

**Porovnání mikro-mechanických a mechanických
vlastností polyamidu 6, polyamidu 66,
polykarbonátu a akrylo-nitril-butadienstyrenu**

Hana Vrbová

Bakalářská práce
2018-2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Hana Vrbová**

Osobní číslo: **T16120**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Porovnání mikro-mechanických a mechanických vlastností polyamidu 6, polyamidu 66, polykarbonátu a akrylonitril-butadienstyrenu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše.
2. Příprava vzorků.
3. Naměření dat.
4. Vyhodnocení dat.
5. Zhodnocení přínosu pro praxi.

Rozsah bakalářské práce: cca 60 stran
Rozsah příloh: dle pokynů VDP
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] PRAMANIK, NK; HALDAR, RS; NIYOGI, UK; ALAM, MS. Development of an Advanced Engineering Polymer from the Modification of Nylon 66 by E-Beam Irradiation. Defence Science Journal. 2014, vol. 64, no. 3 s. 281–289. ISSN:0011-748X.
- [2] SENGUPTA, Rajatendu; TIKKU, V.K; SOMANI, Alok K; CHAKI, Tapan K; BHOWMICK, Anil K. Electron Beam Irradiated Polyamide-6,6 Films?I: Characterization by Wide Angle X-ray Scattering and Infrared Spectroscopy. Radiation Physics and Chemistry. 2005, vol. 72, no. 5 s. 625–633. ISSN:0969-806X.
- [3] SENGUPTA, Rajatendu; TIKKU, V.K; SOMANI, Alok K; CHAKI, Tapan K; BHOWMICK, Anil K. Electron Beam Irradiated Polyamide-6,6 Films?II: Mechanical and Dynamic Mechanical Properties and Water Absorption Behavior. Radiation Physics and Chemistry. 2005, vol. 72, no. 6 s. 751–757. ISSN:0969-806X.
- [4] KIM, JW; JANG, H. Friction and Wear of Monolithic and Glass-fiber Reinforced PA66 in Humid Conditions. WEAR. 2014, vol. 309, no. 1–2 s. 82–88. ISSN:0043-1648.
- [5] JARRAR, R.; MOHSIN, A.M.; HAIK, Y. Alteration of the Mechanical and Thermal Properties of Nylon 6/Nylon 6,6 Blends by Nanoclay. Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 124, no. 3 s. 1880–1890. DOI: 10.1002/app.35215.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lenka Hýlová
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: 2. ledna 2019
Termín odevzdání bakalářské práce: 24. května 2019

Ve Zlíně dne 19. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15. 5. 2019

.....

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

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

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

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu 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 výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá měřením a zkoumáním mikro-mechanických a mechanických vlastností vybraných druhů polymerů. Jedná se o polyamid 6 (PA6), polyamid 66 (PA66), polykarbonát (PC) a akrylo-nitril-butadienstyren (ABS). Polyamidy 6 a 66 jsou semi-krytalickými polymery, v tomto případě plněny skelným vláknem, zatímco PC a ABS jsou polymery amorfní. Tyto polymery jsou v této práci zpracovány technologií vstřikování do zkušebních těles a následně testovány na mikro-mechanické vlastnosti (indentační tvrdost, modul pružnosti, kríp a plastickou a elastickou deformační práci) a mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, vrubovou houževnatost a tvrdost Shore D). Výsledky jsou diskutovány a porovnávány mezi semi-krytalickými a amorfními polymery. Zkušební tělesa byla následně vystavena teplotně-vlhkostním podmínkám po dobu 7 dní pro porovnání následných změn mikro-mechanického chování.

Klíčová slova: Semi-krytalické a amorfní polymery, mikro-mechanické a mechanické vlastnosti, teplotně-vlhkostní podmínky

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the measurement and evaluation of micro-mechanical and mechanical properties of selected polymers. Namely polyamide 6 (PA6), polyamide 66, polycarbonate (PC) and acrylonitrilebutadienestyrene (ABS). Polyamide 6 and 66 are semi-crystalline polymers, in this case reinforced with glass fibre, while PC and ABS are amorphous polymers. These polymers are processed using injection moulding technology to the shape of test bodies and subsequent tested on their micro-mechanical properties (indentation hardness, elastic modulus, creep and plastic and elastic deformation work) and mechanical properties (tensile strength, notch toughness and Shore D hardness). The results are discussed and compared between semi-crystalline and amorphous polymers. Thereafter test bodies were exposed temperature-humidity conditions for 7 days for the comparison of subsequent changes of micro-mechanical properties.

Keywords: Semi-crystalline and amorphous polymers, micro-mechanical and mechanical properties, temperature-humidity conditions

Chtěla bych poděkovat vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Lence Hýlové za odborné vedení a rady, díky nimž jsem tuto práci zkompletovala. Velký dík také patří mé mamince, která mě po celou dobu psaní podporovala.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

.....

Tato bakalářská práce byla financována z projektu IGA/FT/2019/002.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 CHARAKTERIZACE A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.1 PLASTY	13
1.2 ELASTOMERY	13
2 TERMOPLASTY – BLIŽŠÍ CHARAKTERIZACE	15
2.1 AMORFNÍ TERMOPLASTY	15
2.2 SEMI-KRYSTALICKÉ TERMOPLASTY	15
3 CHARAKTERIZACE VYBRANÝCH POLYMERŮ	16
3.1 POLYAMID 6 (PA6)	16
3.2 POLYAMID 66 (PA66)	16
3.3 POLYKARBONÁT (PC)	17
3.4 AKRYLO-NITRIL-BUTADIENSTYREN (ABS)	18
4 MIKROMECHANICKÉ VLASTNOSTI	20
4.1 INDENTAČNÍ TVRDOST	20
4.2 INDENTAČNÍ KRÍP	21
4.3 MODUL PRUŽNOSTI	22
4.4 ELASTICKÁ A PLASTICKÁ DEFORMAČNÍ PRÁCE	22
5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	24
5.1 TAHOVÉ VLASTNOSTI	24
5.1.1 Vzorce pro výpočty tahových vlastností	24
5.1.2 Vzorce pro výpočty pevnostních charakteristik	25
5.1.2.1 Mez pevnosti	25
5.1.2.2 Napětí na mezi kluzu	25
5.1.2.3 Napětí při přetržení	26
5.1.2.4 Modul pružnosti	26
5.1.3 Jednotlivé meze na tahové křivce	27
5.1.4 Zkušební vzorky	28
5.1.5 Průběh tahové zkoušky	28
5.2 VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST	29
5.2.1 Zkušební vzorky	30
5.2.2 Průběh zkoušky vrubové houževnatosti Charpyho kladivem	31
5.3 SHORE D	32
5.3.1 Popis zkušebního zařízení	32
5.3.2 Zkušební tělesa	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
6 CÍLE PRÁCE	35
7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	36
7.1 PŘEDÚPRAVA MATERIÁLŮ	36
7.2 POSTUP VSTŘIKOVÁNÍ	37
8 MIKRO-MECHANICKÉ VLASTNOSTI	40

8.1	VÝSLEDKY A SROVNÁNÍ	40
8.1.1	Indentační tvrdost H_{IT}	40
8.1.1.1	Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních polymerů	40
8.1.1.2	Indentační tvrdost H_{IT} vybraných semi-krystalických polymerů	41
8.1.1.3	Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních a semikrystalických polymerů	42
8.1.2	Indentační modul pružnosti E_{IT}	42
8.1.2.1	Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfních polymerů	42
8.1.2.2	Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných semi-krystalických polymerů	43
8.1.2.3	Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů	44
8.1.3	Indentační kríp C_{IT}	44
8.1.3.1	Indentační kríp C_{IT} vybraných amorfních polymerů	44
8.1.3.2	Indentační kríp C_{IT} vybraných semi-krystalických polymerů	45
8.1.3.3	Indentační kríp C_{IT} vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů	46
8.1.4	Plastická a elastická deformační práce	46
8.1.4.1	Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfních polymerů	46
8.1.4.2	Plastická a elastická deformační práce vybraných semi-krystalických polymerů	47
8.1.4.3	Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů	47
9	MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	49
9.1	VÝSLEDKY A SROVNÁNÍ	49
9.1.1	Youngův modul pružnosti	49
9.1.1.1	Youngův modul pružnosti vybraných amorfních polymerů	49
9.1.1.2	Youngův modul pružnosti vybraných semi-krystalických polymerů	49
9.1.1.3	Youngův modul pružnosti vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů	50
9.1.2	Vrubová houževnatost	51
9.1.2.1	Vrubová houževnatost vybraných amorfních polymerů	51
9.1.2.2	Vrubová houževnatost vybraných semi-krystalických polymerů	52
9.1.2.3	Vrubová houževnatost vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů	52
9.1.3	Shore D	53
9.1.3.1	Shore D vybraných amorfních polymerů	54
9.1.3.2	Shore D vybraných semi-krystalických polymerů	54
9.1.3.3	Shore D vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů	55
10	MIKRO-MECHANICKÉ VLASTNOSTI PO TEPLTNĚ – VLHKOSTNÍM ZATÍŽENÍ	56
10.1	VÝSLEDKY A SROVNÁNÍ	56
10.1.1	Indentační tvrdost H_{IT} po teplotně – vlhkostním zatížení	56
	Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	56
10.1.1.1	.....	56
	Indentační tvrdost H_{IT} vybraných semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	57

10.1.1.2	.....	57
	Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	58
10.1.1.3	.....	58
10.1.2	Indentační modul pružnosti E_{IT} po teplotně – vlhkostním zatížení	58
10.1.2.1	Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfních polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	58
	Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	59
10.1.2.2	.....	59
	Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	60
10.1.2.3	.....	60
10.1.3	Indentační kríp C_{IT} po teplotně – vlhkostním zatížení	60
	Indentační kríp C_{IT} vybraných amorfních polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	60
10.1.3.1	.....	60
	Indentační kríp C_{IT} vybraných semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	61
10.1.3.2	.....	61
10.1.3.3	Indentační kríp C_{IT} vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	61
10.1.4	Plastická a elastická deformační práce po teplotně – vlhkostním zatížení	62
	Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfních polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	62
10.1.4.1	.....	62
	Plastická a elastická deformační práce vybraných semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	63
10.1.4.2	.....	63
	Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení	64
10.1.4.3	.....	64
ZÁVĚR	.....	65
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	.....	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	.....	69
SEZNAM OBRÁZKŮ	.....	71
SEZNAM TABULEK	.....	74

ÚVOD

Polymerní materiály se těší své velké oblibě a obrovskému rozsahu využití ve všech možných odvětvích. Od lékařství, přes konzumní průmysl a balení potravin, až po konstrukční využití. Z tohoto důvodu je nezbytné znát vlastnosti těchto polymerů a způsoby jejich aplikace. Dále je nutné znát, jak tyto vlastnosti získat a vyhodnotit.

V mechanických vlastnostech, mimo jiné, se odráží tvrdost, pevnost a houževnatost polymerů a tím i schopnost materiálu snést určité zatížení, bez toho aniž by se výrazně zdeformoval, či porušil. Jedná se o nejdůležitější vlastnosti pro konstrukci a dimenzování výrobků z polymerních materiálů.

Co se týče mikro-mechanických vlastností, je zde primárně zkoumána tvrdost a odolnost povrchu materiálů. Je zde použito malých zatěžovacích sil a indentorů mikroskopických rozměrů, které jsou schopny měřit vlastnosti tenkých povrchových vrstev.

Jeden z dalších atributů měřený v rámci mikro-mechanických vlastností je indentační kríp, neboli tečení, který je popisován jako vzrůstající deformace pod konstantním zatížením a je tedy závislý na čase.

Znalost a schopnost získávání a vyhodnocování mechanických a mikro-mechanických vlastností je naprosto nezbytná pro navrhování a dimenzování výrobků z polymerních materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERIZACE A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ

Polymer je látka sestávající z molekul jednoho nebo více druhů atomů (atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, dusíku, chloru, křemíku) nebo skupin spojených navzájem ve velkém počtu. Z chemického hlediska jsou tyto látky organické. Jako základní prvek, obsahují uhlík a díky jeho schopnostem se vázat, mohou monomery vytvářet dlouhé řetězce. Tento proces se nazývá polymerace. [1] [3]

Polymerace je chemický proces, při kterém se většinou malá jednoduchá molekula, nazývaná monomer, řetězí sama se sebou v mnoha opakováních, až dojde ke vzniku obrovské molekuly, tzv. makromolekuly (z řeckého macros = veliký, dlouhý). Polymery nejsou jen syntetické, existuje mnoho polymerů přírodního původu, jako například škrob, celulóza aj. Velká řada proteinů získává svou funkci až při vytvoření oligomerní struktury. [2]

Polymery jsou rozděleny na dvě základní skupiny, a to na plasty a elastomery.

1.1 Plasty

Plasty jsou to látky za běžné teploty tuhé, většinou snadno tvarovatelné, obrábitelné, lehké a mají dobré izolační vlastnosti – mohou být izolanty tepelnými, zvukovými i elektrickými. Dále jsou plasty rozděleny na termoplasty a reaktoplasty, dle chování při vyšších teplotách. Skupina termoplastů je opakovatelně tavitelná a při jejich tavení a následném tuhnutí nedochází k žádné chemické reakci. Reaktoplasty při zahřívání zesílují chemickou reakcí nazývanou vytvrzování a nelze je znovu tavit, při dalším zahřívání materiál degraduje a rozkládá se. Takto vytvrzené materiály nelze znovu tavit, ani rozpouštět. [1] [2]

1.2 Elastomery

Elastomery jsou naopak oproti plastům za běžných podmínek relativně měkké a pružné materiály s nízkou tuhostí, vyznačující se svou odolností vůči deformacím trvalého charakteru. Elastomery jsou dále rozděleny na kaučuky a termoplastické elastomery. Vulkanizací, nejčastěji sírou, se z kaučuků vyrábí pryže. Tímto procesem se v materiálu vytvoří prostorové síť a vzniká nám polymer. Tato změna je nevratná a pryž není možné znovu roztavit a dále zpracovat. Termoplastické elastomery mají zesíťovanou strukturu. Zvyšováním teploty přechází na rozdíl od pryží do tekutého stavu a mohou se zpracovávat obdobně jako termoplasty. Hlavní rozdíl mezi TPE a pryžemi je dán rozdílem ve vlastnostech uzlů sítě, které jsou u pryží (po vulkanizaci kaučuku) chemické povahy, zatímco u TPE jsou povahy

fyzikální a vytváří je obvykle určité množství nemísitelných termoplastických segmentů rozptýlených ve spojitě elastomerní fázi. [4]

2 TERMOPLASTY – BLIŽŠÍ CHARAKTERIZACE

Jak již bylo zmíněno výše, termoplasty jsou opakovaně tavitelné. Jejich řetězec je tvořen dvěma druhy vazeb, primárními a sekundárními. Primární vazby vážou samotný řetězec silnými kovalentními vazbami, kdežto makromolekuly jsou spojeny vodíkovými můstky, či Van der Waalsovými silami. Díky tomuto jevu je možné oslabit tyto vazebné síly natolik, že polymer nakonec roztaje. Termoplasty můžeme podle nadmolekulární struktury dělit na amorfní a semi-krystalické. [1] [2]

2.1 Amorfní termoplasty

Amorfní polymery – uspořádání makromolekul v materiálu je zcela náhodné. Tyto materiály se vyznačují vysokou pevností, tvrdostí a křehkostí. Díky nízkému indexu lomu světla jsou transparentní (propustnost světla až 92%) a používají se do teploty skelného přechodu T_g . Při zahřívání prochází materiál třemi oblastmi. První fáze se nazývá sklovitá. Materiál je pevný a tvrdý, dokud nedosáhne teploty skelného přechodu. Po jejím překročení se materiál nachází v oblasti kaučukovitě. V této oblasti je materiál kožovitý a viskoelastický. Při dalším zahřívání materiál začíná téct. Teplota tečení je u amorfních polymerů smluvní hodnota. [1]

2.2 Semi-krystalické termoplasty

Semi-krystalické polymery – makromolekuly v těchto materiálech nesou určitý stupeň uspořádanosti. Tato uspořádanost je nazývána stupeň krystalinity (pohybuje se v rozmezí 30 až 90%) a jde o relativní podíl uspořádaných oblastí, které se nacházejí mezi oblastmi amorfními. Na pohled jsou materiály mléčně zakalené, neprůhledné. Zahříváný semi-krystalický polymer prochází dvěma fázemi. V první fázi je materiál tuhý, ale křehký. Při překročení teploty tání T_m , zanikají krystaly a geometrické uspořádání a materiál teče. [1]

Teploty předcházející každé oblasti jsou u různých polymerů odlišné. Vlivy na hodnoty těchto teplot mají boční substituenty, které způsobují větší hustotu materiálu. Dále jsou to mezimolekulární síly, například dipólové u PVC a nakonec nacházející se cyklické struktury v řetězci (benzenová jádra). [2]

