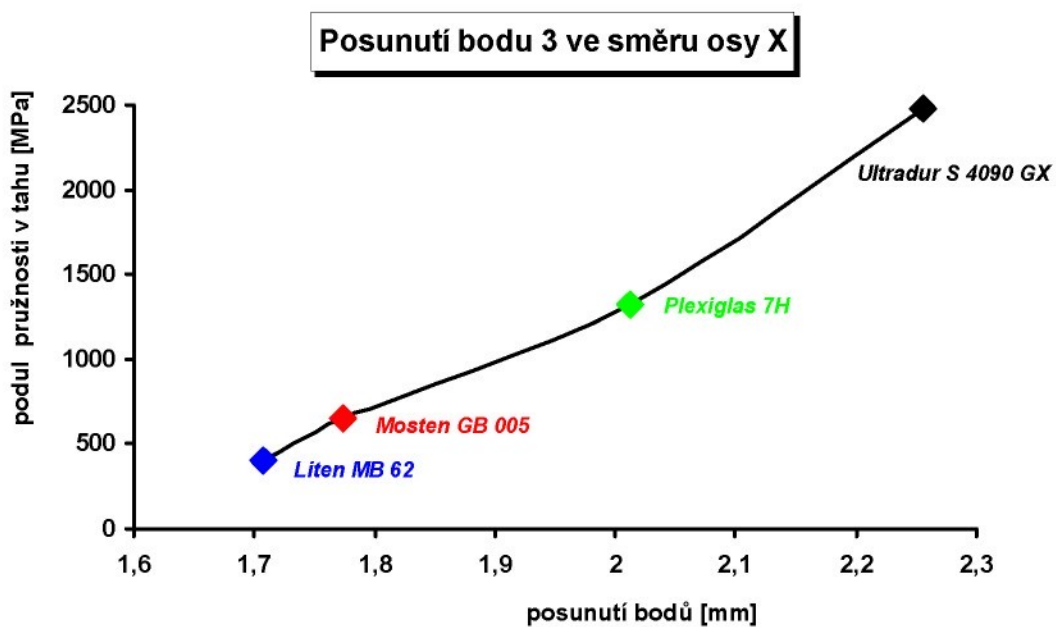
Porovnáme-li průběhy posunutí bodů jednotlivých materiálů je patrné, že se nejvíce posouvaly body materiálu Ultradur S 4090 GX, výrazněji méně docházelo k posuvu materiálu Plexiglas 7H, Liten MB 62 a Mosten GB 005. Tato skutečnost potvrzuje odvozenou teorii o vlivu mechanických vlastností (modulu pružnosti) na deformační děje, která říká, že pro dosažení stejné hodnoty prodloužení vzorků je zapotřebí vyššího napětí pro materiály s větším modulem pružnosti. V důsledku působení vyššího napětí se pozorované body materiálu s větším modulem pružnosti posouvají při stejné hodnotě prodloužení průtahoměru všech materiálů o větší hodnoty než body materiálu s modulem menším. Závislost posunutí jednotlivých bodů zkoumaných materiálů na modulu pružnosti v tahu při porovnávací hodnotě prodloužení průtahoměru ($d_l=2,250\text{mm}$) je znázorněna na obr. 4.5 až obr. 4.7. Určení vztahu mezi materiálem vzorků a rychlostí posunutí není vzhledem k jejich průběhům jednoznačně možné (viz obr. 3.32 až obr. 3.35).



Obr. 4.5 Vliv modulu pružnosti na posunutí bodu 1 hodnocených materiálů ve směru osy X



Obr. 4.6 Vliv modulu pružnosti na posunutí bodu 2 hodnocených materiálů ve směru osy X



Obr. 4.7 Vliv modulu pružnosti na posunutí bodu 3 hodnocených materiálů ve směru osy X

5 ZÁVĚR

Předkládaná práce posuzuje deformační vlastnosti pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS, což u polymerních materiálů doposud v širší míře nebylo provedeno. Měřicí systém ARAMIS umožňuje velmi rychle a především přesné zhodnocení široké škály deformačních vlastností. Pro námi zkoumané materiály (Mosten GB 005, Liten MB 62, Ultradur S 4090 GX a Plexiglas 7H) jsme hodnotili poměrnou povrchovou deformaci, posunutí a rychlost posunutí vybraných míst (bodů) povrchu za působení jednoosého tahového namáhání. Před posouzením deformačních vlastností je nutno upozornit na to, že hodnocení bylo posuzováno při nízkých hodnotách deformace vlivem použití křehkých materiálů (Plexiglas 7H, Ultradur S 4090 GX).

