

Srovnání termo-mechanického chování u vybraných polykarbonátů

Bc. Róbert Valach

Diplomová práce

2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Róbert Valach

Osobní číslo: T14521

Studijní program: N3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Srovnání termo-mechanického chování u vybraných polykarbonátů

Zásady pro vypracování:

- 1. Zpracujte literární rešerši na zadané téma**
- 2. Příprava zkušebních těles pro experiment**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. L. H. Sperling, Introduction to physical polymer science, John Wiley & Sons, 2015.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Eva Hnátková

Ústav výrobního inženýrství

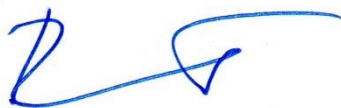
Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

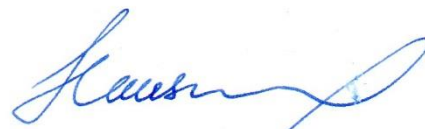
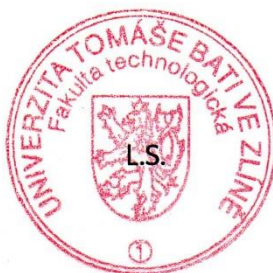
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské/diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že bakalářská/diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – bakalářskou/diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské/diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské/diplomové práce využít ke komerčním účelům.

Ve Zlíně 9.5. 2016

..... Robert Valach
Jméno, příjmení, podpis

1) zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47b Zveřejňování závěrečných prací:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá vysoko teplotne odolnými polykarbonátmi, ktoré sú komerčne dostupné. Teoretická časť sa začína rozborom a delením polymérov. Časť práce sa venuje samotným polykarbonátom. V praktickej časti je rozobraný proces samotnej výroby a úpravy skúšobných teliesok a následne vyhodnotený termo analýzy, mechanické skúšky a optická skúška. Hlavným cieľom práce je porovnať namerané hodnoty s už známymi hodnotami, zhodnotiť materiály medzi sebou a doplniť údaje do materiálových listov.

Kľúčové slová: vysoko teplotne odolný polykarbonát, termo analýzy, mechanické skúšky

ABSTRACT

This master thesis deals with a highly heat-resistant polycarbonates, which are commercially available. The theoretical part describes the analysis and dividing of polymers. The part of the work is devoted to the actual polycarbonate. In the practical part, the process of actual production and modification of testing bodies is developed. Then, the thermo analysis as well as mechanical and optical testing is evaluated. The main objective of this work is to compare the measured values with already known values, comparison of the materials and supplementation of the data to the material sheets.

Keyword: high-heat polycarbonate, thermo analysis, mechanical tests

Rád by som poďakoval všetkým ľuďom, ktorý mi na tejto diplomovej práci pomáhali a boli mojou oporou. Ďakujem mojej vedúcej práce Ing. Eve Hnátkovej, za rady a poskytnuté materiály k mojej práci a za všetok čas mi venovaný. Ďalej veľká vďaka patrí Ing. Františkovi Vavříkovi a Bc. Robertovi Mostýnovi za prípravu skúšobných teliesok. Tato diplomová práca bola spolufinancovaná z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/FT/2016/002 a poďakovanie patrí aj za finančnú podporu programu NPU I (LO1504) poskytnutému Ministerstvom školstva, mládeže a telovýchovy Českej republiky. Prehlasujem že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronicky nahraná do IS/STAG sú totožné.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 POLYMERNÉ MATERIÁLY	10
1.1 ZÁKLADNÉ DELENIE POLYMÉROV	10
1.1.1 Elastoméry.....	10
1.1.2 Termoplasty.....	11
1.1.3 Reaktoplasty	12
1.2 ĎALŠIE DELENIE POLYMÉROV	12
1.2.1 Pôvod polymérov	12
1.2.2 Chemické zloženie polyméru	13
1.2.3 Delenie podľa aplikácií	13
1.2.4 Druhy molekúl	14
1.2.5 Nadmolekulárna štruktúra	14
1.2.6 Výroba.....	15
1.3 MOLEKULOVÁ HMOTNOSŤ	16
1.3.1 Distribúcia a stanovenie mólovej hmotnosti	17
2 POLYKARBONÁT	18
2.1.1 Vlastnosti polykarbonátov	19
2.1.2 Druhy polykarbonátu	20
2.1.3 Použitie polykrabonátov.....	21
3 MECHANICKÉ SKÚŠKY A TERMO ANALÝZY	23
3.1 SKÚŠKA ŤAHOM	23
3.2 SKÚŠKA OHYBOM.....	24
3.3 CHARPY VRUBOVÁ SKÚŠKA.....	25
3.4 SKÚŠKA PODEA VICATA	26
3.5 TEPLOTNÁ DEFORMÁCIA	27
3.6 DIFERENČNÁ KOMPENZAČNÁ KALORIMETRIA (DSC)	28
3.7 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIA	29
4 ZHRNUTIE TEORETICKEJ ČASTI	30
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
5 CIEL PRÁCE	32
6 MATERIÁLY	33
7 PRÍPRAVA SKÚŠOBNÝCH TELIESOK	34
7.1 SUŠENIE GRANULÁTU	34
7.2 VSTREKOVANIE SKÚŠOBNÝCH TELIESOK.....	36
7.3 VÝROBA VRUBOV PRE CHARPY-HO SKÚŠKU.....	37
7.4 POKOVENIE PRE OPTICKÚ SKÚŠKU.....	38
7.5 PRÍPRAVA TELIESOK PRE DSC SKÚŠKU	39
8 METÓDY MERANIA	41

8.1	SKÚŠKA ŤAHOM	41
8.2	SKÚŠKA OHYBOM	42
8.3	CHARPY-HO SKÚŠKA	43
8.4	OPTICKÁ SKÚŠKA	44
8.5	DSC	45
8.6	INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIA	46
9	VÝSLEDKY	47
9.1	VYHODNOTENIE TERMO ANALÝZ	47
9.1.1	FTIR	47
9.1.2	DSC	48
9.2	MECHANICKÉ SKÚŠKY	50
9.2.1	Skúška ťahom.....	50
9.2.2	Skúška ohybom	55
9.2.3	Vrubová skúška Chapry-ho kladivom.....	58
9.3	OPTICKÁ SKÚŠKA DEGRADÁCIE POKOVENÉHO POVRCHU	59
10	DISKUSIA VÝSLEDKOV	62
	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM GRAFU	77
	SEZNAM TABULEK.....	78

ÚVOD

V dnešnej automobilovej dobe sa výrobcovia snažia vytvoriť produkty vzhľadovo lahodiace oku. Na druhej strane sa bojuje s mechanickým a tepelným opotrebením súčiastok v našom prípade konkrétne svetlometov. Práca je vypracovaná v spolupráci so spoločnosťou Varroc Lighting Systems. V práci bude testované viacero druhov vysoko teplotne odolných polykarbonátov, ktoré sa používajú na výrobu časti svetlometov. Všetky testované materiály sú komerčne dostupné, ale pre ochranu nameraných údajov nebudú v práci používané konkrétni výrobcovia a druhy materiálov.

Začiatok práce je venovaný polymérom, kde sa vysvetlí základná terminológia a delenie. Polyméry sa delia podľa aplikácií, výroby, chemického zloženia, pôvodu a iných parametrov. Následne sa podrobne zameriame na polykarbonáty. Aký je rozdiel vo výrobe polykarbonátu a vysoko teplotne odolného polykarbonátu. Aké rôzne aplikácie a využite v priemysle polykarbonát má. Nakoniec teória k samotným skúškam polymérov. Vysvetlený princíp termo analýzy. Rozdelenie mechanických skúšok. Vysvetlenie noriem podľa ktorých sa budú skúšky vykonávať.

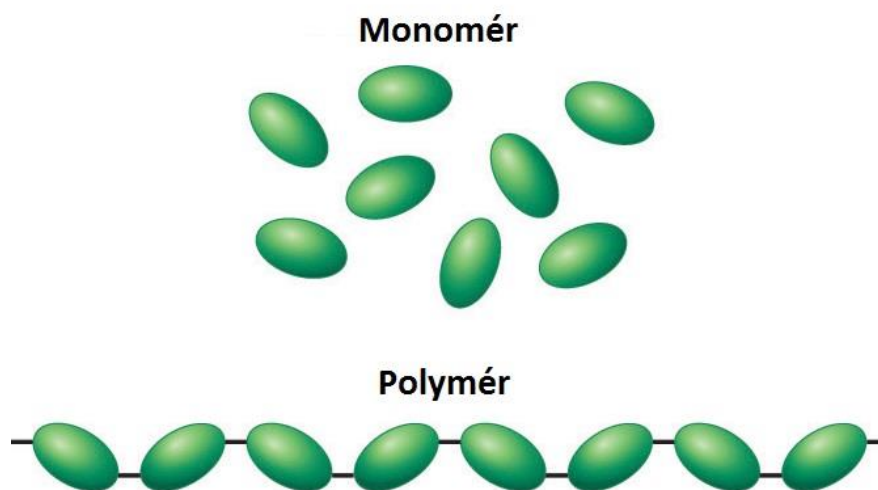
Praktická časť začína dodaním materiálov v 25 kilových vreciach a dodaním materiálových listov. Následne bude vysvetlená príprava skúšobných teliesok od sušenia materiálu, cez vstrekovanie až po konečnú úpravu. Porovnajú sa parametre pri vstrekaní. Po vyrobení skúšobných teliesok a ich úprave sa prešlo k samotným skúškam a analýzám. Každá skúška sa podrobne vysvetlila a uviedli sa parametre podľa ISO normy pri danom meraní. Pri mechanických skúškach sa pre každý materiál robilo desať meraní. Po meraní sa výsledky vyhodnotili do tabuliek a grafov. Z desiatich meraní sa vypočítali aritmetické priemery a smerodajné odchýlky. Po vyhodnotení výsledkov prebehla diskusia, v ktorej sa zhrnuli výsledky.

Hlavným cieľom práce je rozbor dodaných materiálov a porovnanie ich vlastností s tabuľkovými hodnotami ako je napätie v ťahu a ohybe pri izbovej teplote, spracovateľské teploty a iné. Doplnenie údajov do materiálových listov, ktoré sa štandardne neudávajú. List bude doplnený o výsledky mechanických skúšok pri iných teplotách a optickú skúšku. Výsledky budú pomáhať pri výbere materiálu k správnej aplikácii.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÉ MATERIÁLY

Polymér je látka zložená z veľkého množstva makromolekúl, ktoré sa mnohonásobne opakujú (Obr. 1). Základná stavebná časť makromolekuly je monomér. Podľa výberu základných monomérov môžeme získať širokú paletu polymérnych materiálov s rôznymi vlastnosťami. Polymér je čistá zložka, ktorá sa v praxi nepoužíva. Vo všeobecnosti sa používa plast na označenie polyméru v ktorom sú prídavné látky (antidegradanti, plniva, farbiva, atď) . [1]



Obr. 1: Monomér vs. Polymér[2]

1.1 Základné delenie polymérov

Polyméry môžeme deliť podľa mnoho spôsobov. Základné delenie je na elastoméry, termoplasty a reaktoplasty.

1.1.1 Elastoméry

Elastomér je vysoko-elastický polymér. Malou silou vznikajú veľké deformácie. Hlavný elastomér je kaučuk po vulkanizácii. Delenie kaučukov je na prírodné a syntetické. Ďalej sa delia podľa použitia na všeobecné použité, oleju odolné kaučuky a teplu odolné. Najznámejšia aplikácia je v gumárskom priemysle- pneumatiky, manžety, pneumatické mechy, ktoré je vidieť na Obr. 2.



Obr. 2: Výrobok z elastoméru (pneumatické mechy)[3]

1.1.2 Termoplasty

Sú to plastické materiály, ktoré pri určitých teplotách je možné tvarovať. Poožívajú sa na rôzne aplikácie od automobilového priemyslu až po potravinársky (Obr. 3). Hlavnou výhodou je ich znovu použitie. Sú dobré rozpustné v organických zlúčeninách. Termoplasty sú vysokomolekulárne látky. Medzi termoplasty sa radia tieto skupiny:

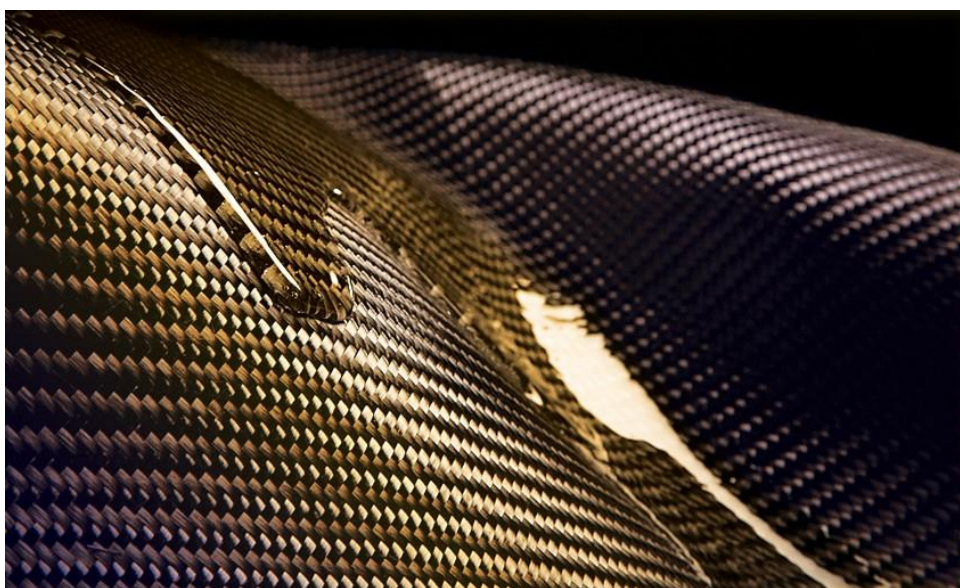
- Polyolefiny a fluoroplasty – polyetylen (PE), kopolymery ethylenu, Polypropylén (PP), polytetrafluorethylen (PTFE), atď
- Vinylové polyméry – polyvinylchlorid (PVC), kopolyméry vinylchloridu, polyvinylacetát (PVAC), Polyvinylalkohol (PVAL), polavinylnacetály, atď
- Styrenové a akrylové polyméry – polystyrén (PS), kopolyméry styrénu, atď
- Polyestery a polyétery - polyethylentereftalát (PETP), polykarbonáty (PC), polyethery, atď
- Polyamidy a polyuretány – druhy polyamidov (PA) a polyuretánov (PUR)



Obr. 3: Box na jedlo z termoplastu [4]

1.1.3 Reaktoplasty

Sú to polyméry, ktoré chemickou reakciou menia svoj lineárny stav na zosieťovaný. Reaktoplasty sa vytvrdzujú. Vytvrdenie môže nastať buď pridaním tvrdidla alebo tepelnou reakciou. Po vytvrdení je materiál nerozpustný a netaviteľný. Reaktoplasty sa nazývajú aj termosety. Po vytvrdení sú nerozpustné v kyselinách, vode a organických rozpúšťadlách a zároveň sú netaviteľné. Reaktoplasty rozdeľujeme na fenoplasty, aminoplasty, epoxidové živice (Obr. 4), polyestérové živice a silikónové živice. [5]



Obr. 4: Uhlíkové vlákno s epoxidovou živicom [5]

1.2 Ďalšie delenie polymérov

Polyméry sa dajú deliť podľa mnoho podskupín. Delíme ich podľa pôvodu, zloženia, aplikácií v priemysle, štruktúry, výroby a iných skupín.

1.2.1 Pôvod polymérov

Polyméry môžu vznikáť prírodné a synteticky. Prírodné polyméry sú bielkoviny, celulóza, škrob, chitín, kaučuk a mnoho ďalších. Zaraďujú sa medzi prvé makromolekulové látky s technickým použitím. Syntetické polyméry sa nevyskytujú v prírode, vytvára ich človek pomocou chemickej syntézy, z čoho dostali aj názov syntetické polyméry. Medzi syntetické polyméry patria polyetylén, polypropylén, polybutén, polyvinylchlorid a mnoho ďalších.[1]

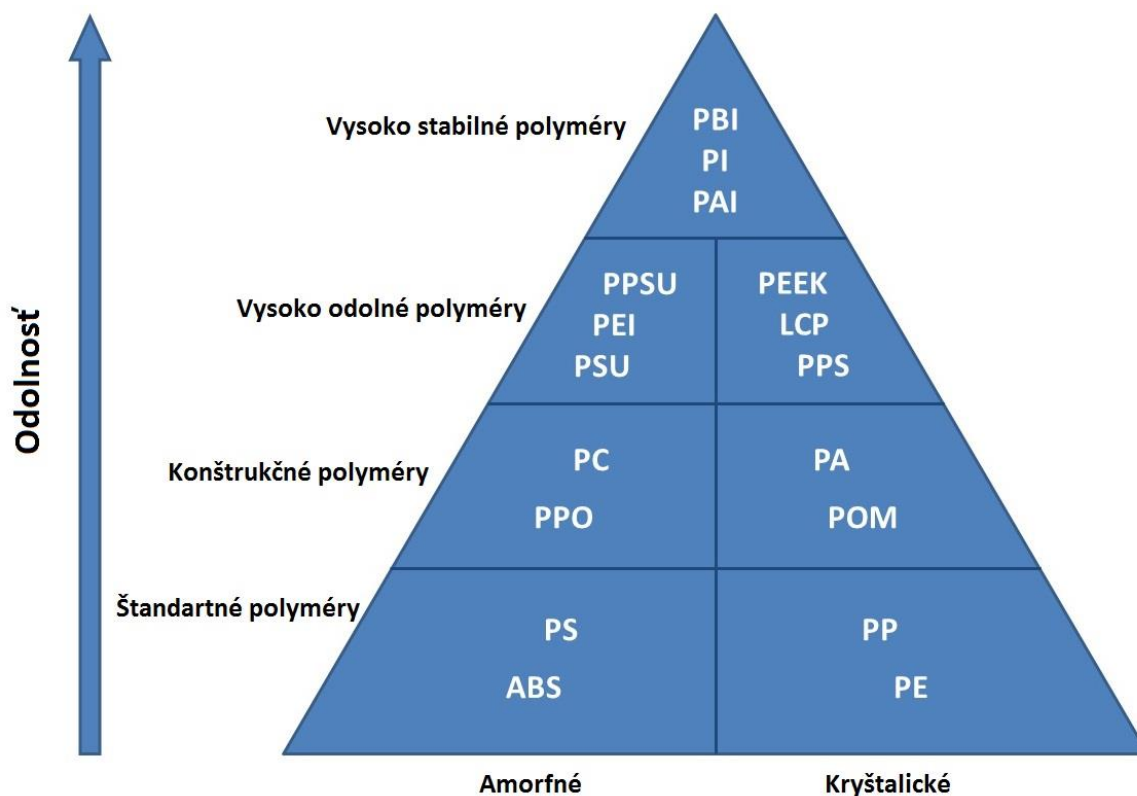
1.2.2 Chemické zloženie polyméru

Záleží na zložení monoméru a ako sú prvky medzi sebou viazané. Polyméry sú tvorené len z niekoľkých chemických prvkov: uhlík – C, vodík – H, kyslík – O, niekedy dusík – N, chlór – Cl, fluór – F, síra – S a silikóny, v štruktúre ktorých je kremík – Si.

1.2.3 Delenie podľa aplikácií

Podľa použitia a vlastností polymérov ich delíme na obyčajné, konštrukčné a vysoko - odolné polyméry, ako je vidieť na Obr. 5. Od vlastností polyméru závisí cena materiálu.

Ďalej sa práca bude zaoberať len konštrukčnými materiálmi nakoľko polykarbonát patrí do skupiny konštrukčných polymérov. Konštrukčné materiály musia spĺňať nároky kladené na dané prvky (pružnosť, tuhosť, pevnosť, oteru vzdornosť, tepelnú odolnosť).



Obr. 5: Delenie polymérov na základe tepelnej odolnosti

Pre rôzne spôsoby použitia musia byť chemicky a mechanicky odolné, nepriepustné. Väčšina makromolekulových látok sú tepelnými a elektrickými izolantmi. Teplotnú stabilitu

majú malú až na niektoré špeciálne materiály. Makromolekulové látky sa dobre a pomerne ľahko spracovávajú. Vlastnosti sa menia pridaním rôznych prísad:

- Zmäkčovadla – znižujú sa van der Waahlove sily, čím plast zmäkne
- Stabilizátory/ retardéry – slúžia na ochranu proti oxidácii, horeniu
- Farbiva – bývajú vo forme pigmentu
- Plniva – zvyšujú objem za malú cenu
- Nadúvadla – chemické zväčšovanie objemu

Po pridaní prísad do polyméru sa vytvorí plast, používaný v praxi. [1]

1.2.4 Druhy molekúl

Polyméry podľa makromolekulej štruktúry delíme na lineárne, rozvetvené a usporiadané do priestorovej siete (Obr. 6).