3 CHARAKTERIZACE VYBRANÝCH POLYMERŮ

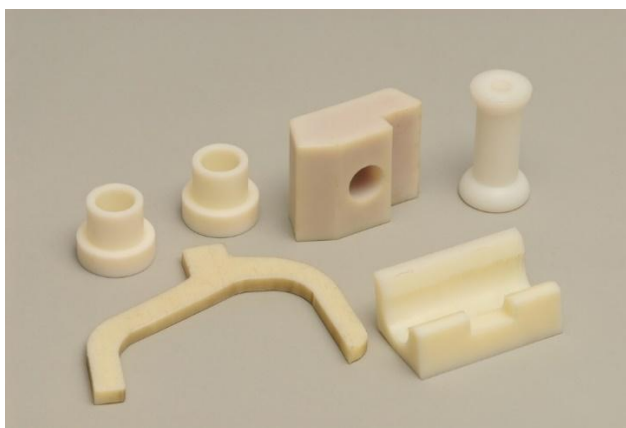
3.1 Polyamid 6 (PA6)

Polyamid 6 je velmi tvrdý neprůhledný polymer připomínající rohovinu, je velmi dobře obrobitelný. Taje při 215 až 220°C. Tento materiál se vyznačuje svou odolností proti otěru a oděru, má nízký koeficient tření a má obecně velmi výhodné mechanické vlastnosti. [7]

Díky jeho vlastnostem se využívá na výrobu vláken, ale také jako konstrukční materiál pro výrobu ozubených kol, vaček, řemenic a jiných namáhaných prvků. Je velmi navlhavý, ale zároveň se jedná o dielektrikum s velmi dobrými izolačními vlastnostmi. [6][7]

PA6 je velmi odolný proti zásadám, rozpouštědlům, solím, tukům a olejům, ropným produktům, chlorovaným uhlovodíkům i za zvýšených teplot. Rozpouští se v kyselině chlorovodíkové, sírové, dusičné, mravenčí, mléčné a šťavelové, ve fenolech a suchém i vlhkém oxidu siřičitém. [5]

Vlákna vyráběná z tohoto materiálu je nutné dloužit a opíráním zbavit monomeru. Tato vlákna mají vysokou pevnost v tahu, jsou velmi odolná proti oděru a otěru, potu, avšak ne příliš dobře odolávají přírodním vlivům a vyšším teplotám. Z vláken PA6 se vyrábějí kordy do pneumatik, vlasce, oplety sít, vlákna do kobereců, příze na punčochy, lana, padáky a různé jiné tkaniny. [7]



Obr. 1 Výrobek z PA6 [25]

3.2 Polyamid 66 (PA66)

PA66 má oproti PA6 nižší navlhavost, vyšší tuhost a je více tepelně odolný. Materiál je dlouhodobě funkční i za vysokých teplot, má vyšší teplotu tání než PA66 a je houževnatý i za nižších teplot. Je více odolný proti otěru a oděru a je rozměrově stálý. [6]

Využívá se jako konstrukční materiál nejen v automobilovém průmyslu pro často používané a namáhané interiérové prvky, ale také pro výrobu ložisek, komponentů do elektrického nářadí, hraček, či kuchyňských robotů v podobě ozubených kol, vaček apod. [9]

PA 66 se chová jako dielektrikum a má velmi dobré elektroizolační vlastnosti s možností samozhášivosti, proto se také, s přidanými samozhášecími přísadami, velmi často používá jako izolační materiál v elektronickém průmyslu. [9]

Materiál velmi dobře odolává různým rozpouštědlům, tukům, olejům a zásadám, ale ne oxidačním činidlům a silným kyselinám. [10]

Tento polymer není nutno opírat, jelikož neobsahuje volný monomer a díky této vlastnosti jej lze použít i v potravinářství. [7]



Obr. 2 Výrobek z PA66 [27]

3.3 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát má výborné mechanické a dielektrické vlastnosti, které se nemění ani v širokém intervalu teplot (-70 až 140 °C). Dá se také velmi dobře třískově obrábět, lepit, či svařovat. Materiál je používán zvláště pro svou transparentnost a nízký index lomu. Je schopen propouštět až 85% světla. Materiál má velmi dobrou rázovou houževnatost, vysokou mechanickou pevnost a rozměrovou stabilitu, odolnost proti slunečnímu záření a chemickou odolnost. [7] [8]

Materiál je nejčastěji zpracováván technologií vstřikování a vytlačováním a využívá se velmi všestranně, na výrobu fólií, desek, CD nosičů, trubek, tyčí a profilů nejen pro různé typy osvětlení. Často se z materiálu vyrábějí dílce, které následně podléhají vyššímu tepelnému a mechanickému namáhání. [7]

Je také dobrým dielektrikem a díky této vlastnosti je využíván v průmyslu, zabývající se elektronikou. [7]

Materiál špatně odolává aminům, amoniaku i vroucí vodě. Degradace může být způsobena i delším kontaktem materiálu s metanolem. Odolává však ostatním alkoholům, uhličitanu sodnému a mýdlům, či roztokům zředěných kyselin. Nepodléhá působení přírodních vlivů a slunečnímu záření a je fyziologicky nezávadný a bez zápachu. [7] [8]



Obr. 3 Výrobky z polykarbonátu [28]

3.4 Akrylo-nitril-butadienstyren (ABS)

Jedná se o kopolymer a vzniká kombinací různých monomerů a to: butadienu, akrylonitrilu a styrenu. V podstatě jde o kopolymer SAN, který je modifikovaný kaučukem. Elastomerní podíl butadienu (13 ž 50 %) se připravuje odděleně a následně se disperguje do směsi akrylonitrilu (10 až 30 %) se styrenem (45 až 70 %). Rozlišují se dva základní postupy pro dispergaci: mísení a roubování. Roubované polymery ABS mají lepší reologické vlastnosti a vzhled. [7]

Materiál se velmi dobře zpracovává, nejčastěji technologií vstřikování, vyfukováním, válcováním, lisováním, tvarováním za tepla. Je možné použít i nadouvadla. Poté je výrobek uvnitř napěněn a díky uniku plynu z povrchu výrobku je získána tvrdá povrchová vrstva. Lze jej svařovat i lepit. [7]

Tento polymer je nejčastěji používán při náročných technických aplikacích, jako jsou vysoké požadavky na houževnatost a chemickou odolnost materiálu. Nejčastěji na interiérové a exteriérové díly motorových vozidel (přístrojové a palubní desky, mřížky nárazníků).

Také díky možnosti galvanického pokovování součástí z daného materiálu jej využíváme na výrobu předních masek a různých ozdobných mřížek automobilů. Materiál se využívá při výrobě domácích elektrických spotřebičů, jako jsou konvice, sušičky, mixéry, ale také v nábytkářství, či výrobě sportovních potřeb.

Kvůli své heterogenosti se jedná vždy o neprůhledný materiál, je houževnatý a má obecně dobré mechanické vlastnosti. Přidáním 20 až 40 % skelné výztuže lze dosáhnout zvýšení mechanické pevnosti. Povrch materiálu je lesklý a tvrdý, tudíž nevyžaduje žádné další úpravy. [7]

Materiál je odolný vůči různým chemickým rozpouštědlům a chemikáliím, avšak špatně odolává povětrnostním podmínkám a světlu. Doporučují se příměsi černého pigmentu, či světelných stabilizátorů. Pokud je vystaven výše zmíněným vlivům, dochází ke zhoršení vlastností a stárnutí. [7]



Obr. 4 Výrobek z ABS [29]

4 MIKROMECHANICKÉ VLASTNOSTI

4.1 Indentační tvrdost

Tvrdost je obecně definována jako odolnost, kterou klade materiál, proti vniku jiného tělesa, čili schopnost vzdorovat trvalé plastické deformaci. Je jednou ze základních charakteristik polymerů, jenže oproti kovům jsou polymery někdy velmi pružné a houževnaté. Kvůli těmto vlastnostem polymerů nelze přesně určit jednotnou metodu měření, pro všechny materiály. [12]

Indentační tvrdost, která se značí H_{IT} , je tedy odpor materiálu, vůči vytvoření vtisku indentorem. Jakmile je v testovaném tělese vytvořen vtisk, je dále zkoumán jeho rozměr a hloubka. Jednotlivé vtisky jsou posuzovány pomocí kvalitní optiky, jelikož dosahují velmi malých rozměrů. Z tohoto důvodu nelze pro měření mikrotvrdosti použít obvyklé tvrdoměry, jelikož je potřeba mnohem větší přesnost při zatěžování indentoru a proměřování jeho vtisku. [14]

Indentor musí plastické deformace podléhat minimálně, aby nezkrasoval výsledky. Proto se volí velmi tvrdé materiály, nejčastěji diamant. [12]

Indentorových geometrií existuje široký výběr, například kulové, či pyramidové. K měření jsou nejčastěji používány pyramidové (čtyřboké jehlany), jelikož ostré hrany zajišťují snazší vnik do materiálu i při nižším zatížení a tak také umožňují posoudit vlastnosti velmi tenkých vrstev. [11]

Měření indentační tvrdosti funguje na stejném principu jako určování makrotvrdosti, avšak s tím rozdílem, že se používá menších zatížení, při vtiskování indentoru do zkušebního tělesa. Hraniční hodnota zatížení, mezi makrotvrdostí a mikrotvrdostí je 19,8N. [14]

Zkouška indentační tvrdosti je vhodná pro následující situace:

- Velmi malé, či tenké součásti
- Křehké materiály
- Rozdíly tvrdosti vnitřku, či mezi hranicemi zrn materiálu
- Rozdíly tvrdosti jednotlivých složek a fází
- Posouzení svarů
- Vlastnosti tenkých nátěrů, či povlaků

- Vlastnosti vrstvy pokovování, či jiného chemicko-tepelného zpracování [13]

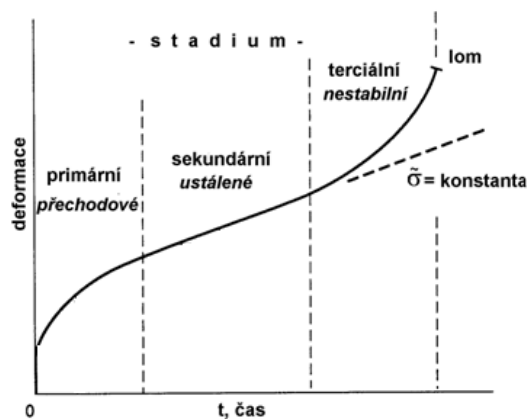
4.2 Indentační kríp

Indentační kríp, který je označován jako C_{IT} , je velmi důležitou vlastností z vědeckého i technického hlediska. Prakticky se jedná o vlastnost tečení, jako časově závislé plastické deformace. Aplikován je především do problematiky zatěžování konstrukčních polymerů za vysokých teplot, jelikož tečení je tepelně aktivovaný proces a hraje velkou roli při změně vlastností materiálu při vyšší teplotě a jeho atomové nestabilitě. [15]

Ačkoliv se u materiálů, jako je sklo a polymery užívá stejné terminologie pro popis časově závislé elastické (viskoelastické) deformace, z hlediska kríповého chování polymerních materiálů bude hovořeno o časově závislé plastické (viskoplastické) deformaci. [15]

Křivku kríповého chování (závislost napětí na čase a teplotě) při konstantním jednoosém namáhání a zahřívání lze jasně rozdělit do tří oblastí:

- Primární (nebo přechodná oblast), při které se vzorek deformuje zpočátku rychle a po chvíli rychlost začne klesat
- Sekundární (nebo ustálená oblast), kdy rychlost deformace při tečení dosahuje minimální hodnoty a zůstává téměř konstantní
- Terciální oblast, ve které se rychlost deformace zvyšuje, objevují se lokální deformace, dokud nedojde k takovému zmenšení průřezu až do přetržení vzorku [15]



Obr. 5 Křivka kríповého chování [17]

4.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti, který se značí E_{IT} , je zjišťován ze směrnice tečny křivky, která charakterizuje indentační tvrdost. Ideálně naměřený modul pružnosti je stejného významu jako Youngův modul pružnosti.

Indentační modul pružnosti je vyjádřen rovnicí:

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (1)$$

,kde:

ν je Poissonovo číslo materiálu zkoušeného materiálu

E^* je komplexní modul

[24]

4.4 Elastická a plastická deformační práce

Elastickou a deformační práci je možné graficky vyjádřit jako plochu pod zatěžovací křivkou a dohromady jsou nazývány jako celková spotřebovaná deformační práce W_{total} a je možné ji jednoduše vyjádřit takto:

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (2)$$

,kde:

W_{plast} je plastická deformační práce [J]

W_{elast} je elastická deformační práce [J]

Plastickou deformační práci W_{plast} je možné vyjádřit jako plochu, která se nachází mezi odlehčovací a zatěžovací křivkou. Tato práce je nevratná a deformace tělesa po konci dalšího zatěžování zůstává.

Elastická deformační práce W_{elast} je vyjádřena plochou pod odlehčovací křivkou. Je vratná a tudíž i deformace, způsobená zatěžováním po odlehčení, zmizí.

Obecně jde o práci, která se spotřebuje při jednom indentačním cyklu.

Další důležitou veličinou, kterou je třeba zmínit, je koeficient zpětné relaxace, který je vyjádřen jako:

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (3)$$

,kde:

W_{elast} je elastická deformační práce [J]

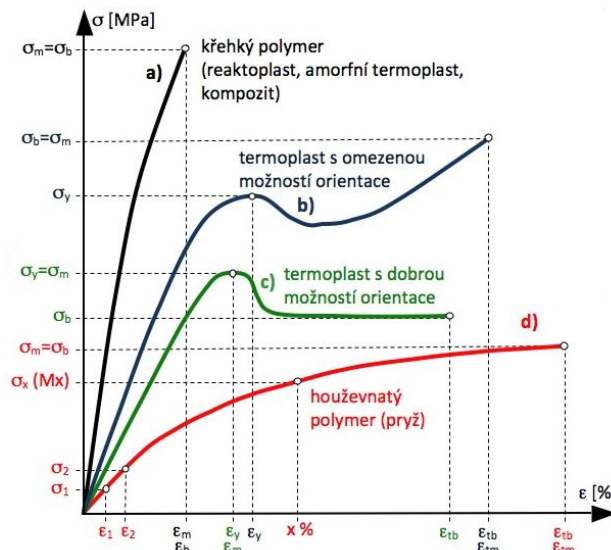
W_{total} je celková spotřebovaná deformační práce [J]

[24]

5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

5.1 Tahové vlastnosti

Tahové vlastnosti polymerních materiálů jsou jedny z nejzákladnějších charakteristik. Právě díky jejich dlouhým řetězcům se velice liší od kovových materiálů menší tuhostí, mnohem větší elasticitou a vratnou deformací. Zkušební těleso je vystaveno namáhání v jedné ose a sledujeme průběh jeho deformace až do přetržení vzorku. Nejvíce směrodatná je v tomto případě deformační křivka (závislost poměrného prodloužení na normálovém napětí), která se určuje zkouškou tahem. Tato závislost je nelineární. Z průběhu této křivky je možno vyčíst charakteristické vlastnosti zkoušených materiálů. [18] [19]



Obr. 6 Tahová křivka pro různé druhy polymerů [18]

5.1.1 Vzorce pro výpočty tahových vlastností

- Smluvní napětí:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

,kde:

- F je velikost působící síly [N]
- S_0 obsah původního průřezu zkušební tělesa [mm²]

- Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

,kde:

L_0 je původní naměřená délka zkušební tělesa [mm]

ΔL_0 je rozměr, o který se zkušební těleso prodloužilo [mm]

- Jmenovité poměrné prodloužení:

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

,kde:

L je vzdálenost mezi upínacími čelistmi [mm]

L_t je rozměr, o který se vzdálenost mezi upínacími čelistmi prodloužila [mm]
[22]

5.1.2 Vzorce pro výpočty pevnostních charakteristik

5.1.2.1 Mez pevnosti

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_0} [\text{MPa}] \quad (7)$$

,kde:

F_p je maximální síla naměřená v průběhu tahové zkoušky [N]

S_0 obsah původního průřezu zkušební tělesa [mm²]

Je to maximum naměřeného napětí při tahové zkoušce. Není pravidlem, že by mez pevnosti vždy souhlasila s napětím, které je naměřeno při přetržení tělesa. Shodné napětí meze kluzu a pevnosti se může vyskytovat nejčastěji u semi-krytalických polymerů.

5.1.2.2 Napětí na mezi kluzu

Horní mez kluzu:

$$\sigma_{kH} = \frac{F_{kH}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (8)$$

,kde:

F_{kH} je největší síla naměřená v oblasti meze kluzu [N]

S_0 obsah původního průřezu zkušební tělesa [mm²]

Dolní mez kluzu:

$$\sigma_{kH} = \frac{F_{kL}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

,kde:

F_{kL} je nejmenší síla naměřená v oblasti meze kluzu [N]

S_0 obsah původního průřezu zkušební tělesa [mm²]

Je to napětí, při kterém se začne tvořit krček a deformace zkušební tělesa je již trvalá, proto se hodnota tohoto napětí uvádí jako kritická hodnota při provozu polymerních součástí a dílů.

5.1.2.3 Napětí při přetržení

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

,kde

F_s je největší síla naměřená v průběhu tahové zkoušky [N]

S_0 obsah původního průřezu zkušební tělesa [mm²]

Je to napětí, při kterém se zkušební těleso poruší, či úplně přetrhne.