Z dosažených výsledků, které byly vyhodnoceny a diskutovány v předcházející kapitole (viz kap. 4.1 a 4.2) vyplývá, že pro materiály s vyšší hodnotou modulu pružnosti je při stejném protažení zkušebních vzorků zapotřebí většího napětí. V důsledku působení vyššího napětí se u těchto materiálů posouvaly posuzované body povrchu více, než u materiálů s modulem pružnosti menším. Hodnotíme-li poměrnou deformaci v délce zkušební tyčky ve směru hlavního namáhání dojdeme k závěru, že všechny zkoumané materiály vykazovaly velmi obdobnou závislost. V určité vzdálenosti od upnutí vzorku se poměrná deformace jevila téměř konstantní. Přesto lze tvrdit, že v této oblasti existuje oblast maximální deformace, tj. oblast budoucího porušení či tvorby krčku, která zásadním způsobem ovlivňuje posunutí a rychlost posunutí částí povrchu. Vzhledem k místu povrchu lze tvrdit, že čím je bod povrchu od oblasti maxima blíže k pohyblivé čelisti, tím se posouvá rychleji a více. Naopak rychlost a posunutí bodů směřujících od maxima k pevné čelisti se snižuje. Poměrnou deformaci ve směru osy kolmé na směr hlavního namáhání lze hodnotit pomocí poissonova poměru, kde větší poměrné deformace (zúžení) dosáhne materiál s nižším modulem pružnosti, nežli materiál s modulem pružnosti větším.

Jistou nevýhodou limitující rozsah využití této optické metody pro houževnaté polymerní materiály je nemožnost měření oblasti krčku, kde vlivem dloužení dochází k porušení deformovaného rastru. Vzhledem k této skutečnosti lze věrohodně hodnotit pouze deformační chování polymerů do meze kluzu. Závěrem bych chtěl doporučit instalaci propojovacího senzoru mezi systémem ARAMIS a tahovým zařízením, která by umožnila měřit a hodnotit přímo některé další závislosti jako např. průběhy napětí ve spojení s aktuálním deformovaným stavem, aj.

LITERATURA

- /1/ KREBSOVÁ, M.: Nauka o polymerech. Liberec: TU v Liberci, 1979.
- /2/ LAPČÍK, L.; RAAB, M.: Nauka o polymerech II. Zlín: UTB ve Zlíně, 2000. ISBN 80-238-6527-7.
- /3/ KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů. Liberec: TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3.
- /4/ <http://tzs.kmm.zcu.cz/polymery.pdf> (březen 2009).
- /5/ KOŠKOVÁ, B.: Struktura a vlastnosti vláken. Liberec: TU v Liberci, 1989. ISBN 80-7083-018-2.
- /6/ MEISSNER, B.; ZILVAR, V.: Fyzika polymerů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-634-87.
- /7/ HAMPL, J.; LIPTÁK, J.; SEDLÁČEK, J.; ŠTUPL, K.: Materiály pro elektrotechniku. Praha: ČVUT v Praze, 2000.
- /8/ HOLZMÜLLER, W.; ALTENBURG, K.: Fyzika polymerů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
- /9/ <http://kmlinux.fjfi.cvut.cz/~novotfil/skola/ROZHRANI/A-PREDN-07/02-Molekularni-pohled.doc> (duben 2009).
- /10/ www.kmt.tul.cz/sekce/doplňky/Polymery.pdf (duben 2009).
- /11/ VANÍČEK, J.: Metody termické analýzy - struktura a fázové chování polymerů. Přednášky. FT TUL. Liberec: TU v Liberci, 2006.
- /12/ <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm> (duben 2009).
- /13/ BĚHÁLEK, L.: Hodnocení nadmolekulární struktury plastů. Seminář. FS TUL. Liberec: TU v Liberci 2007.
- /14/ LENFELD, P.: Technologie zpracování plastů. Prezentace. FS TUL. Liberec: TU v Liberci 2006.
- /15/ http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm (duben 2009).
- /16/ <http://www.filtration.cz/doc/skelna-vlakna-vs-celuloza.pdf> (duben 2009).
- /17/ LENFELD, P.: Plasty a jejich vlastnosti. Prezentace. FS TUL. Liberec: TU v Liberci 2006.

