

# Mechanické vlastnosti syntetických polymerů

Jaroslav Šemora

---

Bakalářská práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav Šemora**  
Osobní číslo: **T11519**  
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti syntetických polymerů**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma. Informace čerpejte z doporučené literatury a článků v odborných časopisech. Veškeré literární zdroje správně citujte.
2. Připravte vzorky polymeru pro statickou zkoušku v tahu a ohybu a dynamickou zkoušku v ohybu.
3. Provedte zkoušky mechanických vlastností a vyhodnocení zkoušek, pokuste se charakterizovat lomové plochy vzorků pomocí mikroskopie.
4. Diskutujte získané výsledky.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Mleziva J., Šnupárek J.: Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. Sobotáles, 2000
2. Schwartz M.: Smart materials. John Wiley and Sons, New York 2002
3. Raab M.: Materiály a člověk. Encyklopedický dům, Praha 1999
4. Tilley R.: Understanding solids. The science of materials. John Wiley and Sons, Chichester 2008
5. Rybníkář F., Ditrych Z., Klácel Z., Ordelt O.: Analýza a zkoušení plastických hmot. SNTL, Praha 1665
6. Havlíček V., Osten M., Šnupárek J.: Přehled plastických hmot. SNTL, Praha 1959
7. Harper Ch.: Handbook of plastics and elastomers. McGraw-Hill, New York 1975

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Petr Smolka, Ph.D.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**7. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**30. května 2014**

Ve Zlíně dne 7. února 2014

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



  
doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.  
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: ŠEMBRÁ JAROSLAV

Obor: MI

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- 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<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> 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<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit 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 26.5.2014

.....  
Šembrá

<sup>1)</sup> 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 nevýdělečně 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 předpisy 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.

<sup>2)</sup> 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).<sup>3)</sup> 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). Odírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.
- (2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.
- (3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

Ve Zlíne 26. 10. 2011

Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odírá-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.

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

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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním mechanických vlastností různých syntetických polymerů. Teoretická část obsahuje náhled do mikrostruktury polymerních materiálů, popis základních metod používaných pro mechanické testování materiálů a popis některých metod, které se využívají pro charakterizaci morfologie povrchu. Část praktická je založena na destruktivním testování mechanických vlastností vybraných polymerních materiálů a zkoumání vlivu nastavení různých podmínek testování. Pomocí optických metod je také hodnocen charakter lomu u rázové zkoušky v ohybu.

Klíčová slova: Polymer, struktura, směs, mechanické vlastnosti, zkouška, lomová plocha.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with testing of mechanical properties of various synthetic polymers. The theoretical part provides a brief insight into the micro-structure of polymeric materials, description of fundamental tests of mechanical properties and methods used for characterization of surface morphology. The experimental part of the work is devoted to destructive testing of mechanical properties of selected polymers and examining the effect of different process parameters, namely deformation rate and type of a notch. Optical methods were utilized to describe fracture area of samples after the impact test.

Keywords: Polymer, structure, mechanical properties, test, fracture area.

## **Poděkování**

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu ing. Petru Smolkovi Ph.D za příkladné vedení, odborné rady, poskytnuté podklady a celkovou pomoc při tvorbě této práce. Dále chci poděkovat své rodině a přátelům za podporu a pochopení.

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

# OBSAH

ÚVOD.....	10
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ.....</b>	<b>12</b>
<b>2 STRUKTURA A ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....</b>	<b>13</b>
2.1 MOLEKULÁRNÍ (CHEMICKÁ) STRUKTURA.....	13
2.1.1 Rozdělení polymerů podle konstituce makromolekul.....	13
2.1.2 Rozdělení kopolymerů podle konstituce makromolekul.....	14
2.2 NADMOLEKULÁRNÍ (FYZIKÁLNÍ) STRUKTURA.....	15
2.2.1 Rozdělení polymerů podle uspořádání makromolekul v pevné fázi.....	15
2.2.1.1 Amorfní polymery.....	15
2.2.1.2 Krystalické polymery.....	16
2.2.2 Dělení polymerů podle termického chování.....	17
2.2.2.1 Elastomery.....	17
2.2.2.2 Plasty.....	17
<b>3 TERMICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ.....</b>	<b>19</b>
3.1 TERMICKÉ CHOVÁNÍ AMORFNÍCH POLYMERŮ.....	19
3.1.1 Teplota skelného přechodu ( $T_g$ ).....	19
3.1.2 Teplota tečení ( $T_f$ ).....	19
3.2 TERMICKÉ CHOVÁNÍ KRYSTALICKÝCH POLYMERŮ.....	20
3.2.1 Teplota tání ( $T_m$ ).....	20
<b>4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ.....</b>	<b>21</b>
4.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	22
4.1.1 Příprava zkušebních těles pro tahovou zkoušku.....	22
4.1.2 Charakteristické veličiny a pojmy pro tahovou zkoušku.....	22
4.1.2.1 Tahové napětí.....	22
4.1.2.2 Poměrné přetvoření (deformace v tahu).....	23
4.1.2.3 Pracovní diagram tahové zkoušky.....	23
4.1.2.4 Modul pružnosti (Youngův modul).....	24
4.1.2.5 Mez úměrnosti.....	25
4.1.2.6 Horní mez kluzu.....	25
4.1.2.7 Dolní mez kluzu.....	25
4.1.2.8 Smluvní mez kluzu.....	25
4.1.2.9 Mez pevnosti v tahu.....	25
4.2 OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	25
4.2.1 Charakteristické veličiny a pojmy pro ohybovou zkoušku.....	26
4.2.1.1 Ohybové napětí.....	26
4.2.1.2 Poměrné přetvoření (deformace v ohybu).....	27
4.2.1.3 Pracovní diagram ohybové zkoušky.....	27
4.3 RÁZOVÁ ZKOUŠKA.....	28
4.3.1 Metoda Charpy.....	28
4.3.1.1 Vyhodnocení zkoušky.....	29
4.3.1.2 Metoda instrumentovaná.....	30
<b>5 CHARAKTERISTIKA A TOPOGRAFIE POVRCHU.....</b>	<b>31</b>



5.1	ROZDĚLENÍ TOPOGRAFICKÝCH METOD .....	31
5.2	OPTICKÁ MIKROSKOPIE .....	32
5.3	SEM (ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE) .....	32
5.4	AFM (MIKROSKOPIE ATOMOVÝCH SIL) .....	32
5.5	LASEROVÁ INTERFEROMETRIE .....	33
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>		<b>34</b>
<b>6</b>	<b>EXPERIMENT .....</b>	<b>35</b>
6.1	TESTOVANÉ MATERIÁLY .....	35
6.1.1	Scanblend (PC/ASA) .....	35
6.1.2	Polystyren (PS).....	35
6.1.3	Polypropylen (PP) .....	36
6.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	36
6.2.1	Postup měření.....	37
6.2.2	Parametry tahové metody.....	37
6.2.3	Zkušební tělesa.....	38
6.2.4	Vyhodnocení zkoušky .....	38
6.2.5	Výsledky a diskuse.....	38
6.2.5.1	Výsledné hodnoty a průběh zkoušky pro PC/ASA.....	39
6.2.5.2	Výsledné hodnoty a průběh tahové zkoušky pro PP.....	41
6.2.5.3	Výsledné hodnoty a průběh tahové zkoušky pro PS.....	43
6.2.5.4	Porovnání pevnosti a modulu pružnosti testovaných materiálů .....	46
6.3	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	48
6.3.1	Postup měření.....	48
6.3.2	Parametry ohybové metody.....	48
6.3.3	Vyhodnocení zkoušky .....	49
6.3.4	Výsledky a diskuse.....	49
6.3.4.1	Výsledné hodnoty a průběh ohybové zkoušky pro PC/ASA .....	49
6.3.4.2	Výsledné hodnoty a průběh ohybové zkoušky pro PP .....	51
6.3.4.3	Výsledné hodnoty a průběh zkoušky pro PS .....	53
6.5	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU (CHARPYHO KLADIVO) .....	57
6.5.1	Postup měření.....	57
6.5.2	Parametry Charpyho kladiva.....	58
6.5.3	Parametry vrubů .....	58
6.5.4	Typy přerušení .....	59
6.5.5	Korekce ztrát .....	59
6.5.6	Výsledky a diskuse.....	59
6.5.6.1	Rázová a vrubová houževnatost .....	60
6.6	ZKOUMÁNÍ LOMOVÝCH PLOCH.....	64
6.6.1	Lomové plochy a profil lomu, PC/ASA.....	64
6.6.2	Lomové plochy a profil lomu, PS .....	65
6.6.3	Lomové plochy a profil lomu, PP .....	66
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>67</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>68</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>70</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>72</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>73</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>		<b>75</b>

## ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je především seznámení se s používanými testovacími metodami pro destruktivní zkoušení mechanických vlastností polymerních materiálů, použití těchto nově nabytých poznatků v praxi a v neposlední řadě také interpretace získaných výsledků.