5.1.2.4 Modul pružnosti

Modul pružnosti je veličina vyjadřující tuhost materiálu. Větší modul pružnosti znamená větší tuhost materiálu. Hodnota této veličiny je stanovena z deformační křivky v místě, kde je závislost napětí na poměrném prodloužení lineární. V této oblasti platí Hookeův (viz rovnice č. 11). Z Hookeova zákona je patrné, že deformace je přímo úměrná napětí ve zkoušeném materiálu. Modul pružnosti popisuje vratnou deformaci při působení malých sil. Při přerušení působení těchto sil se těleso vrátí do původního stavu.

Modul pružnosti lze jednoduše vyjádřit z Hookova zákona takto:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (11)$$

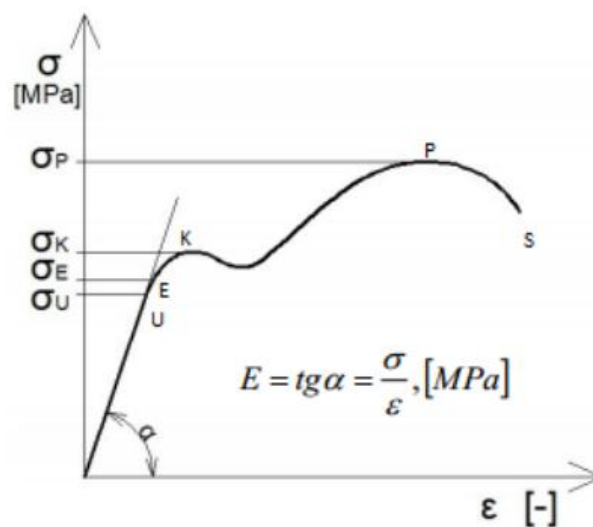
,kde

σ je největší napětí na mezi úměrnosti

ε poměrné prodloužení (viz rovnice č. 19)

[17][21]

5.1.3 Jednotlivé meze na tahové křivce



Obr. 7 Tahová křivka a jednotlivé meze [17]

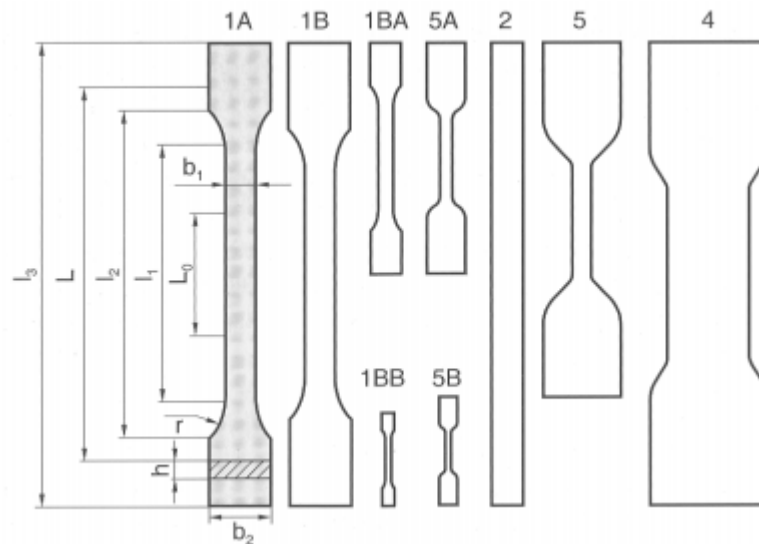
- **Mez úměrnosti (U)** – do tohoto bodu platí Hookeův zákon a v této oblasti je závislost napětí na poměrném prodloužení lineární
- **Mez pružnosti (E)** – v tomto bodě se dosahuje největší napětí, aniž by došlo k deformaci vzorku. Po překročení tohoto bodu vzniknou trvalé a nevratné deformace.
- **Mez kluzu (K)** – v tomto bodě začíná plastický tok v materiálu a deformace je trvalá
- **Mez pevnosti (P)** – v tomto bodě je dosaženo maximální zatěžovací síly a maximálního napětí ve zkoušeném materiálu
- **Mez přetržení (S)** – v tomto bodě se zkušební těleso přetrhne

5.1.4 Zkušební vzorky

Zkouška tahem se zpravidla neprovádí přímo na výrobcích, ale je zapotřebí normalizovaného zkušební vzorku s přesnými rozměry. Zkušební vzorek je připravován technologií vstřikování. Vzorek musí být vstříknut vysokým vstřikovacím tlakem, aby bylo zabráněno tvorbě bublin a jiných nedokonalostí a také aby byla pevnost v tahu co největší. Tok taveniny ve formě musí být orientován jedním směrem. Je také nežádoucí, aby se uprostřed vzorku potkaly dvě čela taveniny. Tato chyba mohla zkreslit výsledky tahové zkoušky. [19]

Rozměry zkušebních těles jsou definovány normou pro každý materiál. Nejčastěji se používají vzorky ve tvaru lopatek s rozšířením na obou koncích vzorku, které umožňují dostatečně pevné uchycení vzorku do čelistí. Napětí se pak koncentruje do zúžení ve střední části vzorku. [18]

Jelikož mechanické vlastnosti mohou být zkreslovány kolísající teplotou, či jejími extrémami a také vlhkostí okolí, doporučuje se testování vzorků tahem při stabilních laboratorních podmínkách [19]

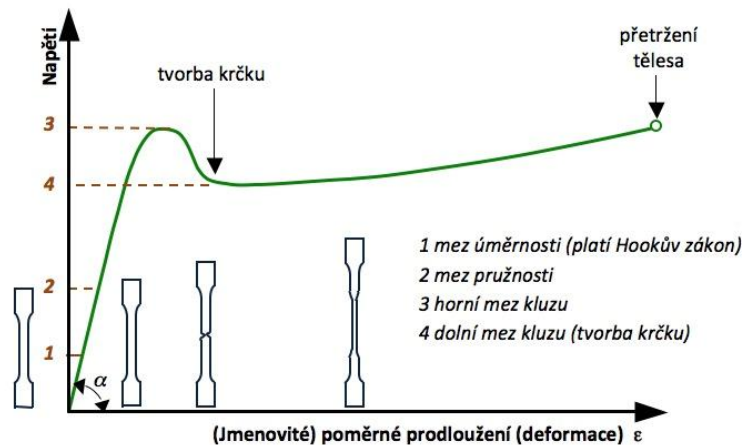


Obr. 8 Tvary zkušebních těles [18]

5.1.5 Průběh tahové zkoušky

Zkušební těleso je upnuto do čelistí trhacího stroje. Jakmile se spustí elektromotor, čelisti se od sebe začnou oddalovat. Síla působící na těleso je průběžně snímána tenzometrickou hlavou, která se nachází v horním příčniku. Nasnímaná data se dále přenáší do systému,

který je začíná vyhodnocovat v závislosti na prodloužení a zapisuje je do tahové křivky. Prodloužení je snímáno rameny extenzometru, které jsou přiloženy po stranách zkušební tělesa ve středu nejužšího místa. Toto zařízení se používá pro přesnější snímání prodloužení a přesnější výsledky. Po nasnímání potřebných dat se ramena oddálí, aby se nepoškodila rázem při přetržení, a trhací stroj pokračuje v pohybu. [21]



Obr. 9 Tahová křivka s tělesem [21]

5.2 Vrubová houževnatost

Vrubová houževnatost je obecně kinetická energie, která je použita k přeražení zkušební tělesa vztahovaná na plochu průřezu v místě porušení (lomu). Jedná se o vlastnost materiálu zabraňovat vzniku trhlin při namáhání a jejich následnému šíření v materiálech, či jeho schopnost absorpce energie a deformace určitou rychlostí. Právě s rostoucí rychlostí deformace se materiály stávají křehčími a k jejich porušení je zapotřebí menších sil, než u namáhání rostoucí zatěžující silou. Ve větších rychlostech deformace dochází už při velmi malém průhybu zkušební tělesa k porušení a vzniku trhlin. Proto opakem houževnatosti bývá uváděna právě křehkost. [23] [24]

$$a = \frac{E_c}{h \cdot b} \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (13)$$

,kde:

E_c je energie při přeražení [J]

h tloušťka zkušební tělesa [mm]

b šířka zkušební tělesa [mm]

Nejvyšší vrubovou houževnatostí se vykazují elastomery, které jsou schopny absorbovat velké množství energie v krátkém čase a díky svým elastickým vlastnostem utlumit rázy. [22]

Při rázovém namáhání reaktoplastů a termoplastů dochází k porušení tělesa různými způsoby lomu. Lomy mohou být buď křehké, tvárné, či houževnaté. Druh lomu se hodnotí pohledem.

Pokud se druh zkoušeného materiálu nachází nad teplotou skelného přechodu, bývají jeho lomy křehké. Pokud se naopak materiál nachází pod touto teplotou, jsou lomy tvárné, či houževnaté.

Zkušební tělesa z polymerních materiálů se opatřují vrubem situovaným ve středu vzorku. Díky tomu se nejvíce napětí koncentruje přímo v jeho okolí a nedochází tak k rozkladu síly po celé délce tělesa a tím dochází i ke snadnějšímu přeražení tělesa.

Parametry ovlivňující vrubovou houževnatost:

- Složení, či případná plniva obsažená v materiálu
- Druh materiálu
- Teplota materiálu při zkoušce
- Doba stáří materiálu
- Obsažená vlhkost
- Rázová síla použitá k přeražení tělesa
- Podmínky zkoušky
- Rozměry zkušebního tělesa

5.2.1 Zkušební vzorky

Je zapotřebí normalizovaného zkušební vzorku s přesnými rozměry. Zkušební vzorek je připravován technologií vstřikování. Vzorek musí být vstříknut vysokým vstřikovacím tlakem, abychom zabránili tvorbě bublin a jiných nedokonalostí. Tok taveniny ve formě musí být orientován jedním směrem. Je také nežádoucí, aby se uprostřed vzorku potkala dvě čela taveniny. Tato chyba by mohla zkreslit výsledky zkoušky vrubové houževnatosti. (viz kapitola 5.1.4)

Pro každý materiál jsou rozměry zkušebních těles definovány normou. V případě zkoušení vrubové houževnatosti jsou zkušební tělesa ve tvaru trámečků, či malých kvádrů. Uprostřed je vytvořen vrub, který může být ve tvaru „v“ či „u“ [22] [23]

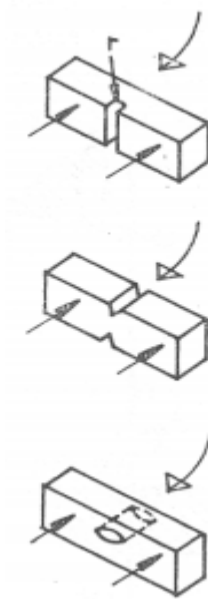
Účelem toho vrubu je, aby lom proběhl kolmo na osu zkušebního tělesa a aby došlo k jeho snadnějšímu porušení. V těsné blízkosti vrubu v materiálu pak dochází k tahovému namáhání a na protější straně, blíže kladivu potom dochází k namáhání tlakovému. Hloubka vrubu větší než 20% tloušťky zkušebního tělesa už má na houževnatost zanedbatelný vliv. K dalšímu rozšíření informací o lomovém chování polymerních materiálů patří umístění vrubu na obě strany zkušebního tělesa, či otvorem. Vruby se vytváří na speciálním nástroji zvaném „vrubovačka“, či se do zkušebního tělesa vypilují, nebo vyfrézují. Nejčastěji se používají vruby hloubce 2 mm. [23]



Obr. 10 Zařízení na tvorbu vrubů („vrubovačka“)

5.2.2 Průběh zkoušky vrubové houževnatosti Charpyho kladivem

Průběh této zkoušky spočívá v namáhání tělesa silou, která je koncentrována do velmi krátké doby. Zkušební těleso je umístěno vodorovně na dvou podporách, vrubem umístěným dále od čela kladiva. Následně je přeraženo úderem rázového kladiva, které směřuje přímo do středu proti vrubu. Kladivo se pohybuje rychlostí 1-10 m/s. Během deformace tělesa je průběžně zaznamenávána energie tělesem spotřebovaná. [22] [23]



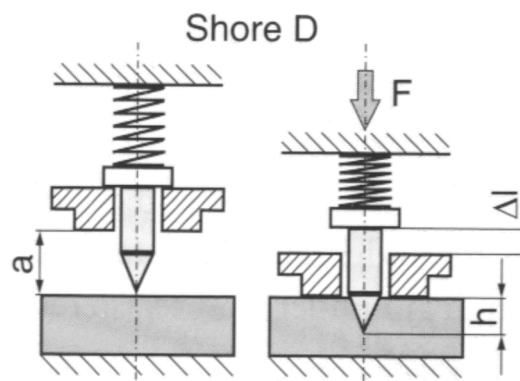
Obr. 11 Různé tvary zkušebních těles [23]

5.3 Shore D

Metoda Shore D se používá pro tvrdší polymerní materiály. Jedná se o metodu, která umožňuje měřit tvrdost pomocí hrotu vlačovaného do zkušebního tělesa. Měří se hloubka vpichu.

5.3.1 Popis zkušebního zařízení

Tvrdoměr je složen z opěrné patky, zkušebního hrotu, ukazatele délky, či digitálního zobrazovacího zařízení a kalibrované tlačné pružiny.



Obr. 12 Zkušební hrot pro metodu Shore D [30]

Kalibrovaná pružina působí na těleso silou vyjádřenou rovnicí:

$$F_{kp} = 455H_D \quad (14)$$

,kde:

F_{kp} je síla vtlačování hrotu do zkušební tělesa [mN]

H_D je hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem [31]

5.3.2 Zkušební tělesa

Minimální tloušťka zkušební tělesa je 4 mm. Pokud zkušební těleso nemá požadovanou tloušťku je povoleno položit více vrstev materiálu na sebe a tím této tloušťky dosáhnout. Výsledky ze vzorků, které jsou složeny z více vrstev položených na sobě, se velmi často liší od výsledků měření, které je prováděno na vzorcích z jednoho kusu materiálu a to z toho důvodu, že nelze dosáhnout dokonalého kontaktu mezi vrstvami.

Vzorky musí mít rovný povrch s dostatečně velkou plochou a to o ploše nejméně 6 mm od špičky zkušební hrotu. [30]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

- Výroba zkušebních těles
- Měření mikro-mechanických vlastností před a po teplotně-vlhkostním zatížení
- Měření mechanických vlastností
- Porovnávání mikro-mechanických vlastností před a po teplotně-vlhkostním zatížení
- Celkové porovnání mikro-mechanických a mechanických vlastností amorfních (PC, ABS) a semi-krystalických polymerů (PA6, PA66) mezi sebou

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Výroba všech zkušebních těles byla provedena technologií vstřikování na vstřikovacím stroji. Byly použity čtyři druhy materiálů: PA6 (Frianyl B63 VO GV 30), PA66 (Frianyl A 63 VO GV 30), PC (Makrolon), ABS (Umastir ABS). Tvarem zkušebního tělesa byla zvolena oboustranná lopatka dle normy: ČSN EN ISO 527-1 a trámeček dle normy: ČSN EN ISO 179-1 Tvar tělesa jako oboustranné lopatky byl použit při zkoušce tahem a okraj lopatky ke zkoušce tvrdosti Shore D. Při zkoušce mikro-mechanických vlastností a vrubové houževnatosti na Charpyho kladivu bylo užito vzorků ve tvaru trámečků.

7.1 Předúprava materiálů

Jelikož jsou materiály PA6 a PA66 navlhavé, je nutno je před samotným zpracováním vysušit v sušárně.

Materiál PA6 byl sušen při teplotě 75 °C po dobu 14-ti hodin a materiál PA66 při teplotě 85 °C po dobu 16-ti hodin. Materiál byl vložen do násypky vždy bezprostředně po vysušení, aby nedošlo k dalšímu nežádoucímu navlhnutí materiálu. Další navlhnutí materiálu by znemožnilo snadnou výrobu a způsobilo by vznik vad výrobku. Vzhledem k povaze využití našich konkrétních výrobků, jakožto zkušebních těles, je nutné se těmito vadám vyvarovat.

Materiál PC byl sušen při teplotě 100°C a ABS při teplotě 80°C po dobu 4 hodin, aby se minimalizovala vlhkost granulátu.

Vysušené materiály byly vloženy do násypky vstřikovacího stroje DEMAG ERGOtech 50-200 system, v němž byla uložena forma na normalizované zkušební vzorky. Všechny materiály byly zpracovávány v téže formě a vstřikovacím stroji.

Tab. 1 Parametry vstřikovacího stroje [31]

Základní parametry stroje	Jedn.	Rozměr/velikost
Uzavírací síla	t	50
Zdvih pohyblivé desky	mm	400
Průchod mezi sloupy	mm	355 x 355
Vnější rozměr upínacích desek	mm	530 x 540
Parametry vstřikovací jednotky		
Průměr šneku	mm	25
Teoretický vstřik. objem	cm ³	61
Gramáž vstřiku	g	54
Vstřikovací tlak	bar	2752
Ostatní data		
Rozměry stroje (D × Š × V)	m	3,70 x 1,40 x 2,00
Celková hmotnost stroje	kg	3300



Obr. 13 Vstřikovací stroj DEMAG ERGOtech 50-200 system

7.2 Postup vstřikování

Pro všechny zpracovávané materiály byl zvolen stejný postup. Ihned po spuštění stroje byly nastaveny teploty v segmentech plastikační jednotky a teplota chlazení formy. Po ustálení teplot na jejich požadované výšce byl připravený materiál aplikován do násypky plastikační jednotky. Pro minimalizaci nežádoucích zbytků jiných materiálů po předchozím vstřikování je nutné materiál nabrat šnekem a protlačit jej přes trysku. Tento postup je nutné opakovat vícekrát, dokud není z trysky vytlačována tavenina čistého materiálu určeného ke zpracování.