Obr. 6: Makromolekula 1.) lineárneho 2.) rozvetveného 3.) zosieťovaná

Makromolekule polyméru nemajú pevný tvar, pohybom segmentov menia geometrické usporiadanie. Vlastnosti polymérov závisia od fázového stavu, molekulovej hmotnosti a chemického zloženia. [1]

1.2.5 Nadmolekulárna štruktúra

Rozdelenie podľa nadmolekularanej štruktúry závisí na usporiadaní makromolekúl v tuhom stave. Delia sa na kryštalické a amorfné polyméry. 100 %-tný kryštalický polymér sa dá vyrobiť len v laboratórnych podmienkach ako monokryštál. Správny pojem v praxi je semikryštalický polymér. Pri kryštalickej fáze je tesnejšie uloženie makromolekúl. Čím

väčší je stupeň kryštalizácie tím väčšia je hustota, zvyšuje sa pevnosť a tuhosť, znižuje sa rozpustnosť, menia sa optické vlastnosti a výrazne sa menia termo-mechanické vlastnosti. Amorfne polyméry majú charakteristickú štruktúru v závislosti na teplote. Majú neusporiadaný stav. Sklovitý stav je pod teplotou sklovitého prechodu T_g , materiál je tuhý a zároveň krehký. Kaučukovitý stav je nad teplotou T_g a pod teplotou tečenia T_f , materiál je elastický má skoro vlastnosti kvapaliny. Plastický stav nastáva nad teplotou T_f , makromolekuly sa premiestňujú a dochádza k tečeniu.

$$T_g < T_m < T_f$$

Tab. 1: Charakteristické teploty pre určité materiály [6]

Názov	Skratka	Typ	T_g [°C]	T_f [°C]
Polymetylmetakrylát	PMMA	A	105	
Polykarbonát	PC	A	150	
Polyvinylchlorid nemäkčený	PVC	A	70	
Polyoxymetylén	POM	S	55	180
Polyfenylénsulfid	PPS	S	85	290
Polyamid	PA6	S	60	230
Polybutyléntereftalát	PBT	S	55	225
Polyetyléntereftalát	PET	S	90	270
Polyetylén lineárny	PE-HD (HDPE)	S	-120	137
Polytetrafluoretylén	PTFE	S	-113	327
Polypropylén	PP	S	-15	176

*A- amorfny, S- semikryštalický

1.2.6 Výroba

Syntetické polyméry sa vyrábajú polymeráciou, polykondenzáciou a polyadáciou. Polymerácia je reakcia nenasýtených monomérov vzniká polymér bez vedľajších produktov. Homopolymerizácia je polymerizácia jedného druhu monoméru. Kopolymerizácia je polymerizácia viac druhov monomérov a môžu tak vznikáť polyméry s lepšími vlastnosťami. Polymerizácie je radikálová, iónová a katiónová (aniónová). Delia sa podľa druhu iniciátora polymerizácie. Polykondenzácia je polyreakcia dvoch navzájom

reagujúcich monomérov s minimálne dvoma funkčnými skupinami. Vedľajší produkt býva nízkomolekulová látka. Reakcie sú vratné, sú robene stupňovite. Používajú sa reakciu katalyzátory, ktoré ovplyvňujú priebeh reakcie. Polykondenzáty sa delia na polyestery, polyamidy, fenoplasty, aminoplasty a epoxidové živice. Polyadícia je reakcia medzi polymerizáciou a polykondenzáciou dvoch navzájom reagujúcich monomérov s minimálne dvoma funkčnými skupinami. Premiestňuje sa vodík atómu z jedného monoméru na druhý. Vedľajší produkt nevzniká. Produktmi sú polyuretány a silikóny.

1.3 Molekulová hmotnosť

Najvýznamnejšia veličina polymérov je molekulová hmotnosť. Molekulová hmotnosť ovplyvňuje hlavné vlastnosti polyméru ako je teplota mäknutia, rozpustnosť, pevnosť, pružnosť a ďalšie charakteristiky odolnosti polyméru. Pre úplnú charakteristiku polyméru je nutné poznať molekulovú hmotnosť. Uniformné makromolekulové látky majú rovnakú molekulovú hmotnosť a chemické zloženie. Túto vlastnosť spĺňajú hlavne prírodné polyméry. Pre uniformné polyméry platí že priemerná molekulová hmotnosť (M_n) sa rovná priemernej hmotnostnej molekulovej hmotnosti (M_w). Index polydisperzity (PDI) je rovný jednej. Makromolekuly s rovnakým chemickým zložením ale inou molekulovou hmotnosťou sú neuniformné makromolekulové látky. Neuniformné sú skoro všetky syntetické polyméry. Pre neuniformné polyméry platí, že $M_n < M_w$. PDI je rovný podielu hmotnostného priemeru a číselného priemeru molekulovej hmotnosti. Polyméry majú rôzne dlhé makromolekulové reťazce, preto distribúcia molekulovej hmotnosti sa udáva ako priemerná hodnota z tejto distribúcie. Priemer môže byť číselný alebo hmotnostný. [7]

Číselný priemer molekulovej hmotnosti M_n sa vypočíta z rovníc:

$$\overline{M}_n = \frac{W}{\sum_i n_i} \quad (1)$$

$$\overline{M}_n = \sum_i p_i M_i \quad (2)$$

kde: p_i – mólový zlomok, n – počet mólov, W – hmotnosť vzorky, M – mólová hm.

Hmotnostný priemer molekulovej hmotnosti M_w sa vypočíta z rovnice:

$$\overline{M}_w = \sum w_i M_i \quad (3)$$

kde: w_i – hmotnostný zlomok, m – hmotnosť mólov

Neuniformita makromolekuly sa zistí z pomeru hmotnostného a číselného priemeru molekulovej hmotnosti. Tento pomer by mal byť v rozmedzí 1,5 - 20. Polymerizační stupeň naberá hodnôt $10 - 10^6$. Z toho vyplýva, že veľkosť makromolekúl je rôznorodá a ovplyvniť to môže príprava. [7]

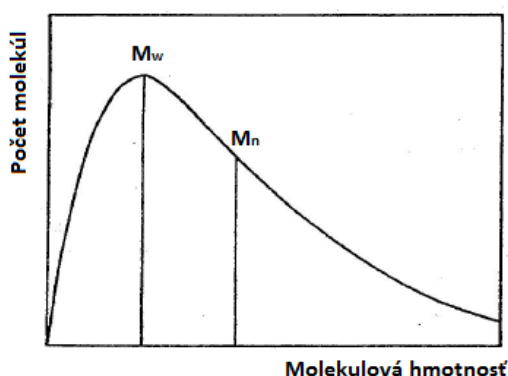
Polymerizačný stupeň sa vypočíta z rovnice:

$$n = \frac{m_0}{M} \quad (4)$$

n – polymerizačný stupeň, m_0 – hmotnosť reťazcu, M – mólová hmotnosť

1.3.1 Distribúcia a stanovenie mólovej hmotnosti

Podľa spôsobu vyhodnotenia nameraných výsledkov sa získajú dva druhy distribučných kriviek. Na Obr. 7 je vidieť diferenciálna distribučná krivka.

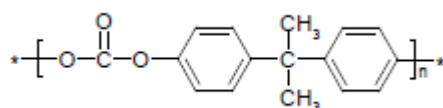


Obr. 7: Diferenciálna distribučná krivka molekulových hmotností

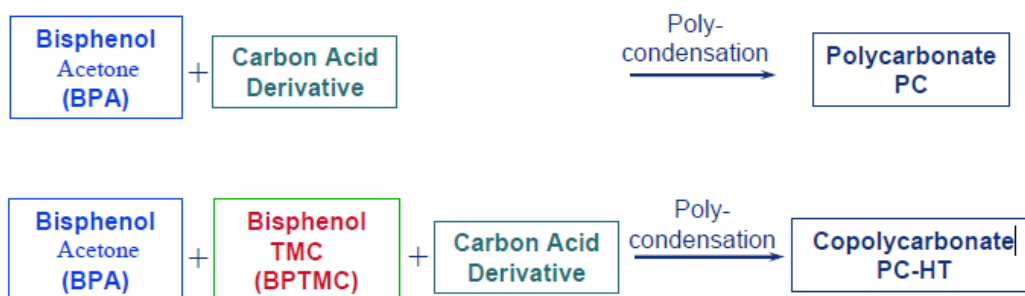
Metódy na stanovenie molekulovej hmotnosti sú absolútne a relatívne. Relatívne stanovenie je kalibrácia podľa známej molekulovej hmotnosti polyméru. Absolútna metóda stanovenia \overline{M}_n je napríklad osmometria, ebullioskopia a kryoskopia a hmotnostná spektrometria. Pre \overline{M}_w sa používa rozptyl svetla a gélová permeačná chromatografia. Viskozitný priemer molekulovej hmotnosti je stanovený relatívnou metódou viskozimetriou. [2]

2 POLYKARBONÁT

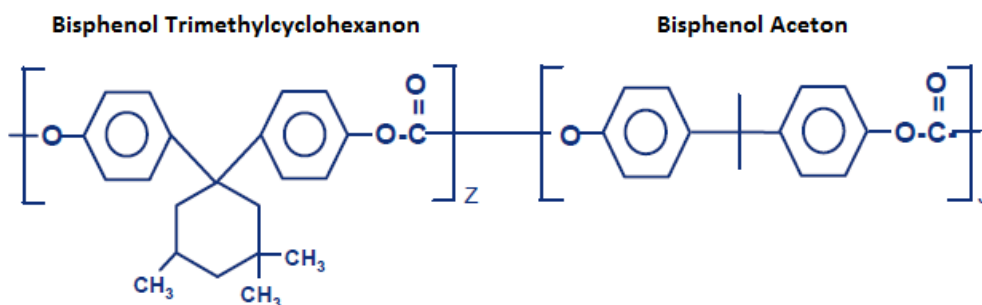
Polykarbonáty patria do skupiny polyesterov. Polykarbonát je polyester kyseliny uhličitej. Lahko sa spracúva rôznymi technológiami ako vstrekomím, lisovaním a tvarovaním za tepla. Polykarbonáty majú vysokú tepelnú odolnosť, vynikajúca rázová húževnatosť a dobré optické vlastnosti. Meno polykarbonát dostal podľa funkčných uhlíkových skupín (Obr. 8), ktoré v reťazci spájajú monoméry. Normovaná skratka polykarbonátu je PC. V priemysle sa používajú obchodné názvy Makrolon, Lexan a iné. Hlavným rozdielom pri výrobe polykarbonátu a vysoko teplotne odolného polykarbonátu (PC – HT) je vidieť na Obr. 9. Spočíva v dodaní bisphenol trimethylcyclohexanonu (BPTMC), ktorého vzorec je na Obr. 10. Čím väčší podiel BPTMC bude obsiahnutý, tým vyššia bude teplota sklovitého prechodu T_g . [8]



Obr. 8: Vzorec polykarbonátu [8]



Obr. 9: Výroba polykarbonátu vs. vysoko teplotne odolného polykarbonátu



Obr. 10: Vzorce BPTMC a BPA pre vznik PC-HT [8]

2.1.1 Vlastnosti polykarbonátov

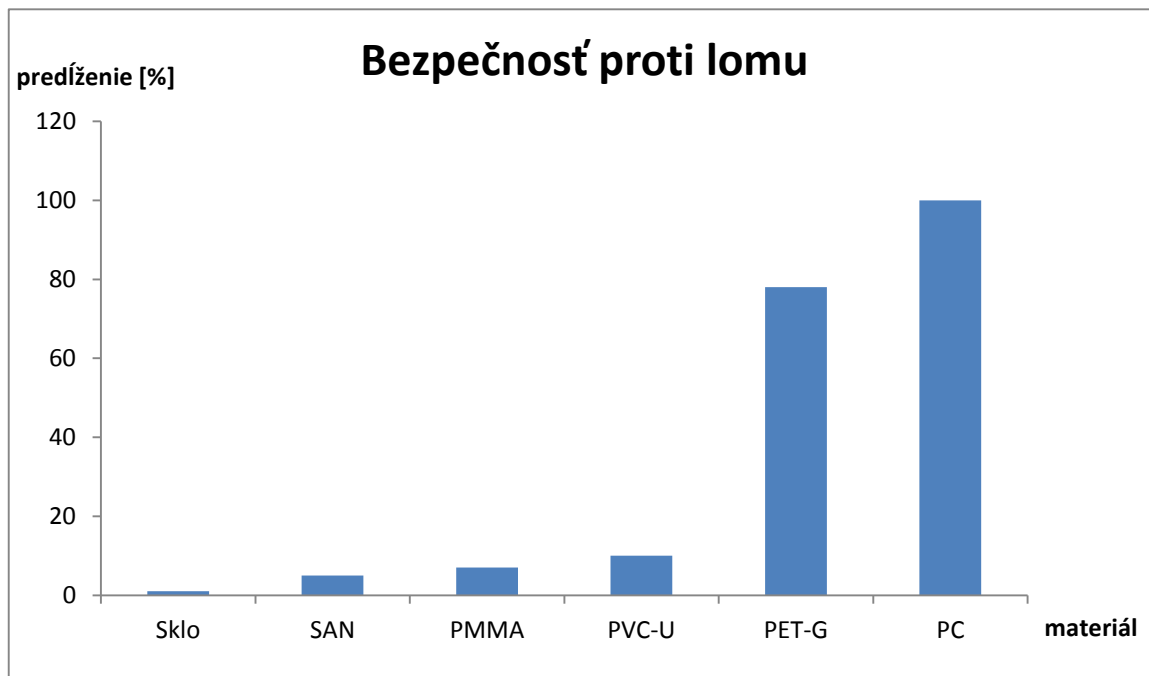
Polykarbonát má veľmi veľkú rázovú húževnatosť, široký pracovný teplotný rozsah a vynikajúce optické vlastnosti. Pracovnú teplotu môže mať od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po trvalú teplotu $+115\text{ }^{\circ}\text{C}$. Veľmi dobrý elektrický izolant. Je odolný voči rôznym látkam ako je benzín, oleje, mazivá, atď. Polykarbonát je tvárny za studena aj za tepla. Má veľmi dobrú tvarovú stálosť. Výhody polykarbonátu sú, že je ľahký, pevný, číry, dobre spracovateľný, málo horľavý a je priepustný pre elektromagnetické žiarenie. Hlavnými nevýhodami sú nízka oteruvzdornosť, tvrdosť, nízka povrchová energia a odolnosť voči pôsobeniu chemikáliám. Najväčšia nevýhoda pri výrobe krytov svetlometov je, že polykarbonát degraduje UV žiarením, čomu sa zabraňuje rôznymi prísadami.

Tab. 2 : Základné vlastnosti polykarbonátu [9]

Vlastnosť	Skratka	Hodnota	Jednotka
Hustota	ρ	1200–1220	kg/m^3
Index lomu	N	1,584	/
Youngův modul	E	2–2,4	GPa
Pevnosť v ťahu	σ_t	55–75	MPa
Tvrdosť	H	180	MPa
Teplota tavenia	T_m	267	$^{\circ}\text{C}$
Teplota skleného prechodu	T_g	150	$^{\circ}\text{C}$
Dielektrická konštanta	ϵ_r	2,9	/
Permitivita	ϵ	$2,568 \times 10^{-11}$	F/m

Rezistentný polykarbonát, ktorý je odolný voči ultrafialovému žiareniu začína nahrádzať sklo. PC-UVP má dobrú odolnosť proti poveternostným podmienkam a hlavnou výhodou je úspora hmotnosti a bezpečnosť proti lomu. PC je o polovicu ľahší než sklo. PC má veľmi dobrú rázovú húževnatosť a preto sa začalo pri obrábacích strojoch používať na

ochranné sklá. Prešiel normou DIN EN 12415 ktorá zahrňuje bezpečnostné zasklenie. Výrazná výhoda oproti sklu je obrábanie za studena.



Graf 1. : Porovnanie bezpečnosti proti lomu pri rovnakých hrúbkach materiálu [9]

2.1.2 Druhy polykarbonátu

Polykarbonát odolný ultrafialovému žiareniu (PC UVPT) je vyvinutý na vonkajšie použitie. Svoju pevnosť nemení na stálom vetre či slnečnom žiarení. Je ohýbateľný za studena ale tvarovateľný za tepla.

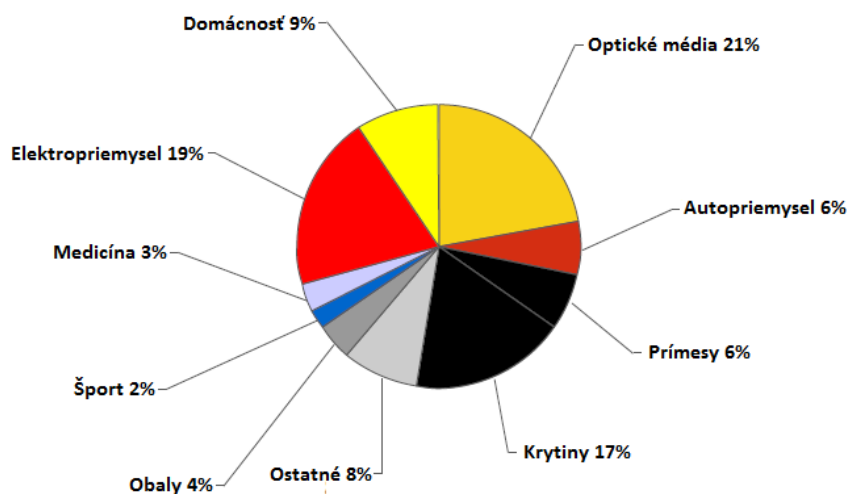
Polykarbonát s povrchovým spevnením je upravený jednostranným alebo obojstranným povlakom. Je vytvorený pre extrémne požiadavky na odolnosť proti oderu a chemikáliám. Na materiál je nanášaná tenká vrstva bez pnutia, ktorá je transparentná a maximálne odolná.

Antistatický polykarbonát (PC AS) je väčšinou vyrábaný v podobe dosiek. Dosky majú antistatickú úpravu na ochranu pred elektrostatickým nábojom a odpudzujú prach a nečistoty. Používajú sa na pracoviskách kde sa musí zachovať maximálna čistota a ochrana pred elektrostatickým nábojom napr. výroba mikro súčiastok. [9]

2.1.3 Použitie polykrabonátov

Polykarbonát sa využíva skoro vo všetkých odvetviach. PC má dobré optické vlastnosti pre výrobu šošoviek, vysokú rázovú húževnatosť pre výrobu ochranných krytín a pomôcok. Pohlcuje hluk, preto sa z neho robia protihlukové systémy. PC sa nájde od presnej výroby až po stavebný priemysel (Obr. 12). Rozdelenie a uvedenie konkrétnych príkladov výrobkov z PC v priemysle grafický znázornené na Obr. 11:

- Optických zariadení- optické šošovky a optické disky (CD, DVD, atď)
- Automobilový priemysel- svetlomety, vnútorné svetielka, dverové kľučky, dokončovacie panely, krytky, spojery (Obr. 13)
- Elektropriemysel- spínacie relé, konektory, diely senzorov, diskové nosiče, panelové podsvietenia
- Domácnosť- elektrické zásuvky, žehličky, mikrovlnné rúry, kávovar, elektrické strojčeky, fény, dekoratívne svietidlá
- Zdravotníctvo- zdravotnícke pomôcky
- Bezpečnostné prvky- ochranné okuliare, prilby, detektory dymu
- Presné diely- diely do fotoaparátov, kamier a hodiniiek
- Kancelárskych prístroje- Notebook, PC, laserová tlačiareň
- Nástroje/ náradie- elektrické náradie, predajné automaty, vlákna cievok
- Komunikácia- mobilné telefóny a diely prenosných zariadení



Obr. 11: Rozdelenie PC podľa využitia v priemysle



Obr. 12 : Makrolon- dosky z PC[10]

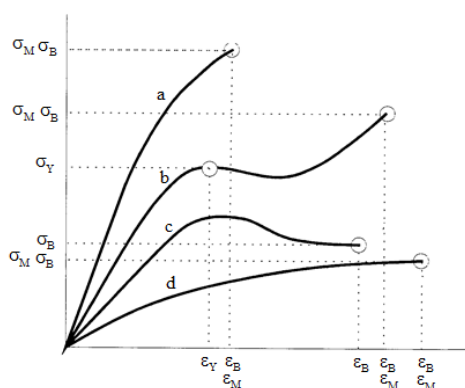


Obr. 13 : Predné kryty svetlometov z PC [11]

3 MECHANICKÉ SKÚŠKY A TERMO ANALÝZY

3.1 Skúška ťahom

Skúška ťahom najrozšírenejšia mechanická skúška, z ktorej sa zistia napätové a deformačné charakteristiky. Pre plasty sa používa norma ISO 527 a pre kovové materiály ISO 6892. Skúšobne teliesko sa vloží do trhačky a namáha sa jednoosím zaťažením až do pretrhnutia. Vyhodnocuje sa modul pevnosti, napätie v ťahu na medzi klzu a maximálne predĺženie v ťahu pri zadaných teplotách. Napätie v klze je maximálne napätie počas skúšky. Ťahové krivky majú špecifický tvar podľa vlastností materiálu (Obr. 14). Norma udáva parametre skúšky a rozmery skúšobného telesa (Obr. 15). [12]



Obr. 14: Základné typy ťahových kriviek [13]

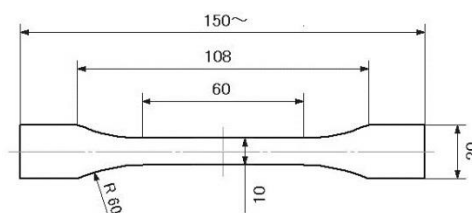
a- krehké materiály, b,c- húževnaté materiály s medzou klzu (PC)

d- húževnaté materiály bez medze sklzu

σ_Y/ε_Y -napätie/pomerné predĺženie na medzi sklzu

σ_B/ε_B -medza pevnosti/pomerné predĺženie pri pretrhnutí

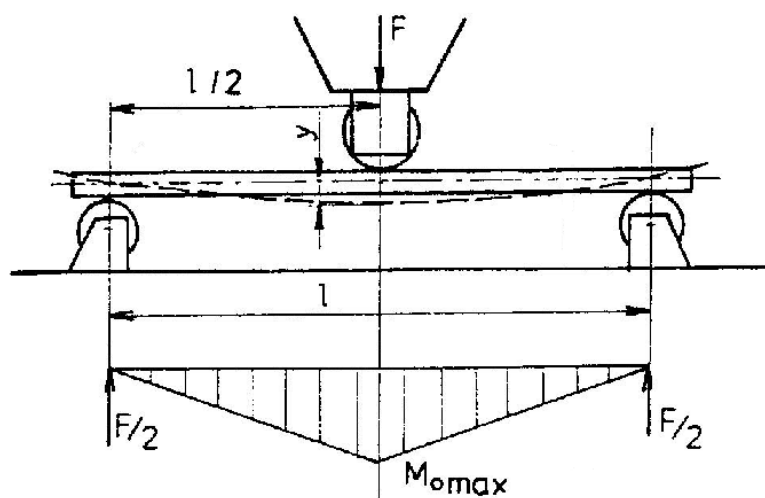
σ_M -medza pevnosti v ťahu ε_M -pomerné predĺženie na medzi pevnosti v ťahu



Obr. 15: Skúšobne teliesko podľa ISO527 (rozmery v mm) [13]

3.2 Skúška ohybom

Je viac skúšok ohybom. Najpoužívanější je trojbodový ohyb, ktorý sa pre plasty vykonáva podľa normy ISO178 (Obr. 16). Zo skúšky sa zistí modul pružnosti v ohybe. Skúška je menej významná ako ťahová. Charakteristické vlastnosti zo skúšky je maximálny priehyb, ktorý je v okamžiku porušenia skúšobného telieska. Skúška je významná skôr pre krehké materiály. [14]



Obr. 16: Trojbodová skúška ohybom[13]

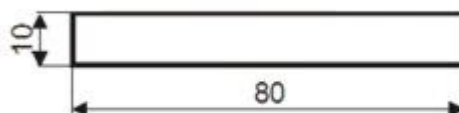
F - zaťažujúca sila [N], l - vzdialenosť podpier [mm],

M_{oMAX} - maximálny ohybový moment [Nmm], y - priehyb [mm]

Výpočet maximálneho krútiaceho momentu:

$$M_{oMAX} = \frac{F \cdot l}{4} \text{ [Nmm]} \quad (5)$$

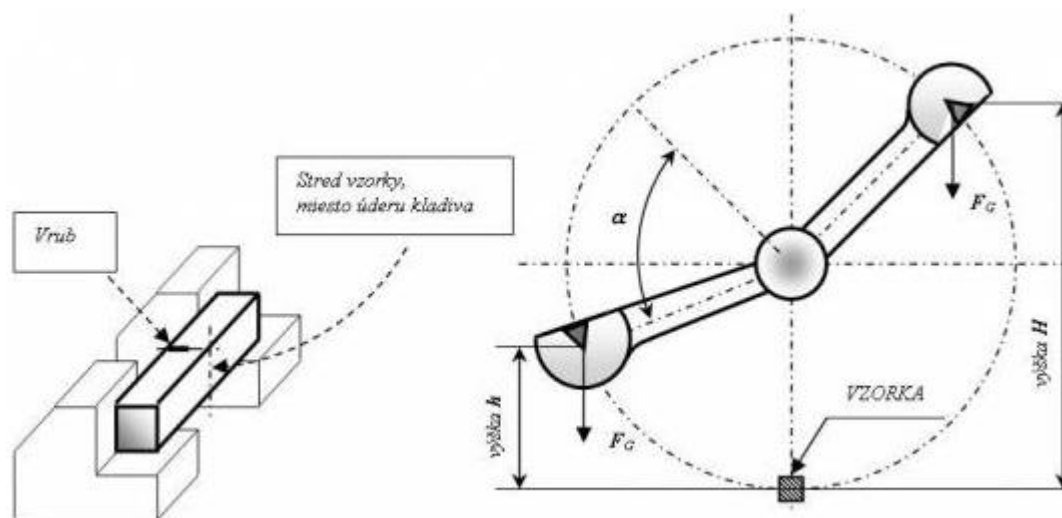
Skúšobné teliesko má podľa normy zadané rozmery 80 x 10 x 4 mm (Obr. 17)



Obr. 17: Skúšobne teliesko pre trojbodový ohyb podľa ISO178 (rozmery v mm)

3.3 Charpy vrubová skúška

Skúška Charpy je razová ohybová skúška. Zisťuje odolnosť pri dynamickom, rázovom zaťažení. Pri skúške vzniká lom. Energia Charpy-ho kladiva sa spotrebuje pri porušení telieska minimálne. Skúška je vykonávaná na kyvadlovom kladive. Vzorka kvôli vrubu musí byť uložená symetricky. Kladivo zo zadanej výšky padá len gravitačnou tiažou. Priebeh skúšky je vidieť na Obr. 18. Meria sa zbytková energia po prerazení.