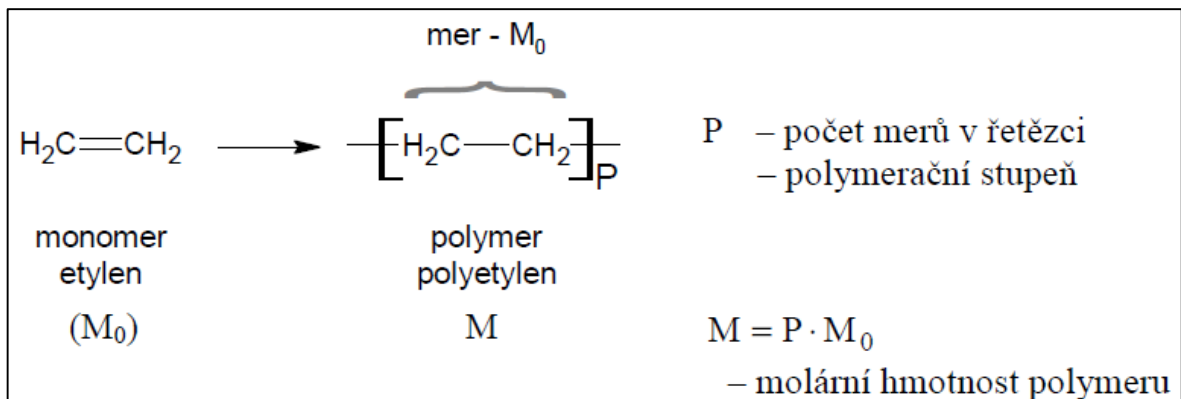
Dalším úkolem je charakterizovat lomové plochy materiálů, které budou vystaveny dynamickému namáhání při rázové zkoušce v ohybu pomocí Charpyho kladiva.

Kromě této praktické části práce bude obsahovat také část teoretickou, která poskytne stručný náhled do mikrostruktury polymerních materiálů, dále také popíše především již zmiňované metody testování mechanických vlastností polymerů a některé metody pro zobrazování topografie povrchu materiálů nebo jejich lomových ploch.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ

Polymery jsou látky, které patří mezi látky makromolekulární. Slovo polymer se skládá ze dvou částí. Poly, což znamená mnoho a meros, které označuje část. Podle tohoto názvu je zřejmé, že se polymery skládají z mnoha částí. Tyto části se nazývají mery a látka, z níž polyreakcí vzniká polymer, se nazývá monomer. [1]



**Obrázek 1:** Zjednodušené schéma vzniku polymeru (polyetylen) [1]

Názvy polymerů se tvoří pojmenováním monomerní sloučeniny a přidáním předpony poly nebo se mohou používat názvy vycházející například ze zažitého obchodního označení.

Syntetické polymerní materiály, hojně využívané pro svoji schopnost tvářet se (za určitých podmínek). Mají kromě specifického složení také specifické vlastnosti závislé na jejich struktuře. Společné specifické vlastnosti pro většinu polymerů jsou malá hustota, odolnost proti korozi, velká variabilita výsledných vlastností, dobré elektroizolační a tepelněizolační vlastnosti. Ovšem nejsou to jenom tyto vcelku pozitivní vlastnosti. Mezi ty nežádoucí patří malá pevnost (ve srovnání s kovy), nízká tepelná odolnost, hořlavost. V dnešní době je možno většinu těchto negativních vlastností eliminovat přísadami nebo technologií výroby. [2]

Největším problémem je likvidace plastů, které jsou díky své chemické odolnosti špatně odbouratelné, a příroda si s nimi, lépe řečeno s většinou, neumí poradit. Proto je v dnešní době kladen důraz na jejich recyklaci případně částečnou nebo úplnou rozložitelnost. [3]

## 2 STRUKTURA A ROZDĚLENÍ POLYMERŮ

Pojem struktura vyjadřuje, jakým způsobem a podle jakých pravidel jsou uspořádány makromolekuly. Struktura polymerů může být rozdělena do dvou úrovní a těmi jsou chemická struktura, která vyjadřuje samotné uspořádání atomů nebo skupin atomů v makromolekule a na ní závislá struktura fyzikální, která vyjadřuje vzájemné uspořádání samotných makromolekul. [4]

### 2.1 Molekulární (chemická) struktura

Základní strukturu polymeru tvoří makromolekuly se stejným, stále opakujícím se chemickým složením, mery, které jsou samy tvořeny atomy různých prvků. Mery se mohou různě spojovat. Způsob spojování vyjadřuje pojem konstituce.

Polymery se skládají převážně z atomů uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, síry ale i dalších prvků jako jsou například halogeny.

Uspořádání jednotlivých atomů a substituentů v makromolekulách se nazývá konfigurace makromolekul.

Dále se může řetězec otáčet v prostoru, toto otáčení se nazývá konformace makromolekul. [1,4]

#### 2.1.1 Rozdělení polymerů podle konstituce makromolekul

##### a) Polymery lineární

Každý mer je spojen pouze s dvěma mery vedlejším. Vznikají polyreakcí pouze dvojfunkčních jednotek a řetězce jsou vzájemně vázány slabými vazebnými interakcemi.

##### b) Polymery rozvětvené

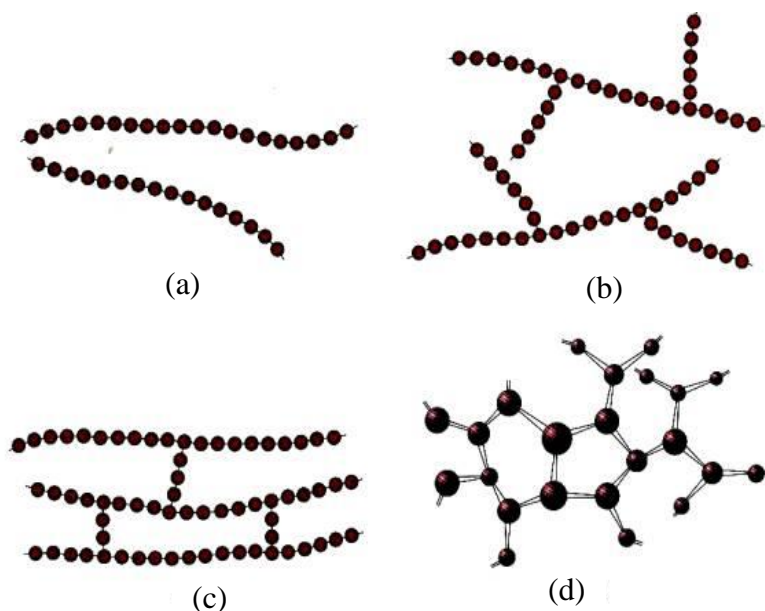
Mery se mohou větvit a v místě rozvětvení vzniká tzv. troj nebo i vícefunkční jednotka. Jako rozvětvené polymery nejsou brány ty, které mají v monomerní jednotce dlouhý substituent. Mají nižší hustotu než lineární polymery. Toto uspořádání je typické pro termoplasty.

##### c) Polymery se zkříženými články

Podobná struktura jako u polymerů lineárních ovšem zde mezi řetězci vznikají kovalentní vazby např. přidáním vícefunkčních sloučenin.

**d) Zesíťované polymery**

Spojení řetězců do prostorové sítě, vznikají jednak polyreakcí troj i vícefunkčních monomerů nebo spojováním lineárních popřípadě větvených makromolekul. [4]



*Obrázek 2: Molekulární struktura polymerů [5]*

**2.1.2 Rozdělení kopolymerů podle konstituce makromolekul**

Kopolymery jsou polymery tvořené polymerací dvou nebo více druhů monomerů. Podle počtu se používá označení biopolymery, terpolymery a quatropolymery.

**a) Statistický kopolymer**

Mery jednotlivých látek jsou uspořádány náhodně.

**b) Alternující kopolymer**

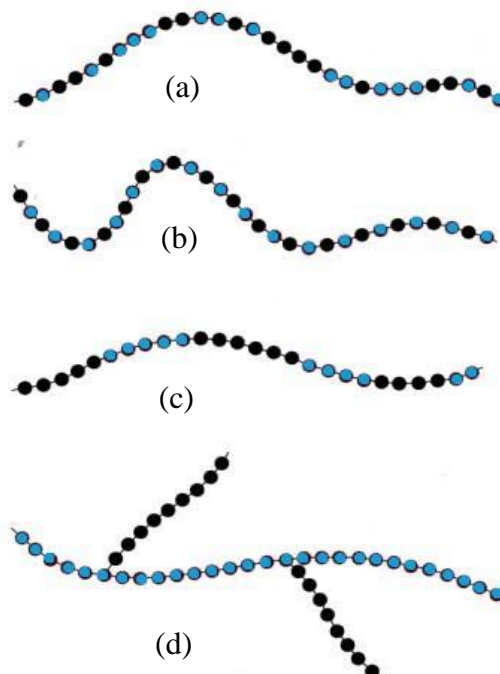
Jednotlivé mery se pravidelně střídají.