Jednotlivé teploty segmentů plastikační jednotky a chlazení formy byly nastaveny podle materiálových listů jednotlivých materiálů. Tyto hodnoty jsou pouze orientační, je třeba technologický postup ještě upravit při samotném vstřikování.

Na vstřikovacím stroji byl zvolen poloautomatický režim a byl vystříknut první vzorek. Ihned po vyhození z formy byl výrobek zkontrolován, zda-li není jeho tvar nijak zdeformovaný, nebo jestli se dále nedeformuje. V opačném případě by to znamenalo, že je teplota chlazení příliš vysoká, nebo je doba chlazení příliš krátká.

Dále je pohledem zkontrolováno, jestli se na vzorku v oblasti dělicí roviny nenacházejí přetoky. Pokud ano, znamená to, že je zvolen příliš vysoký vstřikovací tlak, nebo dotlak. Pokud je dotlak a vstřikovací tlak příliš nízký, mohou se ve výrobku nacházet bublinky a vzduchové kapsy. Při extrémně nízkém vstřikovacím tlaku mohou vzniknout dokonce i nedotoky (tavenina nezplní celý prostor formy). Těmto vadám je potřeba se vyhnout, jelikož by zkreslily výsledky pevnostních měření a tyto výsledky by nebyly vypovídající.

Dále byla kvalita výrobků zkontrolována po vizuální stránce, zda-li nejsou spálené, či není-li povrch výrobků hrubý, nebo se loupe povrch. Při nalezení těchto vad je třeba dále upravovat parametry vstřikování, dokud se nepodaří vyrobit odpovídající kvalitu výrobků pro další testování.

Po ukončení procesu hledání požadovaných vstřikovacích parametrů pro výrobky je na stroji zahájen plně automatický režim. Je třeba dát prvních deset výrobků stranou, dokud se proces výroby neustálí a nestabilizuje.

Výrobky byly ochlazeny při laboratorní teplotě, byly jim odštípnuty studené vtoky a rame-na, na kterých výrobek držel. Dále byly vzorky uloženy do popsáných uzavíratelných sáčků pro pozdější testování.

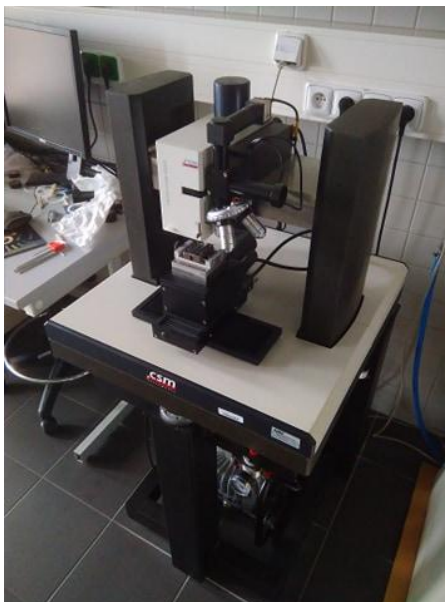


Obr. 14 Zpracování vzorků

Po samotném vstřikování je nutno vstřikovací trysku stroje vyčistit aspoň 100 g polypropylenem. Polypropylen stačí nasypat do násypky vstřikovací jednotky a opakovaně nabírat a protlačovat přes trysku, dokud nebude všechn spotřebován a nebude možné vidět průtok čistého polypropylenem. Touto akcí je zabráněno zanesení, či ucpání trysky a tím i jejímu znehodnocení.

8 MIKRO-MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mikro-mechanické vlastnosti byly měřeny na Micro combi testeru od firmy CSM Instruments na Fakultě technologické. Při měření byl použit Vickersův indentor ve tvaru čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136° .



Obr. 15 Micro combi tester

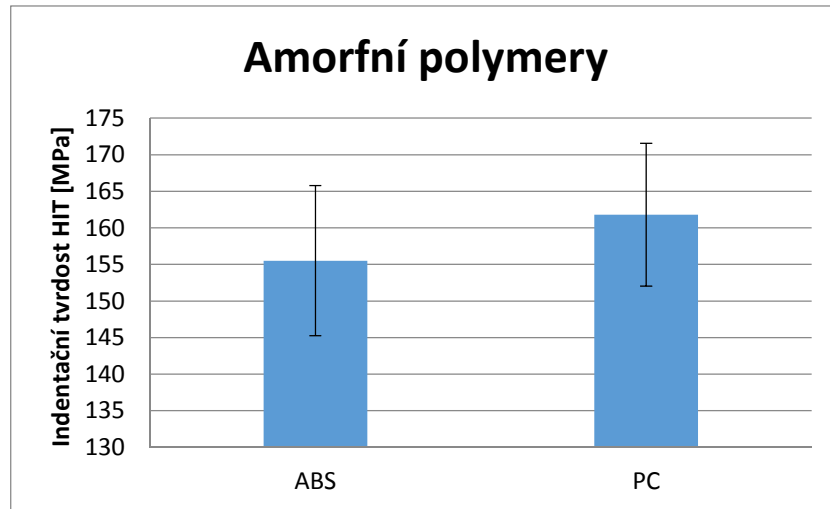
Bylo použito tři vzorků ve tvaru trámečku. Na každém ze vzorků bylo provedeno deset vpichů při zatížení 1 N, rychlosti zatěžování 2 N/min a prodlevou 90-ti sekund.

8.1 Výsledky a srovnání

8.1.1 Indentační tvrdost H_{IT}

8.1.1.1 Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních polymerů

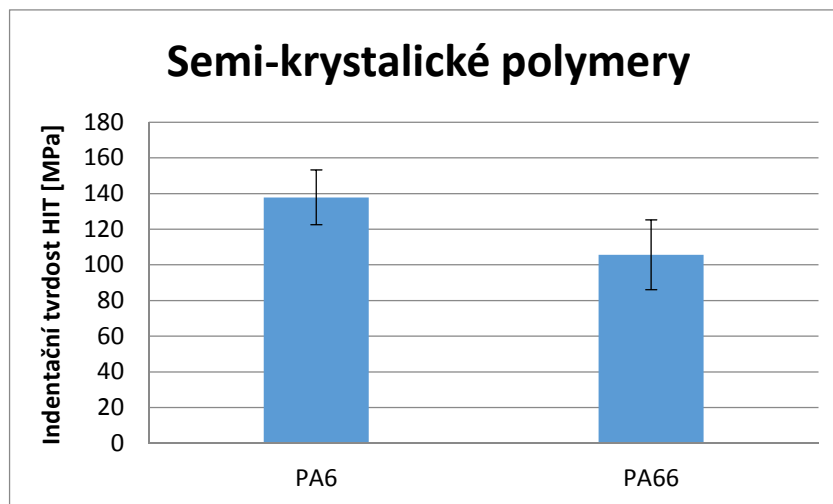
Při měření indentační tvrdosti amorfních polymerů ABS a PC se hodnota tvrdosti materiálu pohybovala v řádech stovek MPa. U ABS byla naměřena hodnota indentační tvrdosti $(155,50 \pm 10,26)$ MPa a u PC $(161,80 \pm 9,76)$ MPa.



Obr. 16 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfní polymery

8.1.1.2 Indentační tvrdost H_{IT} vybraných semi-krytalických polymerů

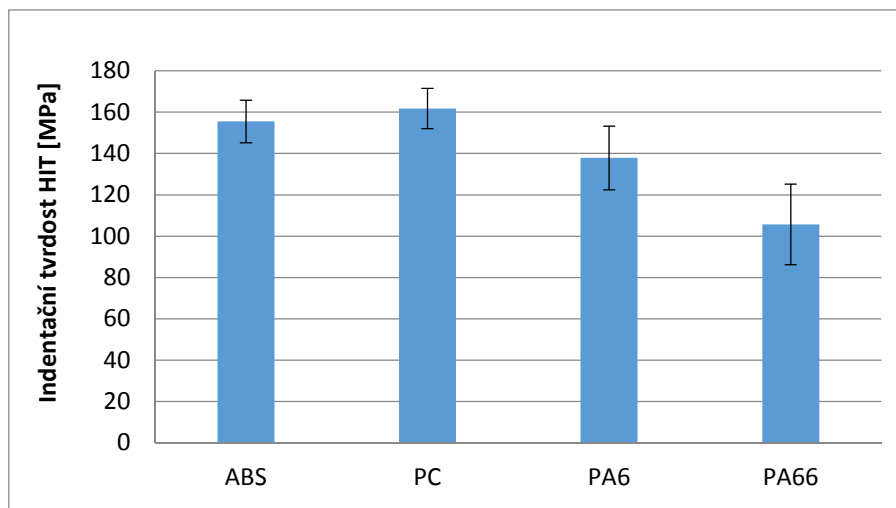
Při měření indentační tvrdosti semi-krytalických polymerů PA6 a PA66 se hodnota tvrdosti materiálu také pohybovala v řádech stovek MPa, ale byla mírně nižší. U PA6 byla naměřena hodnota indentační tvrdosti ($137,84 \pm 15,39$) MPa a u PA66 ($105,62 \pm 19,52$) MPa.



Obr. 17 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro semi-krytalické polymery

8.1.1.3 Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních a semikrystalických polymerů

Při srovnání indentační tvrdosti u všech zkoušených polymerů je možné vidět, že indentační tvrdost je u amorfních polymerů vyšší. Je také možné vidět, že rozptyl naměřených dat indentační tvrdosti je u PA6 a PA66 větší. Je to způsobeno přítomností skelných vláken v materiálu a možným kontaktem indentoru se samotným skelným vláknem.



Obr. 18 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfní a semikrystalické polymery

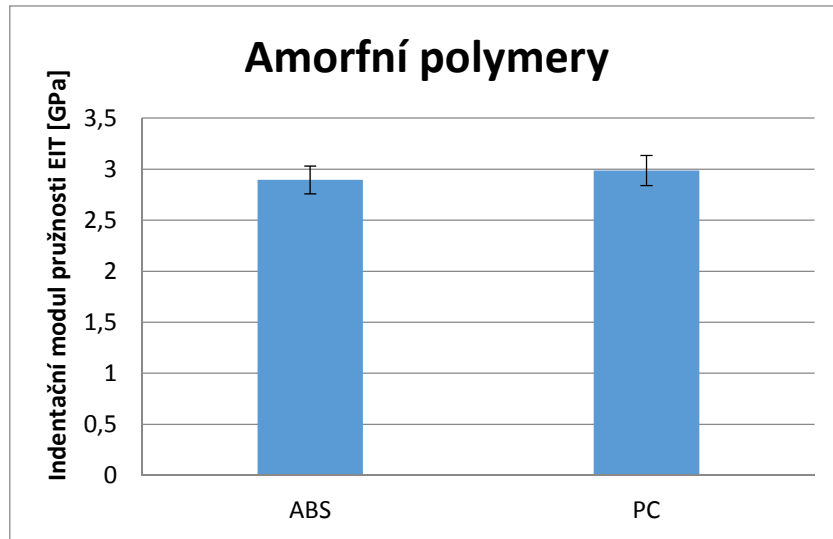
Tab. 2 Srovnání indentační tvrdosti HIT vybraných polymerů

Indentační tvrdost HIT			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABS	155,50	10,26	MPa
PC	161,80	9,76	MPa
PA6	137,84	15,39	MPa
PA66	105,62	19,52	MPa

8.1.2 Indentační modul pružnosti E_{IT}

8.1.2.1 Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfních polymerů

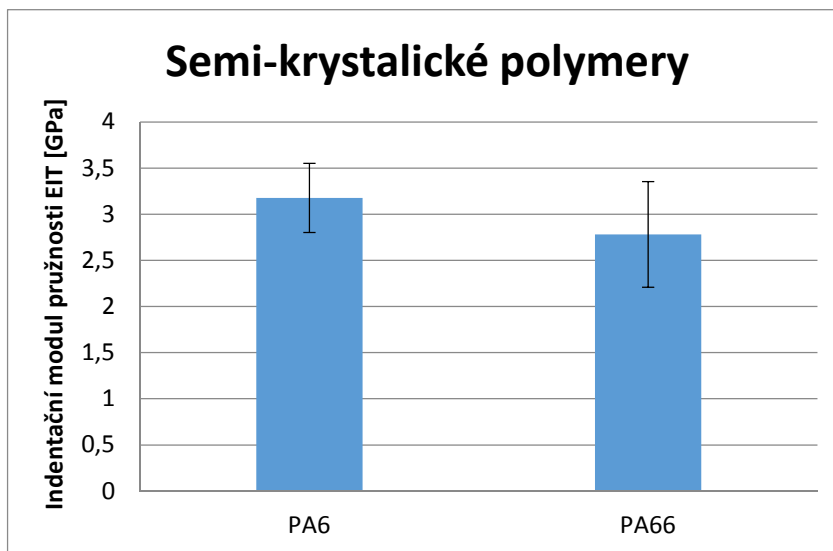
Při měření indentačního modulu pružnosti amorfních polymerů ABS a PC se hodnota modulu materiálu pohybovala v řádech jednotek GPa. U ABS byla naměřena hodnota indentačního modulu pružnosti $(2,895 \pm 0,137)$ GPa a u PC $(2,987 \pm 0,148)$ GPa.



Obr. 19 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfní polymery

8.1.2.2 Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných semi-krytalických polymerů

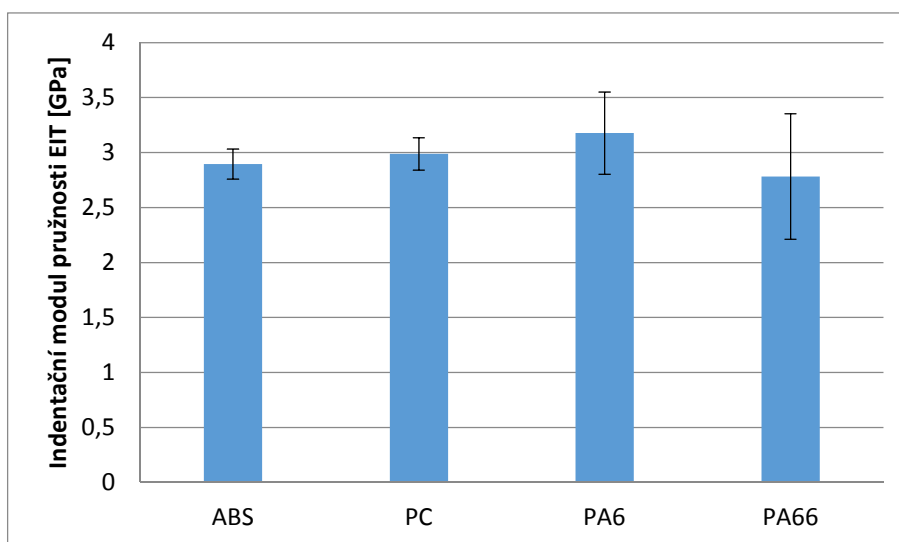
Při měření indentačního modulu pružnosti semi-krytalických polymerů PA6 a PA66 se hodnota modulu materiálu také pohybovala v řádech jednotek GPa. U PA6 byla naměřena hodnota indentačního modulu pružnosti $(3,178 \pm 0,374)$ GPa a u PA66 $(2,782 \pm 0,572)$ GPa.



Obr. 20 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro semi-krytalické polymery

8.1.2.3 Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů

Při srovnávání hodnot indentačního modulu pružnosti vidíme, že nejvyšší hodnoty dosahuje PA6. Vyšší směrodatné odchylky u materiálů PA6 a PA66 jsou opět způsobeny přítomností skelných vláken v materiálu.