Obr. 18: Princíp Charpy-ho vrubovej skúšky [13]

H - výška kladiva v základnej polohe [mm], h - výška kladiva po prerazení telieska [mm]

F_g - gravitačná sila [N]

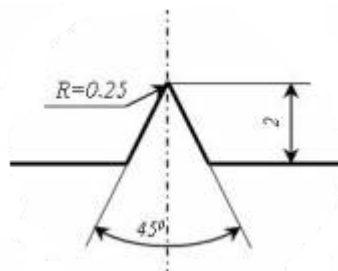
Výpočet vrubovej húževnatosti:

$$W_k = \frac{F_g \cdot v^2}{2g} \text{ [J]} \quad (6)$$

$$v = \sqrt{2gH} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (7)$$

$$KV = F_g(H - h) \text{ [J]} \quad (8)$$

Skúška je vykonávaná podľa normy ISO 179, ktorá určuje aj rozmery telesa. Veľkosť testovaného telesa je 80 x 10 x 4 mm, v ktorom je v strede vyrezaná drážka. Rozmery drážky sú na Obr. 19. [15]



Obr. 19: Detail vrubu [13]

3.4 Skúška podľa Vicata

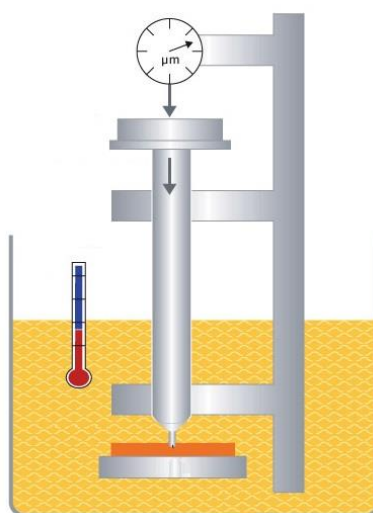
Skúška podľa Vicata stanovuje teplotu mäknutia plastu. Pri skúške sa ihla kruhového prierezu s plochou hrotu 1 mm^2 vtláča do skúšobného telieska z plastu do hĺbky 1 mm. Ihla pôsobí zadanými parametrami podľa normy ISO 306 kolmo na teleso, ktoré je ponorené v nádobe s vyhrievanou kvapalinou. Princíp skúšky je vidieť na Obr. 20. Táto metóda poskytuje presné výsledky pre amorfné termoplasty.

Sú známe 4 metódy: A50 – zaťaženie $10 \pm 2 \text{ N}$, ohrev $50 \pm 5 \text{ K/h}$

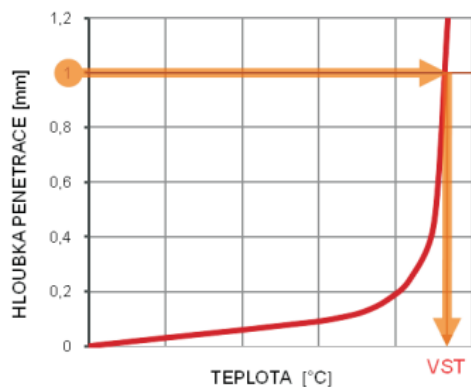
A120 – zaťaženie $10 \pm 2 \text{ N}$, ohrev $120 \pm 5 \text{ K/h}$

B50 – zaťaženie $50 \pm 2 \text{ N}$, ohrev $50 \pm 5 \text{ K/h}$

B120 – zaťaženie $50 \pm 2 \text{ N}$, ohrev $120 \pm 5 \text{ K/h}$



Obr. 20: Skúška podľa Vicata ST ISO306



Obr. 21: Stanovenie teploty mäknutia podľa Vicata [16]

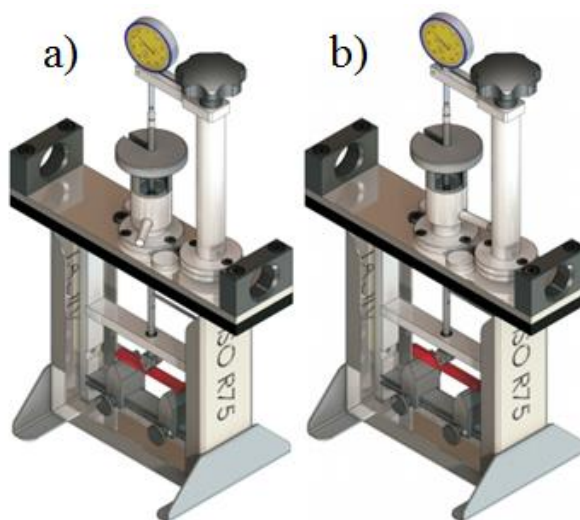
3.5 Teplotná deformácia

Skúška HDT z anglického Hest Deflection Temperature sa vykonáva podľa normy ISO 75. Stanovuje teplotu priehybu pri zaťažení. Teliesko o rozmeroch 80 x 10 x 4 mm je umiestnené v nádobe s vyhrievaním médiom. Pri skúške je využívaný trojbodový ohyb tak, aby bolo dosiahnuté normované napätie v ohybe. Teplota sa zvyšuje lineárne 120 ± 10 K/h. Zaznamenáva sa teplota a priehyb v %. Skúška je vykonávaná s telieskom na plocho alebo nastojato (Obr. 22).

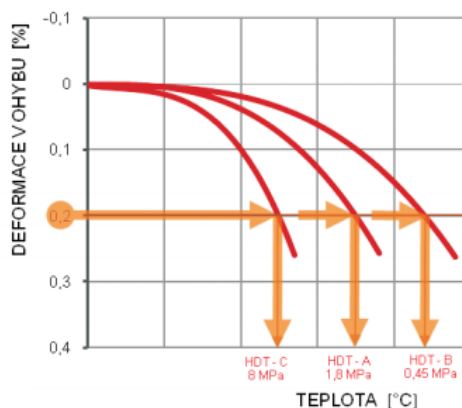
Sú známe 3 metódy: A – napätie v ohybe 1,80 MPa

B – napätie v ohybe 0,45 MPa

C – napätie v ohybe 8,00 MPa



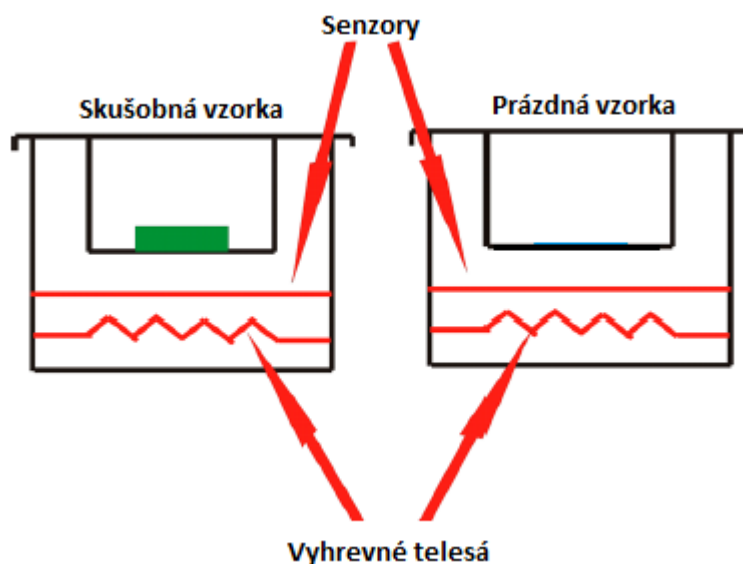
Obr. 22: Zariadenia pre HDT skúšku ISO75 a) plocho b) nastojato [16]



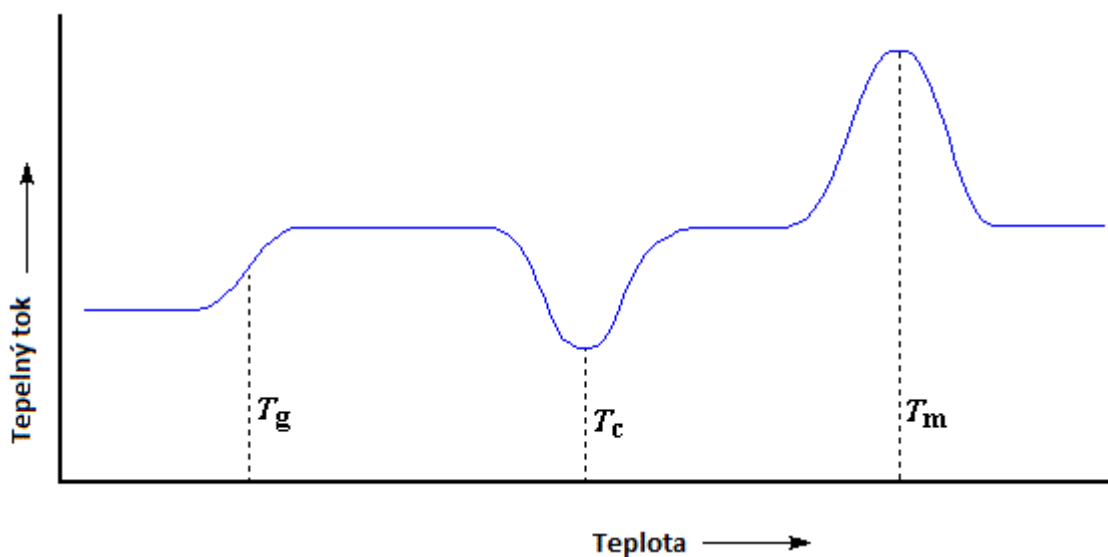
Obr. 23: Stanovenie teploty priehybu [16]

3.6 Diferenčná kompenzačná kalorimetria (DSC)

DSC je termická analýza. Má veľmi univerzálne využitie. Môžu sa testovať pevné aj kvapalné vzorky v rôznych teplotách. Počas skúšky sa skúmajú teplotné vlastnosti plasty vystaveného teplotnému programu. Testovaná vzorka sa zohrieva a chladí zadanou rýchlosťou súčasne s kontrolnou vzorkou (Obr. 24). Z DSC analýzy zistíme teplotu tečenia, teplotu sklovitého prechodu, teplotu degradácie, druhy kryštalizácie a tepelnú kapacitu. Skúška prebieha v inertnej atmosfére v rozmedzí teplôt - 100 °C až po 650 °C.



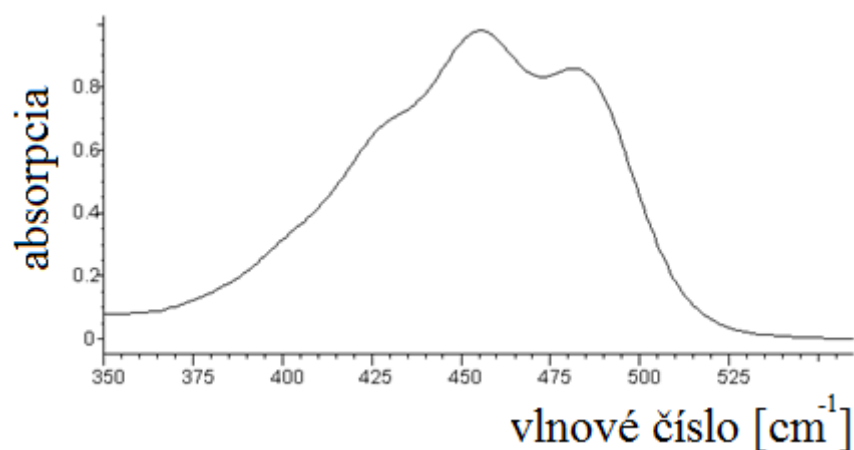
Obr. 24: Princíp DSC [17]



Obr. 25: Výsledok skúšky DSC [17]

3.7 Infračervená spektroskopia

Infračervená spektroskopia (FTIR) je analýza na rozoznanie hlavného zloženia látky, charakteristiku štruktúry a chemické zloženie materiálu. Metóda sa zaoberá interakciou elektromagnetického žiarenia v infračervenej oblasti s molekulou. Infračervená spektroskopia má veľké využitie, nakoľko zariadenia sú ekonomicky dostupné a výsledky majú vysokú kvalitu. Obsluha zariadenia je jednoduchá a ekonomicky nenáročná. Vyhodnotenie výsledkov je rýchle. Meraním absorpcie na vlnovej dĺžke získame absorpčné spektrum látky (Obr. 26). [18]



Obr. 26: Príklad absorpčného spektra [18]

4 ZHRNUTIE TEORETICKEJ ČASTI

Teoretická časť sa delí na tri hlavné kapitoly a niekoľko podkapitol. V teoretickej časti sa v prvom rade v skratke zhrnulo z čoho sa skladá polymér. Spravilo sa základné delenie polymérov podľa ich pôvodu, aplikácie, druhu výroby a chemického zloženia.

Ďalšia kapitola bola venovaná polykarbnátom. Bola vysvetlená výroba obyčajného a vysokoteplotne odolného polykarbonátu. Jeho univerzálne použitie v priemysle a základné vlastnosti polykarbonátov. Podľa zloženia a druhu výroby existuje veľké množstvo aplikácií v rôznych odvetviach (medicína, elektronika, automobily,)

V záverečnej kapitole teoretickej časti sa oboznámilo so statickými skúškami, dynamickými skúškami a termo analýzami. Všetky mechanické skúšky sa vykonávali podľa noriem.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CIEL PRÁCE

Cieľom práce bolo dodané materiály podrobiť termo analýzám a mechanickým skúškam. V prvom rade sa FTIR spektroskopiou preverí zloženie materiálu, či sa skutočne jedná o polykarbonát a či niektorý materiál nemá špecifické zloženie. Následne sa vykoná termo-analýza DSC, ktorou sa stanoví teplota sklovitého prechodu.

Nasledovať bude príprava materiálu na spracovanie. Po vysušení sa materiál spracuje vstrekováním. Pre rázovú skúšku sa do vystreknutých teliesok vyreže vrub a pre optickú skúšku sa musia telesa pokoviť.

V práci bude nasledovať konkrétna práca so zariadeniami na vykonanie skúšok:

- FTIR analýza
- DSC analýza pre určenie teploty sklovitého prechodu
- Statická skúška ťahom podľa normy ISO 527 a bude sa vyhodnocovať modul pevnosti v ťahu, napätie na medzi klzu a maximálne predĺženie v ťahu pri teplotách -30 °C, 23 °C, 80 °C, 130 °C
- Statická skúška ohybom podľa normy ISO 178 a vyhodnotí sa modul pevnosti v ohybe pri teplotách -30 °C, 23 °C, 80 °C, 130 °C
- Rázová vrubová skúška na Charpy-ho kladive podľa normy ISO 179 a vyhodnotí sa sila a práca potrebná pre prerazenie telesa pri teplotách -30 °C, 23 °C.
- optická skúška, ktorá bude spočívať v tepelnom namáhaní vákuovo pokovených telies. Vyhodnocovať sa bude teplotná degradácia pokoveného povrchu.

6 MATERIÁLY

Na analýzu boli poskytnuté vysokoteplotne odolné polykarbonáty od dvoch rôznych výrobcov. Od každého výrobcu štyri druhy PC-HT. Materiál bol dodaný vo vreciach po 25 kg ako čierny granulát (Obr. 27). Pre ochranu údajov sa v práci nebudú používať názvy výrobcov ani materiálov. Z materiálových listov (Tab. 3) boli vybrané základné mechanické vlastnosti pri 23 °C a základné teploty pre spracovanie materiálu vstrekomím s teplotou sklovitého prechodu, ktoré budú slúžiť na porovnanie s výsledkami.

Tab. 3: Údaje z materiálových listov

Materiál	E_T [MPa]	τ [MPa]	E_O [MPa]	T_V [°C]	T_F [°C]	T_g [°C]
A1	2400	68	2400	330	100	158
A2	2400	71	2400	330	100	173
A3	2450	74	2450	330	100	183
A4	2450	76	2450	330	100	203
B1	2400	65	2400	290-335	85-130	150
B2	2600	70	2450	290-335	85-130	161
B3	2500	70	2500	300-345	95-130	170
B4	2750	77	2600	300-345	95-130	183

E_T - modul pevnosti v ťahu, τ - napätie v ťahu na medzi klzu, E_O – modul pevnosti v ohybe

T_V – teplota taveniny pri vstrekomí, T_F – Teplota formy, T_g – teplota sklovitého prechodu



Obr. 27: Čierny granulát PC-HT

7 PRÍPRAVA SKÚŠOBNÝCH TELIESOK

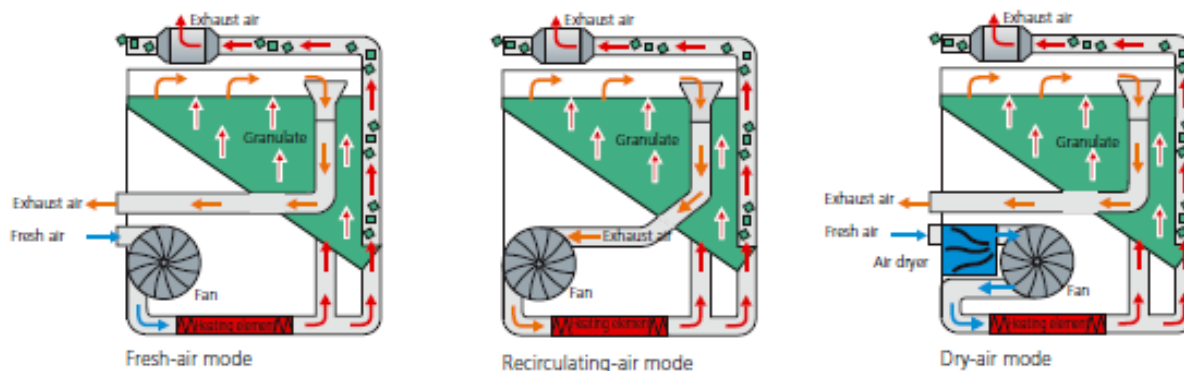
V tejto kapitole sa oboznámime so všetkými procesmi výroby a úpravy skúšobných teliesok pre dané skúšky. Od sušenia materiálu cez výrobu skúšobných telies až po ich konečnú úpravu.

7.1 Sušenie granulátu

Polykarbonáty sú navlhavé materiály a preto pred samotným spracovaním ho treba vysušiť. Zbytkový obsah vlhkosti pre spracovanie môže byť 0,02 %. Keby nedosiahneme požadovanej vlhkosti na výrobku by vznikali povrchové vady a aj mechanické vlastnosti by boli zhoršené. Na sušenie granulátu PC-HT bol použitý prístroj na sušenie Thermolift s označením 100-2 (Obr. 28) od firmy Arburg. Zariadenie pracuje na princípe sušenia prúdiacim vzduchom (Obr. 29). V stroji cykluje čerstvý a cirkulujúci vzduch. So sušiarňou je ľahká manipulácia. Hlavnou výhodou je, že Thermolift 100-2 nie je len sušiareň ale aj dopravník buď tlakový alebo podtlakový, záleží od materiálu. Zariadenie je mobilné a môže slúžiť súčasne na plnenie dvoch vstrekovacích strojov.