**c) Sledový kopolymer**

Mery jednoho polymeru jsou spojeny do delších strukturních jednotek, které se střídají pravidelně se strukturními jednotkami polymeru druhého.

#### d) Roubovaný kopolymer

Na řetězec tvořený měry jednoho polymeru jsou tzv. naroubovány větve tvořené řetězci jiného. [5]



*Obrázek 3: Uspořádání merů  
v kopolymerech [5]*

## 2.2 Nadmolekulární (fyzikální) struktura

Řetězce se mohou nacházet v náhodných konformacích a nejsou schopny se pravidelně uspořádat, takové polymery se označují jako amorfní. V případě že polymer dokáže tvořit uspořádanou strukturu, nese označení krystalický. [6]

### 2.2.1 Rozdělení polymerů podle uspořádání makromolekul v pevné fázi

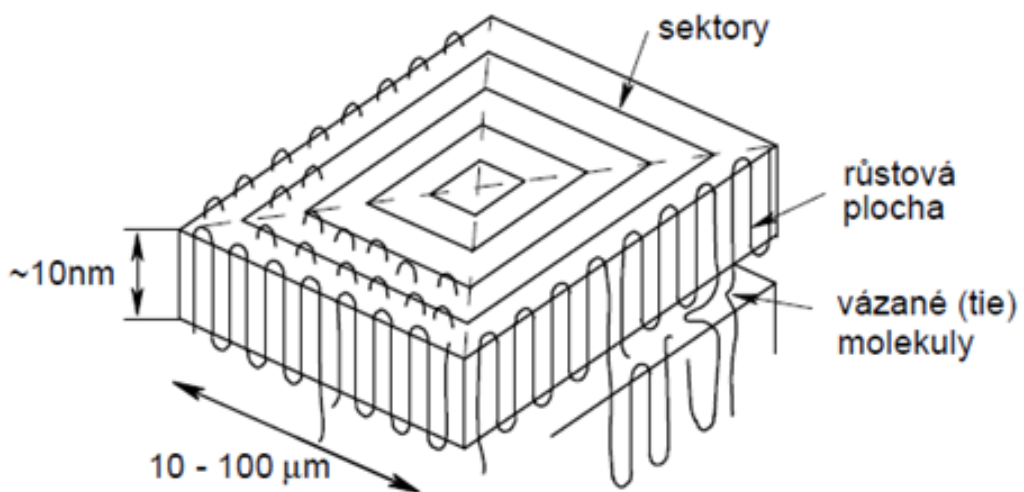
#### 2.2.1.1 Amorfní polymery

Makromolekulární řetězce jsou rozloženy zcela náhodně a nejsou schopny vytvořit pravidelnou strukturu na delší vzdálenost. Náznak pravidelnosti se dá pozorovat pouze u velmi malých částí, které odpovídají cca atomu a jeho nejbližším sousedům. Makromolekula se nachází ve stavu tzv. statistického klubka. [6]

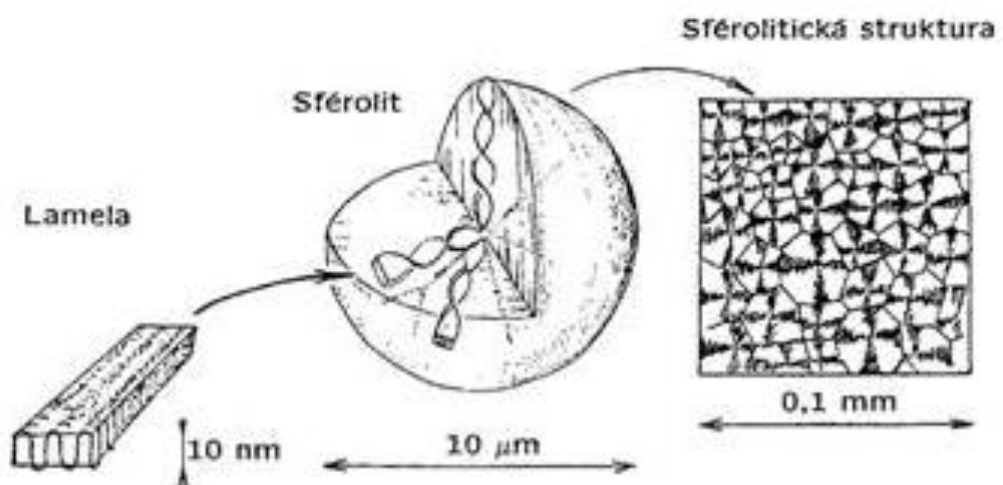
### 2.2.1.2 Krystalické polymery

Řetězce tvoří, vlivem příznivých termodynamických podmínek pravidelné struktury, mezi kterými se nacházejí i amorfní části. Proto je přesnější označení semikrystalický polymer. Žádný polymer se nenachází v plně krystalickém stavu. Vždy obsahuje větší či menší podíl krystalické fáze. Tento podíl se nazývá stupeň krystalinity a má vliv na výsledné vlastnosti polymeru. [4,6]

Pokud polymer krystalizuje z velmi zředěného roztoku, vytváří se tzv. lamely, které se mohou označovat i jako monokrystaly. Při krystalizaci z taveniny lamely přecházejí v tzv. fibrily a ty mohou tvořit sférolit, což je kulovitá částice složená právě z radiálních fibril.



Obrázek 4: Lamelární monokrystal [1]



Obrázek 5: Schéma tvorby sférolitické struktury [1]



V případě dostatečně rychlého ochlazení taveniny, tudíž bude mít polymer malou krystalinitu, nemusí vůbec k vytvoření sférolitu dojít a vznikne struktura, ve které jsou uspořádané části volně dispergovány v amorfním prostředí. A nebo také nemusí krystalovat vůbec. [1,6]

### 2.2.2 Dělení polymerů podle termického chování



**Obrázek 6:** Disperze uspořádaných částí  
v amorfním prostředí [1]

Toto rozdělení nejlépe vystihuje obrázek č. 7, ze kterého je zřejmé že polymery je možno dělit na elastomery a plasty. Toto rozdělení je na základě vlastností při pokojové teplotě. Plasty lze poté rozdělit na termoplasty a reaktoplasty tady se jedná o chování za zvýšených teplot. [6]

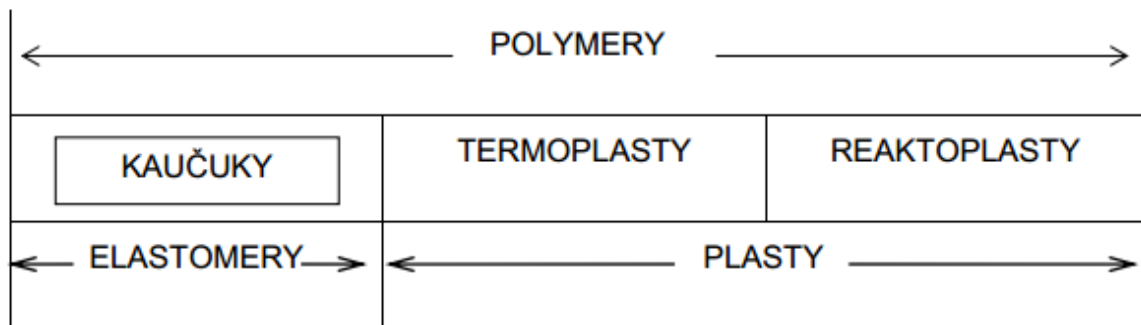
#### 2.2.2.1 Elastomery

Elastomery se vyznačují vysokou elasticitou. Jejich vratná (elastická) deformace může dosahovat i kolem 800% původní délky materiálu. Při takových prodloužení se elastomer vrátí do původního stavu zcela neporušen. Početnou skupinou elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se následně vyrábí pryže. [6]

#### 2.2.2.2 Plasty

Plasty jsou skupinou polymerních materiálů, které jsou za běžné teploty poměrně tvrdé. Při vyšších teplotách se tyto materiály stávají plastické a dají se tvarovat.