Obr. 21 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfní a semi-krystalické polymery

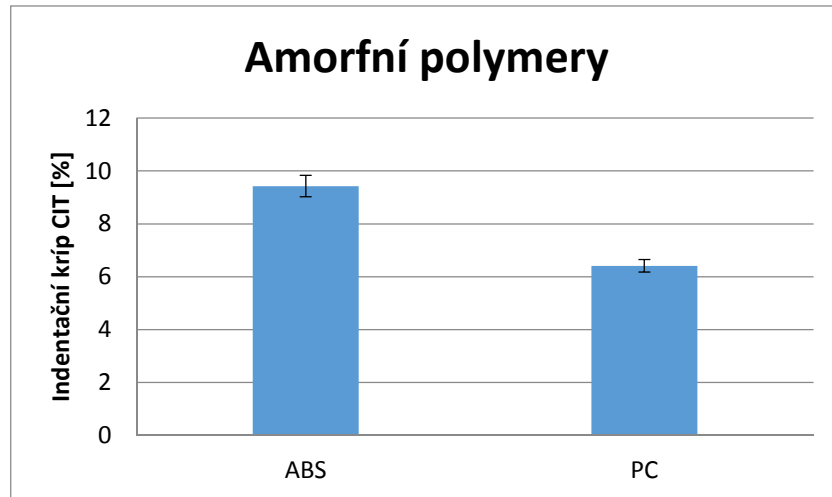
Tab. 3 Srovnání indentačního modulu pružnosti EIT vybraných polymerů

Indentační modul pružnosti EIT			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABS	2,895	0,137	GPa
PC	2,987	0,148	GPa
PA6	3,178	0,374	GPa
PA66	2,782	0,572	GPa

8.1.3 Indentační kríp C_{IT}

8.1.3.1 Indentační kríp C_{IT} vybraných amorfních polymerů

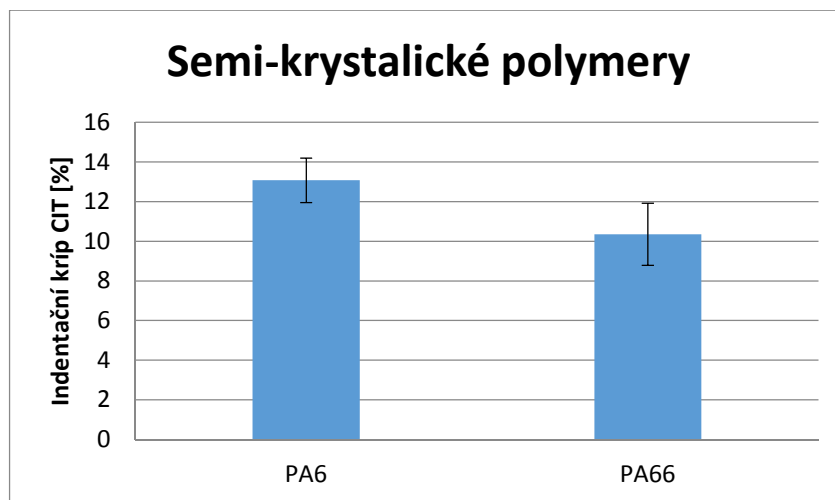
Indentační kríp se u amorfních materiálů ABS a PC pohybuje okolo 10 %. U ABS byla naměřena hodnota indentačního krípu ($9,43 \pm 0,40$) % a u PC ($6,41 \pm 0,24$) %.



Obr. 22 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfní polymery

8.1.3.2 Indentační kríp C_{IT} vybraných semi-krytalických polymerů

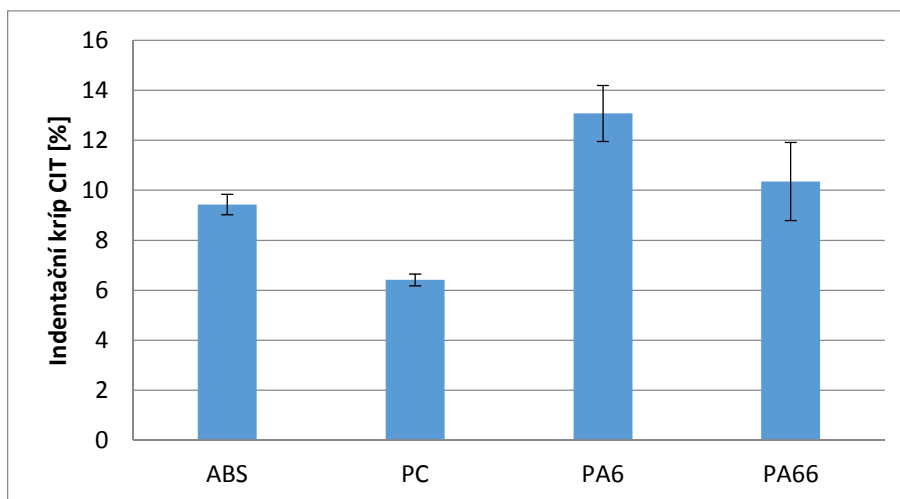
Indentační kríp se u semi-krytalických materiálů PA6 a PA66 pohybuje mírně nad 10 %. U PA6 byla naměřena hodnota indentačního krípu ($13,08 \pm 1,12$) % a u PA66 ($10,35 \pm 1,56$) %.



Obr. 23 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro semi-krytalické polymery

8.1.3.3 Indentační kríp C_{IT} vybraných amorfních a semi-krytalických polymerů

Srovnáním hodnot indentačního krípu u amorfních a semi-krytalických polymerů je možné si všimnout, že největší indentační kríp má PA6. Amorfní polymery jej mají nejnižší, což může být způsobeno samotnou houževnatostí amorfních polymerů.



Obr. 24 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfní a semi-krytalické polymery

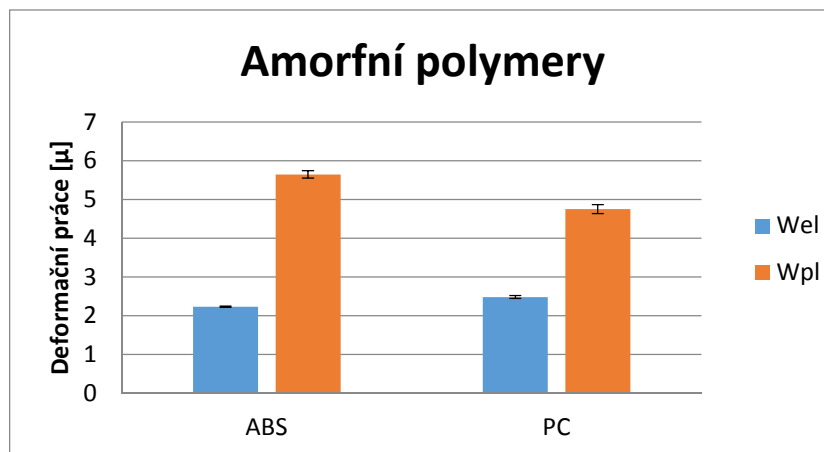
Tab. 4 Srovnání indentačního krípu C_{IT} vybraných polymerů

Indentační kríp C_{IT}			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABS	9,43	0,40	%
PC	6,41	0,24	%
PA6	13,08	1,12	%
PA66	10,35	1,56	%

8.1.4 Plastická a elastická deformační práce

8.1.4.1 Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfních polymerů

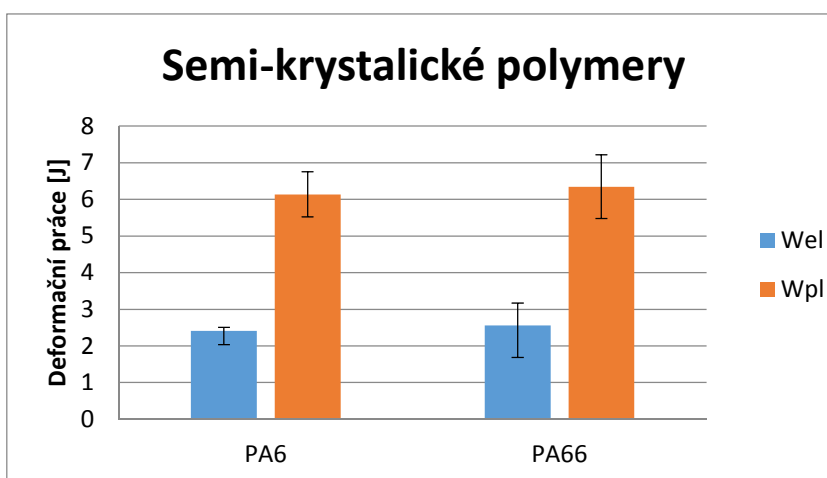
Při měření plastické a elastické práce amorfních polymerů, bylo zjištěno, že hodnota plastické deformační práce u polymeru ABS je $(5,650 \pm 0,095)$ J a u PC $(4,754 \pm 0,119)$ J. Hodnota elastické deformační práce byla o poznání nižší. U polymeru ABS je její hodnota $(2,237 \pm 0,017)$ J a u PC $(2,485 \pm 0,039)$ J.



Obr. 25 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfní polymery

8.1.4.2 *Plastická a elastická deformační práce vybraných semi-krystalických polymerů*

U semi-krystalických polymerů byla naměřena hodnota plastické deformační práce pro polymer PA6 ($6,135 \pm 0,616$) J a pro PA66 ($6,346 \pm 0,868$) J. Hodnota elastické deformační práce pro polymer PA6 byla zjištěna ($2,408 \pm 0,098$) J a pro PA66 ($2,555 \pm 0,374$) J.

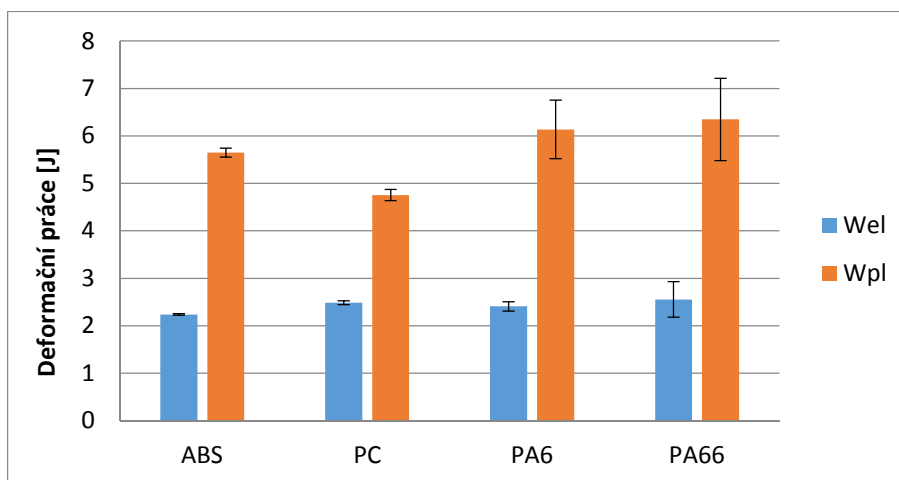


Obr. 26 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro semi-krystalické polymery

8.1.4.3 *Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů*

Při srovnání plastické a elastické deformační práce vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů se hodnota elastické deformační práce příliš neliší. Za to hodnota

plastické deformační práce je vyšší u semi-krystalických polymerů, což je způsobeno jejich menší adaptabilitou v porovnání s amorfními polymery.



Obr. 27 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfni a semi-krystalické polymery

Tab. 5 Srovnání plastické a elastické deformační vybraných polymerů

Plastická a elastická deformační práce					
Materiál	Střední hodnota Wel	Směrodatná odchylka Wel	Střední hodnota Wpl	Směrodatná odchylka Wpl	Jednotka
ABS	2,237	0,017	5,650	0,095	J
PC	2,485	0,039	4,754	0,119	J
PA6	2,408	0,098	6,135	0,616	J
PA66	2,555	0,374	6,346	0,868	J

9 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

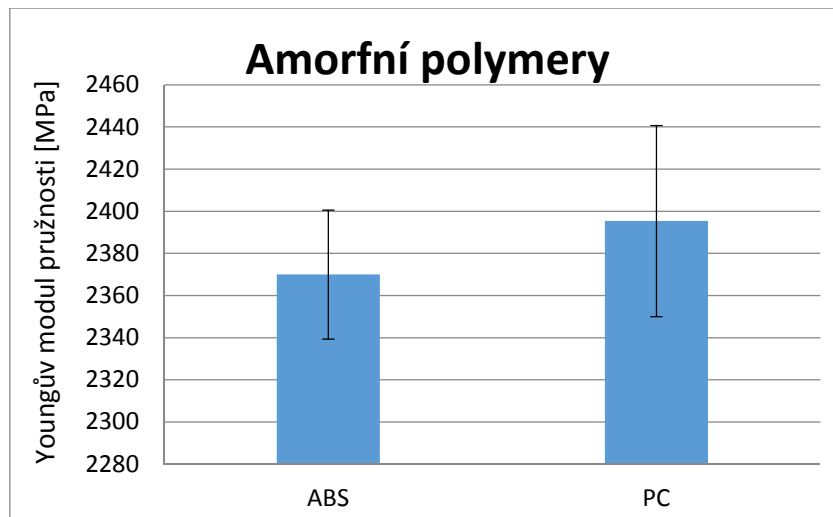
Pro zkoušky mechanických vlastností bylo použito vždy 15 zkušebních těles.

9.1 Výsledky a srovnání

9.1.1 Youngův modul pružnosti

9.1.1.1 Youngův modul pružnosti vybraných amorfních polymerů

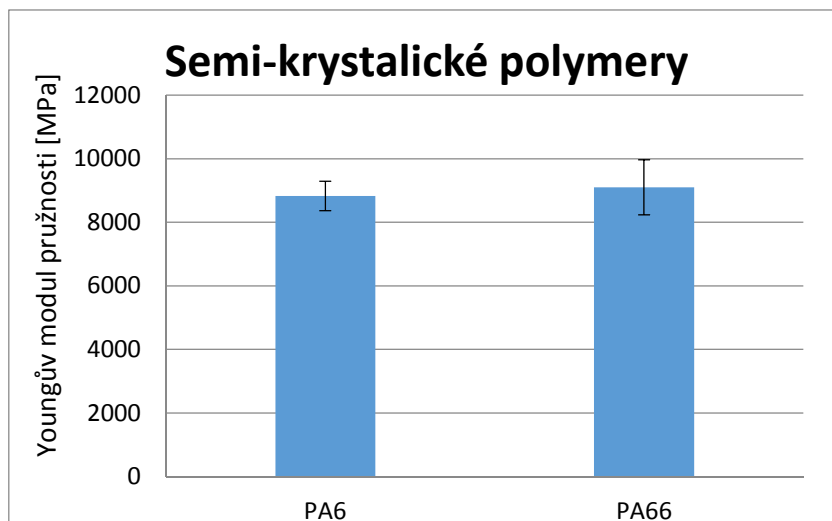
Youngův modul pružnosti u amorfních polymerů se pohyboval v řádech tisíců MPa a byl velmi podobný. U polymeru ABS byl naměřen (2370 ± 31) MPa a u PC (2395 ± 45) MPa



Obr. 28 Naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti pro amorfní polymery

9.1.1.2 Youngův modul pružnosti vybraných semi-krystalických polymerů

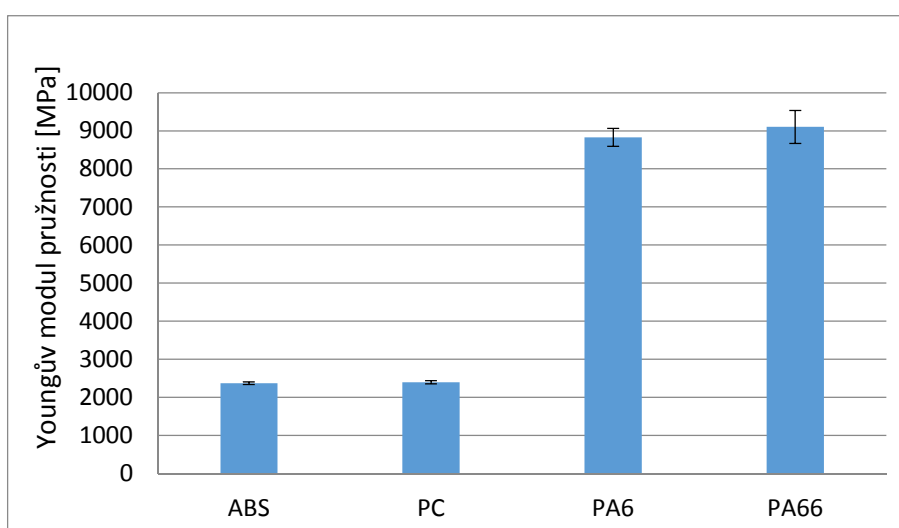
Youngův modul pružnosti u semi-krystalických polymerů byl pro polymer PA6 naměřen (8828 ± 234) MPa a pro polymer PA66 (9103 ± 433) MPa.



Obr. 29 Naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti pro semi-krystalické polymery

9.1.1.3 Youngův modul pružnosti vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů

Při srovnání Youngova modulu pružnosti u amorfních a semi-krystalických polymerů je možné vidět, že hodnota této veličiny je u semi-krystalických polymerů o hodně vyšší. Je také možné si všimnout větších směrodatných odchylek. Velikost těchto odchylek je opět způsobena přítomností skelných vláken a jejich případnou špatnou dispergací ve vzorku. Zvýšenou hodnotu modulu pružnosti u PA6 a PA66 je možné přičíst přítomnosti skelných vláken. Poněvadž všechny zvolené materiály přesahují hodnotou modulu pružnosti nad 1000 MPa, je možné je zařadit do skupiny konstrukčních plastů.