Obr. 28: Arburg Thermolift 100-2 (sušiareň) [19]



Obr. 29: Princíp sušenia v zariadení Thermolift 100-2 [19]

Tab. 4 Tabuľka teplôt a dôb sušenia pre materiály PC-HT z materiálových listov

Materiál	A 1	A 2	A 3	A 4	B 1	B 2	B 3	B 4
Teplota sušenia [°C]	130	130	130	130	125	125	135	135
Doba sušenia [h]	4-12	4-12	4-12	4-12	4-6	4-6	4-6	4-6

Tab. 5: Tabuľka teplôt a dôb sušenia pre materiály PC-HT použité

Materiál	A 1	A 2	A 3	A 4	B 1	B 2	B 3	B 4
Teplota sušenia [°C]	120	120	120	120	120	120	120	120
Doba sušenia [h]	24	24	24	24	12	12	12	12

Časy sušenia mohli byť ovplyvnené použitým zariadením, predošlým uskladnením materiálu, atď. Pri dodržaní času sušenia z materiálových listov boli na výrobkoch poškodenia tzv. „prskance“ – spôsobené vlhkosťou v materiály. Doba sušenia bola predĺžená ale teplota bola znížená aby nedošlo k prípadnej teplotnej degradácii materiálu. Pre materiály od výrobcu A sa materiály sušili 24hodín nakoľko po 10 hodinovom sušení na vystreknutých telieskach boli známky vysokého percenta vlhkosti (prskance na povrchu), ale teplotu sušenia sme ubrali na 120 °C. Materiály výrobcu B sme tiež sušili dvojnásobný čas oproti udávanému z materiálového listu a teplota bola znížená na 120 °C. Porovnanie medzi materiálovým listom a našimi parametrami je vidieť v tabuľkách 4 a 5.

7.2 Vstrekovanie skúšobných teliesok

Po vysušení materiálu nasledovalo okamžité spracovanie materiálu aby sa zase nenasýtil vlhkosťou. Na vstrekovanie bol použitý stroj od spoločnosti Arburg 470H 1000-400 HIDRIVE (Obr. 30). Je to hybridný stroj, ktorý kombinuje hydrauliku s elektrikou. Stroj je rýchlejší a ekonomickejší oproti čisto hydraulickému stroju. Šnek mal priemer 40 mm. Forma je na Obr. 31. Z každého materiálu bolo vyrobených 160 ks skúšobných teliesok, ktoré majú normované rozmery pre skúšku ťahom ISO 527 a pre ohyb a vrub ISO 178. Skúšobné telesá s rozmery vidieť na Obr. 15 a 17 .



Obr. 30: Arburg 470H 1000-400 HIDRIVE [19]



Obr. 31: Forma pre skúšobné telieska

Tab. 6: Parametre vstrekovacieho stroja Arburg 470H 1000-400 HIDRIVE

Vzdialenosť medzi vodiacimi stĺpmi [mm]	470x470
Maximálna uzatváracia sila [kN]	1000
Veľkosť vstrekovacej jednotky	400

Tab. 7: Parametre pre vstrekovací cyklus

Materiál	A 1	A 2	A 3	A 4	B 1	B 2	B 3	B 4
Teplota formy [°C]	90	90	90	90	90	90	90	90
Dávka [mm]	28	29	28	30	26	26	27	29
Vstrek. tlak[bar]	1000	1000	1100	1200	1000	1000	1000	1000
Prepnutie [mm]	10	10	10	10	10	10	10	10
Dotlak [bar]	800	800	900	1000	700	800	800	800
Doba dotlaku [s]	12	12	12	12	13	13	13	13
Doba chaldenia [s]	30	30	30	30	35	35	30	30
Rýchlosť vstrekovania [mm/s]	30	30	30	30	30	30	30	30
Dekomprese [mm]	5	5	5	5	5	5	5	5
Teplota I.pásma [°C]	265	265	290	290	325	325	330	325
Teplota II. pásma [°C]	275	275	310	310	325	325	330	325
Teplota III. pásma [°C]	290	290	315	315	310	310	315	310
Teplota IV. pásma [°C]	295	295	320	325	300	300	305	300
Teplota V. pásma [°C]	310	310	325	330	285	285	285	285
Teplota trisky [°C]	310	310	325	330	270	270	270	270

7.3 Výroba vrubov pre Charpy-ho skúšku

Pre vrubovú skúšku sa už na vystreknuté vzorky, obdĺžniky o veľkosti 4 x 10 x 80 mm vyrezali drážky. Drážky boli vyrezané mechanickým zariadením CEAST (Obr. 32). Mikrometrom sa posúvala plošina na ktorej bolo zafixované skúšobne teliesko a rotačným pohybom rukoväte sa nôž presných normalizovaných rozmerov posúval

priamočiarym pohybom hore dolu. Tento proces sa opakoval až do dĺžky 2 mm, ktorú zobrazoval mikrometer na zariadení.



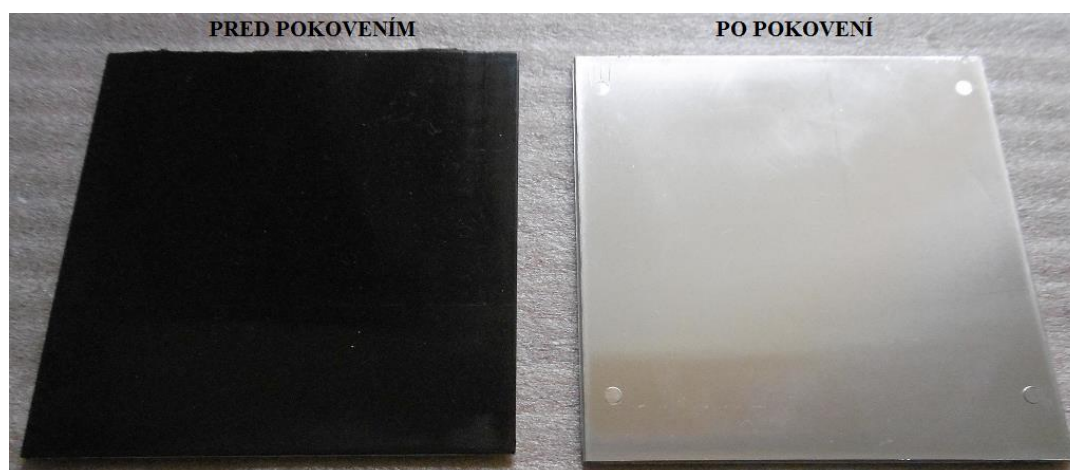
Obr. 32: Zariadenie na výrobu vrubov pre vrbovú skúšku Charpy-ho kladivom

7.4 Pokovenie pre optickú skúšku

Skúšobne telesa o rozmeroch 110 x 110 x 4 mm boli vákuovo pokovené. Telesá sa pred samotným pokovením vyčistili liehom. Nasledovalo uloženie do stroja (Obr. 33). Po vložení a uzatvorení komory v hrubom vákuu prebehne telesami čistiaci výboj, ktorý zlepšuje príľnavosť hliníka. Po vyčistení sa v komore vytvorí vysoké vákuum počas ktorého prebieha roztavenie hliníka, ktorý sa následne odparí a skondenzuje na požadovanom povrchu telesa, čím vznikne hliníková vrstva (Obr. 34). Pre ochranu hliníkovej vrstvy pred vlhkosťou sa na povrch nanáša silikónová vrstva Hexametyldisiloxan ($C_6H_{18}O_{Si}_2$). Vrstva má hrúbku 50 - 100 nm a je transparentná. Zvyšuje životnosť hliníkovej vrstvy. Pokovená vrstva musí byť lesklá a bez akýchkoľvek poškodených miest. Poškodenia môžu vzniknúť nízkym vákuom a znečistením zariadenia alebo povrchu. Pokovenie má ako estetický, tak aj funkčný vplyv na súčiastku. Hliníková vrstva má lepšiu odrazivosť. Pokovenie sa používa pre všetky spôsobilé materiály na pokovenie. V našom prípade sa jednalo o termoplast PC-HT



Obr. 33: Zariadenie pre vákuové pokovenie



Obr. 34: Skúšobné telesá pred a po pokovení

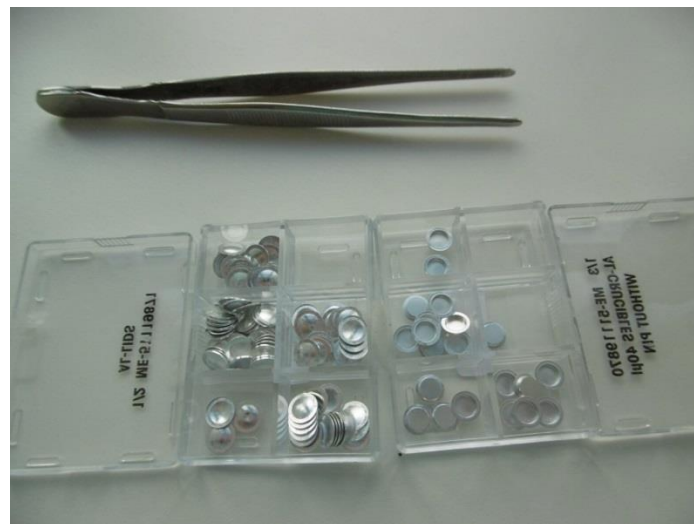
7.5 Príprava teliesok pre DSC skúšku

Pre DCS skúšku sa pripravujú vzorky ako hliníkové mištičky (Obr. 36), do ktorých sa vkladá analyzovaný materiál o hmotnosti 5 - 10 mg. Následne je miska uzavretá a zalisovaná na mechanickom zariadení od firmy Mettler Toledo (Obr. 35). K váženiu sa

používali laboratórne váhy, do ktorých bola vložená hliníková miska do stredy, po vložení sa váha vynulovala a navážil analyzovaný materiál. Pri príprave vzorkou sa pracovala s pinzetou (Obr. 36).



Obr. 35: Mechanické zariadenie na zalisovanie od firmy Mettler Toledo



Obr. 36: Hliníkové misky s vrchnými dielmi a pinzeta

8 METÓDY MERANIA

V tejto kapitole sa oboznámime s konkrétnymi typmi skúšok. Za akých parametrov a podmienok sa budú vykonávať. Použité zariadenia a pomôcky.

8.1 Skúška ťahom

Skúška ťahom bola vykonávaná pri štyroch rôznych teplotách (-30 °C, 23 °C, 80 °C, 130 °C) na stroji pre statické skúšky od firmy ZWICK ROELL s označením 1456. Pre teplotu -30 °C sa vzorky zmrazovali po minimálnu dobu 24 hodín pri -30 °C a pri teplotách 80 °C a 130 °C sa vzorky temperovali v temperačnej komore, tiež od firmy ZWICK ROELL po dobu jednej hodiny. Rýchlosť posuvu pokiaľ sa nezmeria modul je 10 mm/min, po zmeraní modulu sa rýchlosť posuvu zvýši na 50 mm/min, a táto rýchlosť je konštantná až do pretrhnutia skúšobného vzorku. Úlohou bolo zmerať modul pružnosti v ťahu, napätie a deformáciu v ťahu. Prierez skúšobného telieska $S_0 = 40 \text{ mm}^2$. Pre každý druh materiálu bola skúška vykonaná desať krát.



Obr. 37: Uloženie skúšobného telesa v čeľustiach stroja ZWICK ROELL 1456

8.2 Skúška ohybom

Trojbodová skúška ohybom bola vykonávaná pri štyroch rôznych teplotách (-30 °C, 23 °C, 80 °C, 130 °C) na stroji pre statické skúšky od firmy ZWICK ROELL s označením 1456. Pre teplotu -30 °C sa vzorky zmrazovali po minimálnu dobu 24 hodín pri -30 °C a pri teplotách 80 °C a 130 °C sa vzorky temperovali v temperačnej komore (Obr. 39) po dobu 1 hodiny. Vzďialenosť medzi podperami bola 64 mm podľa normy ISO 178. Rýchlosť posuvu pokiaľ sa nezmeria modul je 1mm/min, po zmeraní modulu sa rýchlosť posuvu zvýši na 20 mm/min. Prierez skúšobného telieska $S_0 = 40 \text{ mm}^2$. Pre každý druh materiálu bola skúška vykonaná desať krát.



Obr. 38: Uloženie skúšobného telieska pri skúške ohybom



Obr. 39: Skúška ohybom v temperačnej komore

8.3 Charpy-ho skúška

Vrubová skúška Charpy-ho kladivom bola vykonávaná pri dvoch rôznych teplotách (-30 °C, 23 °C) na stroji pre vykonávanie rázových skúšok od firmy CEAST s označením DAS 8000 JUNIOR, ktorý je na Obr. 40. Pre teplotu -30 °C sa vzorky zmrazovali po minimálnu dobu 24 hodín. Skúškou bola zistená maximálna sila a vykonaná práca pri prerazení vzorku. Pre každý materiál bolo vykonaných desať meraní.



Obr. 40: Zariadenie pre rázové skúšky CEAST DAS 8000JUNIOR

Tab. 8: Parametre Charpy-ho skúšky

Parameter	Jednotka	Hodnota
Váha záťaže	kg	2,186
Uhol	°	150
Rýchlosť rázu	m/s	3,7

8.4 Optická skúška

Skúška prebiehala na sušiacom zariadení od firmy MEMMENT UN55, ktorý je vidieť na Obr. 41. Do zariadenia boli vkladané pokovené vzorky. V zariadení skúšobné teleso 110 x 110 x 4 mm boli po dobu jednej hodiny. Zadávateľom bol čas trvania skúšky stanovený na jednu hodinu. Po hodine sa vzorky vytiahli a opticky porovnali s teplotne nenamáhaným telesom. Poškodenie bolo zmatnenie pokoveného povrchu alebo jeho úplná degradácia. Testovaná teplota sa odvíjala od T_g materiálu. Test sa ukončil pri teplote, pri ktorej sa pokovené teleso poškodilo. Pre každú teplotu bolo používané nové skúšobné teleso aby predošlé teplotné namáhanie neovplyvnilo výsledok skúšky. Počas skúšky bola klapka uzavretá na 100 %, pri všetkých teplotách boli podmienky testovania rovnaké.



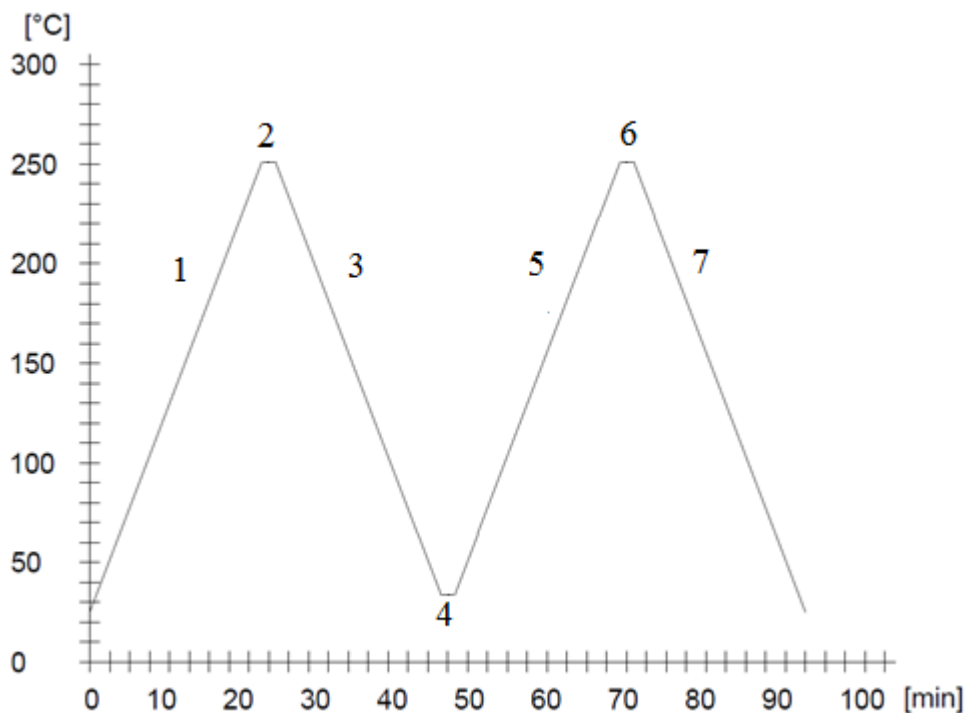
Obr. 41: Sušiacie zariadenie MEMMENT UN55

8.5 DSC

DSC je termo analýza materiálu, ktorá prebieha na zariadení od Mattler Toledo (Obr. 43). Z tejto skúšky sa zisťuje teplota sklovitého prechodu T_g . Analýza prebieha za určitého teplotného režimu. Prvý krát sa materiál zohreje pre stratu pamäte z výrobných procesov a pre spresnenie výsledkov a samotný výsledok sa určuje až z druhého ohrevu. Teplotný režim prebieha za lineárneho ohrevu/chladnutia $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ za minútu. Ako inertnú atmosféru používame dusík nakoľko kyslík oxiduje.

Teplotný režim je graficky znázornený na Obr. 42:

1. Ohrev z $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $260\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. Zdržanie na teplote $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu jednej minúty
3. Chladnutie z $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
4. Zdržanie na teplote $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu jednej minúty
5. Ohrev z $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $260\text{ }^{\circ}\text{C}$
6. Zdržanie na teplote $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu jednej minúty
7. Chladnutie z $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 42: Teplotný režim DSC analýzy



Obr. 43: Zariadenie pre termo analýzy

8.6 Infračervená spektroskopia

Pred infračervenou spektroskopiou (FTIR) sa granula materiálu rozlisuje za studena. FTIR je analýza vykonávaná na zariadení Nicolet iS5 (Obr. 44). Pri skúške bol použitý ZnSe kryštál.



Obr. 44: Zariadenie pre FTIR spektroskopiou Nicolet iS5

9 VÝSLEDKY

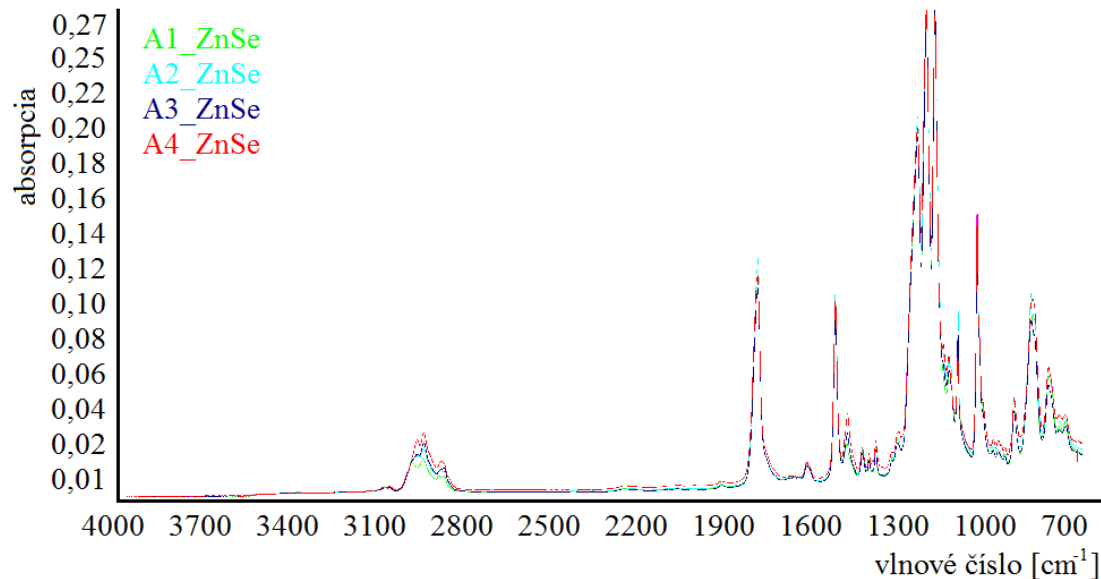
Vo výsledkoch sú namerané dáta a krátke zhrnutie vyhodnotených údajov. Ako prvé budú vyhodnotené termo analýzy, ďalej mechanické skúšky a nakoniec optická skúška.

9.1 Vyhodnotenie termo analýz

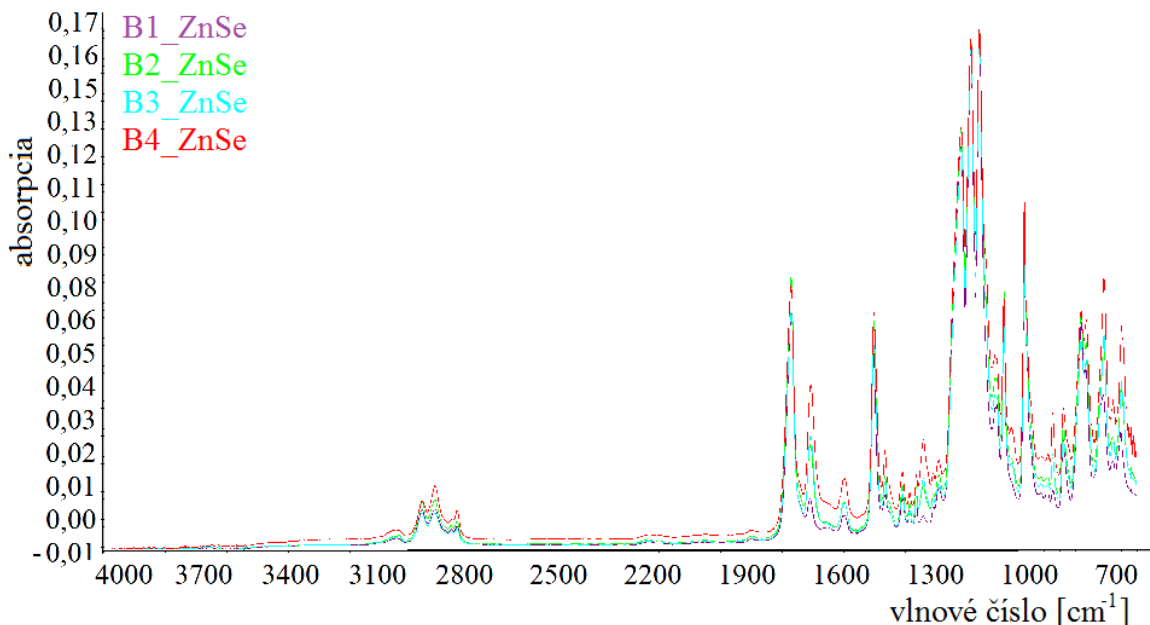
V termo analýzách sa vyhodnotí FTIR skúška pre zloženie dodaných materiálov a DSC analýza pre určenie teploty sklovitého prechodu. Testujú sa materiály nevysušené a s neznámym podielom vlhkosti.

9.1.1 FTIR

Ako prvá skúška sa robila skúška FTIR na potvrdenie, či sa vážne jedná o polykarbonáty s rovnakým zložením. Nakoľko piky v grafoch 2 a 3 boli zhodné vieme že sa jedná zložením o veľmi podobné materiály. Táto skúška je časovo nenáročná. Testovala sa granula, ktorá bola zlisovaná dvoj tonovým lisom za studena.