- a) Termoplasty - změna z pevné do plastického stavu je vratná, nedochází ke změně chemické struktury
- b) Reaktoplasty - změna z pevného do plastického stavu je nevratná, během termických změn dochází ke změně chemické struktury a dalším zahříváním se začne polymer rozkládat. [6]

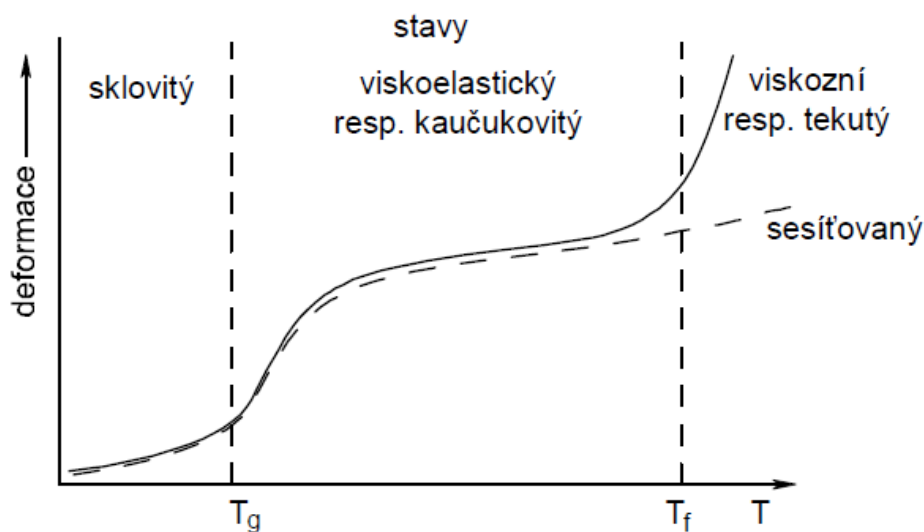


*Obrázek 7: Rozdělení polymerů podle termického chování [6]*

### 3 TERMICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ

Tato skupina vlastností úzce souvisí s nadmolekulární ale i s molekulární strukturou polymerů. Termické chování polymerů dobře vystihuje tzv. termomechanická křivka, kterou se sleduje vzniklá deformace v závislosti na rostoucí teplotě při konstantním zatížení polymeru. Jinak se bude chovat polymer amorfní, jinak polymer krystalický. [1,4]

#### 3.1 Termické chování amorfních polymerů



Obrázek 8: Termomechanická křivka pro amorfní polymer [1]

V uvedené termomechanické křivce se nacházejí tři, pro amorfní polymer charakteristické oblasti. V každé z nich se amorfní polymer nachází v určitém stavu a navzájem tyto stavy oddělují charakteristické teploty.

##### 3.1.1 Teplota skelného přechodu ( $T_g$ )

Tato teplota odděluje stav sklovitý od stavu viskoelastického. Pod  $T_g$  ustává pohyb segmentů (20-50 řetězcových atomů). Pod touto teplotou se projevuje pouze tepelný pohyb atomů a menších skupin. Polymer je v tomto stavu křehký a chová se jako sklo. [1,4]

##### 3.1.2 Teplota tečení ( $T_f$ )

Teplota tečení odděluje stav viskoelastický a stav viskózní (tekutý). Mezi  $T_g$  a  $T_f$  se projevuje pohyb segmentů. Polymer se stává houževnatým a chová se pružně. Kaučuky se v této oblasti chovají viskoelasticky. Nad teplotou  $T_f$  jsou překonány mezimolekulární síly a účinkem zatížení polymer začíná téct. Zesítované polymery tuto oblast nemají.[1]

### 3.2 Termické chování krystalických polymerů

Pro krystalické polymery je charakteristická pouze jedna teplota a to  $T_m$ . Jedná se o teplotu tání krystalického polymeru. [1]



*Obrázek 9: Termomechanická křivka pro krystalický polymer [1]*

#### 3.2.1 Teplota tání ( $T_m$ )

V krystalických polymerech mnohem více působí mezimolekulární síly. Pohyb segmentů se projeví až od teploty  $T_m$ , u které se uspořádaná struktura rozbíjí skokem a vzniká tavenina. [1,4]

## 4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ

Mechanické vlastnosti materiálu vyjadřují, jak moc je schopen materiál odolávat mechanickému namáhání. Reakce materiálu na vnější zatížení je dána čtyřmi faktory:

1. Zatížením, které způsobuje vnější síla.
2. Zkušebním tělesem, což je těleso s definovaným tvarem a rozměry.
3. Materiálem, který je definován molekulární a nadmolekulární strukturou.
4. Podmínkami zkoušky. To jsou například teplota, vlhkost a také samotný postup zkoušky.

Mezi základní mechanické vlastnosti patří pružnost, pevnost, plasticita, houževnatost a tvrdost. Tyto vlastnosti jsou testovány různými metodami, aby mohlo být zjištěno, jestli je možné materiál použít pro požadovanou aplikaci a také proto, aby mohly být mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů vzájemně porovnávány.

Kvůli vzájemnému porovnávání a reprodukci výsledků mechanických zkoušek, musejí být podmínky zkoušek přesně definované, a proto je lze dělit podle různých kritérií:

- a) podle způsobu zatížení – tahová zkouška, tlaková zkouška, ohybová zkouška, zkouška krutem, zkouška ohybem
- b) podle stavu napjatosti – jednoosé zkoušky, víceosé zkoušky
- c) podle časového zatížení působícího na těleso – statické zkoušky, dynamické zkoušky, krátkodobé zkoušky, dlouhodobé zkoušky
- d) podle fyzikálních podmínek – zkoušky za různých teplot, zkoušky v různých prostředích
- e) podle účinků zatěžovacích sil na těleso – destruktivní zkoušky, nedestruktivní zkoušky

Tyto kritéria se obvykle při zkouškách vzájemně kombinují, aby bylo možné zjistit, jak se bude materiál chovat v prostředí, ve kterém má být uplatněn, a jak bude reagovat na vnější podněty, které by měl snášet. [7, 8]

## 4.1 Tahová Zkouška

Tahová zkouška je jedna z nejdůležitějších mechanických zkoušek pro hodnocení pevnosti materiálu. Řadí mezi zkoušky destruktivní, tudíž pro zjištění potřebných informací musí dojít k trvalé deformaci materiálu, při nejlepším k jeho porušení. Také je to zkouška statická, poněvadž se působí konstantním zatížením nebo změna zatížení probíhá pomalu. A nakonec i jednoosá a krátkodobá. [8]

V případě kdyby byl materiál izotropní, byly by síly působící v každém bodě řezu zkoušeného tělesa rozloženy rovnoměrně. Ovšem tento stav prakticky neexistuje. [8, 9]

V České republice je mechanické testování polymerních materiálu upraveno normami ČSN EN ISO 527 1-4.

### 4.1.1 Příprava zkušebních těles pro tahovou zkoušku

Zkušební tělesa mohou být připravovány dvěma způsoby. Buď je těleso připraveno přímo ze zkoušeného materiálu některým technologickým postupem např. vstřikováním. Nebo se vyřízne část výrobku a ta se strojně opracuje.[8]

Další důležitou částí přípravy před samotným měřením je tzv. kondicionání, což je několikahodinové uskladnění v klimatizovaném boxu nebo v místnosti, se stálou teplotou a vlhkostí, kde poté bude probíhat samotná zkouška. [8]

### 4.1.2 Charakteristické veličiny a pojmy pro tahovou zkoušku

#### 4.1.2.1 Tahové napětí

Napětí je veličina, která vyjadřuje sílu  $F$  působící na určitou plochu tělesa  $S$  v jeho průřezu při mechanickém namáhání materiálu. Jednotkou této veličiny je  $N \cdot m^{-2}$ .