Obr. 30 Naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti pro amorfní a semi-krystalické polymery

Tab. 6 Srovnání Youngova modulu pružnosti vybraných polymerů

Youngův modul pružnosti			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABS	2370	31	MPa
PC	2395	45	MPa
PA6	8828	234	MPa
PA66	9103	433	MPa

9.1.2 Vrubová houževnatost

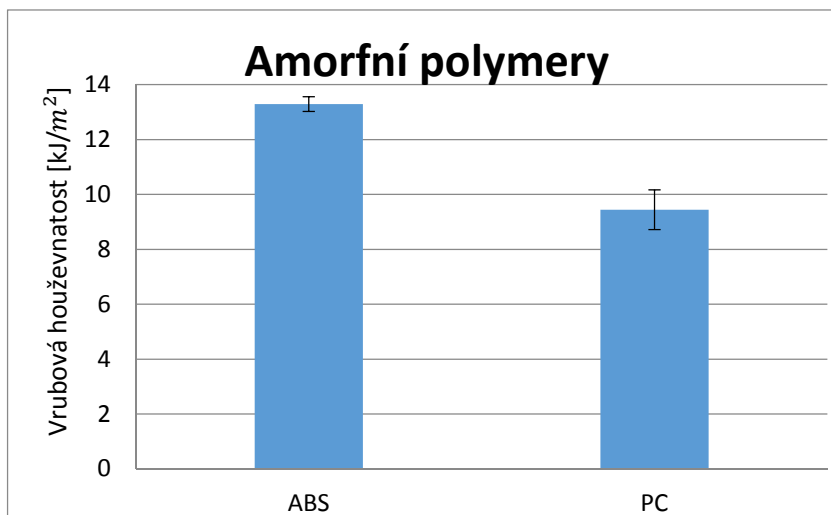
Vrubová houževnatost byla měřena v laboratoři Cebia Tech na Charpyho kladivu Zwick HIT50P o síle 50 J.



Obr. 31 Charpyho kladivo Zwick HIT50P,

9.1.2.1 Vrubová houževnatost vybraných amorfních polymerů

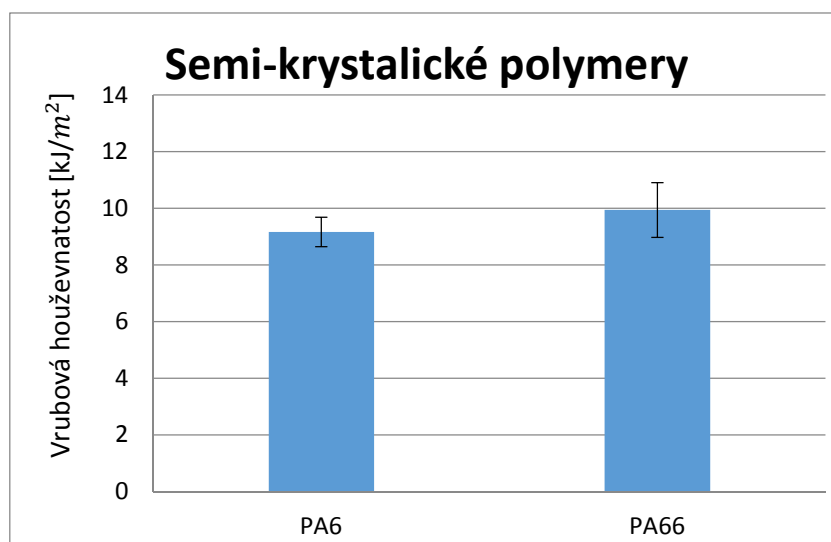
U amorfních materiálů byla naměřena hodnota vrubové houževnatosti pro materiál ABS ($13,29 \pm 0,27$) kJ/m² a pro PC ($9,44 \pm 0,72$) kJ/m².



Obr. 32 Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro amorfní polymery

9.1.2.2 Vrbová houževnatost vybraných semi-krystalických polymerů

U semikrystalických materiálů byla naměřena hodnota vrubové houževnatosti pro materiál PA6 ($9,16 \pm 0,52$) kJ/m² a pro PA66 ($9,94 \pm 0,97$) kJ/m².

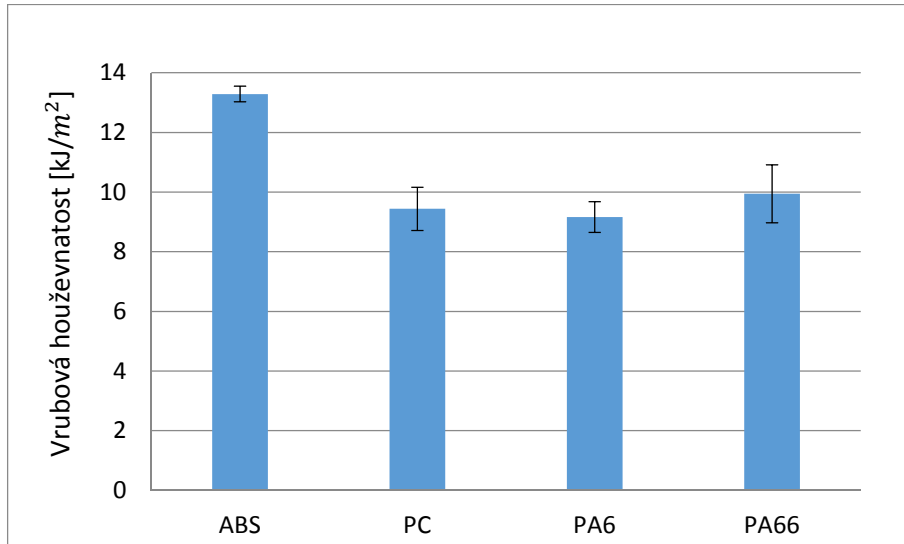


Obr. 33 Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro semi-krystalické polymery

9.1.2.3 Vrbová houževnatost vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů

Při srovnávání vrubové houževnatosti amorfních a semi-krystalických polymerů je možné vidět, že největší hodnotu vrubové houževnatosti vykazoval amorfní polymer a to konkrétně

ně ABS. Ostatní polymery mají tuto hodnotu srovnatelnou. Výška vrubové houževnatosti v případě ABS je ovlivněna přítomností butadienového kaučuku, který zabraňuje šíření trhlin v materiálu.



Obr. 34 Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro amorfní a se-mi-krytalické polymery

Tab. 7 Srovnání vrubové houževnatosti vybraných druhů polymerů

Vrubová houževnatost			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABS	13,29	0,27	kJ/m ²
PC	9,44	0,72	kJ/m ²
PA6	9,16	0,52	kJ/m ²
PA66	9,94	0,97	kJ/m ²

9.1.3 Shore D

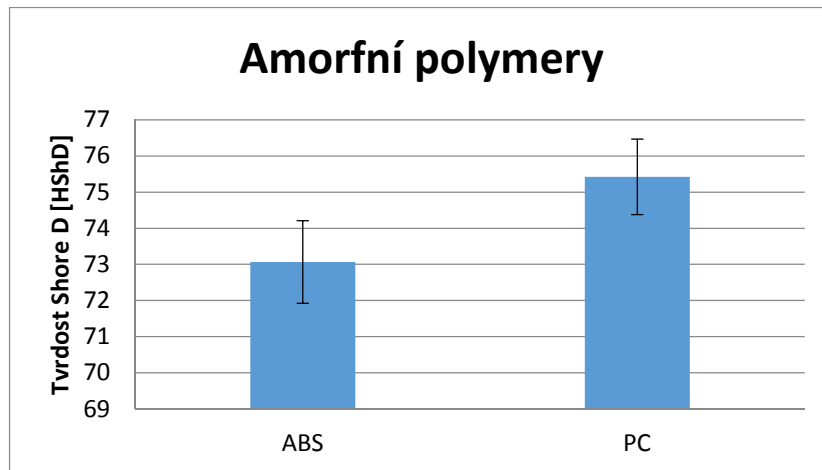
Tvrdość Shore D byla měřena na tvrdoměru Omag v laboratoři na Fakultě technologické.



Obr. 35 Tvrdoměr Omag

9.1.3.1 Shore D vybraných amorfních polymerů

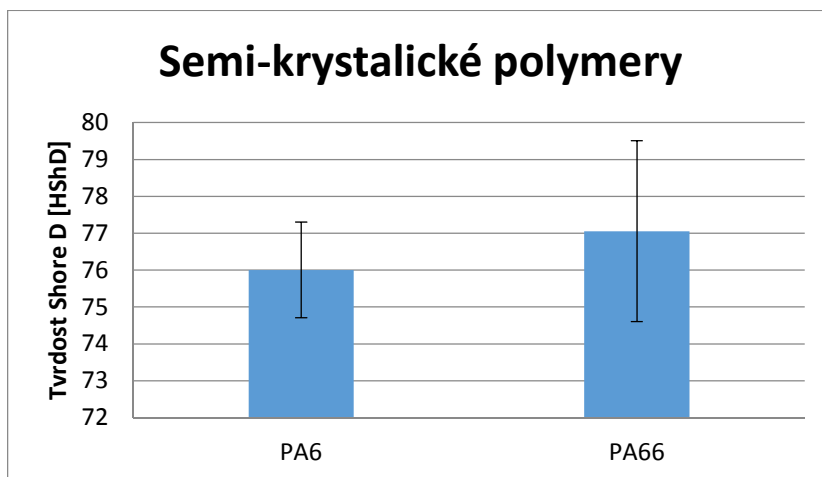
Při měření tvrdosti Shore D byla u amorfních polymerů, konkrétně pro polymer ABS naměřena hodnota $(73,1 \pm 1,1)$ HShD a pro PC $(75,4 \pm 1,0)$ HShD.



Obr. 36 Naměřené hodnoty tvrdosti Shore D pro amorfní polymery

9.1.3.2 Shore D vybraných semi-krytalických polymerů

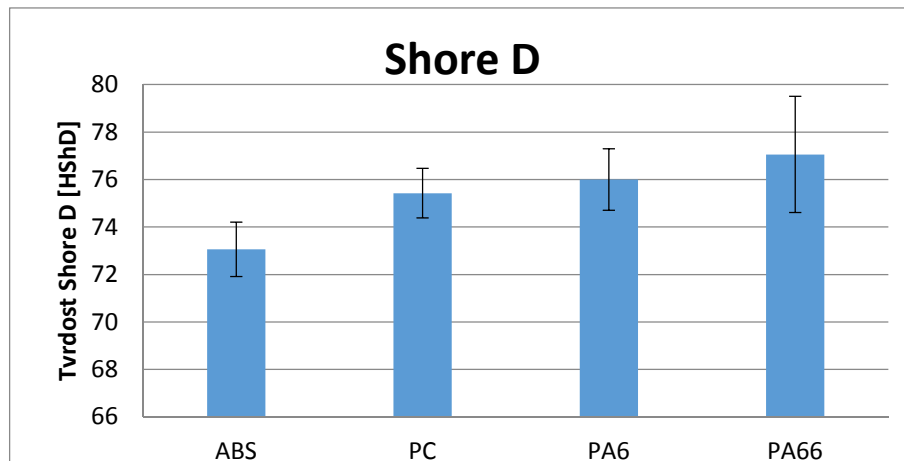
U semi-krytalických polymerů byla tvrdost Shore D pro polymer PA6 naměřena $(76,0 \pm 1,3)$ HShD a pro PA66 $(77,1 \pm 2,4)$ HShD.



Obr. 37 Naměřené hodnoty tvrdosti Shore D pro semi-krytalické polymery

9.1.3.3 Shore D vybraných amorfních a semi-krystalických polymerů

Tvrdość Shore D je větší u semi-krystalických, než u amorfních polymerů, což se dá vysvětlit jejich vnitřní uspořádanou strukturou, navíc v případě polyamidů jejich plnění sklem. Největší tvrdość Shore D má PA66. Nejmenší hodnotu má ABS, což je s největší pravděpodobností způsobeno přítomností kaučuku v tomto kopolymeru.



Obr. 38 Naměřené hodnoty tvrdości Shore D pro amorfní a semikrystalické polymery

Tab. 8 Srovnání tvrdości Shore D vybraných polymerů

Tvrdość Shore D			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABS	73,1	1,1	HShD
PC	75,4	1,0	HShD
PA6	76,0	1,3	HShD
PA66	77,1	2,4	HShD

10 MIKRO-MECHANICKÉ VLASTNOSTI PO TEPLTNĚ – VLHKOSTNÍM ZATÍŽENÍ

Zkušební vzorky byly podrobeny teplotně – vlhkostnímu zatížení. Následně bylo zopakováno měření mikro-mechanických vlastností materiálu, modifikovaných vlhkostí a teplotou.

Vzorky byly v temperační komoře umístěny při teplotě 80°C a vlhkosti 75 % 7 dní a následně po 7 dnech ponechání vzorků v laboratorních podmínkách bylo provedeno měření.

Simulace nepříznivých podmínek byla provedena v laboratoři Cebia Tech v teplotně vlhkostní komoře řady Discovery.



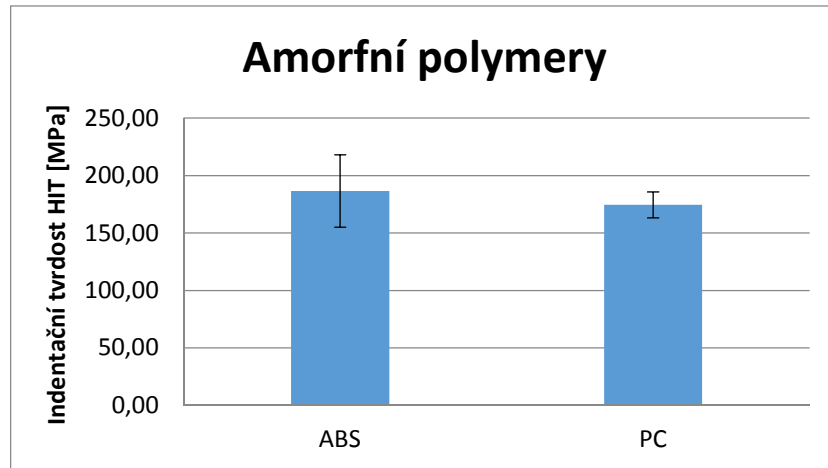
Obr. 39 Teplotní komora řady Discovery

10.1 Výsledky a srovnání

10.1.1 Indentační tvrdost HIT po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.1.1 Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

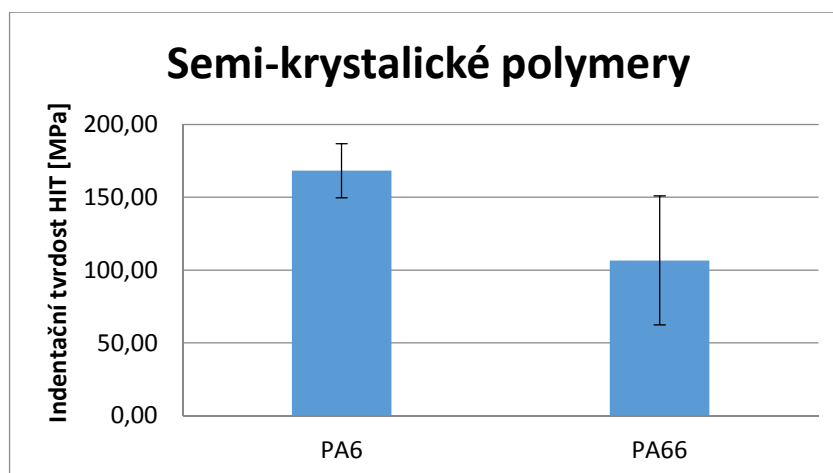
Při měření indentační tvrdosti amorfních polymerů ABS a PC po teplotně – vlhkostním zatížení se hodnota tvrdosti materiálu pohybovala v řádech stovek MPa. U ABS byla naměřena hodnota indentační tvrdosti ($186,60 \pm 31,51$) MPa a u PC ($174,46 \pm 11,25$) MPa.



Obr. 40 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfní polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.1.2 Indentační tvrdost H_{IT} vybraných semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

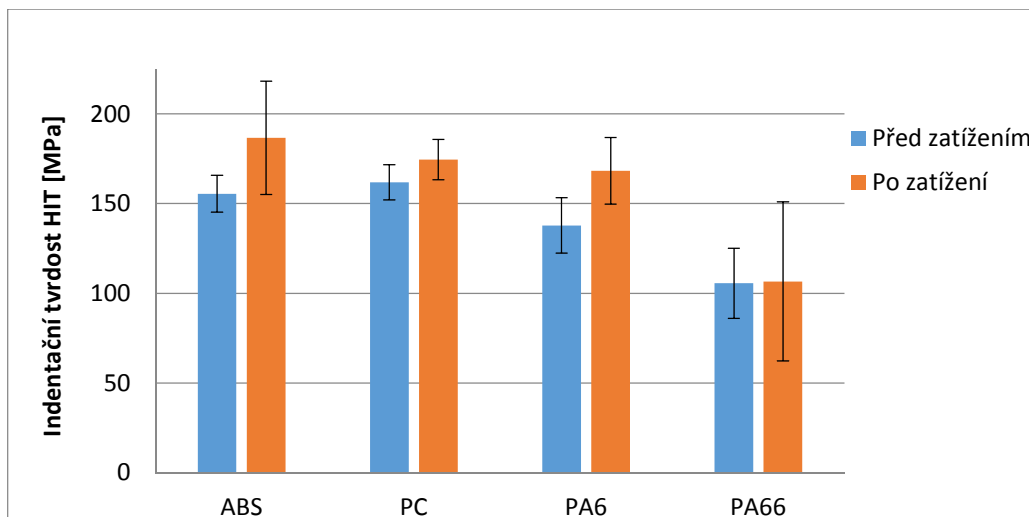
Při měření indentační tvrdosti semi-krytalických polymerů PA6 a PA66 po teplotně – vlhkostním zatížení se hodnota tvrdosti materiálu také pohybovala v řádech stovek MPa. U PA6 byla naměřena hodnota indentační tvrdosti $(168,29 \pm 18,60)$ MPa a u PA66 $(106,61 \pm 44,31)$ MPa.