Graf 2: Výsledok analýzy FTIR pre materiály výrobcu A



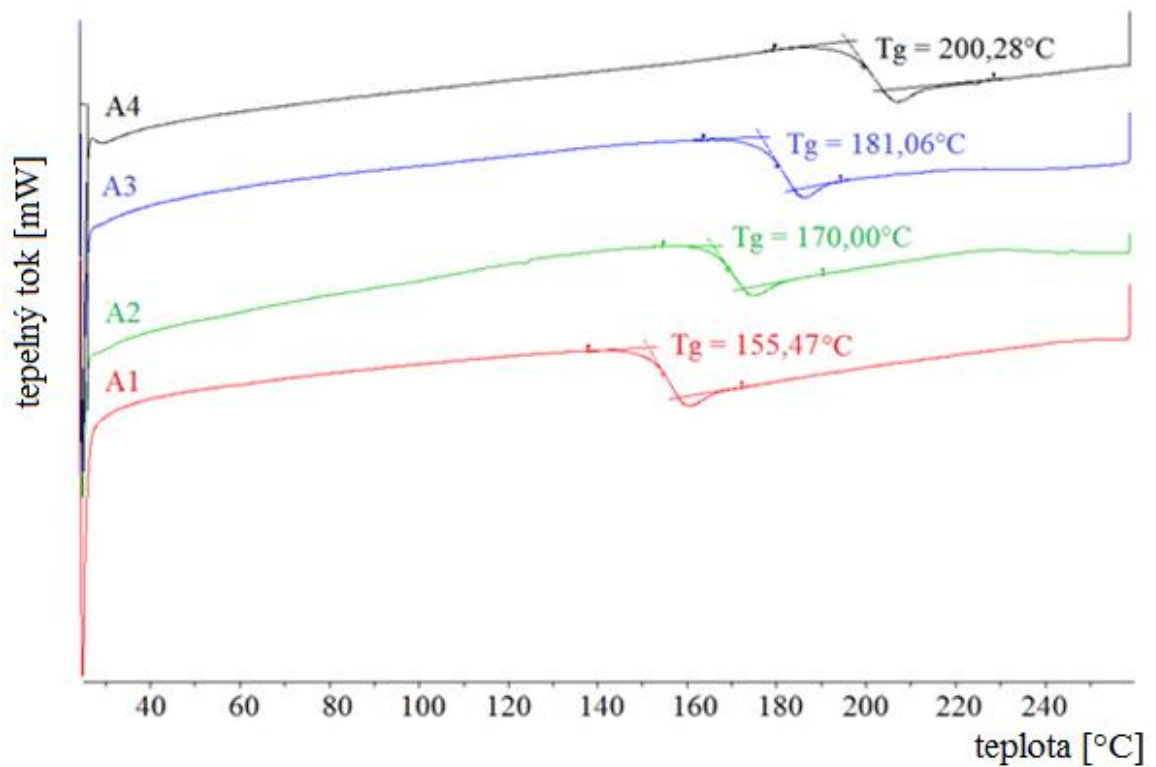
Graf 3: Výsledok analýzy FTIR pre materiálu výrobcu B

9.1.2 DSC

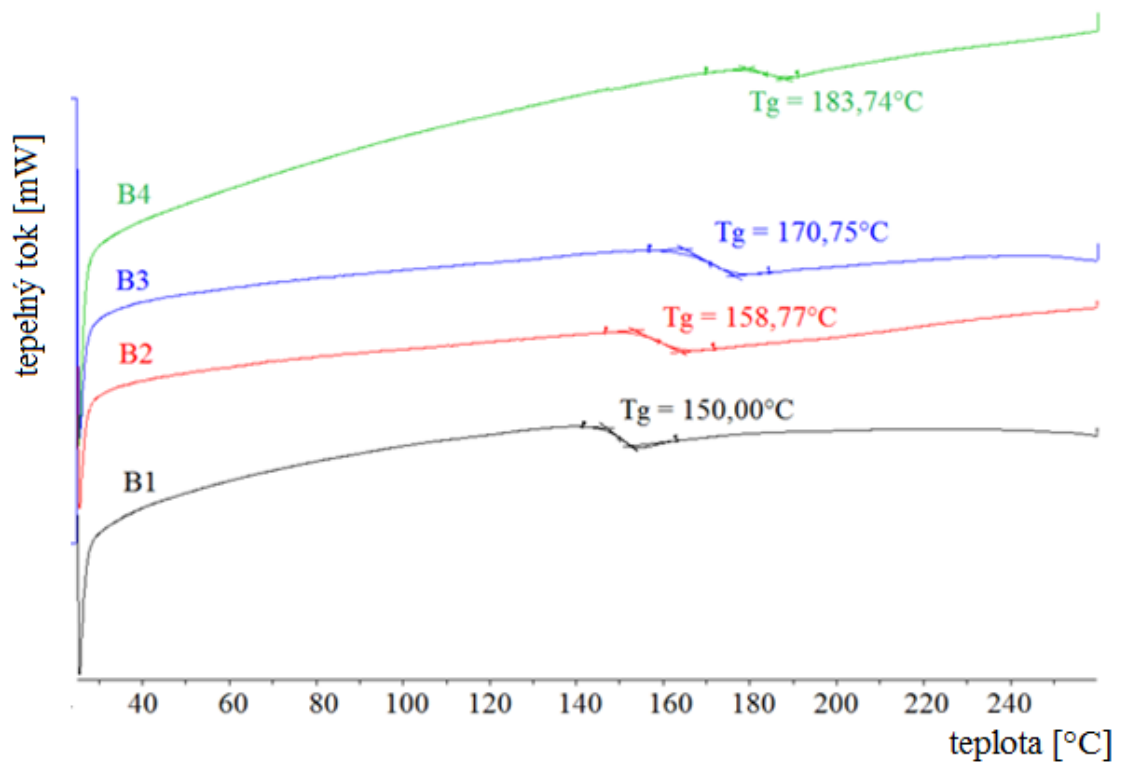
Po potvrzení materiálu nasledovala ďalšia termo-analýza a to DSC, aby sme zistili teploty sklovitého prechodu daných materiálov. Váha vzorku musela byť v rozpätí 5 - 10 mg. Namerané hodnoty z DSC analýzy je vidieť v grafoch 4 a 5, výsledky sa spísali do Tab. 9. Vyhodnotené dáta z DSC skúšky potvrdili teploty sklovitého prechodu z materiálových listov (Tab.4). Rozdiely boli v rozhraní ± 3 °C.

Tab. 9: Výsledné teploty sklovitého prechodu z analýzy DSC

Materiál	T_g [°C]	Materiál	T_g [°C]
A1	155,5	B1	150,0
A2	170,0	B2	158,8
A3	181,0	B3	170,7
A4	200,3	B4	183,7



Graf 4: Výsledok termo analýzy DSC pre materiály výrobcu A



Graf 5: Výsledok termo analýzy DSC pre materiálu výrobcu B

9.2 Mechanické skúšky

Výsledky meraní boli spracované výpočtovo aj graficky. Pre výpočet boli použité aritmetické priemery z meraní a smerodajnej odchýlky.

Aritmetický priemer:

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (9)$$

kde: x_i - jednotlivé hodnoty, n – rozsah súboru, Σ - súčet

Smerodajná odchýlka:

$$o = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (10)$$

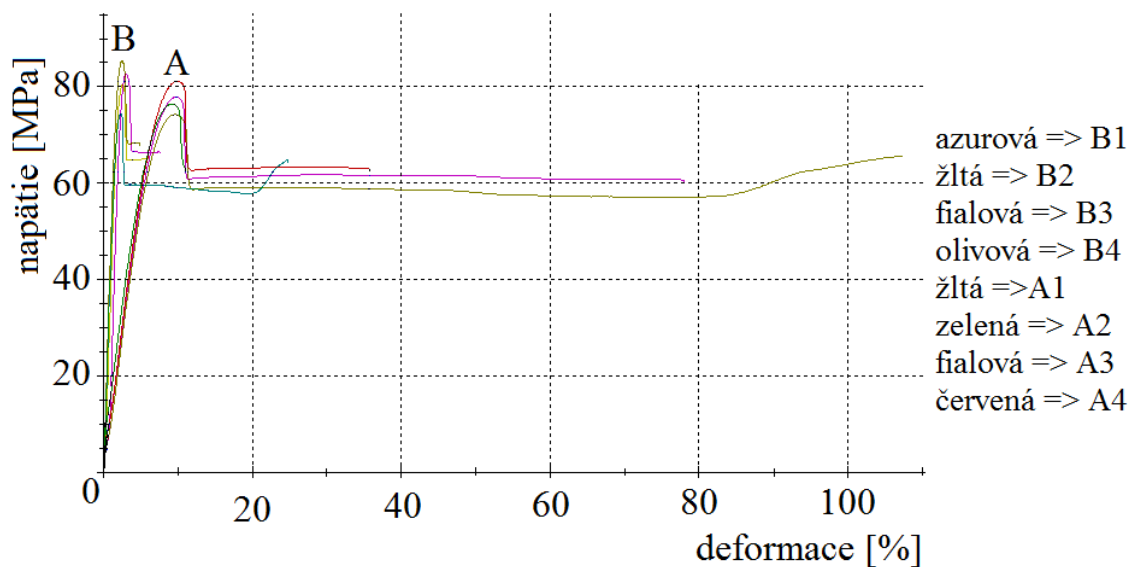
Aritmetický priemer sa počíta zo všetkých nameraných údajov, ktoré sa sčítajú a následne vydedia počtom meraní. Smerodajná odchýlka udáva šírku rozloženia hodnôt a môže sa počítať iba ak sú k dispozícii všetky namerané dáta. Prvá hodnota v tabuľkách je aritmetický priemer nameraných dát a smerodajná odchýlka sa označuje v tabuľkách symbolom \pm , ktorá nasleduje sa aritmetickým priemerom.

9.2.1 Skúška ťahom

Skúška sa vykonávala na desiatich telieskach z každého materiálu a pri štyroch rôznych teplotách. Z desiatich nameraných hodnôt sa zrátal aritmetický priemer so smerodajnou odchýlkou. V nasledujúcich tabuľkách sú merania rozdelené podľa teplôt. Vyhodnocoval sa modul pevnosti E_T v ťahu, napätie τ v ťahu na medzi klzu a maximálne predĺženie ΔL v ťahu.

Tab. 10: Výsledky ťahovej skúšky pre -30 °C

Materiál	T [°C]	E_T [MPa]	τ [MPa]	ΔL [%]
A1	-30	2270,0 ± 272,2	74,4±0,4	99,1±6,1
A2	-30	1928,0 ± 451,8	76,3±0,7	100,2±20,3
A3	-30	1630,0 ± 292,3	78,2±0,3	60,8±23,4
A4	-30	1884,0 ± 516,6	81,5±0,3	38,6±18,6
B1	-30	3419,0 ± 279,9	74,5±0,2	21,1±6,8
B2	-30	2922,0 ± 549,7	78,6±1,4	17,7±7,5
B3	-30	2946,0 ± 884,0	83,2±0,5	11,4±3,7
B4	-30	3326,0 ± 292,9	85,7±0,8	5,3±1,1

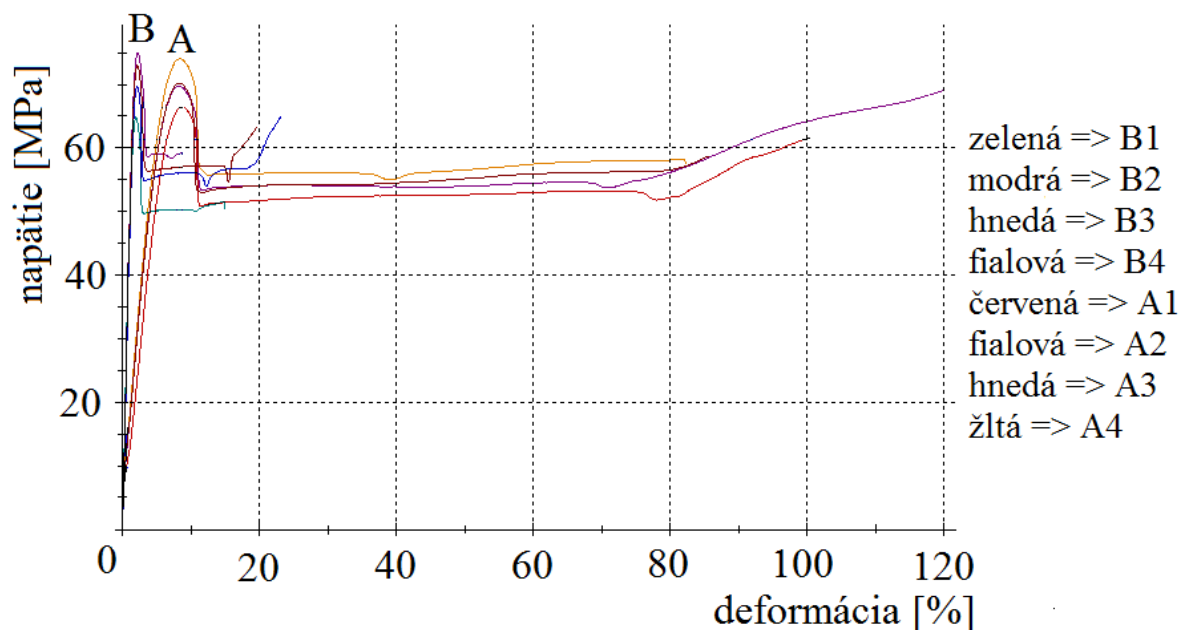


Graf 6: Závislosť napätia na deformácii pri -30 °C

Prvé vzorky na testovanie boli zamrazené 24 hodín pri -35 °C. Výsledky sú spracované v tabuľke 10 a grafe 6. Z merania je vidieť, že materiály od výrobcu A sú húževnatejšie, nakoľko ich predĺženie je niekoľko násobne vyššie ako pri materiáloch výrobcu B. Materiály od výrobcu B sú ale zase tvrdšie ale tým pádom aj krehkejšie.

Tab. 11: Výsledky ťahovej skúšky pre 23 °C

Materiál	T [°C]	E_T [MPa]	τ [Mpa]	ΔL [%]
A1	23	2590,0±564,1	66,8±0,6	96,7±5,3
A2	23	2637,0±173,5	69,3±0,8	97,5±18,1
A3	23	2569,0±172,9	70,3±0,2	87,2±2,1
A4	23	2254,0±264,1	73,8±0,1	56,9±24,8
B1	23	3285,0±227,4	65,9±3,2	18,2±8,7
B2	23	3248,0±239,3	73,1±0,2	14,6±6,7
B3	23	3117,0±505,4	69,7±0,3	20,9±3,9
B4	23	3561,0±316,4	75,4±0,2	9,2±4,2

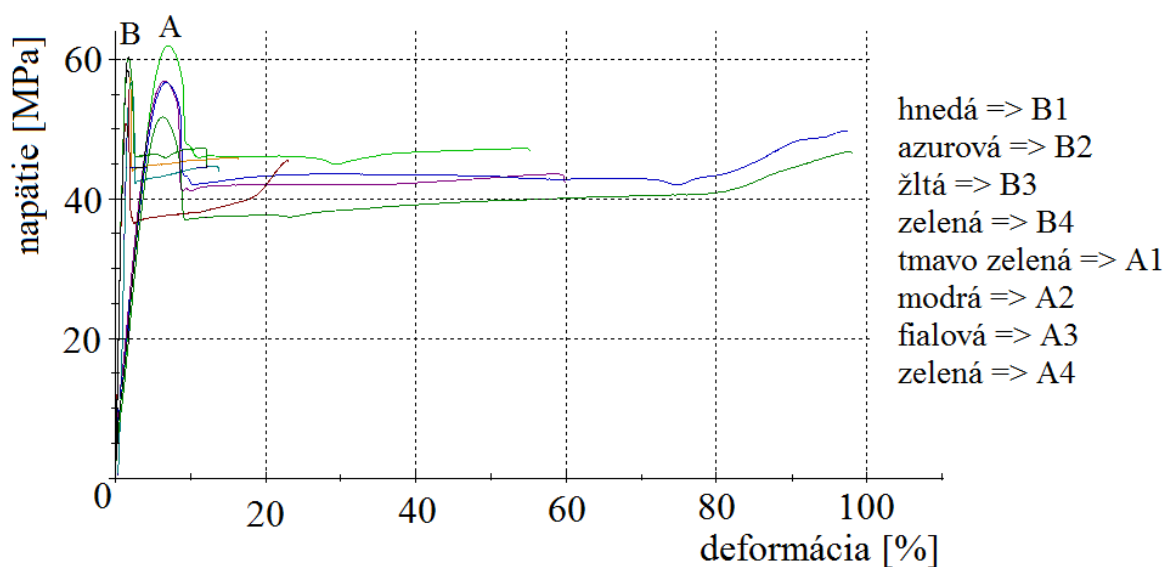


Graf 7: Závislosť napätia na deformácii pri 23 °C

Meranie pri izbovej teplote 23 °C je zhrnuté v tabuľke 11 a grafe 7. Modul v ťahu vychádzal až na materiál A4 vyšší ako je udávaný v materiálových listoch. Napätie v ťahu na medzi klzu bolo veľmi podobné. Materiály od výrobcu A sú aj pri teplote 23 °C húževnatejšie. Pevnejšie a krehkejšie sú materiály výrobcu B. Moduly v ťahu vzrástli oproti meraniu pri -30 °C.

Tab. 12: Výsledky ťahovej skúšky pre 80 °C

Materiál	T [°C]	E_T [MPa]	τ [Mpa]	ΔL [%]
A1	80	2689,0±663,8	51,4±1,0	102,6±9,3
A2	80	2339,0±481,1	56,2±0,8	87,2±14,1
A3	80	2523,0±362,4	56,8±0,3	92,5±12,7
A4	80	2303,0±380,3	63,7±1,2	70,2±23,7
B1	80	3988,0±235,8	51,3±1,0	23,7±1,9
B2	80	3771,0±393,8	59,2±0,9	12,0±6,2
B3	80	3295,0±507,0	56,4±1,0	14,7±5,4
B4	80	4074,0±304,2	60,7±1,0	10,7±2,7

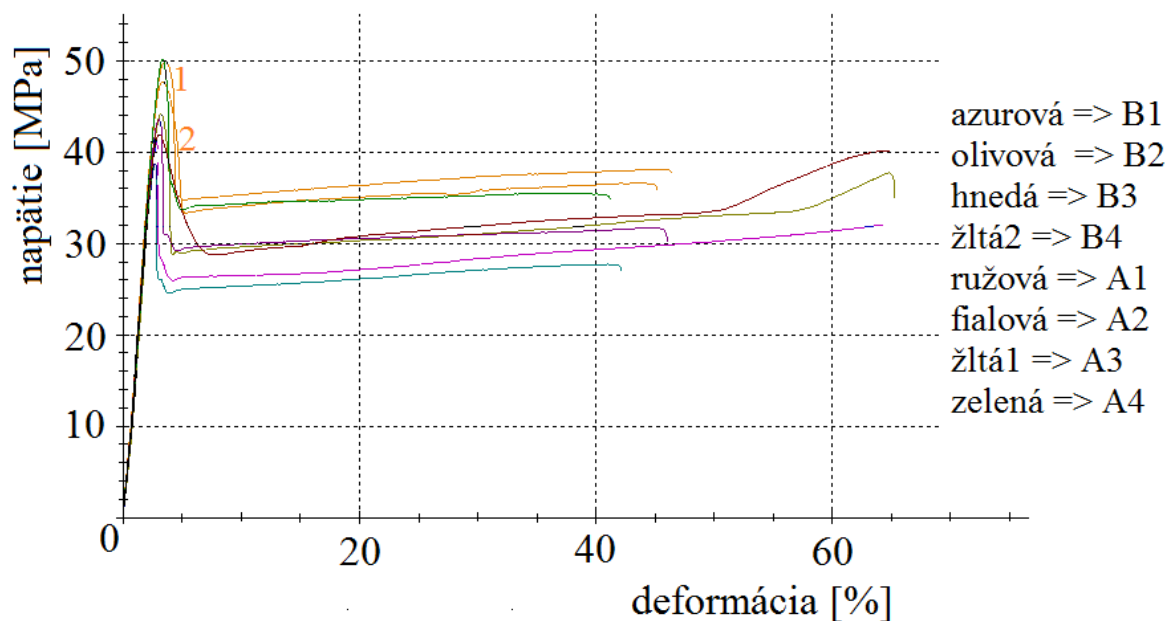


Graf 8: Závislosť napätia na deformácii pri 80 °C

Ďalšie merania prebehli vo výhrevnej komore, kde sa temperovali minimálnu dobu jednej hodiny. Výsledky merania sú zhrnuté v tabuľke 12 a grafe 8. Materiály výrobcu B sú opäť pevnejšie ale krehké. Pri 80 °C dosiahli materiály maximálnych hodnôt modulu v ťahu. Od výrobcu A sú materiály húževnatejšie a od výrobcu B krehkejšie.