V materiálu při jeho zatížení vynikají dva typy napětí. Napětí, které vzniká v ose působící síly kolmo na sledovaný průřez, se nazývá normálové. Značí se malým řeckým písmenem sigma a matematicky se dá vyjádřit následovně. [8]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Při namáhání tahem se průřez tělesem zmenšuje (často i docela zásadně) proto byl zaveden pojem smluvní napětí, které je vztaženo na počáteční plochu průřezu zkušební tělesa, která se značí  $S_0$ . [9]

Druhý typ napětí je tzv. tangenciální neboli tečné. Tečné napětí vzniká rovnoběžně se sledovaným průřezem a je tedy kolmé na normálové napětí. Toto napětí se značí malým řeckým písmenem  $\tau$  a je dáno silou  $F$  působící v rovině průřezu  $S_0$ . [9]

$$\tau = \frac{F}{S_0} \quad (2)$$

#### 4.1.2.2 Poměrné přetvoření (deformace v tahu)

Kromě průřezu namáhaného tělesa se pochopitelně mění i jeho délka. Oba tyto jevy, jak změnu průřezu, tak i změnu délky, popisuje poměrné přetvoření, které se značí nejčastěji malým řeckým písmenem  $\epsilon$ . Pokud je sledována změna délky tak je možné poměrné přetvoření (prodloužení) zapsat následujícím vztahem, ve kterém  $l$  vyjadřuje konečnou délku a  $l_0$  délku počáteční.

$$\epsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

V případě že je sledována změna průřezu tak lze poměrné přetvoření zapsat následovně. Písmena  $S_0$  a  $S$  vyjadřují počáteční respektive konečný průřez zkušebního tělesa. [9]

$$\epsilon_S = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} \quad (4)$$

Z matematických vyjádření je zřejmé, že poměrná přetvoření jsou veličinami bezrozměrnými, ale často se vyjadřují v procentech. Poměr těchto dvou veličin se nazývá Poissonovo číslo a značí se malým řeckým písmenem  $\mu$  a je bezrozměrné. [9]

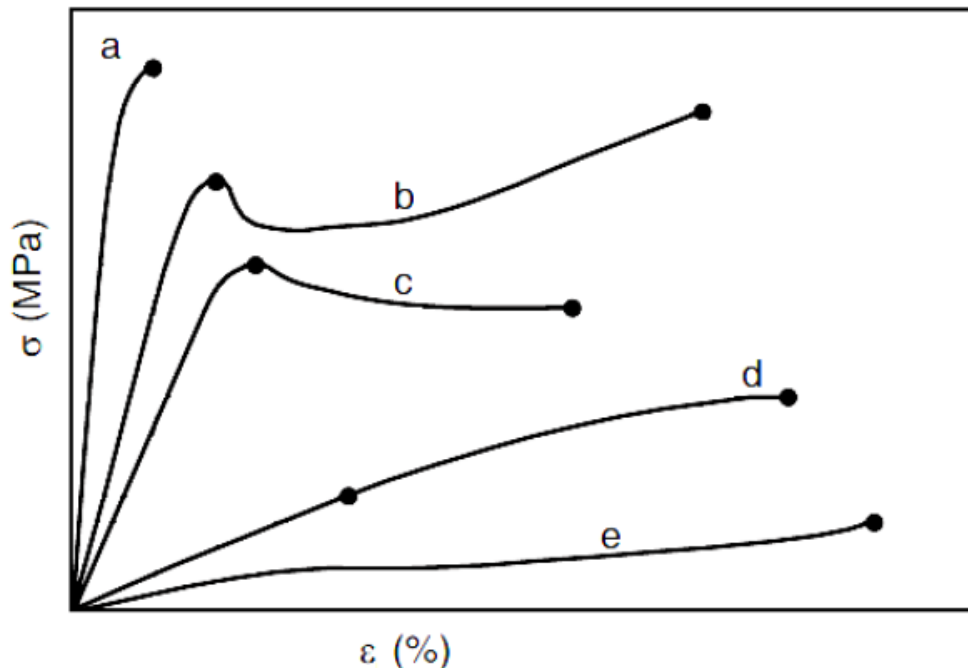
$$\mu = \frac{\epsilon_S}{\epsilon_l} \quad (5)$$

Poissonovo číslo je charakteristická veličina pro každý materiál a může nabývat hodnotu od 0,3 do 0,5. [3]

#### 4.1.2.3 Pracovní diagram tahové zkoušky

Pracovní diagram vyjadřuje závislost mezi napětím a poměrným přetvořením materiálu. Tento diagram se po neměření vyhodnocuje a jsou z něj zjišťovány požadované veličiny, které jsou popsány níže. [10]

Na následujícím grafu můžeme vidět průběh tahové zkoušky pro různé materiály. Křivka a) znázorňuje průběh deformace křehkého materiálu. Křivky b), c) jsou charakteristické pro houževnaté materiály s mezí kluzu. Křivka d) znázorňuje průběh tahové zkoušky pro houževnatý materiál bez meze kluzu a křivka e) je elastomer. [10]



*Graf 1: Pracovní diagramy tahové zkoušky pro různé materiály [11]*

#### 4.1.2.4 Modul pružnosti (Youngův modul)

V počáteční části tahové křivky, také se označuje jako oblast elastické deformace, je závislost napětí na přetvoření více či méně lineární nebo alespoň lze aproximovat přímkou. Rovnice této přímky se nazývá Hookův zákon a právě modul pružnosti je směrnice této přímky. Lze také říct, že modul pružnosti je konstanta úměrnosti mezi působícím napětím a poměrným přetvořením namáhaného tělesa. [10]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

Kde:  $\sigma$  – tahové napětí [MPa]

$E$  – youngův modul [MPa]

$\varepsilon$  – poměrné přetvoření [–]



#### 4.1.2.5 *Mez úměrnosti*

Je to mezní napětí, do kterého platí Hookův zákon. Reálně ovšem k malé deformaci dochází již při malém zatížení testovaného tělesa. Proto je většinou mez úměrnosti definována jako mezní napětí, po kterém zůstane těleso prodloužené o 0,01%. [10]

#### 4.1.2.6 *Horní mez kluzu*

Znázorňuje bod na tahové křivce, do kterého stále roste deformace, ale začíná klesat napětí. V tomto bodě dochází ke tvorbě krčku a v místě krčku dochází k orientaci molekul ve směru tahového napětí. Zároveň dochází k deformačnímu zpevnění. [10]

#### 4.1.2.7 *Dolní mez kluzu*

Bod na tahové křivce následující po horní mezi kluzu, do kterého stále klesá napětí. Za dolní mezi kluzu napětí i deformace testovaného tělesa roste. V tomto bodě skončilo orientování molekul a dochází k dalšímu protahování tělesa. [10]

#### 4.1.2.8 *Smluvní mez kluzu*

Některé materiály nemají zřetelné meze kluzu, proto se stanovuje tzv. smluvní mez kluzu. Tato mez je definována jako průsečík tahové křivky s přímkou, která je vedena z bodu o určené deformaci (např. 1%) a zároveň je rovnoběžná s lineární částí tahové křivky. [10]

#### 4.1.2.9 *Mez pevnosti v tahu*

Vyjadřuje maximální zatížení vztažené na počáteční průřez testovaného tělesa. I když k přetržení dochází až později při nižším napětí. Reálná mez pevnosti je mnohem menší než pevnost vypočtená z mezimolekulárních sil. Důvodem je výskyt poruch v materiálu, které pevnost radikálně snižují. Matematické vyjádření ukazuje vzorec (6). [9,10]

$$\sigma_M = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (6)$$

## 4.2 **Ohybová zkouška**

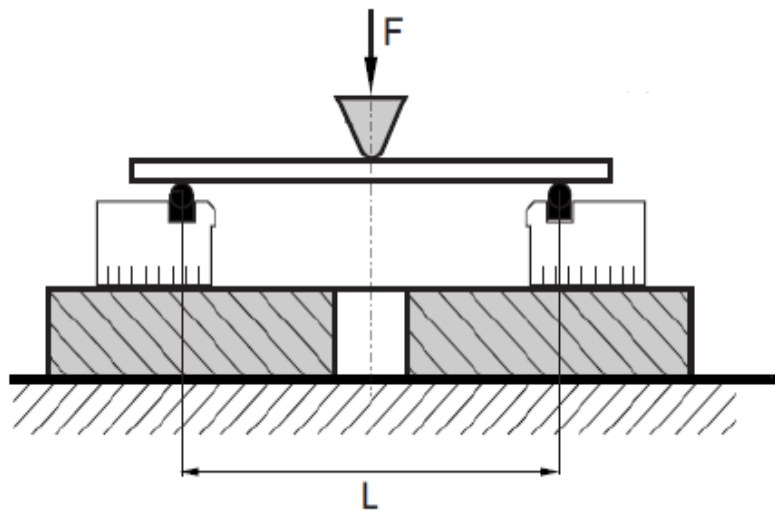
Ohybové zkoušky jsou se zkouškou tahovou nejdůležitější zkoušky mechanických vlastností materiálu. Dle ohybového chování lze plasty rozdělit na houževnaté a křehké. Houževnaté plasty se prohnu, ale zůstanou neporušené. Křehké plasty v určitém průhybu prasknou.

Zkoušky ohybem se řadí mezi zkoušky statické.

Zkouška tříbodovým ohybem spočívá v tom, že je testované těleso podepřeno na dvou místech podpěrami. Obvykle jsou to kalené ocelové válečky. A z horní strany působí v ose, mezi podpěrami, síla kolmo na těleso.

Další možnost ohybové zkoušky je čtyřbodový ohyb. Uspořádání této zkoušky je podobné ovšem z horní strany na těleso působí síla se dvěma působišti, které jsou vzdáleny stejně od obou podpěr.