Obr. 41 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro semi-krytalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.1.3 Indentační tvrdost H_{IT} vybraných amorfních a semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Největší indentační tvrdost mají i po teplotně – vlhkostním zatížením amorfnní polymery a semi-krytalický PA6. U ABS a PC a PA66 došlo dokonce ke zlepšení těchto vlastností, a to až o 20%. Vlastnosti PA66 zůstávají stejné i po zatížení.



Obr. 42 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfnní a semi-krytalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení

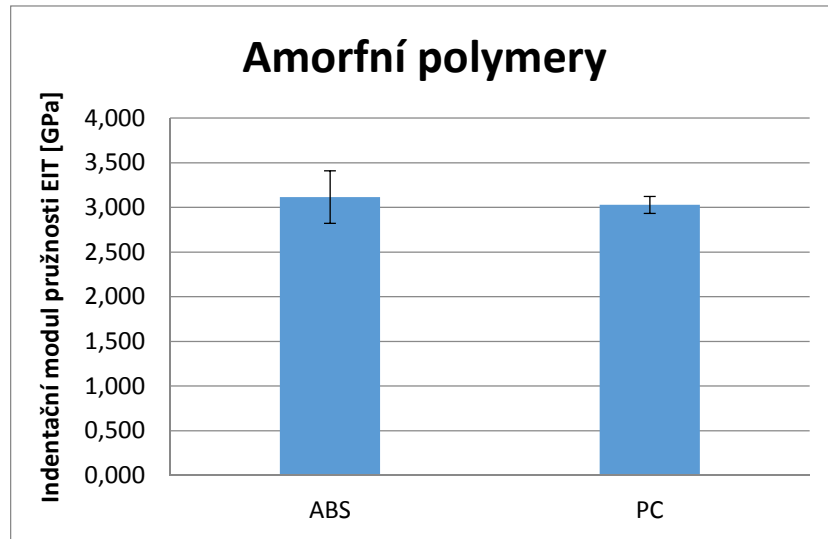
Tab. 9 Srovnání indentační tvrdosti HIT vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Indentační tvrdost HIT			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABS	186,60	31,51	MPa
PC	174,46	11,25	MPa
PA6	168,29	18,59	MPa
PA66	106,61	44,31	MPa

10.1.2 Indentační modul pružnosti E_{IT} po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.2.1 Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfnních polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

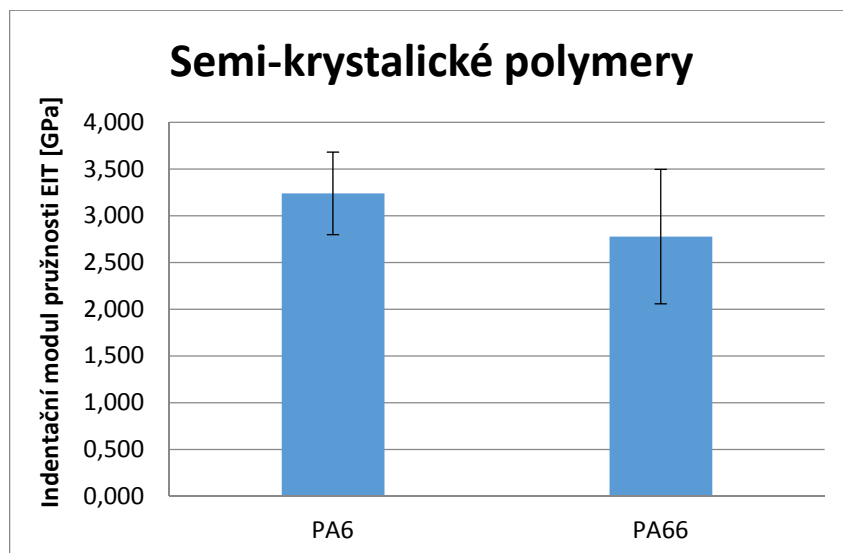
Při měření indentačního modulu pružnosti amorfnních polymerů ABS a PC po teplotně – vlhkostním zatížení se hodnota modulu materiálu pohybovala v řádech jednotek GPa. U ABS byla naměřena hodnota indentačního modulu pružnosti $(3,115 \pm 0,295)$ GPa a u PC $(3,028 \pm 0,096)$ GPa.



Obr. 43 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfní polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.2.2 Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

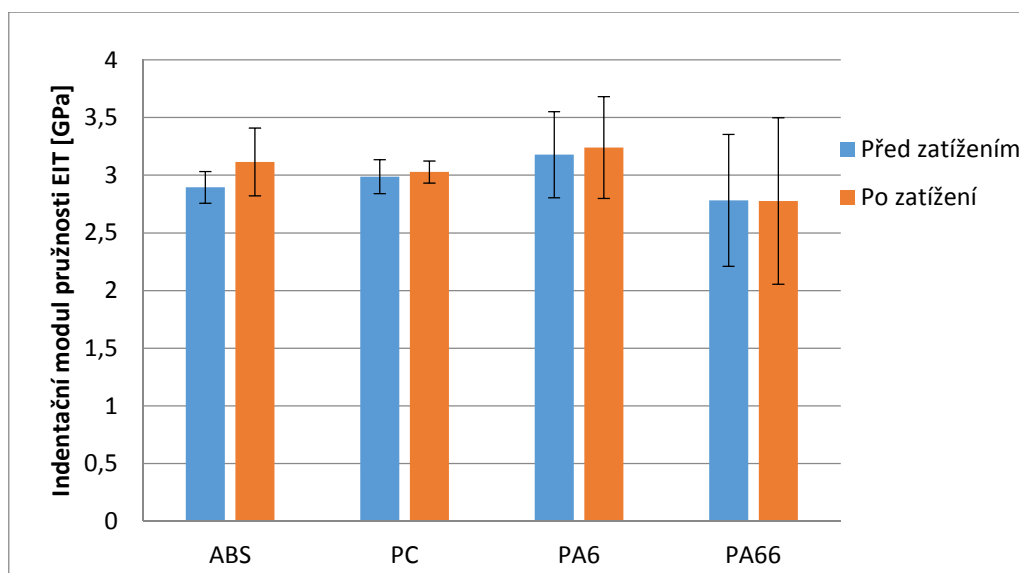
Při měření indentačního modulu pružnosti semi-krytalických polymerů PA6 a PA66 po teplotně – vlhkostním zatížení se hodnota modulu materiálu také pohybovala v řádech jednotek GPa. U PA6 byla naměřena hodnota indentačního modulu pružnosti ($3,240 \pm 0,441$) GPa a u PA66 ($2,777 \pm 0,721$) GPa.



Obr. 44 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro semi-krytalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.2.3 Indentační modul pružnosti E_{IT} vybraných amorfních a semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Teplotně – vlhkostní zatížení způsobilo zlepšení indentačního modulu pružnosti u amorfních polymerů a u semi-krytalického PA6. Vlastnosti PA66 zůstávají i po tomto zatížení stejné.



Obr. 45 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfní a semi-krytalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení

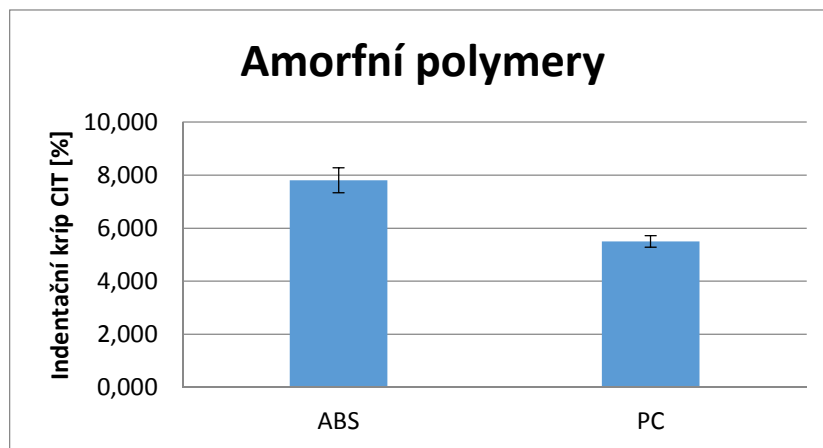
Tab. 10 Srovnání indentačního modulu pružnosti EIT vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Indentační modul pružnosti EIT			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABC	3,115	0,295	GPa
PC	3,028	0,096	GPa
PA6	3,240	0,441	GPa
PA66	2,777	0,721	GPa

10.1.3 Indentační křip CIT po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.3.1 Indentační křip C_{IT} vybraných amorfních polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

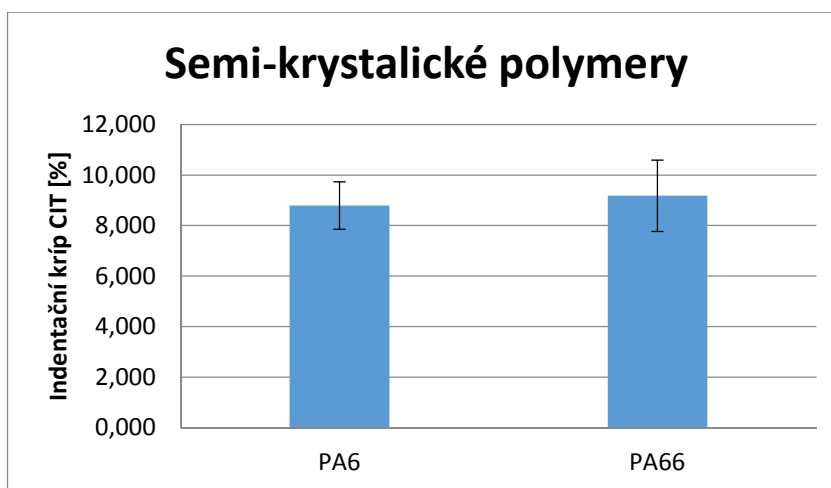
Indentační křip se u amorfních materiálů ABS a PC po teplotně – vlhkostním zatížení pohybuje okolo 10 %. U ABS byla naměřena hodnota indentačního křipu ($7,811 \pm 0,469$) % a u PC ($5,502 \pm 0,215$) %.



Obr. 46 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfní polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.3.2 Indentační kríp C_{IT} vybraných semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

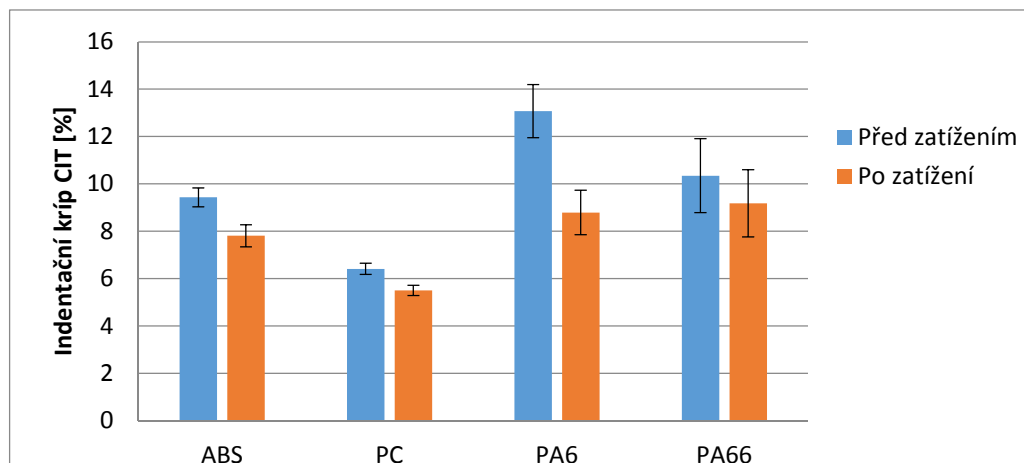
Indentační kríp se u semi-krytalických materiálů PA6 a PA66 po teplotně – vlhkostním zatížení pohybuje mírně nad 10 %. U PA6 byla naměřena hodnota indentačního krípu ($8,792 \pm 0,940$) % a u PA66 ($9,179 \pm 1,414$) %.



Obr. 47 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro semi-krytalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.3.3 Indentační kríp C_{IT} vybraných amorfních a semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Po teplotně – vlhkostním zatížení nastalo zhoršení indentačního krípu u amorfních i semi-krytalických materiálů, což je s největší pravděpodobností způsobeno teplotou působící během zátěžového testu. Největší zhoršení indentačního krípu je zaznamenán u PA6.



Obr. 48 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfni a semi-krystalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

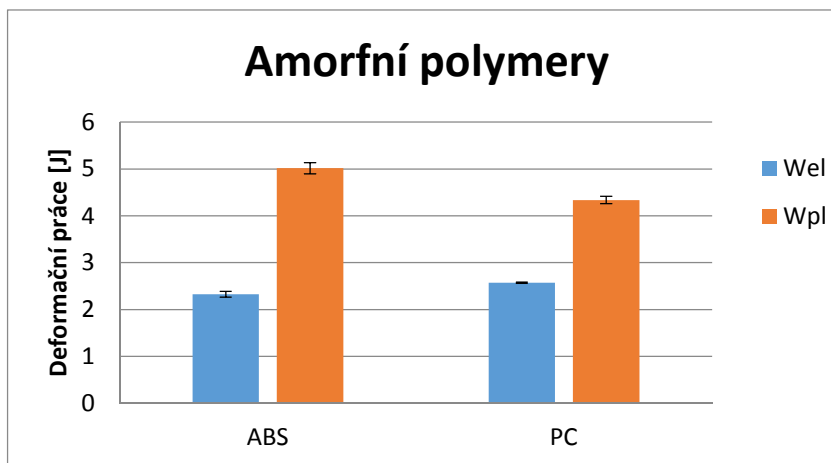
Tab. 11 Srovnání indentačního krípu CIT vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Indentační kríp CIT			
Materiál	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Jednotka
ABC	7,811	0,469	%
PC	5,502	0,215	%
PA6	8,792	0,940	%
PA66	9,179	1,414	%

10.1.4 Plastická a elastická deformační práce po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.4.1 Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfni polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

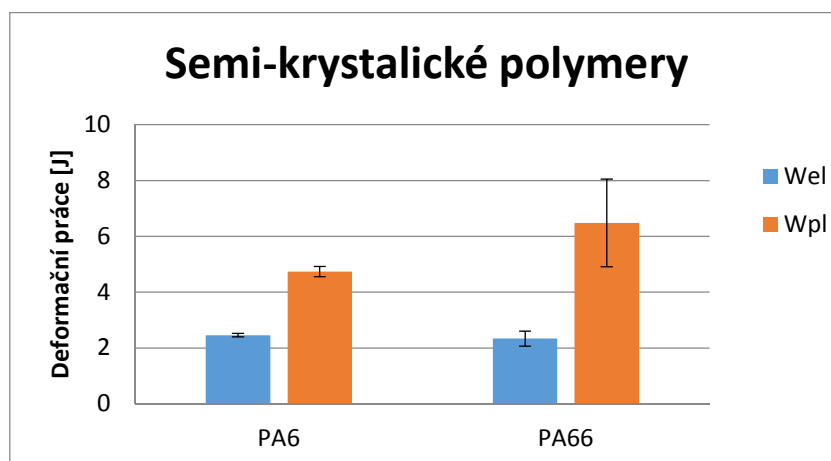
Při měření plastické a elastické práce amorfni polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení, bylo zjištěno, že hodnota plastické deformační práce u polymeru ABS je $(5,016 \pm 0,118)$ J a u PC $(4,338 \pm 0,079)$ J. Hodnota elastické deformační práce byla o poznání nižší. U polymeru ABS je její hodnota $(2,324 \pm 0,061)$ J a u PC $(2,574 \pm 0,013)$ J.