- /18/ <http://www.kme.zcu.cz/granty/biofrvs/pdf/4-01FRVS-03.pdf> (duben 2009).
- /19/ <http://www.campusplastics.com/> (duben 2009).
- /20/ LEDNICKÝ, F.: Faktografie polymerních materiálů jako důležitý zdroj informací o struktuře a mechanických vlastnostech. Habilitační práce. Liberec: TU v Liberci, 2003.
- /21/ KULHA, P.: Senzory pro měření deformace. Prezentace. FEL ČVUT. Praha: ČVUT v Praze, 2005.
- /22/ ČERNOHORSKÝ, J.: Když se řekne tenzometry. Článek. Automatizace r. 48, č.1, 2005.
- /23/ ČERNOHORSKÝ, J.: Senzory s kovovými tenzometry v technické praxi. Článek. Automa, č. 04, 2008.
- /24/ http://www.labortech.cz/cz/pages/kmf01_extenzometr.html (duben 2009).
- /25/ <http://www.gom.com/EN/measuring.systems/aramis/system/system.html> (květen 2009).
- /26/ http://www.mcae.cz/ARAMIS_CS.html (květen 2009).
- /27/ KALOVÁ, I.; HORÁK, K.: Optické metody měření 3D objektů. Článek. Elektrevue, VUT Brno, 12.4. 2005.
- /28/ Materiálový list Mosten GB 005.
- /29/ Materiálový list Liten MB 62.
- /30/ Materiálový list Ultradur S 4090 GX.
- /31/ Materiálový list Plexiglas 7H.
- /32/ ČSN EN ISO 294.
- /33/ ČSN EN ISO 527-1/2.
- /34/ Manuál kalibrace přístroje ARAMIS 2M.