Tab. 13: Výsledky ťahovej skúšky pre 130 °C

Materiál	T [°C]	E_T [MPa]	τ [Mpa]	ΔL [%]
A1	130	1271,0±134,0	42,0±0,9	60,6±12,9
A2	130	1347,0±163,1	44,5±0,5	53,9±17,2
A3	130	1379,0±99,4	49,7±1,1	43,8±17,1
A4	130	1440,0±191,3	50,6±0,6	46,9±14,3
B1	130	1437,0±69,0	42,0±1,4	30,5±10,8
B2	130	1593,0±109,9	45,9±1,9	44,2±14,8
B3	130	1471,0±125,0	43,5±1,8	55,5±13,5
B4	130	1522,0±136,4	47,3±0,6	47,2±11,5



Graf 9: Závislosť napätia na deformácii pri 130 °C

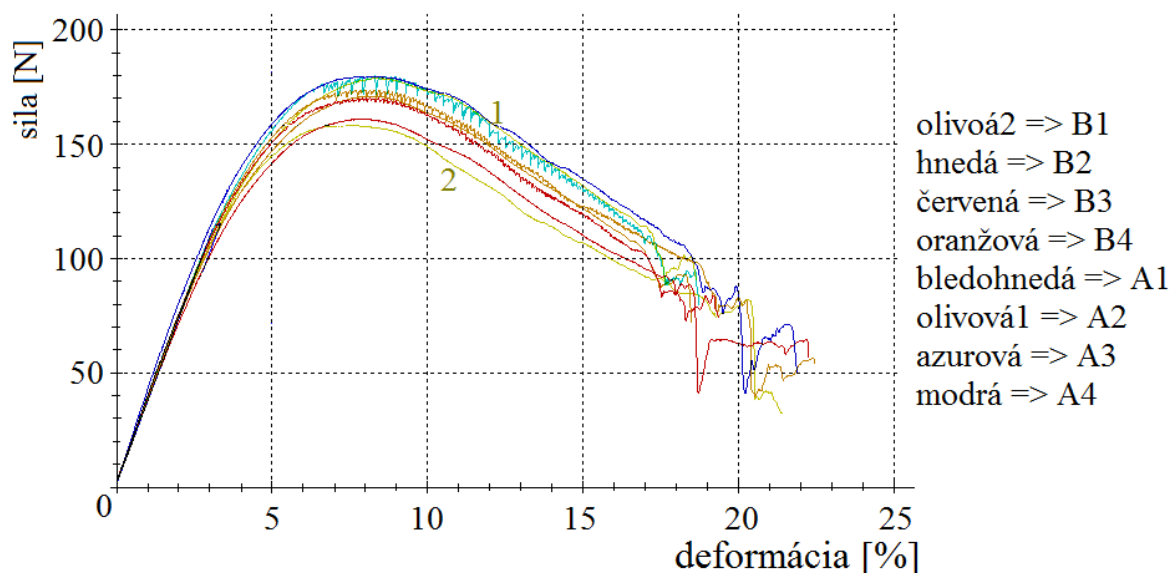
Posledné meranie bolo pri 130 °C. Spracovaný výsledok je v tabuľke 13 a grafe 9. Tú sa pevnosť odvíjala od T_g materiálu. Čím väčšie T_g , tým pevnejší materiál. Výsledné hodnoty boli pre materiály oboch výrobcov veľmi podobné. S teplotou rastie húževnatosť materiálov od výrobcu B ale od výrobcu A klesla oproti predošlým meraniam.

9.2.2 Skúška ohybom

Skúška sa vykonávala na desiatich telieskach z každého materiálu a pri štyroch rôznych teplotách. Z desiatich nameraných hodnôt sa zrátal aritmetický priemer so smerodajnou odchýlkou. V nasledujúcich tabuľkách sú merania rozdelené podľa teplôt. Vyhodnocoval sa modul pevnosti v ohybe E_o .

Tab. 14: Výsledky ohybovej skúšky pre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Materiál	T [$^{\circ}\text{C}$]	E_o [MPa]
A1	-30	2207,0±68,7
A2	-30	2190,0±40,2
A3	-30	2152,0±60,0
A4	-30	2165,0±53,9
B1	-30	2022,0±50,4
B2	-30	2088,0±55,3
B3	-30	2109,0±41,3
B4	-30	2303,0±48,4



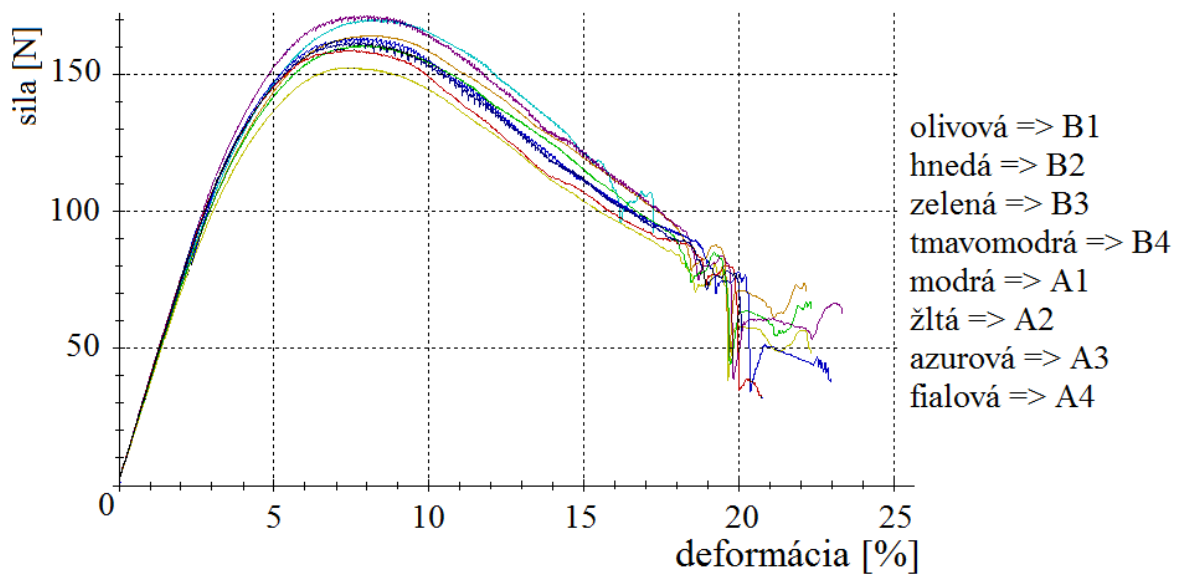
Graf 10: Závislosť sily na deformácii pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Meranie pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ je spracované v tabuľke 14 a grafe 10. Meranie dopadlo veľmi podobnými výsledkami modulu v ohybe materiálov oboch výrobcov. Z grafu je vidieť že

pre materiály od výrobcu A musela byť vyvinutá väčšia sila pre rovnakú deformáciu, z toho vyplýva že materiály od výrobcu A budú pri ohybe pevnejšie.

Tab. 15: Výsledky ohybovej skúšky pre 23 °C

Materiál	T [°C]	E_0 [MPa]
A1	23	2157,0±32,3
A2	23	2119,0±34,2
A3	23	2144,0±31,4
A4	23	2215,0±25,0
B1	23	2035,0±31,4
B2	23	2076,0±32,6
B3	23	2099,0±50,1
B4	23	2129,0±41,3

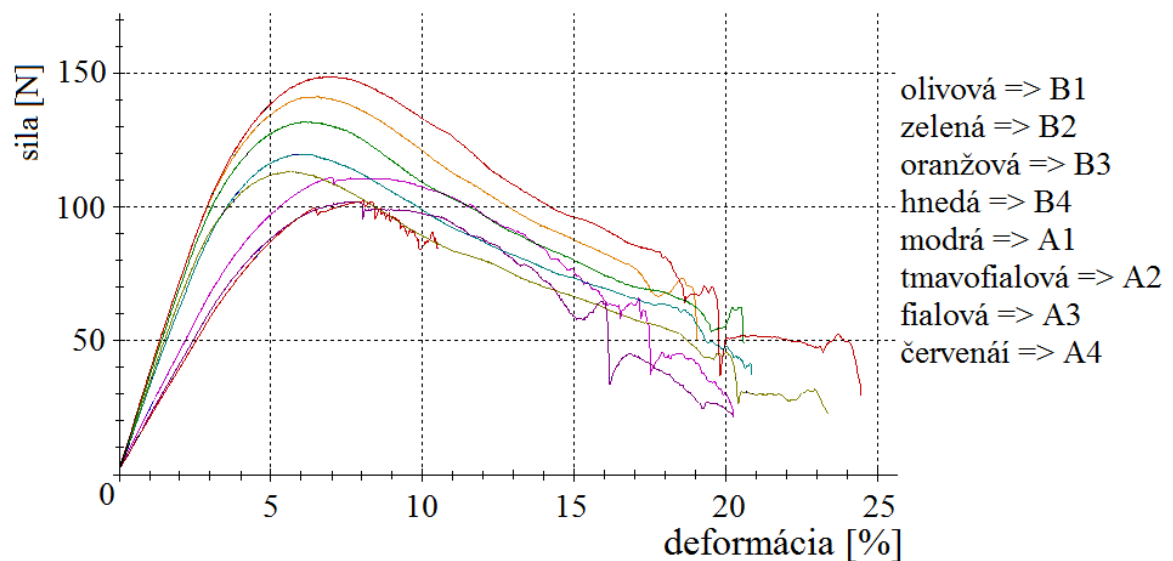


Graf 11: Závislosť sily na deformácii pri 23 °C

Meraním pri 23 °C ukázalo že modul v ohybe sa nemení a materiáli majú podobnú pevnosť pri namáhaní ohybom ako pri -30 °C. Výsledky sú spracované v tabuľke 15 a grafe 11.

Tab. 16: Výsledky ohybovej skúšky pre 80 °C

Materiál	T [°C]	E_o [MPa]
A1	80	1615,0±164,2
A2	80	1245,0±114,0
A3	80	1186,0±74,5
A4	80	1138,0±50,2
B1	80	1847,0±84,0
B2	80	1971,0±53,7
B3	80	2092,0±45,3
B4	80	2114,0±28

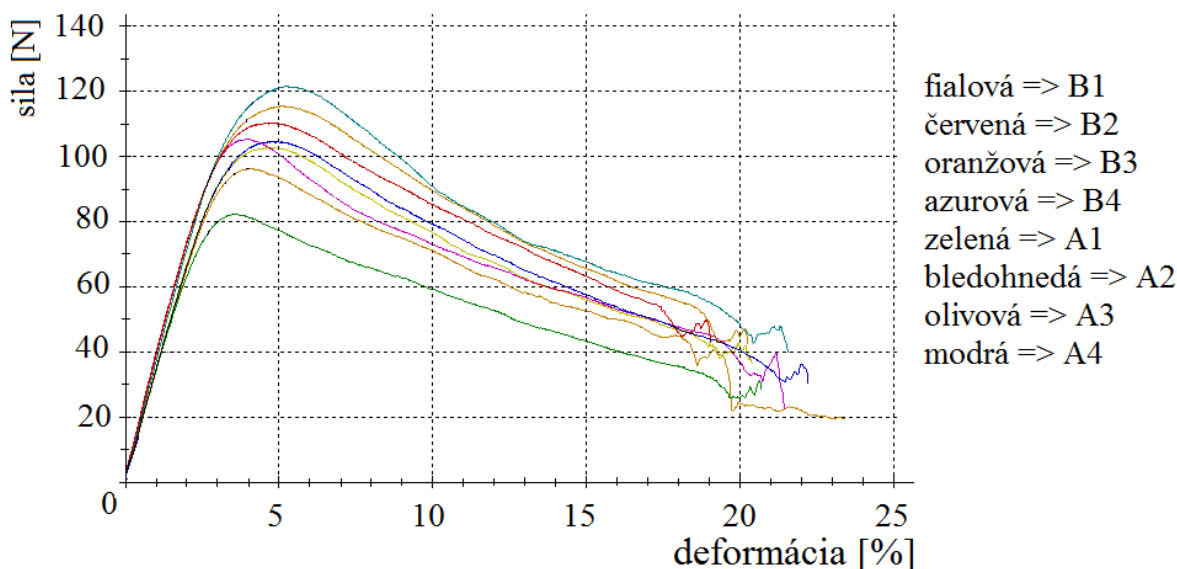


Graf 12: Závislosť sily na deformácii pri 80 °C

Výsledky z merania pri 80 °C sú spracované v tabuľke 16 a grafe 12. Meranie ukázalo že materiál od výrobcu B je pevnejší, nakoľko sila potrebná na rovnakú deformáciu musela byť vyššia .

Tab. 17: Výsledky ohybovej skúšky pre 130 °C

Materiál	T [°C]	E_o [MPa]
A1	130	1689,0±102,8
A2	130	1867,0±68,6
A3	130	1929,0±131
A4	130	2019,0±69,8
B1	130	1840,0±154
B2	130	2141,0±67,1
B3	130	2220,0±32,6
B4	130	2155,0±50,4



Graf 13: Závislosť sily na deformácii pri 130 °C

Pri teplote 130°C z grafu vidieť že materiály výrobcu B sú pevnejšie. Bolo potrebné pre rovnakú deformáciu vynaložiť viac sily. Výsledky sú v tabuľke 17 a grafe 13.

9.2.3 Vrubová skúška Chapry-ho kladivom

Skúška sa vykonávala na desiatich telieskach z každého materiálu a pri dvoch rôznych teplotách. Z desiatich nameraných hodnôt sa zráta aritmetický priemer so smerodajnou odchýlkou. Vyhodnocovala sa maximálna sila F_m , práca pri maximálnej sile A_m a celková práca potrebná na prerazenie telesa A_b .

Tab. 18: Výsledky meraní rázovej vrubovej skúšky pri -30 °C

Materiál	T [°C]	F_m [N]	A_m [kJ/m ²]	A_b [kJ/m ²]
A1	-30	461,7±41,9	4,6±0,9	7,4±0,4
A2	-30	425,9±24	4,1±0,3	6,0±0,2
A3	-30	453±29,5	4,3±0,3	5,9±0,2
A4	-30	414,6±29,3	4,0±0,3	4,9±0,2
B1	-30	522,7±56,3	2,3±0,6	3,2±0,2
B2	-30	512,5±78,3	2,3±0,3	2,9±0,1
B3	-30	490,7±75,3	2,3±0,4	2,9±0,3
B4	-30	567,1±50,5	2,2±0,6	3,0±0,3

Tab. 19: Výsledky meraní rázovej vrubovej skúšky pri 23 °C

Materiál	T [°C]	F_m [N]	A_m [kJ/m ²]	A_b [kJ/m ²]
A1	23	453,4±31,1	5,3±1,2	7,8±0,5
A2	23	427,6±31,4	4,3±0,4	6,3±0,2
A3	23	463,3±31,4	4,4±0,1	5,9±0,3
A4	23	445,2±31,6	4,2±0,3	5,1±0,1
B1	23	456,8±32,2	2,7±0,1	3,3±0,1
B2	23	493,4±47,4	2,4±0,6	3,1±0,2
B3	23	447,3±75,7	1,9±0,3	2,8±0,2
B4	23	471,6±31,8	2,0±0,4	2,8±0,1

Zo Charpy-ho rázovej skúšky sme zistili že pre materiály výrobcov A aj B bola potrebná podobná sila na prerazenie skúšobného telesa ale potrebná práca na prerazenie bola u materiálov výrobcu B polovičná, čo je vidieť v tabuľkách 18 a 19, z čoho plynie že sú materiály podobne pevné ale krehkejšie. Teplota nemala výrazný vplyv na pevnosť u materiálov A a u materiálov B s teplotou pevnosť klesala.

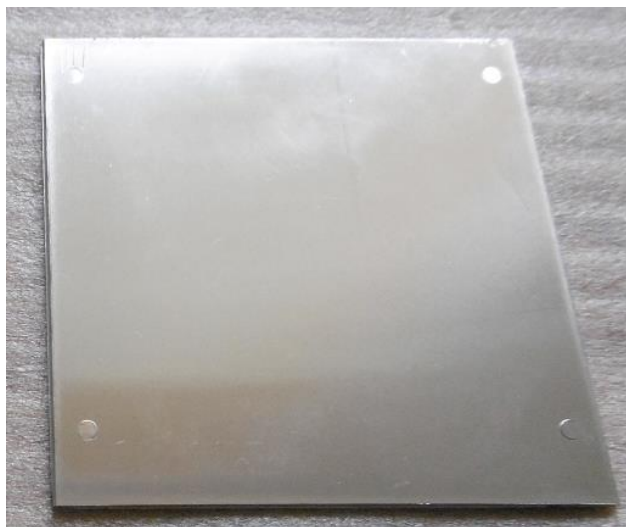
9.3 Optická skúška degradácie pokoveného povrchu

Optická skúška pokoveného povrchu sa odvíjala od teploty sklovitého prechodu. Čím menšia T_g , tým skôr pokovený povrch teplotne degradoval. Pri materiály A pri teplote 150 °C došlo až k deformácií skúšobného telesa z materiálu A1. Prvotná degradácia povrchu

bola strata pôvodného lesku a následne vznikli na povrchu póry. Najlepšiu odolnosť mali materiály A3, A4, B3 a B4 (Tab. 20), ktoré majú T_g hodnoty pomerne vysoké.

Tab. 20: Vyhodnotenie optickej skúšky

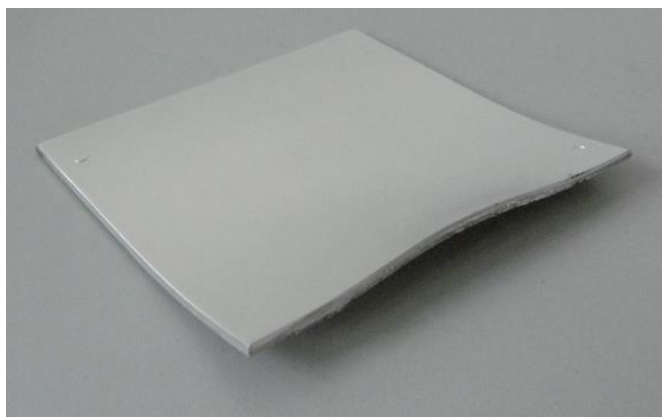
Teplota [°C]	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
135	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
140	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
145	X	X	OK	OK	X	OK	OK	OK
150	X	X	OK	OK	X	OK	OK	OK
155	X	X	OK	OK	X	OK	OK	OK
160	X	X	OK	OK	X	X	OK	OK
165	X	X	X	OK	X	X	OK	OK
170	X	X	X	X	X	X	X	X



Obr. 45: Pokovené telo bez tepelnej degradácie



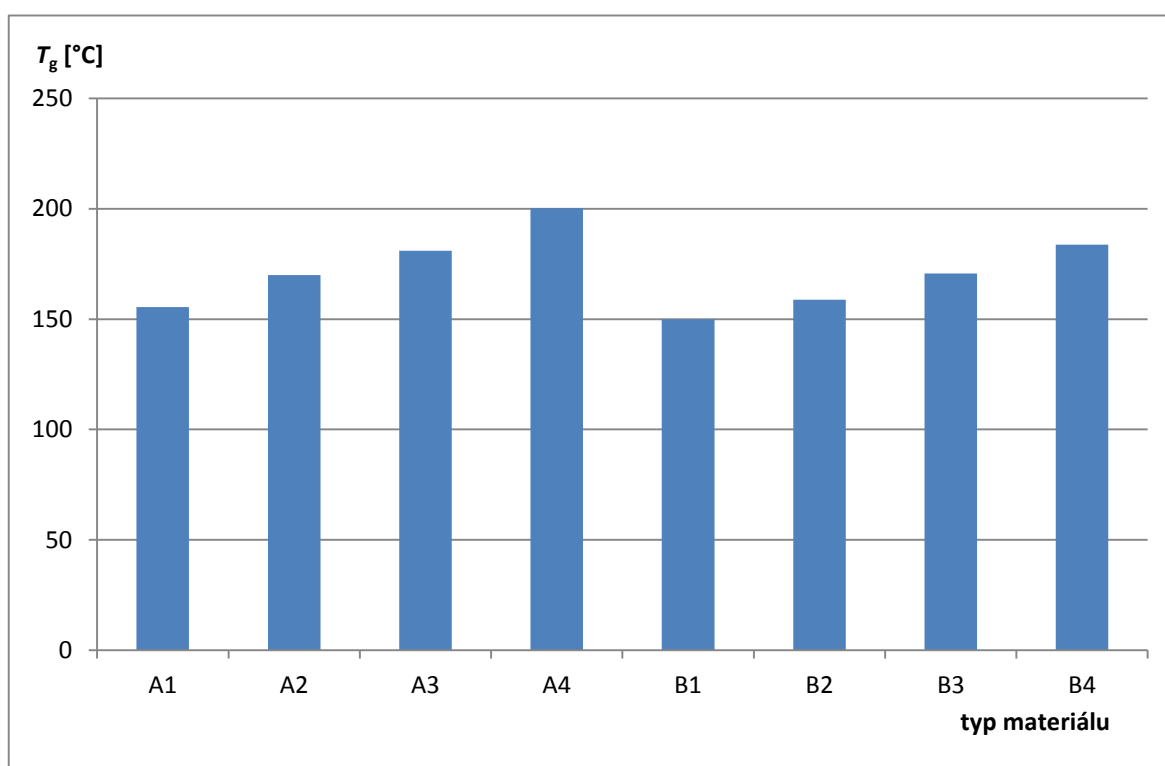
Obr. 46: Pokovené těleso po tepelném namáhání (degradácia povrchu)



Obr. 47: Zdeformované pokovené těleso z materiálu Al po tepelném namáhání

10 DISKUSIA VÝSLEDKOV

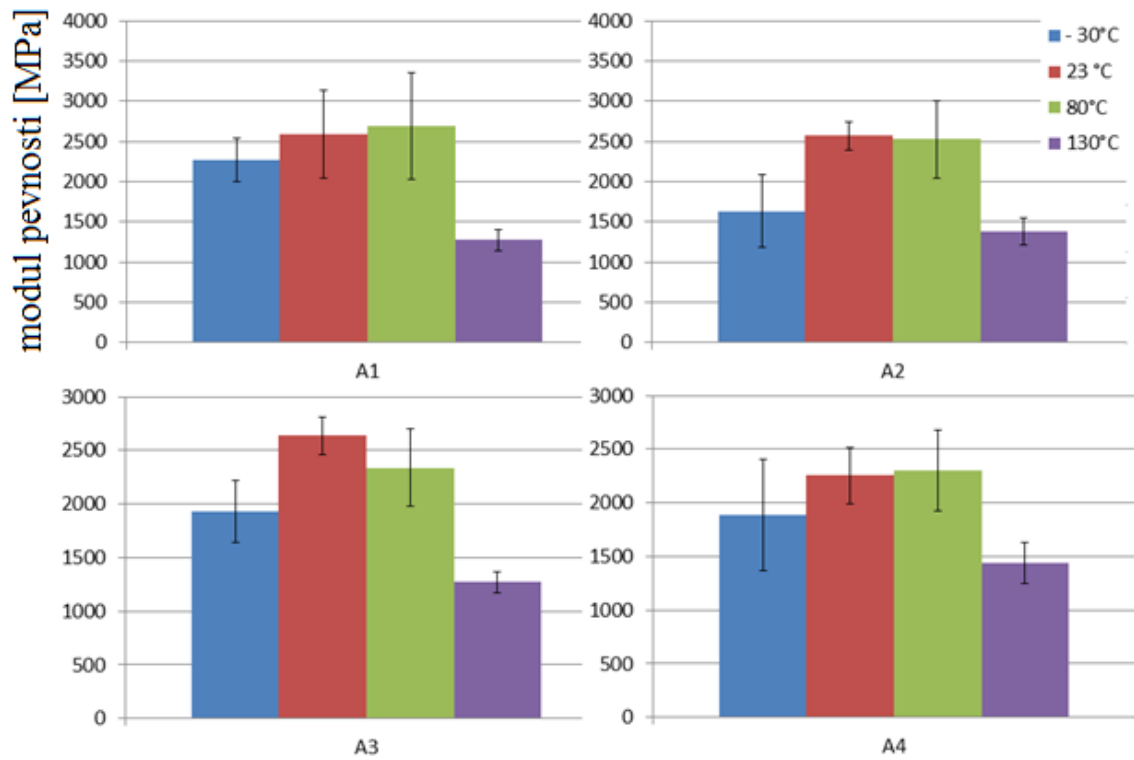
Z analýzy FTIR sme sa dozvedeli podľa výsledných grafov že sa jedná o materiály s totožným zložením nakoľko píky boli v rovnakých miestach. DCS analýza ukázala, že najvyššie teploty sklovitého prechodu T_g majú materiály A4 (200,3 °C), B4 (183,8 °C) a A3 (181,0 °C). Najnižšie hodnoty mali materiály B1 (150,0 °C), A1 (155,5 °C) a B2 (158,8 °C). Podľa T_g je jasné viditeľné teplotná odolnosť materiálov. Najodolnejší materiál voči teplu je jednoznačne A4. Výsledky sú graficky zhrnuté v Graf 14.