Obr. 49 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfní polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.4.2 *Plastická a elastická deformační práce vybraných semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení*

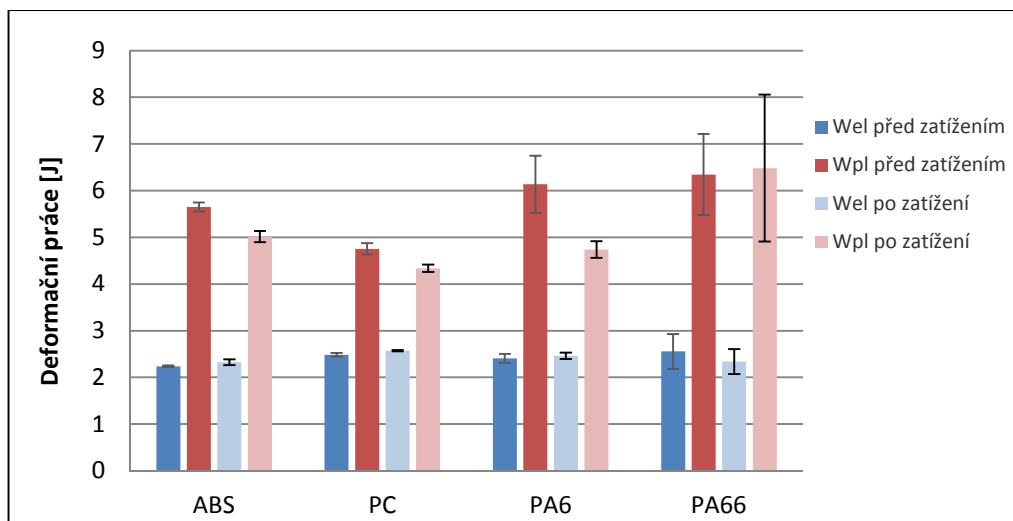
U semi-krytalických polymerů byla naměřena hodnota plastické deformační práce po teplotně – vlhkostním zatížení pro polymer PA6 ($64,739 \pm 0,181$) J a pro PA66 ($6,483 \pm 1,573$) J. Hodnota elastické deformační práce pro polymer PA6 byla zjištěna ($2,462 \pm 0,068$) J a pro PA66 ($2,337 \pm 0,268$) J.



Obr. 50 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro semi-krytalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení

10.1.4.3 Plastická a elastická deformační práce vybraných amorfních a semi-krytalických polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Po teplotně – vlhkostním zatížení nebyly u plastické a elastické deformační práce zaznamenány žádné výrazné změny. Pouze u PA66 byl zaznamenán mírný pokles



Obr. 51 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfní a semi-krytalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení

Tab. 12 Srovnání plastické a elastické deformační vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení

Plastická a elastická deformační práce					
Materiál	Střední hodnota Wel	Směrodatná odchylka Wel	Střední hodnota Wpl	Směrodatná odchylka Wpl	Jednotka
ABC	2,324	0,061	5,016	0,118	J
PC	2,574	0,013	4,338	0,079	J
PA6	2,462	0,068	4,739	0,181	J
PA66	2,337	0,268	6,483	1,573	J

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zaměřena na zkoumání a vyhodnocování mikro-mechanických a mechanických vlastností vybraných druhů polymerů a srovnávání jejich vlastností na základě jejich struktury.

Práce je rozdělena do několika částí. První část byla věnována základní charakterizaci polymerů a bližší charakteristice vybraných polymerů, které jsou následně zkoumány. Je důležité získat základní poznatky o těchto materiálech, abychom mohli pokračovat jejich zpracováním, měřením a vyhodnocením výsledků.

Další část práce byla věnována popisu mikro-mechanických a mechanických vlastností, jako jsou indentační tvrdost, modul pružnosti, křip a plastická a elastická deformační práce, a také tahové vlastnosti, vrubová houževnatost a tvrdost Shore D. Tyto vlastnosti jsou podrobně popsány a je zde popsán i proces získávání a vyhodnocování dat a samotné měřicí přístroje.

Praktická část je věnována zpracování samotného polymeru a popisu výroby normalizovaných těles. Je zde kladen velký důraz na kvalitu výroby a dodržení přesného postupu, abychom předešli zisku zkreslených výsledků právě výrobními vadami.

Dále pak praktická část práce obsahuje informace o měření jednotlivých mikro-mechanických a mechanických vlastností a jejich výsledky, jak v textové, tak v grafické podobě. Je zde také uveden slovní popis výsledků a jejich srovnání v tabulce.

Měření mikro-mechanických vlastností bylo rozšířeno o modifikaci vlastností zkušebních těles v temperační komoře, kde byly simulovány vlhkost a teplota. Tyto výsledky byly dále porovnány s výsledky před vlhkostně-teplotním zatížením. Z výsledků je patrné, že v případě indentační tvrdosti a indentačního modulu pružnosti dochází k mírnému zlepšení těchto mikro-mechanických vlastností. V případě indentačního křipu došlo k mírnému poklesu této vlastnosti. Výsledky plastické a deformační práce vykazují nepatrné změny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Katedra tváření kovů a plastů – Skripta [online]. [cit. 2019-1-14] Dostupný z WWW: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [2] Syntetické makromolekulární látky [online]. [cit. 2019-1-14] Dostupný z WWW: <http://e-chembook.eu/synteticke-makromolekularni-latky>
- [3] Polymerní materiály, Ing. Tomáš Křenek [online]. [cit. 2019-1-20] Dostupný z WWW: https://www.opi.zcu.cz/download/Polymery_2010.pdf
- [4] Rozdělení a charakteristika polymerů [online]. [cit. 2019-2-1] Dostupný z WWW: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [5] Polyamid – PA6, Kajman K [online]. [cit. 2019-2-1] Dostupný z WWW: <http://kajmank.cz/polyamid-pa-6-vlastnosti/>
- [6] PA6, PA66, PA66/6, Technyl, Solvay – Resinex [online]. [cit. 2019-2-14] Dostupný z WWW: <https://www.resinex.cz/produkty/technyl.html>
- [7] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2., přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. 537 s. ISBN 8085920727
- [8] DUCHÁČEK, V.: Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. Str. 94. ISBN 80-7080-617-6
- [9] PA66 – Polyamid 66 [online]. [cit. 2019-2-18] Dostupný z WWW: <https://www.techplasty.sk/material/polyamid/pa66-polyamid-66>
- [10] Nápověda: Materiály PA66 [online]. [cit. 2019-2-18] Dostupný z WWW: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2014/CSY/?guid=GUID-3AA2AD48-448D-4035-91FE-7A27583F030D>
- [11] MALZBENDER, J. Comment on hardness definitions. Journal of the European Ceramic Society[online]. Elsevier, 2003, 23(9), 1355-1359 [cit. 2019-03-04]. DOI: 10.1016/S0955-2219(02)00354-0. ISSN 09552219.
- [12] DUŠEK, Jiří. Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/tjgzq/>. Disertační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Vladislav Navrátil.

- [13] DOČKAL, Adam. Mikro-mechanické vlastnosti HDPE plněného nano-plnivý. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018, 93 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/42331>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Ovsík, Martin
- [14] Zkoušky tvrdosti [online]. [cit. 2019-3-10] Dostupný z WWW: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [15] CHOI, In-chul, Byung-gil YOO, Yong-jae KIM a Jae-il JANG. Indentation creep revisited. Journal of Materials Research [online]. Cambridge Univ Press, 2012, 27(1), 3-11 [cit. 2019-03-04]. DOI: 10.1557/jmr.2011.213. ISSN 08842914
- [16] GINDER, Ryan S; NIX, William D; PHARR, George M. A Simple Model for Indentation Creep. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2018, vol. 112 s. 552-562. ISSN:0022-5096
- [17] PETROVAJ, Pavel. Studium creepového chování za zvýšených teplot. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, 72s 8s příloh. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/24426>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Řezníček, Martin
- [18] Mechanické vlastnosti polymerů – Tahové vlastnosti polymerů [online]. [cit. 2019-3-15] Dostupný z WWW: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [19] Characterization and failure analysis of plastics. Materials Park, OH: ASM International, 2003, vi, 482 s. ISBN 0-87170-789-6
- [20] Skripta – Tahová zkouška [online]. [cit. 2019-3-16] Dostupný z WWW: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6
- [21] Mechanické vlastnosti polymerů – Tvrdost polymerů [online]. [cit. 2019-3-20] Dostupný z WWW: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [22] Mechanické vlastnosti polymerů – Dynamické a rázové namáhání [online]. [cit. 2019-3-28] Dostupný z WWW: <https://publi.cz/books/180/11.html>
- [23] Dynamické zkoušky, UFMI FT UTB [online]. [cit. 2019-3-16] Dostupný z WWW: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf
- [24] OVSÍK, Martin. Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 179 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/25609>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Maňas, David
- [25] Výroba polyamidu [online]. [cit. 2019-4-2] Dostupný z WWW: <http://www.moraprim.cz/24924-vyroba-polyamidu>

- [26] Polyamid 6 – PA6 – Ertalon, Tecamid, Sustamid [online]. [cit. 2019-4-2] Dostupný z WWW: <https://www.vmplast.cz/sortiment/polyamid/ertalon/>
- [27] BT – Polymers [online]. [cit. 2019-4-2] Dostupný z WWW: <http://btpol.com/products-Polycarbonate%20Resins.shtml>
- [28] What is ABS plastic? – IOSP [online]. [cit. 2019-4-4] Dostupný z WWW: <https://www.iosp.org/what-is-abs-plastic/>
- [29] Statické zkoušky krátkodobé, UFMI FT UTB [online]. [cit. 2019-4-6] Dostupný z WWW: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [30] LUDVÍK, Jan, BÍLEK, Karel, LUDVÍK Štěpán. Zkoušky tvrdosti. 3. vyd. Kladno: Metrotest Kladno. 22 s
- [31] Formplast GmbH, Demag Ergotech 50-200 system [online]. [cit. 2019-4-6] Dostupný z WWW: http://www.formplastgmbh.de/cz/injection_moulding_machine.php?maschinen_id=4200
- [32] PRAMANIK, NK; HALDAR, RS; NIYOGI, UK; ALAM, MS. Development of an Advanced Engineering Polymer from the Modification of Nylon 66 by E-Beam Irradiation. Defence Science Journal. 2014, vol. 64, no. 3 s. 281-289. ISSN:0011-748X
- [33] SENGUPTA, Rajatendu; TIKKU, V.K; SOMANI, Alok K; CHAKI, Tapan K; BHOWMICK, Anil K. Electron Beam Irradiated Polyamide-6,6 Films?I: Characterization by Wide Angle X-ray Scattering and Infrared Spectroscopy. Radiation Physics and Chemistry. 2005, vol. 72, no. 5 s. 625-633. ISSN:0969-806X
- [34] SENGUPTA, Rajatendu; TIKKU, V.K; SOMANI, Alok K; CHAKI, Tapan K; BHOWMICK, Anil K. Electron Beam Irradiated Polyamide-6,6 Films?II: Mechanical and Dynamic Mechanical Properties and Water Absorption Behavior. Radiation Physics and Chemistry. 2005, vol. 72, no. 6 s. 751-757. ISSN:0969-806X
- [35] KIM, JW; JANG, H. Friction and Wear of Monolithic and Glass-fiber Reinforced PA66 in Humid Conditions. WEAR. 2014, vol. 309, no. 1-2 s. 82-88. ISSN:0043-1648
- [36] JARRAR, R.; MOHSIN, A.M.; HAIK, Y. Alteration of the Mechanical and Thermal Properties of Nylon 6/Nylon 6,6 Blends by Nanoclay. Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 124, no. 3 s. 1880-1890. DOI: 10.1002/app.35215

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PVC	Polyvinylchlorid
PA6	Polyamid 6
PA66	Polyamid 66
PC	Polykarbonát
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
SAN	Styrenakrylonitril
HIT	Indentační tvrdost [MPa]
CIT	Indentační kríp [%]
EIT	Indentační modul pružnosti [GPa]
E*	Komplexní modul [MPa]
ν	Poissonovo číslo materiálu zkoušeného materiálu
W_{total}	Celková deformační práce [J]
W_{plast}	Plastická deformační práce [J]
W_{elast}	Elastická deformační práce [J]
η_{IT}	Koeficient zpětné relaxace [J]
F	Velikost působící síly [N]
S_0	Obsah původního průřezu zkušební tělesa [mm^2]
ε	Poměrné prodloužení
L	Původní naměřená délka zkušební tělesa mezi upínacími čelistmi [mm]
L_t	Velikost prodloužení zkušební tělesa mezi upínacími čelistmi [mm]
σ_p	Napětí na mezi kluzu [MPa]
F_p	Největší síla naměřená v průběhu tahové zkoušky [N]
σ_{kH}	Napětí na horní mezi kluzu [MPa]
F_{kH}	největší síla naměřená v oblasti meze kluzu [N]

σ_{kH}	Napětí na dolní mezi kluzu [MPa]
F_{kL}	Nejmenší síla naměřená v oblasti meze kluzu [N]
σ_s	Napětí při přetržení [MPa]
F_s	Největší naměřená v průběhu tahové zkoušky [N]
σ	Největší napětí na mezi úměrnosti [MPa]
E	Modul pružnosti [MPa]
a	Křehkost [kJ/m ²]
E_c	Energie při přeražení [J]
h	Tloušťka zkušební tělesa [mm]
b	Šířka zkušební tělesa [mm]
F_{kp}	Síla vtlačování hrotu do zkušební tělesa [mN]
H_D	Hodnota tvrdosti Shore D naměřená tvrdoměrem

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Výrobek z PA6 [25].....	16
Obr. 2 Výrobek z PA66 [27].....	17
Obr. 3 Výrobky z polykarbonátu [28]	18
Obr. 4 Výrobek z ABS [29]	19
Obr. 5 Křivka krípkového chování [17].....	21
Obr. 6 Tahová křivka pro různé druhy polymerů [18]	24
Obr. 7 Tahová křivka a jednotlivé meze [17]	27
Obr. 8 Tvary zkušebních těles [18].....	28
Obr. 9 Tahová křivka s tělesem [21].....	29
Obr. 10 Zařízení na tvorbu vrubů („vrubovačka“)	31
Obr. 11 Různé tvary zkušebních těles [23].....	32
Obr. 12 Zkušební hrot pro metodu Shore D [30].....	32
Obr. 13 Vstříkovací stroj DEMAG ERGOtech 50-200 system.....	37
Obr. 14 Zpracování vzorků.....	39
Obr. 15 Micro combi tester.....	40
Obr. 16 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfnní polymery	41
Obr. 17 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro semi-krystalické polymery.....	41
Obr. 18 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfnní a semi-krystalické polymery.....	42
Obr. 19 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfnní polymery.....	43
Obr. 20 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro semi-krystalické polymery.....	43
Obr. 21 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfnní a semi-krystalické polymery	44
Obr. 22 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfnní polymery	45
Obr. 23 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro semi-krystalické polymery	45
Obr. 24 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfnní a semi-krystalické polymery.....	46
Obr. 25 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfnní polymery.....	47
Obr. 26 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro semi-krystalické polymery	47

Obr. 27 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfni a semi-krystalické polymery	48
Obr. 28 Naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti pro amorfni polymery.....	49
Obr. 29 Naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti pro semi-krystalické polymery.....	50
Obr. 30 Naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti pro amorfni a semi-krystalické polymery	50
Obr. 31 Charpyho kladivo Zwick HIT50P,	51
Obr. 32 Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro amorfni polymery	52
Obr. 33 Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro semi-krystalické polymery	52
Obr. 34 Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti pro amorfni a semi-krystalické polymery.....	53
Obr. 35 Tvrdoměr Omag	53
Obr. 36 Naměřené hodnoty tvrdosti Shore D pro amorfni polymery	54
Obr. 37 Naměřené hodnoty tvrdosti Shore D pro semi-krystalické polymery	54
Obr. 38 Naměřené hodnoty tvrdosti Shore D pro amorfni a semikrystalické polymery.....	55
Obr. 39 Teplotní komora řady Discovery	56
Obr. 40 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfni polymery po teplotně – vlhkostním zatížení.....	57
Obr. 41 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro semi-krystalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení.....	57
Obr. 42 Naměřené hodnoty indentační tvrdosti pro amorfni a semi-krystalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení	58
Obr. 43 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfni polymery po teplotně – vlhkostním zatížení.....	59
Obr. 44 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro semi-krystalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení	59
Obr. 45 Naměřené hodnoty indentačního modulu pružnosti pro amorfni a semi-krystalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení.....	60
Obr. 46 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfni polymery po teplotně – vlhkostním zatížení.....	61

Obr. 47 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro semi-krystalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení.....	61
Obr. 48 Naměřené hodnoty indentačního krípu pro amorfnní a semi-krystalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení	62
Obr. 49 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfnní polymery po teplotně – vlhkostním zatížení	63
Obr. 50 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro semi-krystalické polymery po teplotně – vlhkostním zatížení.....	63
Obr. 51 Naměřené hodnoty plastické a elastické deformační práce pro amorfnní a semi-krystalické polymery před a po teplotně – vlhkostním zatížení.....	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry vstřikovacího stroje [31]	37
Tab. 2 Srovnání indentační tvrdosti HIT vybraných polymerů	42
Tab. 3 Srovnání indentačního modulu pružnosti EIT vybraných polymerů.....	44
Tab. 4 Srovnání indentačního krípu CIT vybraných polymerů	46
Tab. 5 Srovnání plastické a elastické deformační vybraných polymerů	48
Tab. 6 Srovnání Youngova modulu pružnosti vybraných polymerů.....	51
Tab. 7 Srovnání vrubové houževnatosti vybraných druhů polymerů.....	53
Tab. 8 Srovnání tvrdosti Shore D vybraných polymerů	55
Tab. 9 Srovnání indentační tvrdosti HIT vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení.....	58
Tab. 10 Srovnání indentačního modulu pružnosti EIT vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení.....	60
Tab. 11 Srovnání indentačního krípu CIT vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení.....	62
Tab. 12 Srovnání plastické a elastické deformační vybraných polymerů po teplotně – vlhkostním zatížení.....	64