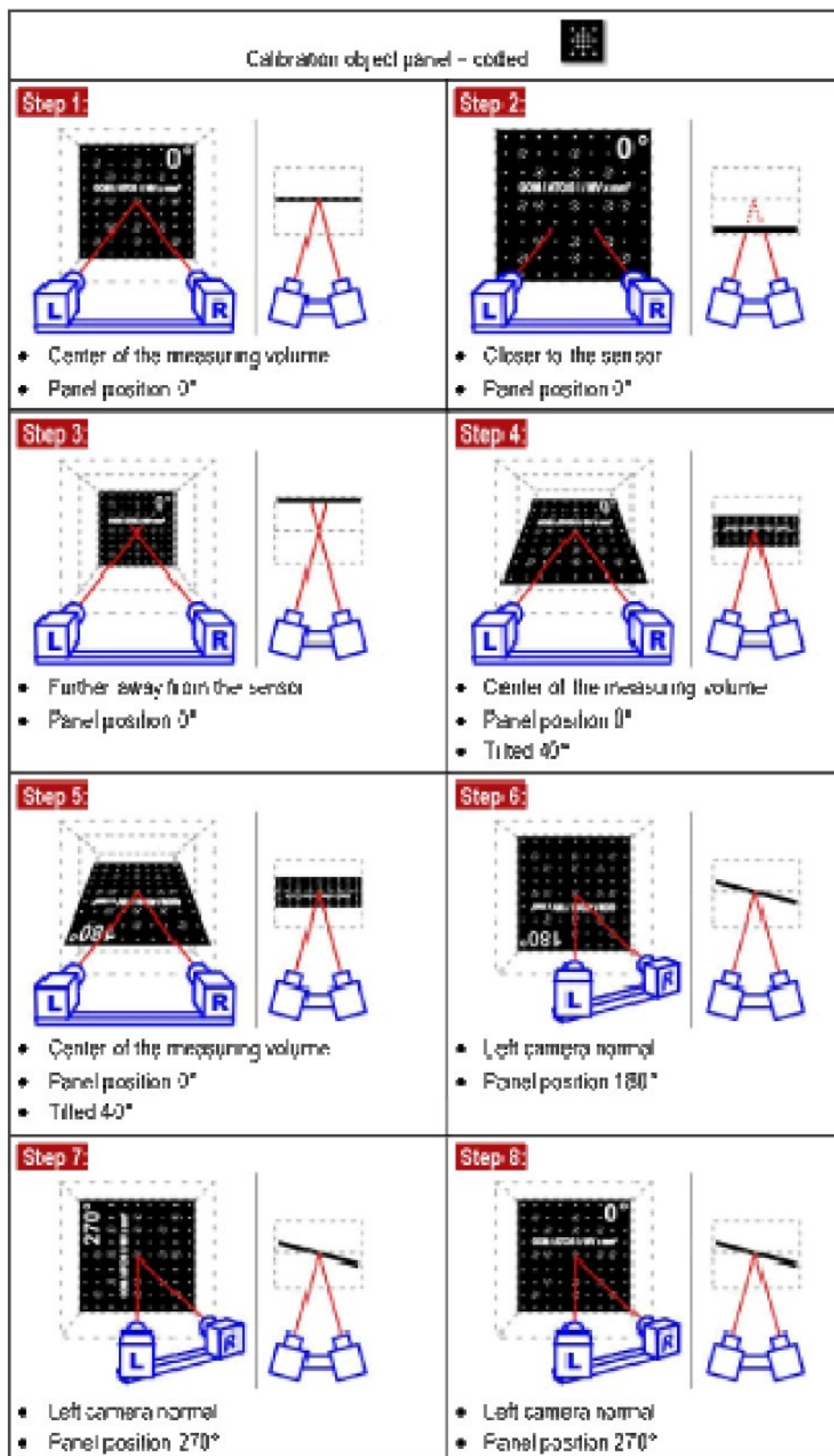
PŘÍLOHY

Diplomové práce

Příloha 1: Kalibrační kroky pro kalibraci přístroje ARAMIS 2M

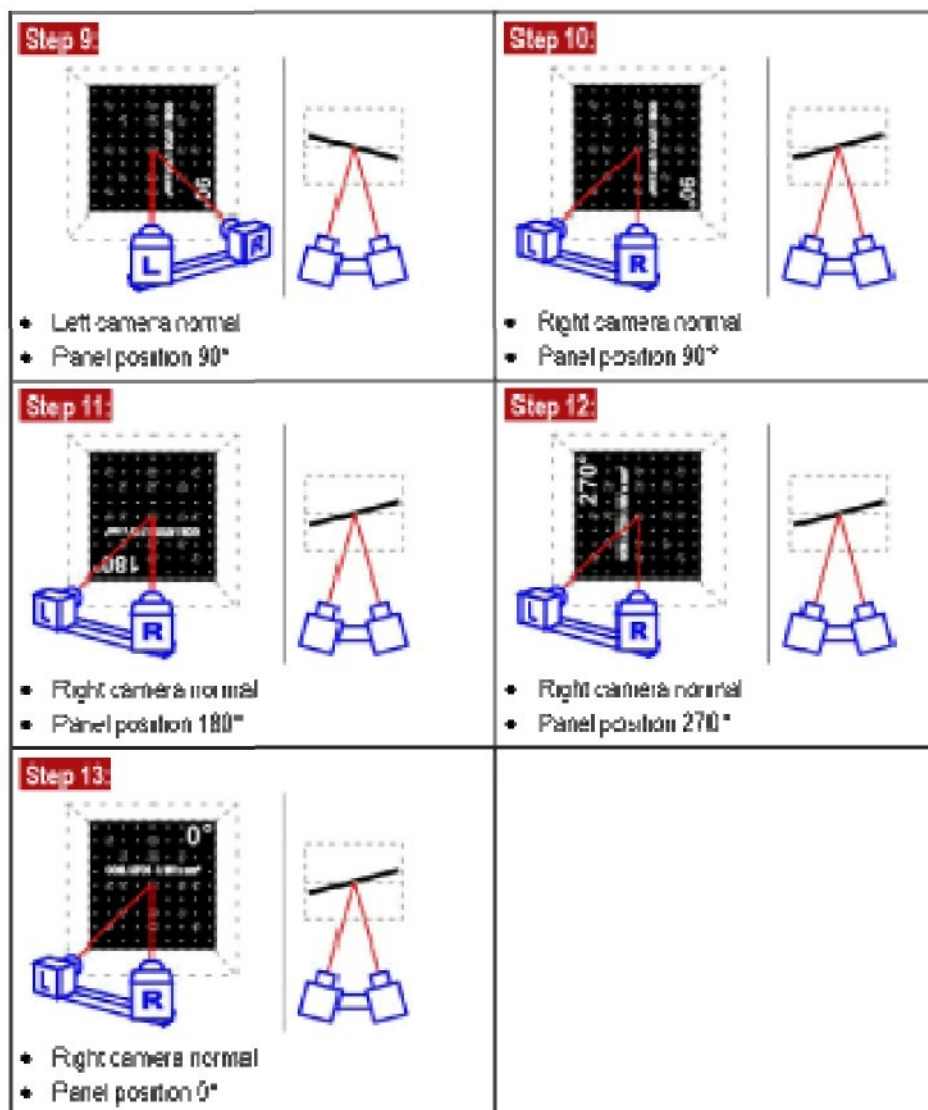
Příloha 2: Průběhy posunutí a rychlosti posunutí bodů hodnocených materiálů na povrchu tělesa ve směru osy X (ve směru tahového působení)