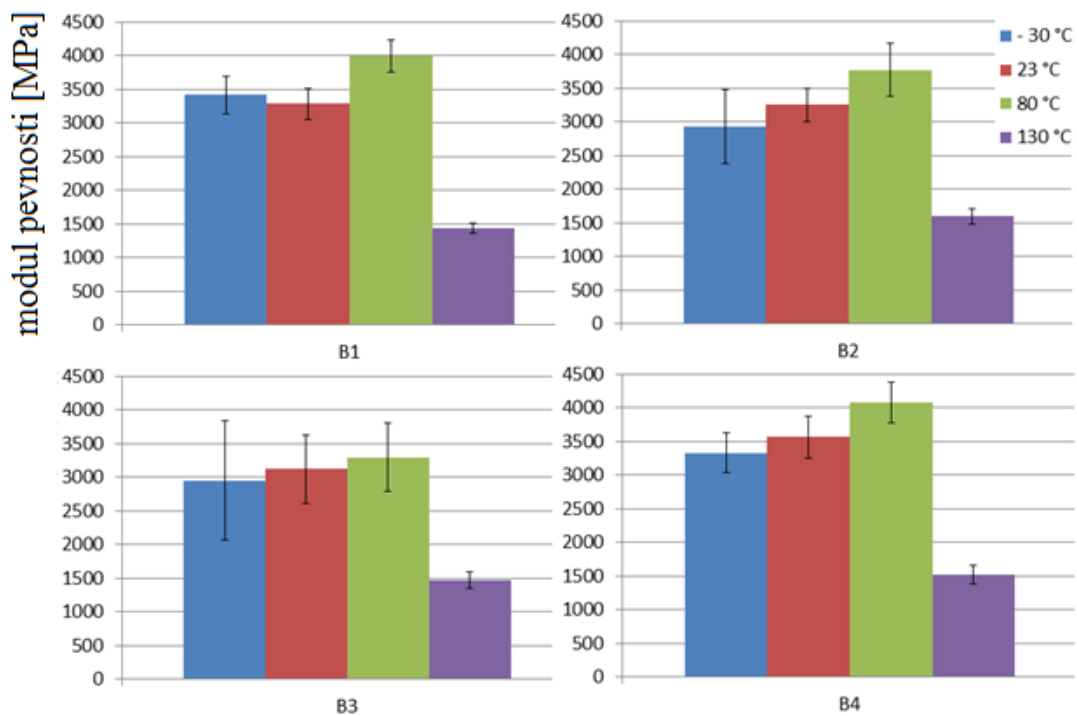
Graf 14: Grafické vyhodnotenie pre DSC analýzu

Pri skúške ťahom sa ukázalo že z hľadiska pevnosti sú materiály výrobcu B lepšie nakoľko modul pevnosti v ťahu bol vyšší až o ± 1000 MPa, čo môžeme vidieť na grafoch 15 a 16. Z hľadiska húževnatosti naopak sú lepšia materiály A, nakoľko ich predĺženie bolo niekoľkonásobne väčšie (Graf 19 a 20). Tieto výsledky platia pre teploty od -30 °C po 80 °C. Pri 130 °C sa modul v ťahu, napätie v ťahu na medzi klzu aj predĺženie v ťahu podobalo, takže tam výrazný favorit nie je (Graf 17 a 18). Modul pevnosti v ťahu v porovnaní s materiálovými listami bol nameraný vyšší u každého materiálu než udáva materiálový list

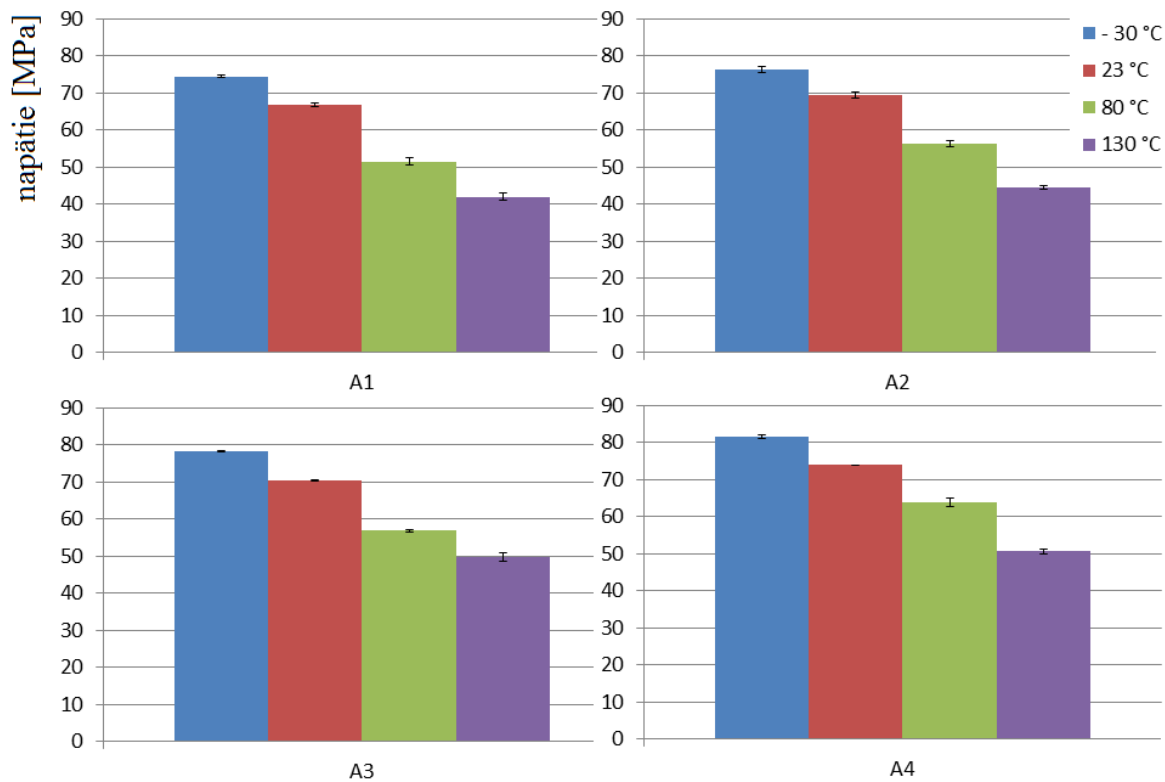
okrem materiálu A4. Pri materiáloch A bol nameraný modul vyšší o cca 200 MPa ale pri materiáloch B až o 800 MPa.



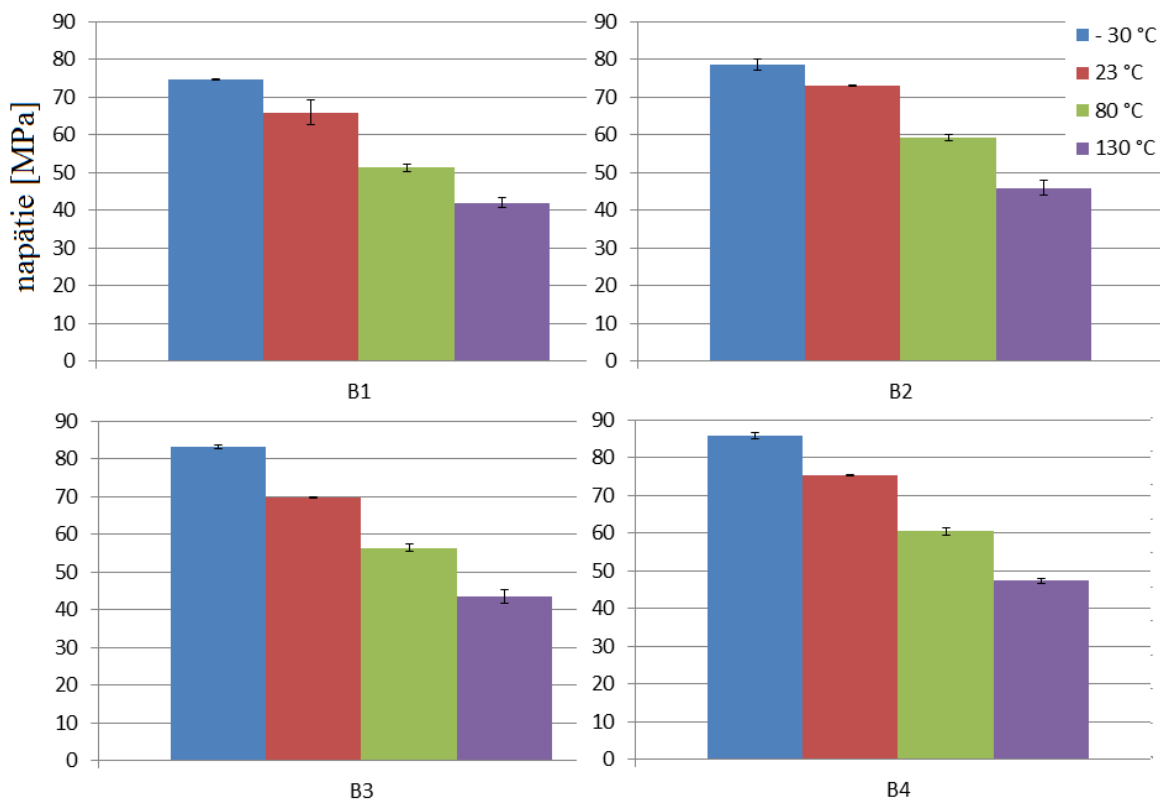
Graf 15: Modul pevnosti v ťahu pre materiály A



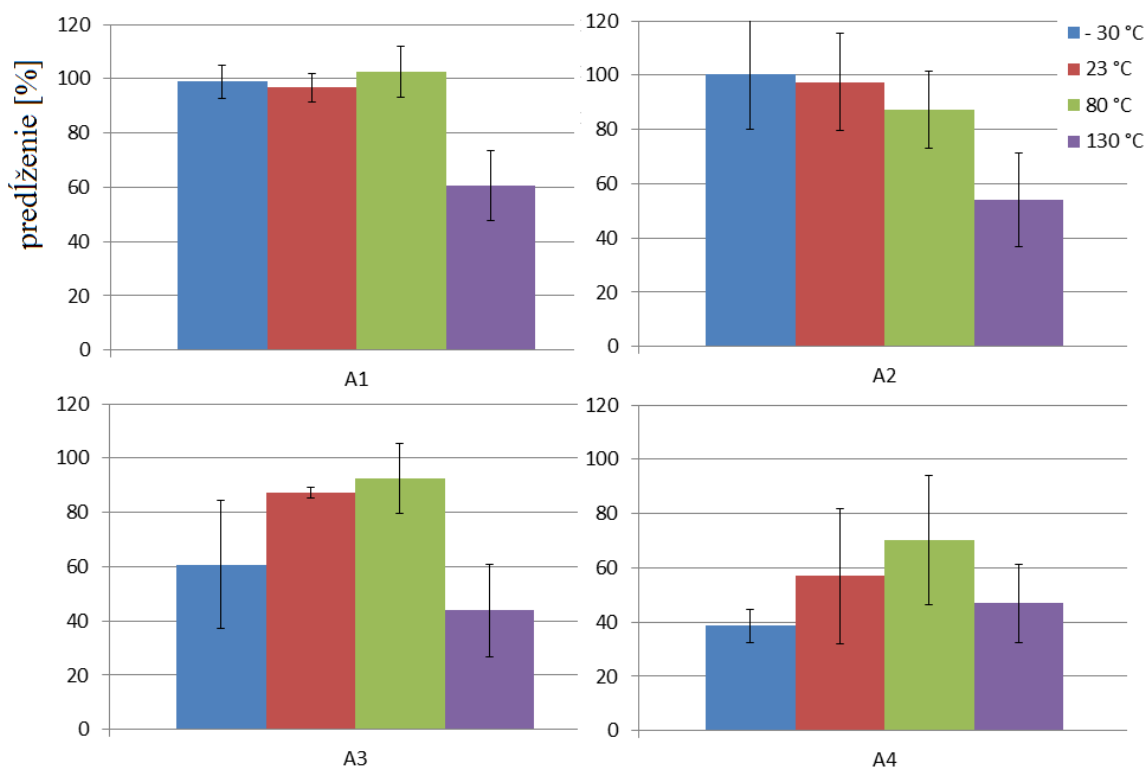
Graf 16: Modul pevnosti v tahu pre materiály B



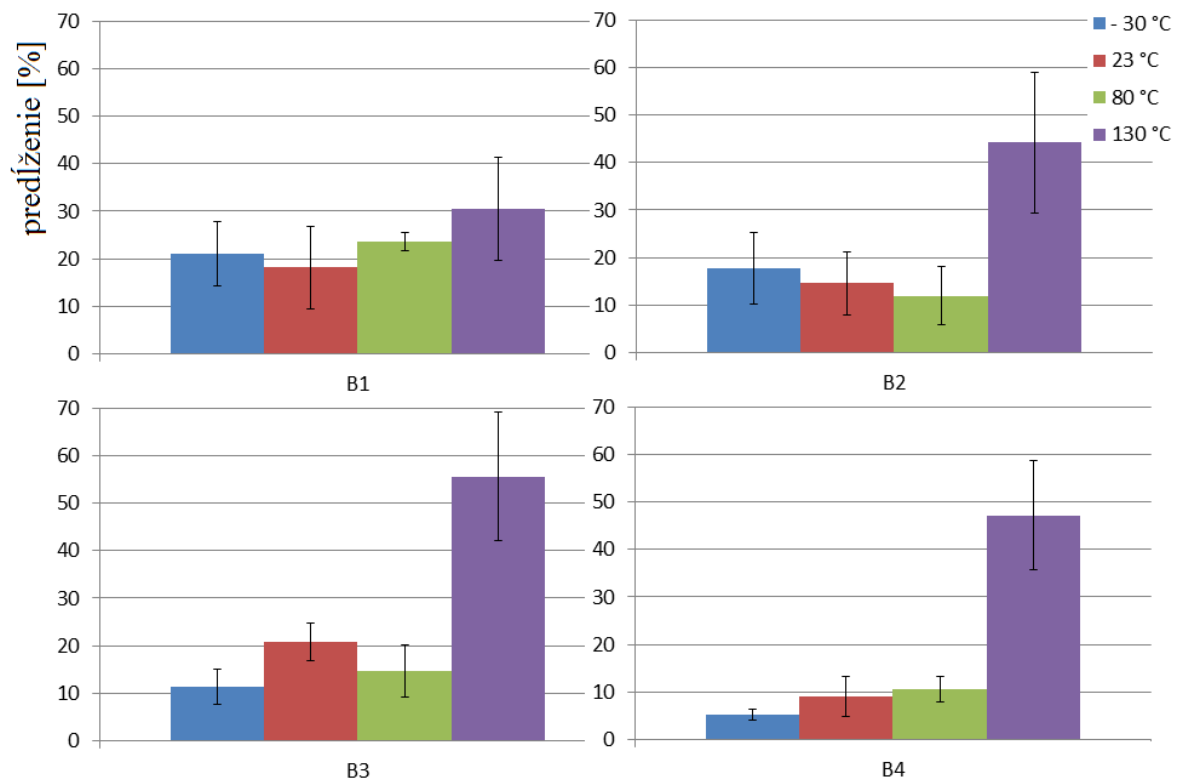
Graf 17: Napätie na medzi klzu pre materiály A



Graf 18: Napätie na medzi klzu pre materiály B

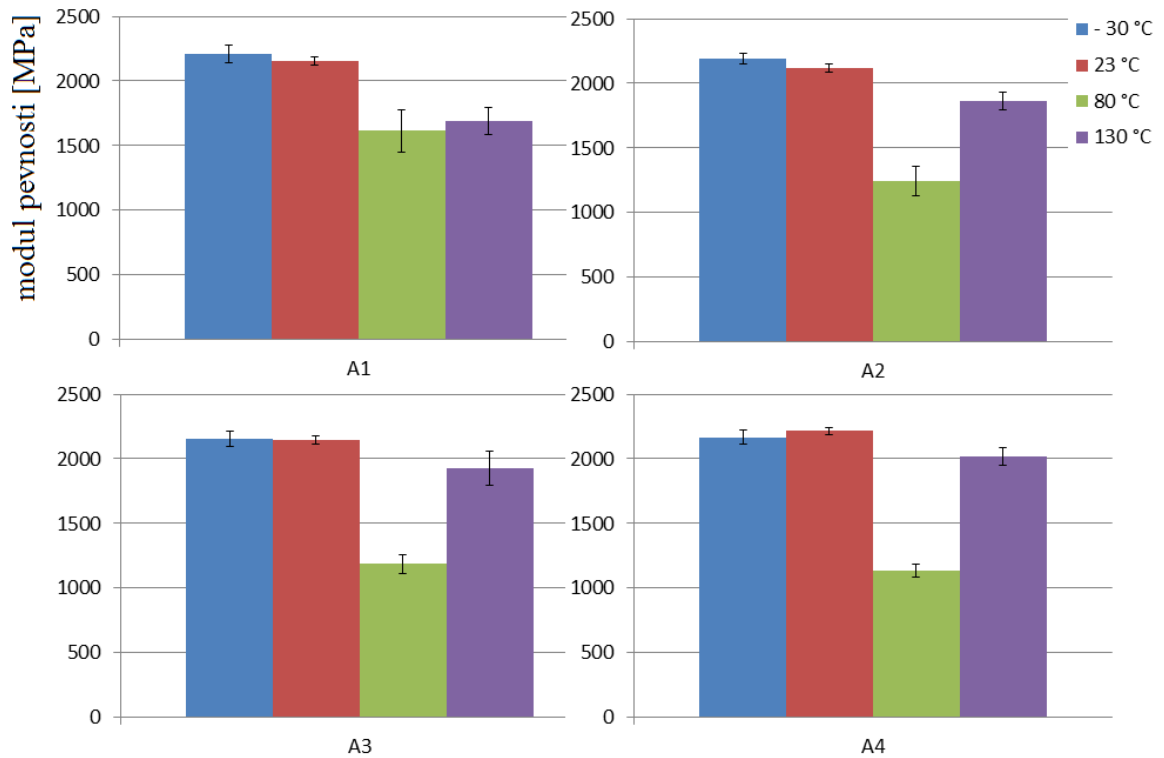


Graf 19: Maximálne predĺženie pre materiály A

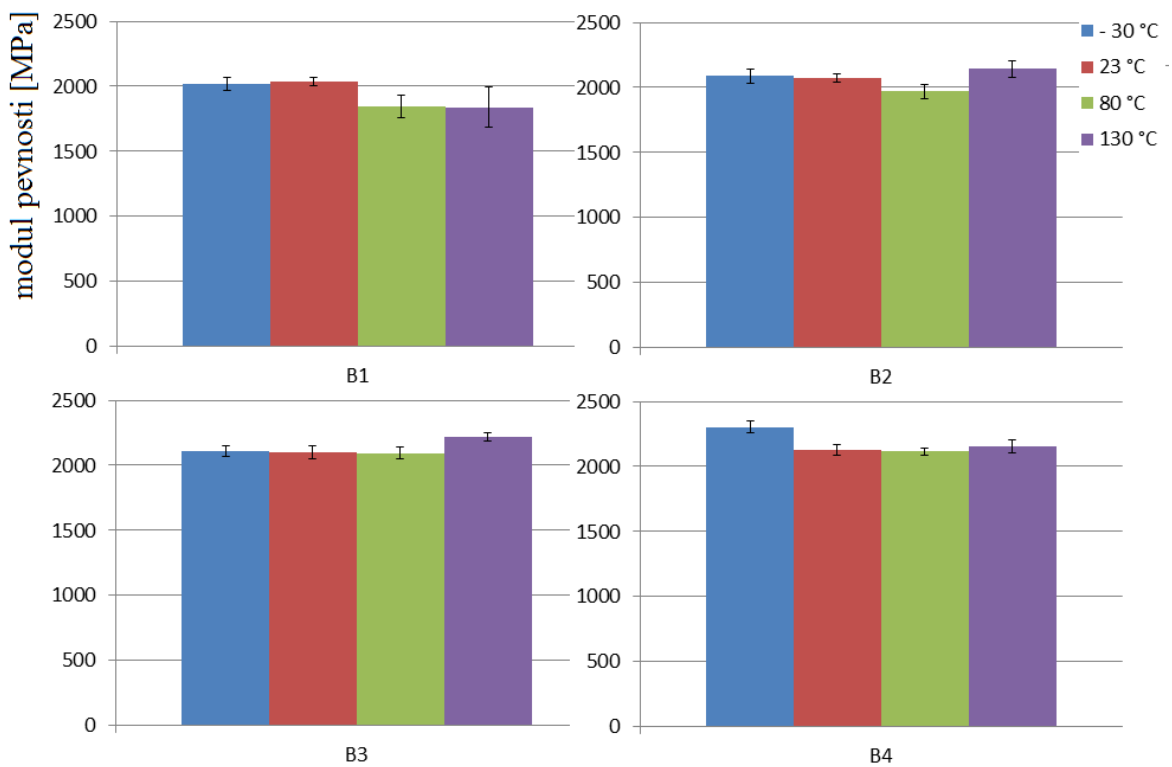


Graf 20: Maximálne predĺženie pre materiály B

Pri ohybe materiály B s rastúcou teplotou boli pevnejšie. Pri -30 °C a 23 °C mali materiály zhodné moduly ± 2100 MPa ale z grafov bolo jasne vidieť že materiály výrobcu A sú pevnejšie lebo na rovnakú deformáciu bolo spotrebovanej viac sily. Takže z merania vyplýva že s rastúcou teplotou materiály A strácajú na pevnosti viac. V porovnaní s materiálovým listom boli hodnoty namerané nižšie pri materiáloch A o cca 200 MPa a pri materiáloch B až o cca 400 MPa.