Čtyřbodový ohyb je méně využíván kvůli složitosti aparatury ale má i své výhody jako je konstantní ohybový moment a menší smykové napětí než u tříbodového ohybu. [9,10]



**Obrázek 10:** Uspořádání ohybové zkoušky tříbodovým ohybem [18]

#### 4.2.1 Charakteristické veličiny a pojmy pro ohybovou zkoušku

##### 4.2.1.1 Ohybové napětí

Napětí v ohybu se počítá podle následujícího vzorce:

$$\sigma_f = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F \cdot L}{4}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (7)$$

Kde:  $M$  – ohybový moment [ $N \cdot mm$ ]

$W$  – moment odporu v ohybu [ $mm^3$ ]

$F$  – síla [ $N$ ]

$L$  – vzdálenost podpěr [mm]

$b$  – šířka zkušebního tělesa [mm]

$h$  – tloušťka zkušebního tělesa [mm]

#### 4.2.1.2 Poměrné přetvoření (deformace v ohybu)

Deformace v ohybu lze vypočítat následovně:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot y \cdot h}{L} \quad (8)$$

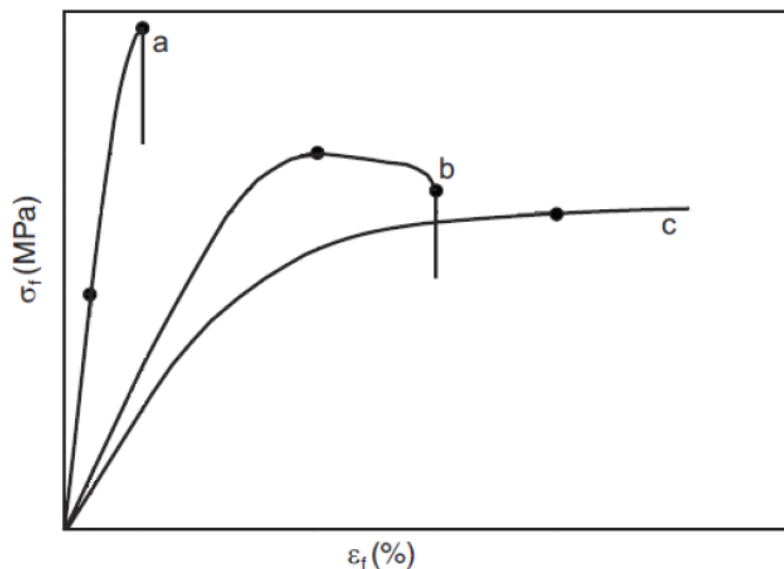
Kde:  $L$  – vzdálenost podpěr [mm]

$y$  – velikost průhybu [mm]

$h$  – tloušťka zkušebního tělesa [mm], [10]

#### 4.2.1.3 Pracovní diagram ohybové zkoušky

Pracovní diagram vypadá podobně, jako u tahové zkoušky na následujícím grafu jsou znázorněny ohybové křivky pro a) křehký (lámavý) materiál, b) houževnatý materiál s mezí kluzu, c) houževnatý materiál bez meze kluzu (obr. 12). [9]



**Graf 2:** Pracovní diagramy ohybové zkoušky pro různé materiály [10]

### 4.3 Rázová zkouška

Rázové zkoušky se řadí mezi zkoušky dynamické. Napětí působí v krátkém časovém intervalu a je sledováno, kolik energie se spotřebuje na destrukci tělesa. K porušení dochází buď houževnatým, nebo křehkým lomem. Houževnatý lom je charakterizován molekulárními změnami, jako je kluz a částečné rozbalení makromolekulárních klubek. Křehký lom vzniká v místě trhliny a dochází zde k porušení hlavních a vedlejších vazeb, tudíž je potřeba nižší energie na destrukci zkušební tělesa.

Houževnaté materiály se při rázovém namáhání chovají podobně, jako materiály křehké, tento jev je tím výraznější, čím je rychlejší ohyb testovaného tělesa.

Rázovými zkouškami je měřena tzv. rázová houževnatost, která je definována jako odolnost materiálu proti nárazu. Nebo může být měřena vrubová houževnatost, což je rázová houževnatost těles, které jsou opatřeny vrubem a tím pádem je energie na přeražení menší.

Rázové zkoušky lze dělit podle způsobu namáhání na rázové zkoušky v tahu, tlaku, ohybu a v krutu. Z nichž je nejdůležitější rázová zkouška v ohybu. [10]

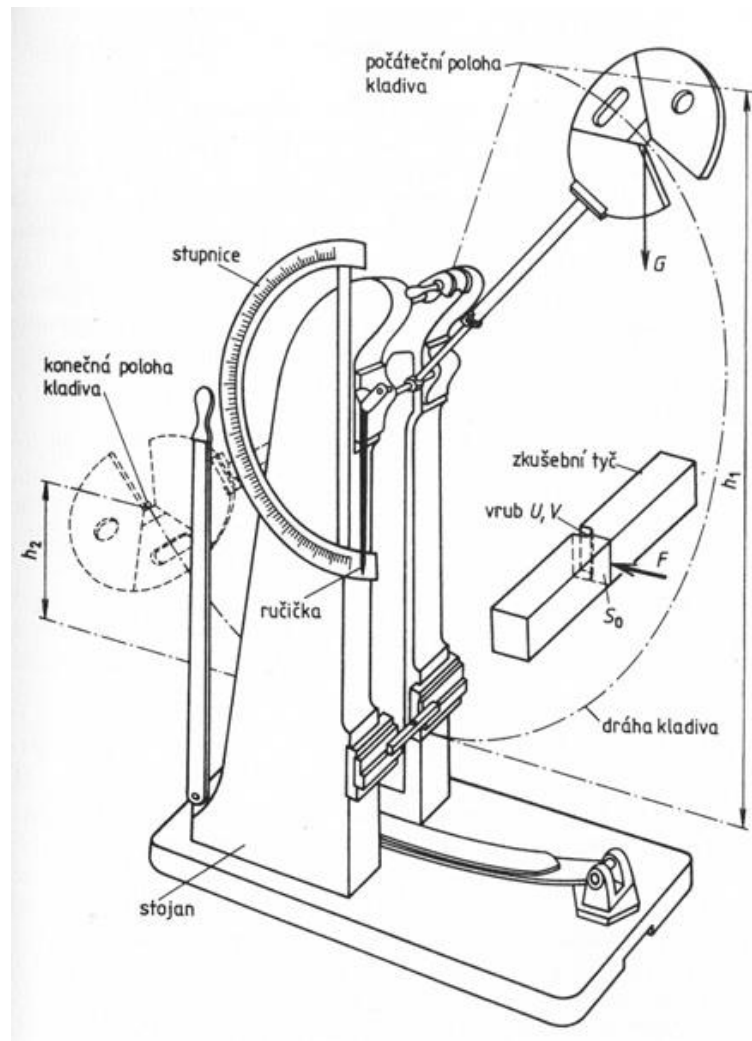
#### 4.3.1 Metoda Charpy

Při této metodě dochází k přeražení zkušební tělesa za pomoci kyvadla se závažím tzv. Charpyho kladiva. Tvar zkušební tělesa je zpravidla hranol, který může, ale také nemusí být opatřen vrubem různého tvaru i hloubky. Rozměry zkušebních těles i vrubů pro jednotlivé materiály udávají příslušné normy.

Princip zkoušky je v porovnání výšky, do které kladivo dokmitne bez zkušební tělesa a s ním. Zkušební těleso se umísťuje do prostoru se dvěma podpěrami tak aby bylo v trajektorii padajícího kladiva. Pokud je opatřeno vrubem, tak musí být vrub uprostřed, přímo v cestě padajícího kladiva.

Další důležitou součástí kladiva je stupnice s ukazatelem, který je unášen kyvadlem. Na stupnici je znázorněna energie potřebná k přeražení tělesa nebo výška, ze které se následně

energie počítá. Na následujícím obrázku je zobrazeno kladivo, zkušební těleso a také je zde naznačen průběh zkoušky. [12]



**Obrázek 11:** Charpyho kladivo a zkušební těleso opatřené vrubem [13]

#### 4.3.1.1 Vyhodnocení zkoušky

Pokud není na stupnici vyobrazena výsledná energie je potřeba ji spočítat z počáteční a koncové výšky, které kladivo dosáhne. Výsledná energie je složena z pěti částí, které se vzájemně sčítají. Tyto části vyjadřují jednotlivé energie potřebné na:

- iniciaci trhliny,
- šíření trhliny,
- odhození přeražených částí tělesa,
- ztráty v ložiskách, odpor vzduchu a posuv ukazatele,

e) vynesení kyvadla do konečné výšky.