Příloha 1: Kalibrační kroky pro kalibraci přístroje ARAMIS 2M



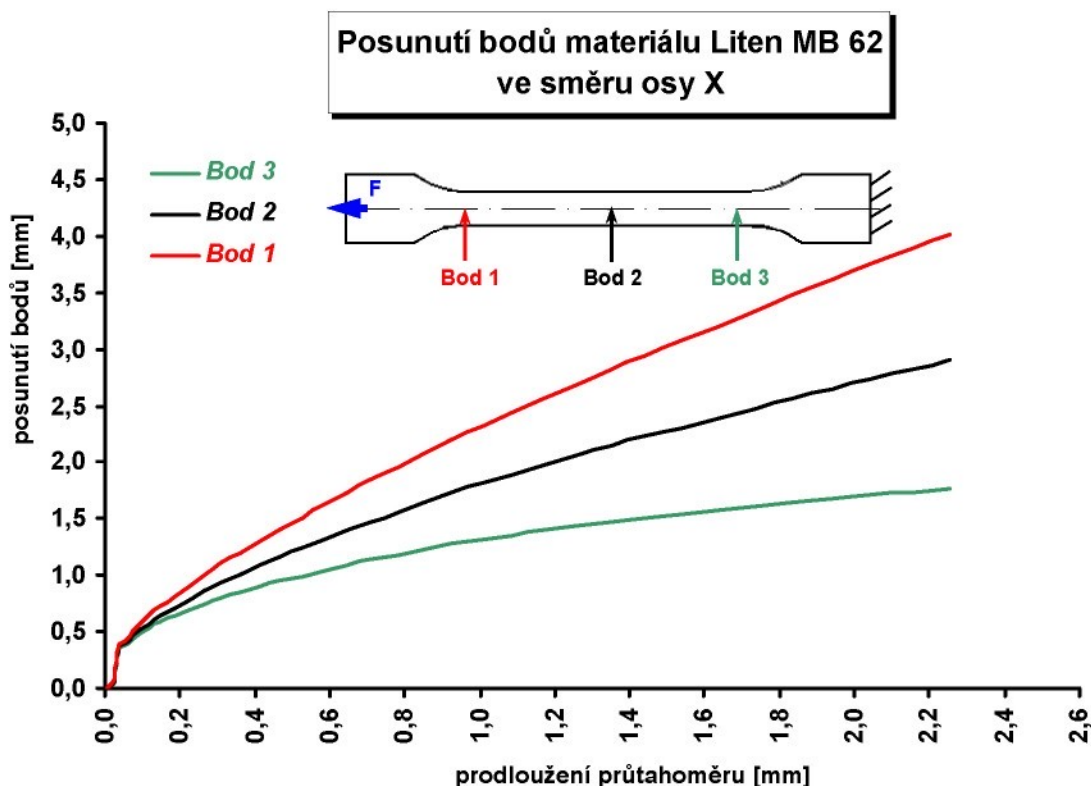
Obr. P 1 Postup potáčení a snímání kalibrační desky CP 20 90x72 CCD kamerami