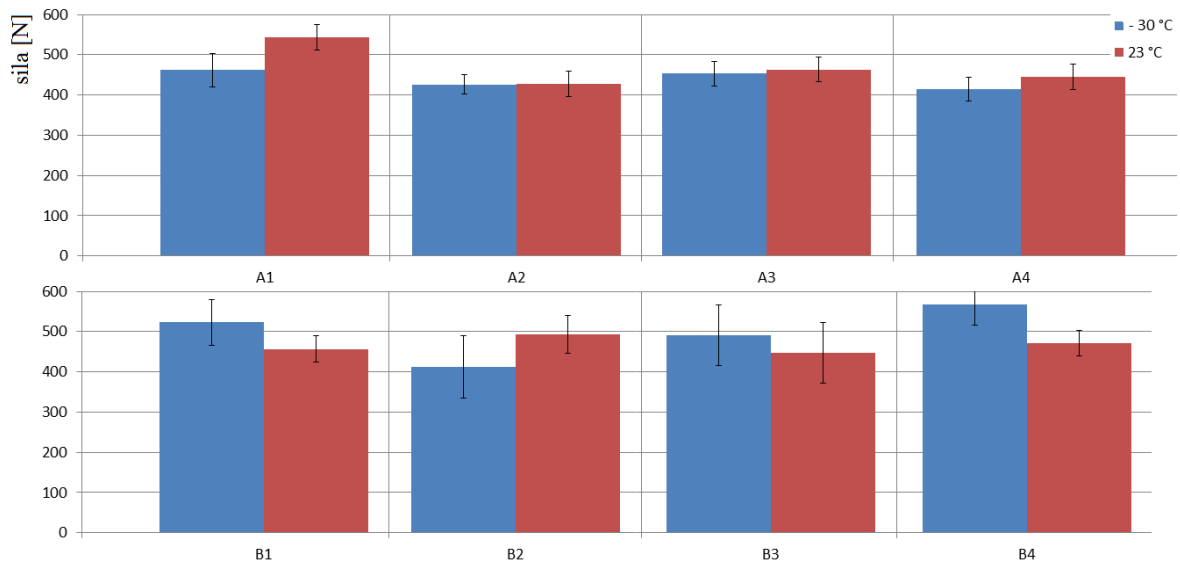


Graf 21: Modul pevnosti v ohybe pre materiály A

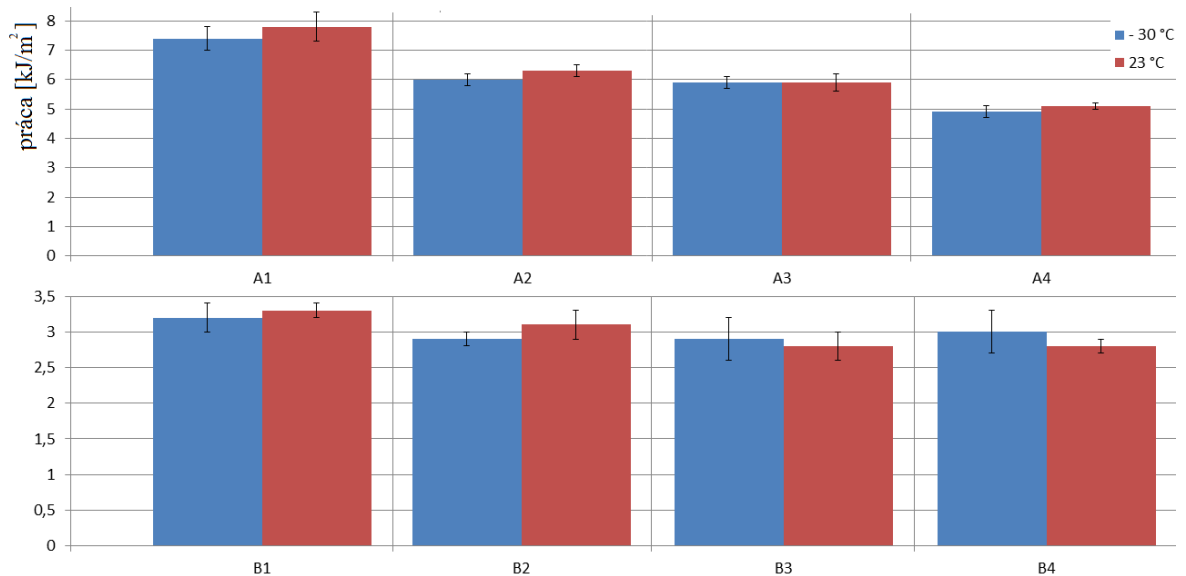


Graf 22: Modul pevnosti v ohybe pre materiály B

Chapryho skúška nám potvrdila že materiály B sú pevnejšie ale nie sú tak húževnaté ako materiály A. Sila na prerazenie telies materiálov bola podobná ale práca potrebná na prerazenie nižšia u materiálov B, čo je vidieť v Graf 23 a 24.

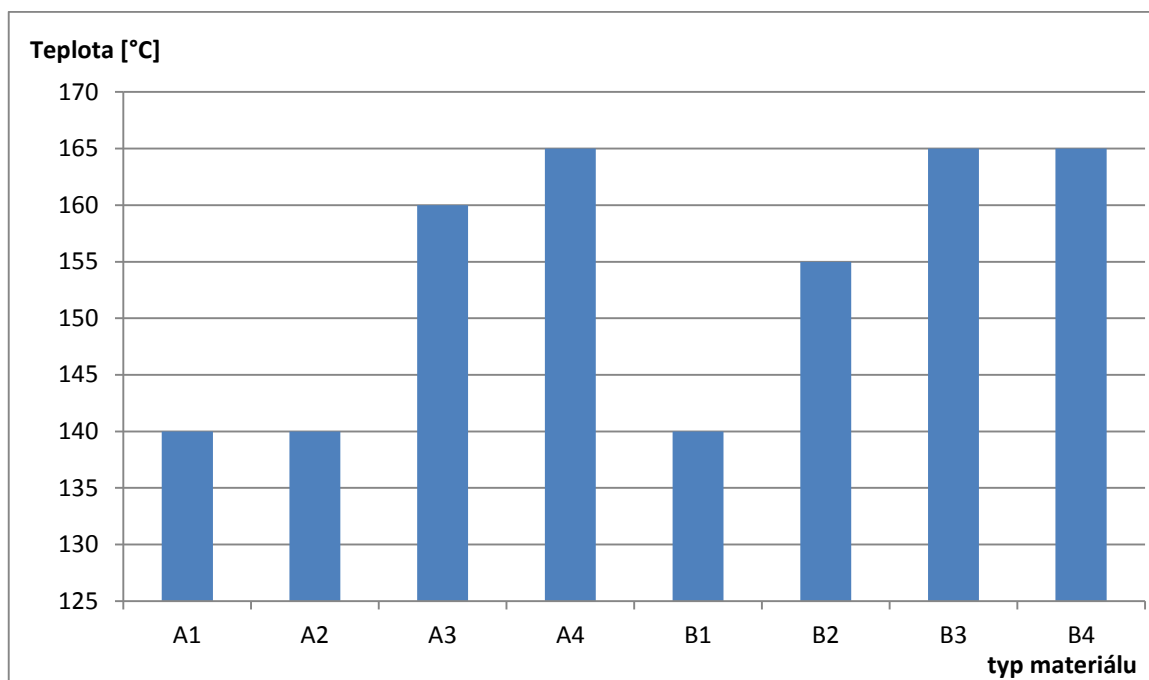


Graf 23: Sila potrebná na prerazenie skúšobného telieska



Graf 24: Práca potrebná na prerazenie skúšobného telieska

Optická skúška preukázala že na materiály ktoré majú byť teplotne namáhané a pokovené sú vhodnejšie materiály A3, A4, B3 a B4, čo je vidieť v Graf 25.



Graf 25: Teplotná odolnosť pokoveného povrchu

ZÁVĚR

Teoretická část práce je zaměřená na polymérní materiály. Ich delenie môže byť podľa rôznych kategórií. Konkrétnejšie sa venovalo samotným polykarbonátom, o ktorých práca je. Ich výrobe, deleniu a aplikácií v priemysle. V teoretickej časti sa vysvetlil princíp skúšok a analýz, ktoré sa neskôr v praktickej časti budú vykonávať.

Praktická časť začala dodaním materiálov od výrobcov A a B firmou Varroc Lighting Systems, ktorá tieto materiály používa vo výrobných procesoch pre výrobu svetlometov. Celkovo sa jednalo o osem druhov materiálov. Pokračovalo sa prípravou skúšobných telies pre statické, dynamické a optické skúšky. V prvom rade sa materiál vysušil a následne sa z neho vystrekli skúšobné telesa v potrebných počtoch. Pre rázovú skúšku sa do vystreknutých telies mechanicky vyrezala drážka. Pre optickú skúšku sa telesa vákuovo pokovili vo firme Varroc Lighting Systems. Po výrobe telies začal výskum termo analýzami, mechanickými a optickými skúškami.

Práca by sa dala ďalej rozšíriť o merania pri iných teplotách, v rozmedzí od 80 °C - 130 °C aby bolo bližšie známe kedy sa začnú materiály správať podobne, nakoľko medzi výsledkami boli pomerne veľké rozdiely. Skúšky sa môžu previesť aj za iných parametrov stroja. Pre úplnú analýzu materiálu by sa dali spraviť ešte iné analýzy a skúšky. Prípadne by sa dalo rozšíriť portfólium materiálov o recykláty dodaných materiálov a porovnať ich vlastnosti medzi sebou.

Práca slúži ako nástroj pre zvolenie ideálneho materiálu pre daný typ aplikácie. Rozšíril sa materiálový list o výsledky mechanických skúšok pri iných teplotách a o optickú skúšku. Jednoznačne sa nedá povedať ktorý materiál je najlepší nakoľko ich vlastnosti sa líšia a každý nájde svoju aplikáciu. Materiály s menšou teplotou sklovitého prechodu preukázali rovnaké mechanické vlastnosti a ich cena bude lacnejšia, tak ich využitie pri teplotne nenamáhaných aplikáciách bude ekonomicky výhodnejšie.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [3] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [2] Polymeric Solids. Principles of General Chemistry. [online]. [cit.2016-04-03] Dostupné z: <http://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0/s16-08-polymeric-solids.html>
- [3] Bumpers. Miner Elastomer Products. [online]. ©2009 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z : <http://minerelastomer.com/brochures/generalbumper.pdf>
- [4] Termoplast italian packaging solutions. Termoplast s.r.l. [online]. ©2011 [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://termoplast.com/news/68_ecobox—new-semi-oval-container/
- [5] Reaktoplasty. *Www.public.cz* [<https://publi.cz/books/180/21.html>]. [cit. 2016-04-04]
- [6] HUDEC, I. *Konstruktivní plasty*. Bratislava, 2006. Slovenská technická univerzita v Bratislave.
- [7] KLOUŽKOVÁ, A., ZEMENOVÁ, P. , KLOUŽEK, J., a PABST. W., Termická analýza: Zřízení laboratoře pro praktickou výuku termické analýzy se zaměřením na anorganické nekovové materiály. Praha, VŠCHT Praha, 2012.
- [8] ELVERS, Barbara. Dr. *Ullmann's: Polymers and Plastics*. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2016. ISBN 978-3-527-338238.
- [8] KLOUŽKOVÁ, A., ZEMENOVÁ, P. , KLOUŽEK, J., a PABST. W., Termická analýza: Zřízení laboratoře pro praktickou výuku termické analýzy se zaměřením na anorganické nekovové materiály. Praha, VŠCHT Praha, 2012.
- [9] Přehled technických plastů. FERONA THYSSEN PLASTICS s.r.o. [online]. ©2014 [cit.2016-04-04]. Dostupné z: http://www.feronathysen.cz/cms_dokumenty/ftp-prehled-technických-plastu.pdf
- [10] Dutinkový polykarbonát – Makrolón. PLAST PARTNER. [online]. ©2010[cit.2016-04-04] Dostupné z: <http://pergoly-zastreseni.cz/product/show/dutinkovy-polykarbonat-makrolon>

- [11] Produkty. VARROC GROUP. [online] ©2013[cit.2016-04-04] Dostupné z: <http://www.varroc.cz/produkty-19.html>
- [12] STN EN ISO 527-1 (STN 640605). Plasty. Stanovenie ťahových vlastností. 2012
- [13] *Kontrolní a zkušební metody* [<http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=kzm>]. [cit. 2016-04-01].
- [14] STN EN ISO 178 (STN 640607). Plasty. Stanovenie ohybových vlastností. 2011
- [15] STN EN ISO 179-2 (STN 640612). Plasty. Stanovenie vlastností pri náraze Charpyho metódou. 2001
- [16] BĚHÁLEK, L. *Tepelné vlastnosti plastů: tepelná odolnost plastů vůči vysokým teplotám*. Liberec, 2010. Fakulta strojní Technické univerzity v Liberci.
- [17] CHVOJKA, J. Amorfnní a krystalické polymery, termické analýzy: DSC, TGA, TMA. 2015.
- [18] POLKA, L. *UV VIS a FTIR spektroskopická analýza materiálů na bázi polymerů*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [19] Hybrid machine. ARBURG. [online] ©2014[cit.2016-04-04]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/products-and-services/injection-moulding/injection>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PC	Polykarbonát
PC-HT	Vysoko teplotne odolný polykarbonát
T _g	Teplota sklovitého prechodu
T _m	Teplota kaučukovitého stavu
T _f	Teplota tečenia
T	Teplota
°C	Stupeň Celzia
E _T	Modul v ťahu
τ	Napätie
MPa	Mega pascal
ΔL	predĺženie
E _o	Modul v ohybe
F _m	Sila
A _b	Práca
kJ	Kilo joule
N	Newton
%	Percento
mg	Miligram
m/s	Meter za sekundu
°	Stupeň
kg	Kilogram
mm ²	Milimeter štvorcový
Zn	Zinok

Se	Selén
$C_6H_{18}OSi_2$	Hexametyldisiloxan
mm	Milimeter
min	Minúta
s	Sekunda
kN	Kilonewton
Mo	Ohybový moment
l	Délka
Nmm	Newtonmilimeter
GPa	Gigapascal
h	Hodina
m^3	Meter kubický

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Monomér vs. Polymér</i> [2]	10
<i>Obr. 2: Výrobok z elastoméru (pneumatické mechy)</i> [3]	11
<i>Obr. 3: Box na jedlo z termoplastu</i> [4]	11
<i>Obr. 4: Uhlíkové vlákno s epoxidovou živickou</i> [5]	12
<i>Obr. 5: Delenie polymérov na základe tepelnej odolnosti</i>	13
<i>Obr. 6: Makromolekula 1.) lineárneho 2.) rozvetveného 3.) zosieťovaná</i>	14
<i>Obr. 7: Diferenciálna distribučná krivka molekulových hmotností</i>	17
<i>Obr. 8: Vzorec polykarbonátu</i> [8]	18
<i>Obr. 9: Výroba polykarbonátu vs. vysoko teplotne odolného polykarbonátu</i>	18
<i>Obr. 10: Vzorce BPTMC a BPA pre vznik PC-HT</i> [8]	18
<i>Obr. 11: Rozdelenie PC podľa využitia v priemysle</i>	21
<i>Obr. 12 : Makrolon- dosky z PC</i> [10]	22
<i>Obr. 13 : Predné kryty svetlometov z PC</i> [11]	22
<i>Obr. 14: Základné typy ťahových kriviek</i> [13]	23
<i>Obr. 15: Skúšobne teliesko podľa ISO527 (rozmery v mm)</i> [13]	23
<i>Obr. 16: Trojbodová skúška ohybom</i> [13]	24
<i>Obr. 17: Skúšobne teliesko pre trojbodový ohyb podľa ISO178 (rozmery v mm)</i>	24
<i>Obr. 18: Princíp Charpy-ho vrubovej skúšky</i> [13]	25
<i>Obr. 19: Detail vrubu</i> [13]	26
<i>Obr. 20: Skúška podľa Vicata ST ISO306</i>	26
<i>Obr. 21: Stanovenie teploty mäknutia podľa Vicata</i> [16]	27
<i>Obr. 22: Zariadenia pre HDT skúšku ISO75 a) plocho b) nastojato</i> [16]	27
<i>Obr. 23: Stanovenie teploty priehybu</i> [16]	28
<i>Obr. 24: Princíp DSC</i> [17]	28
<i>Obr. 25: Výsledok skúšky DSC</i> [17]	29
<i>Obr. 26: Príklad absorpčného spektra</i> [18]	29
<i>Obr. 27: Čierny granulát PC-HT</i>	33
<i>Obr. 28: Arburg Thermolift 100-2 (sušiareň)</i> [19]	34
<i>Obr. 30: Princíp sušenia v zariadení Thermolift 100-2</i> [19]	35
<i>Obr. 30: Arburg 470H 1000-400 HIDRIVE</i> [19]	36
<i>Obr. 31: Forma pre skúšobné telieska</i>	36

<i>Obr. 32: Zariadenie na výrobu vrubov pre vrubovú skúšku Charpy-ho kladivom.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 33: Zariadenie pre vákuové pokovenie</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 34: Skúšobné telesá pred a po pokovení</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 35: Mechanické zariadenie na zalisovanie od firmy Mettler Toledo</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 36: Hliníkové misky s vrchnými dielmi a pinzeta</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 37: Uloženie skúšobného telesa v čeľustiach stroja ZWICK ROELL 1456</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 38: Uloženie skúšobného telieska pri skúške ohybom</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 39: Skúška ohybom v temperačnej komore</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 40: Zariadenie pre rázové skúšky CEAST DAS 8000JUNIOR.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 41: Sušiacie zariadenie MEMMENT UN55</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 42: Teplotný režim DSC analýzy</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 43: Zariadenie pre termo analýzy</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 44: Zariadenie pre FTIR spektroskopiu Nocilet iS5</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 45: Pokovené telo bez tepelnej degradácie</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 46: Pokovené teleso po tepelnom namáhaní (degradácia povrchu)</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 47: Zdeformované pokovené teleso z materiálu Al po tepelnom namáhaní.....</i>	<i>61</i>

SEZNAM GRAFU

<i>Graf 1. : Porovnanie bezpečnosti proti lomu pri rovnakých hrúbkach materiálu [9].....</i>	<i>20</i>
<i>Graf 2: Výsledok analýzy FTIR pre materiály výrobcu A</i>	<i>47</i>
<i>Graf 3: Výsledok analýzy FTIR pre materiálu výrobcu B</i>	<i>48</i>
<i>Graf 4: Výsledok termo analýzy DSC pre materiály výrobcu A</i>	<i>49</i>
<i>Graf 5: Výsledok termo analýzy DSC pre materiálu výrobcu B.....</i>	<i>49</i>
<i>Graf 6: Závislosť napätia na deformácií pri -30 °C.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf 7: Závislosť napätia na deformácií pri 23 °C</i>	<i>52</i>
<i>Graf 8: Závislosť napätia na deformácií pri 80 °C</i>	<i>53</i>
<i>Graf 9: Závislosť napätia na deformácií pri 130 °C</i>	<i>54</i>
<i>Graf 10: Závislosť sily na deformácií pri -30 °C.....</i>	<i>55</i>
<i>Graf 11: Závislosť sily na deformácií pri 23 °C.....</i>	<i>56</i>
<i>Graf 12: Závislosť sily na deformácií pri 80 °C</i>	<i>57</i>
<i>Graf 13: Závislosť sily na deformácií pri 130 °C.....</i>	<i>58</i>
<i>Graf 14: Grafické vyhodnotenie pre DSC analýzu</i>	<i>62</i>
<i>Graf 15: Modul pevnosti v ťahu pre materiály A</i>	<i>63</i>
<i>Graf 16: Modul pevnosti v ťahu pre materiály B</i>	<i>64</i>
<i>Graf 17: Napätie na medzi klzu pre materiály A</i>	<i>64</i>
<i>Graf 18: Napätie na medzi klzu pre materiály B.....</i>	<i>65</i>
<i>Graf 19: Maximálne predĺženie pre materiály A.....</i>	<i>65</i>
<i>Graf 20: Maximálne predĺženie pre materiály B.....</i>	<i>66</i>
<i>Graf 21: Modul pevnosti v ohybe pre materiály A</i>	<i>67</i>
<i>Graf 22: Modul pevnosti v ohybe pre materiály B</i>	<i>67</i>
<i>Graf 23: Sila potrebná na prerazenie skúšobného telieska</i>	<i>68</i>
<i>Graf 24: Práca potrebná na prerazenie skúšobného telieska</i>	<i>68</i>
<i>Graf 25: Teplotná odolnosť pokoveného povrchu</i>	<i>69</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Charakteristické teploty pre určité materiály [6]</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2 : Základné vlastnosti polykarbonátu [9]</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 3: Údaje z materiálových listov</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 4 Tabuľka teplôt a dôb sušenia pre materiály PC-HT z materiálových listov ..</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 5: Tabuľka teplôt a dôb sušenia pre materiály PC-HT použité.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6: Parametre vstrekovacieho stroja Arburg 470H 1000-400 HIDRIVE.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 7: Parametre pre vstrekovací cyklus</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 8: Parametre Charpy-ho skúšky</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 9: Výsledné teploty sklovitého prechodu z analýzy DSC</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 10: Výsledky ťahovej skúšky pre -30 °C</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 11: Výsledky ťahovej skúšky pre 23 °C.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 12: Výsledky ťahovej skúšky pre 80 °C.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 13: Výsledky ťahovej skúšky pre 130 °C.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 14: Výsledky ohybovej skúšky pre -30 °C.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 15: Výsledky ohybovej skúšky pre 23 °C</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 16: Výsledky ohybovej skúšky pre 80 °C</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 17: Výsledky ohybovej skúšky pre 130 °C</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 18: Výsledky meraní rázovej vrubovej skúšky pri -30 °C.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 19: Výsledky meraní rázovej vrubovej skúšky pri 23 °C</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 20: Vyhodnotenie optickej skúšky</i>	<i>60</i>