Práce potřebná na všechny tyto úkony lze vypočítat z následujícího vzorce.

$$A_n = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad (9)$$

Kde:  $m$  – hmotnost kladiva [kg]

$g$  – gravitační zrychlení; [9,81 m.s<sup>-2</sup>]

$h_1$  – výška které dosáhne kladivo bez vzorku [m]

$h_2$  – výška které dosáhne kladivo po přeražení vzorku [m]

Je-li  $A_n$  vztažena na jednotku plochy řezu zkušebního tělesa tak se jedná o již dříve zmiňovanou rázovou houževnatost, je definována jako odolnost materiálu proti tvorbě křehkého lomu a lze spočítat podle vzorce (10), její jednotkou je tedy kJ/m<sup>2</sup>.

$$a_n = \frac{A_n}{S} \cdot 10^3 \quad (10)$$

V případě tělesa oslabeného vrubem je třeba vzít v úvahu i vrub a lze pomocí předchozího vzorce vypočítat tzv. vrubovou houževnatost kde  $S$  je plocha zkušebního tělesa oslabena vrubem v mm. [10]

#### 4.3.1.2 Metoda instrumentovaná

Na rozdíl od klasické Charpyho metody není výsledkem pouze energie potřebná na přelomení zkušebního vzorku. Výstupem instrumentované metody rázové zkoušky je křivka závislosti síly na průhybu zkušebního tělesa. Plocha pod křivkou po integraci vyjadřuje práci potřebnou na přelomení vzorku. Základní rozdíl aparatury je v tom, že břit kladiva obsahuje tenzometry, které měří již zmiňovaný průhyb i sílu. [12]

## 5 CHARAKTERISTIKA A TOPOGRAFIE POVRCHU

Na topografii povrchu materiálu značně závisí jeho vlastnosti. Proto je dobré umět topografii zachytit a poté správně charakterizovat popřípadě upravit podle potřeby. I zdánlivě dokonale hladké povrchy, jako je například povrch leštěného křemíku obsahuje topografické nerovnosti, ovšem na jejich zobrazení je potřeba velmi citlivé techniky jako je mikroskopie atomových sil.

Pro charakteristiku povrchu se používají dvě veličiny. Těmi jsou průměrná drsnost (RA) a střední kvadratická odchylka drsnosti (RMS) lze je vypočítat podle vzorců (10), (11) obě veličiny jsou v  $\mu m$ . [15,16]

$$RS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i - \bar{z}| \quad (11)$$

Kde:  $N$  – počet měření

$\bar{z}$  – průměrná výška nerovností [ $\mu m$ ]

$z_i$  – výška jednotlivých nerovností [ $\mu m$ ]

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (11)$$

### 5.1 Rozdělení topografických metod

Topografické metody kvantitativně i kvalitativně popisují povrch materiálu, lze je dělit podle toho, jestli zobrazují pouze plochu nebo prostor na 2D respektive 3D metody. Další možnost dělení topografických metod je podle interakce přístroje, popřípadě podnětu vytvořeného přístrojem, se zkoumaným povrchem na kontaktní a bezkontaktní metody.

- a) Kontaktní metody – přístroj je v přímém kontaktu s povrchem materiálu a může dojít až ke značné deformaci vzorku
- b) Bezkontaktní metody – ke kontaktu se vzorkem dochází zprostředkovaně např. pomocí elektromagnetického vlnění, mechanického vlnění nebo proudu částic. Vyhodnocují se poté modifikované signály zachycené detektorem [15]

V následující části jsou popsány vybrané metody, které zobrazují především mikrostrukturu povrchu materiálů. [15]

## 5.2 Optická mikroskopie

Tato metoda patří mezi metody bezkontaktní. Slouží jako prvotní náhled na topografii povrchu materiálu. Podle poznatků zjištěných touto zobrazovací metodou se poté volí metoda další, kterou lze pozorovat povrch ve větším rozlišení.

Optická neboli světelná mikroskopie využívá k zobrazení elektromagnetické záření z oblasti viditelného spektra (390-790 nm).

Nevýhodou této metody je malá hloubka ostroty a relativně malé rozlišení ve srovnání s ostatními metodami. [16]

## 5.3 SEM (elektronová mikroskopie)

Metoda skenovací elektronové mikroskopie patří mezi bezkontaktní metody a využívá k zobrazení proud urychlených elektronů. Tento proud je usměrňován pomocí tzv. elektromagnetických čoček a vzorek je tímto způsobem rastrován. Elektrony jsou po interakci s povrchem zachycovány na detektor, patřičně zesíleny a následně je vytvořen výsledný obraz. Primárně získáváme touto metodou 2D obraz povrchu který lze převést na 3D nasnímáním povrchu z více úhlů a následným složením obrazů.

Mezi výhody této metody patří velká hloubka ostroty, vysoké rozlišení v závislosti na urychlovacím napětí elektronu.

Nevýhodou je například nutnost udržovat vakuum uvnitř tubusu elektronového mikroskopu. Nutnost vodivosti vzorku, která lze ovšem zajistit jeho pokovením. [16]

## 5.4 AFM (mikroskopie atomových sil)

Mikroskopie atomárních sil využívá k zobrazení povrchu silovou interakci mezi sondou a povrchem materiálu. Může se jednat o kontaktní ale i bezkontaktní metodu v závislosti na zvoleném režimu snímání.

Povrch vzorku je rastrován pomocí sondy a rozlišení je závislé na průměru hrotu, který by měl být ideálně cca 0,2 nm, ovšem reálně se dosahuje nejméně cca 3 nm.



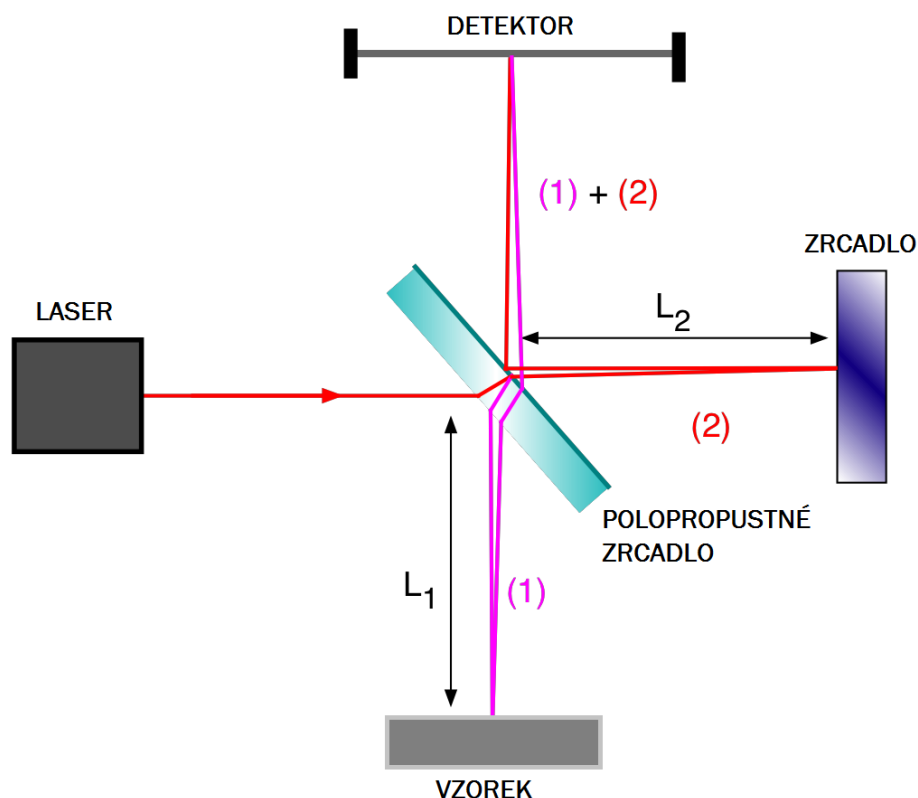
Poloha sondy je určována odrazem laserového paprsku od nosníku, na kterém je sonda umístěna. Odražené koherentní záření dopadá na detektor a pomocí PC je vytvořen výsledný obraz topografie povrchu.

Mikro posuv sondy zajišťují piezoelektrické části, které jsou zvlášť pro posuv v osách  $x$ ,  $y$  a v ose  $z$ . Získáváme tedy 3D informace o povrchu a ze získaných souřadnic lze pomocí příslušného softwaru vytvořit 3D zobrazení. [16]

## 5.5 Laserová interferometrie

Jedná se o metodu bezkontaktní, která využívá lomu, odrazu a následné interferenci elektromagnetického záření. Interferuje paprsek odražený od zrcadla (referenční) a paprsek odražený od povrchu materiálu. Interferenční obraz je poté promítnut na detektor (např. CCD kamera) a v počítači je vytvořen obraz topografie povrchu.