Příloha 1: Kalibrační kroky pro kalibraci přístroje ARAMIS 2M

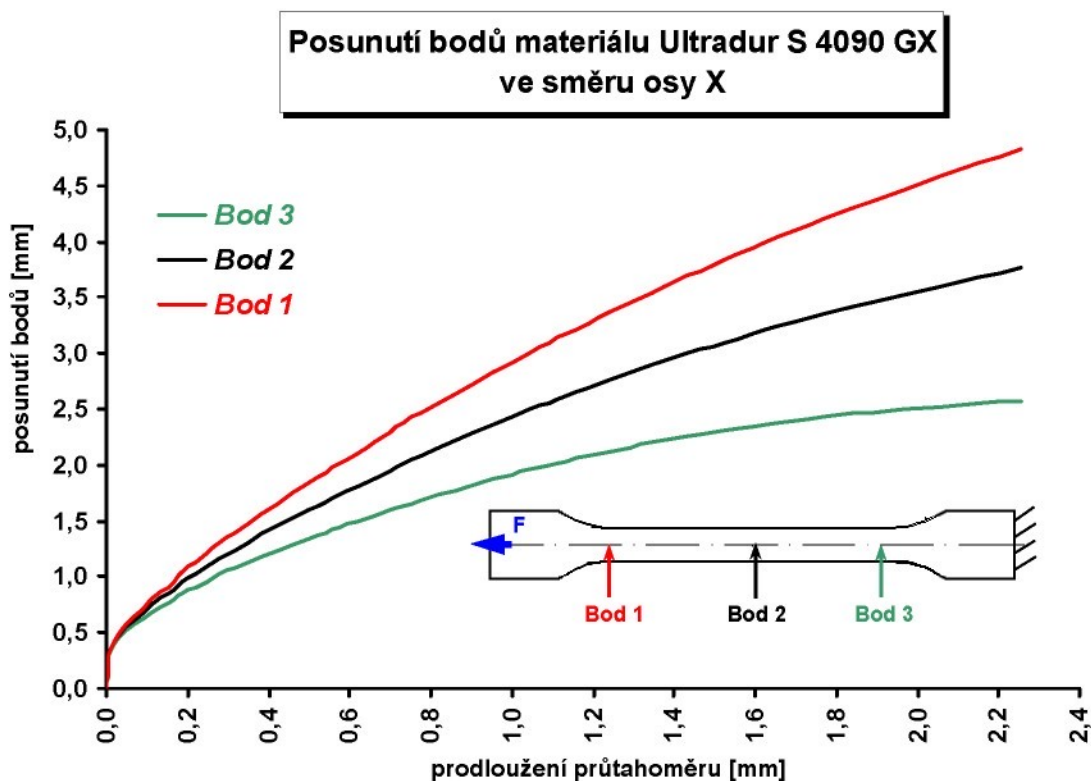


Obr. P 1 Postup potáčení a snímání kalibrační desky CP 20 90x72 CCD kamerami

Příloha 2: Průběhy posunutí bodů hodnocených materiálů na povrchu tělesa ve směru osy X (ve směru tahového působení)

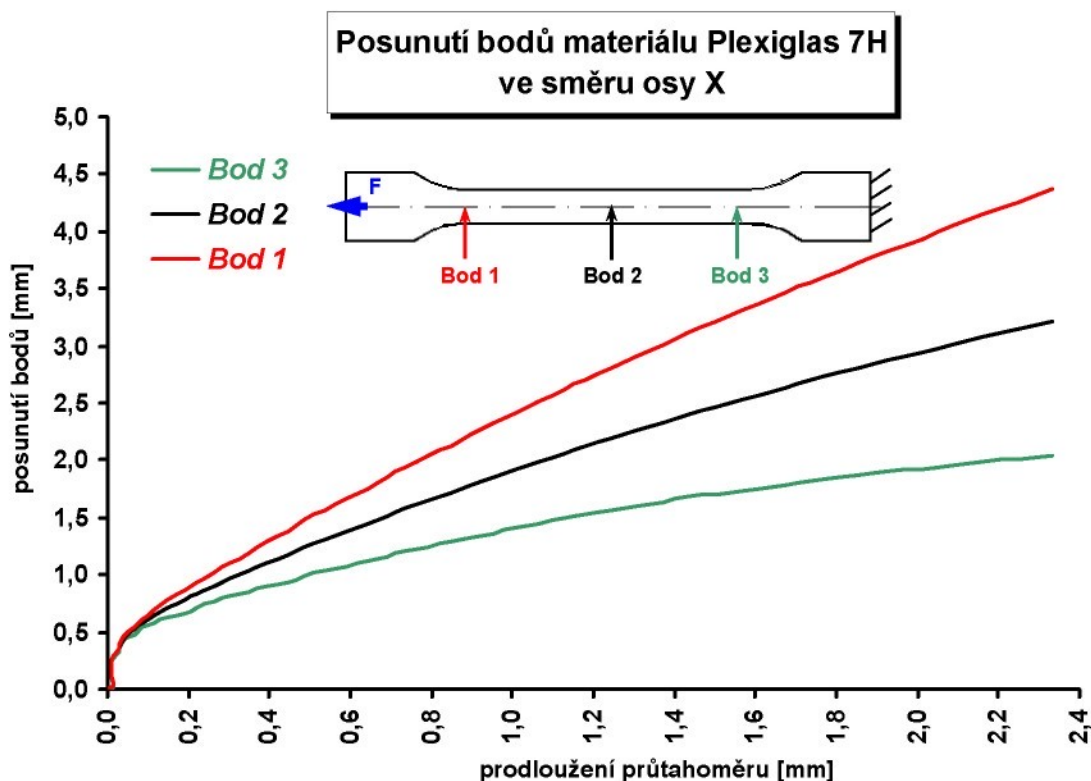


Obr. P 2 Průběhy posunutí bodů na povrchu tělesa materiálu Liten MB 62 ve směru osy X

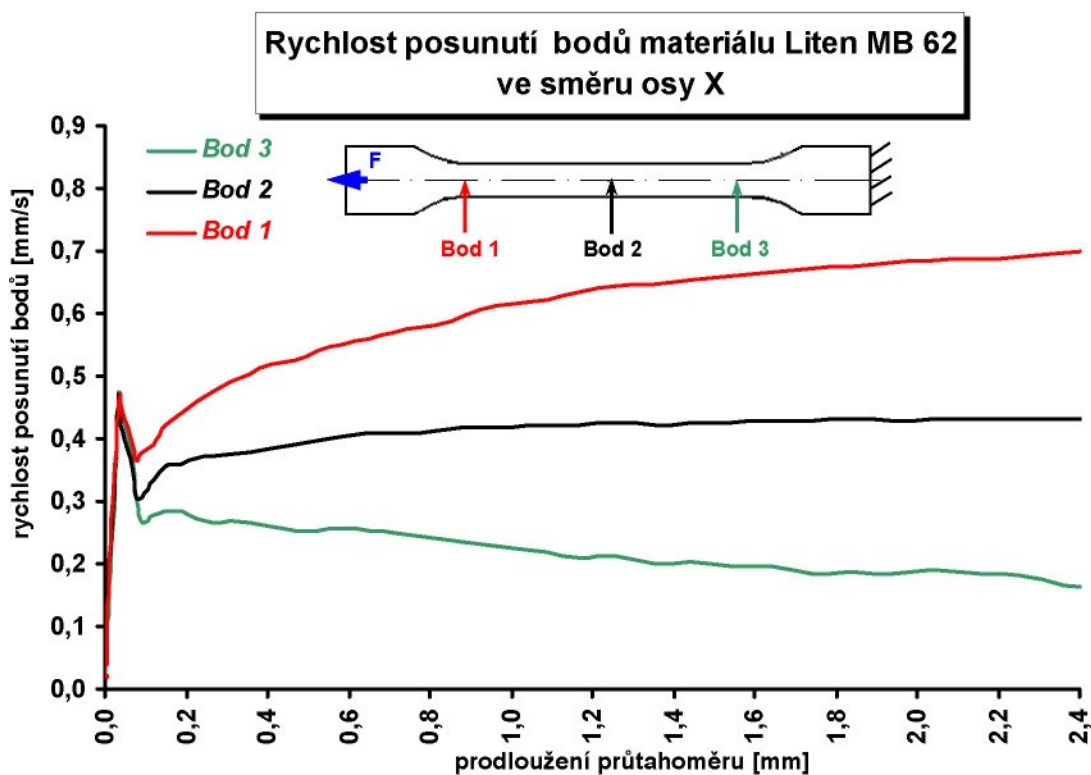


Obr. P 3 Průběhy posunutí bodů na povrchu tělesa materiálu Ultradur S 4090 GX ve směru osy X

Příloha 2: Průběhy posunutí a rychlostí posunutí bodů hodnocených materiálů na povrchu tělesa ve směru osy X (ve směru tahového působení)

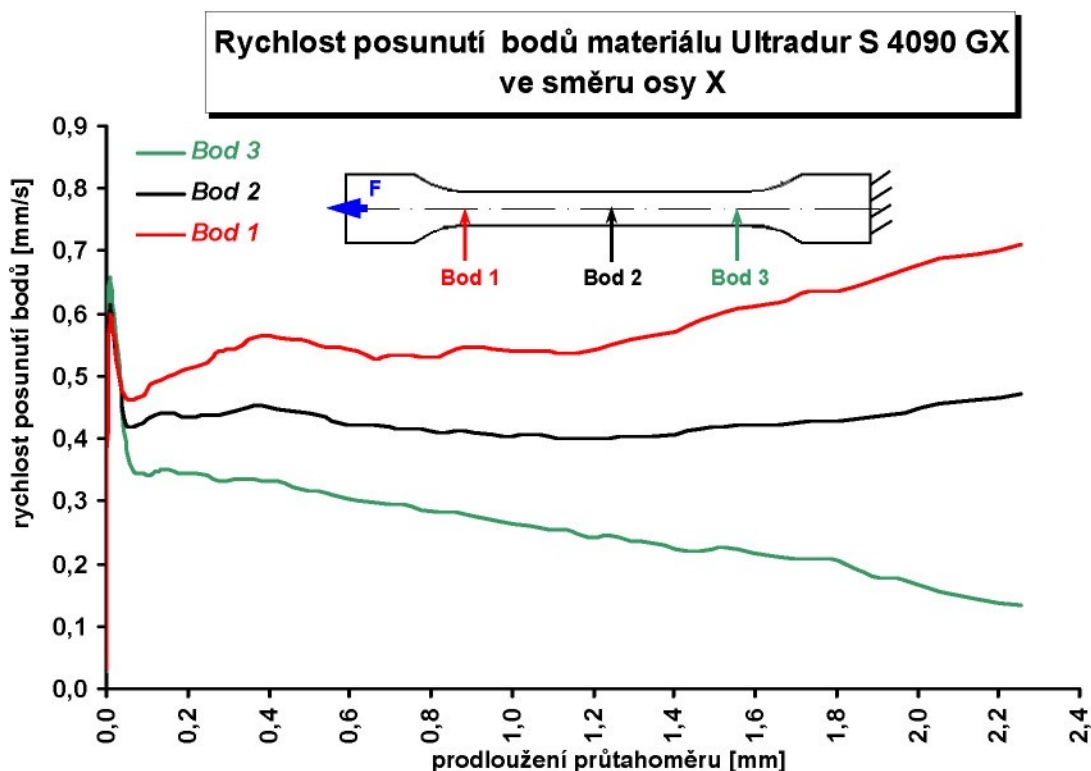


Obr. P 4 Průběhy posunutí bodů na povrchu tělesa materiálu Liten MB 62 ve směru osy X

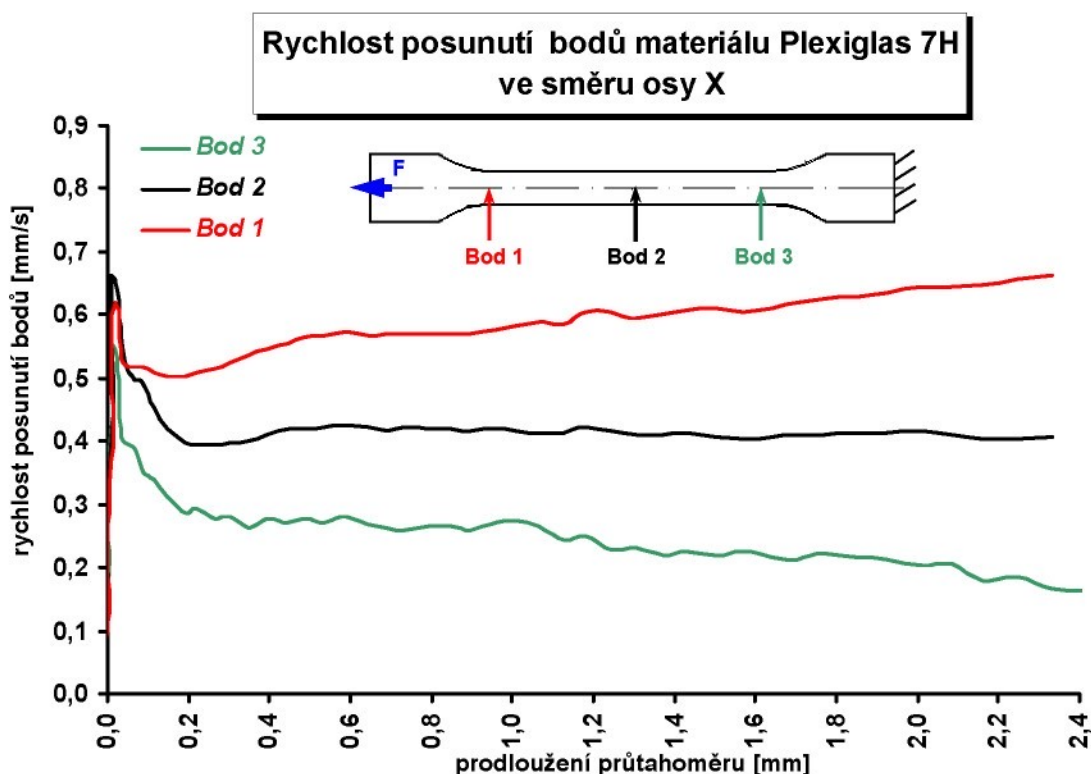


Obr. P 5 Průběhy rychlostí posunutí bodů na povrchu tělesa materiálu Liten MB 62 ve směru osy X

Příloha 2: Průběhy rychlostí posunutí bodů hodnocených materiálů na povrchu tělesa ve směru osy X (ve směru tahového působení)



Obr. P 6 Průběhy rychlostí posunutí bodů na povrchu tělesa materiálu Ultradur S 4090 GX ve směru osy X



Obr. P 7 Průběhy rychlostí posunutí bodů na povrchu tělesa materiálu Plexiglas 7H ve směru osy X