Mohou být poskytovány 3D informace o povrchu materiálu. [16]



**Obrázek 12:** Princip laserové interferometrie (Michelsonův interferometr) [15]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 EXPERIMENT

Experiment spočíval v tom, že byly změřeny mechanické vlastnosti polymerní směsi materiálu zvaného scanblend. Poté byly změřeny mechanické vlastnosti dalších polymerů a to konkrétně polystyrenu (PS) a polypropylenu (PP). Tyto měření byly prováděny pro porovnání výsledných hodnot.

### 6.1 Testované materiály

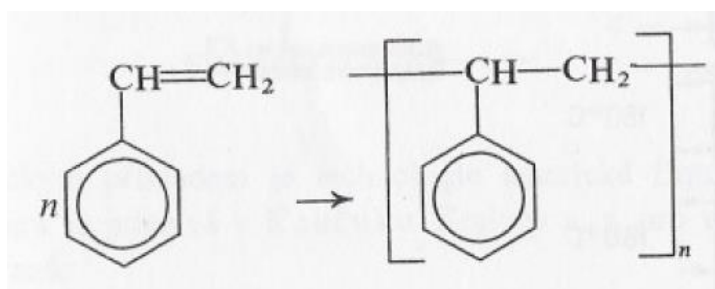
#### 6.1.1 Scanblend (PC/ASA)

Jedná se o polymerní směs složenou z polykarbonátu a akrylonitril-styren-akrylátu. Dále se ve směsi nachází ještě další aditiva ovlivňující jeho vlastnosti. PC a ASA jsou vzájemně nemísitelné, proto se používá tzv. kompatibilizátor.

Kompatibilizátor je látka která upravuje fázové rozhraní uvnitř směsi a způsobuje částečnou mísitelnost směsi.

Výhodou tohoto materiálu je vysoká pevnost, odolnost proti přírodním podmínkám a také proti UV záření. Proto se hojně užívá v automobilovém průmyslu jak pro vnější tak pro vnitřní součásti.

#### 6.1.2 Polystyren (PS)

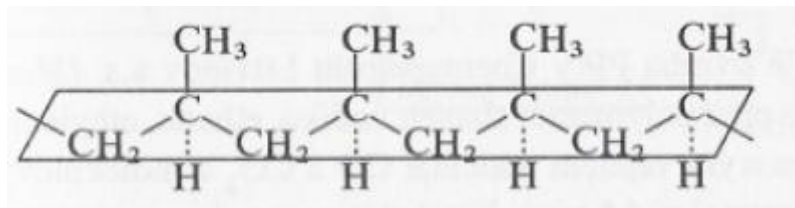


**Obrázek 13:** Strukturální vzorec styrenu a polystyrenu

[14]

Polystyren byl připraven v krystalickém stavu s vysokým podílem krystalinity. V tomto stavu je PS ideálním zástupcem křehkých plastů. Testovány byly dva typy polystyrenu a to konkrétně čirý transparentní a v tahové zkoušce i transparentní žlutý. Vzorky polystyrenu byly vyroben lisováním a aby došlo ke krystalizaci, musely být navozeny potřebné podmínky, jako je vysoká teplota a tlak. [14]

### 6.1.3 Polypropylen (PP)



*Obrázek 14: Struktura izotaktického PP [14]*

Polypropylen je zástupcem houževnatých polymerů. Vyznačuje se svou vysokou tažností, kdy dochází k vytahování jednotlivých vláken v celém objemu vzorku. Polypropylen byl ve stavu amorfním a uspořádání (konstituce) makromolekul bylo izotaktické. [14]

## 6.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla prováděna na univerzálním testovacím přístroji Instron 3345 (obr. 15). Testovaná tělesa všech tří materiálů byly připraveny vstřikováním a před zkouškou byly 4 hodiny kondicionovány při laboratorní teplotě. Teplota před zkouškou a v jejím průběhu byla 22°C a vlhkost vzduchu byla 65%.



*Obrázek 15: Instron 3345*

### 6.2.1 Postup měření

U jednotlivých vzorků byla před zkouškou změřena jejich šířka a tloušťka a určeny další parametry, jako je rychlost namáhání, vzdálenost čelistí a způsob ukončení zkoušky.

Tyto parametry byly poté vloženy do softwaru Instron 2.5 který z nich a ze samotného průběhu zkoušky vyhodnotil potřebné materiálové charakteristiky.

Po zadání parametrů byl vzorek umístěn do pneumatických čelistí a následně bylo zpuštěna zkouška.

### 6.2.2 Parametry tahové metody

Pro všechna měření v tahu byl použit siloměr s maximálním zatížením 5kN a čelisti byly vzdáleny vždy 100 mm. Rozměry byly měřeny u každého tělesa zvlášť a jsou uvedeny u vyhodnocení zkoušky. Zakončení zkoušky bylo nastaveno při 40% poklesu tahového napětí, což odpovídalo porušení vzorku. V následujících tabulkách jsou uvedeny zvolené rychlosti pro zatěžování jednotlivých materiálů. Tyto rychlosti byly zvoleny podle předpokládaného chování testovaných materiálů.

**Tabulka 1:** Zvolená rychlost zatěžování v tahu pro PC/ASA

PC/ASA	A	B
Rychlost zatěžování [mm/min]	5	10
Počet vzorků	10	10

**Tabulka 2:** Zvolená rychlost zatěžování v tahu pro PP

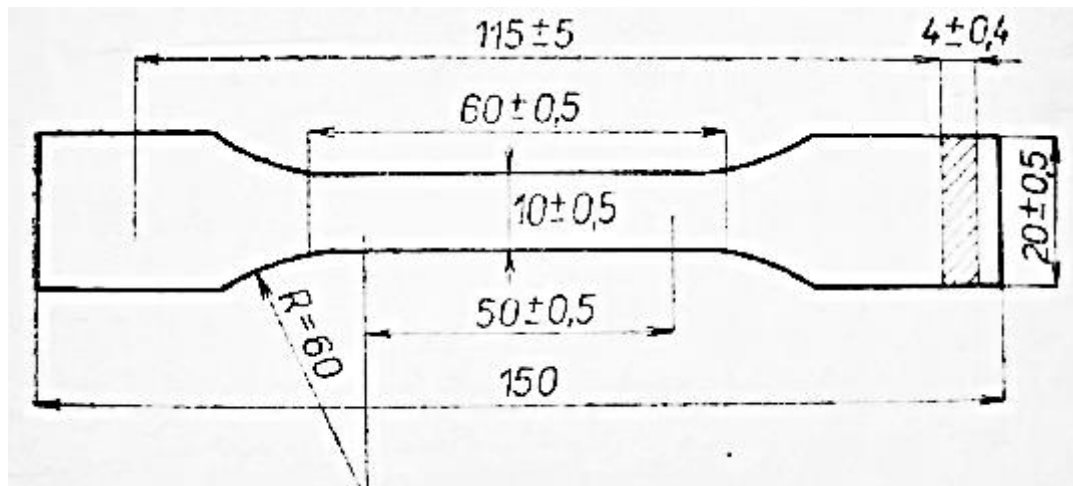
PP	A	B
Rychlost zatěžování [mm/min]	30	50
Počet vzorků	5	5

**Tabulka 3:** Zvolená rychlost zatěžování v tahu pro PS

PS	A	B (čirý)	B' (žlutý)
Rychlost zatěžování [mm/min]	1	2	2
Počet vzorků	5	5	7

### 6.2.3 Zkušební tělesa

Vzorky pro tahovou zkoušku byly ve tvaru standardizované ploché lopatky (obr. 18).



Obrázek 16: Tvar a rozměry vzorku pro tahovou zkoušku [9]

### 6.2.4 Vyhodnocení zkoušky

Tahovou zkoušku vyhodnocoval software propojený s trhacím strojem. Důležité materiálové charakteristiky a grafy průběhu zkoušky jsou uvedeny ve výsledcích.

Software má možnost vyhodnocení modulu pružnosti buď z oblasti křivky, kterou sám vybere, v tomto případě se jedná o automatický modul. Anebo může být oblast pro měření vybrána a navíc lze i určit na kolik částí se má daná oblast rozdělit. Tento modul je značen jako Youngův. V následujících měřeních byly pro Youngův modul subjektivně vybrány nejvhodnější části křivek a byly rozděleny na 6 částí. Podle manuálu k softwaru se automatický modul určuje ze 4 částí a oblast je vymezena rostoucí křivkou. Oblast začíná v počátku křivky a končí v jejím konvexním bodě což je bod, ve kterém se mění rostoucí část křivky v část klesající. Mez pevnosti je vyhodnocována z křivky podle vzorce (6) vyjádřeného v bodě 4.1.2.9.

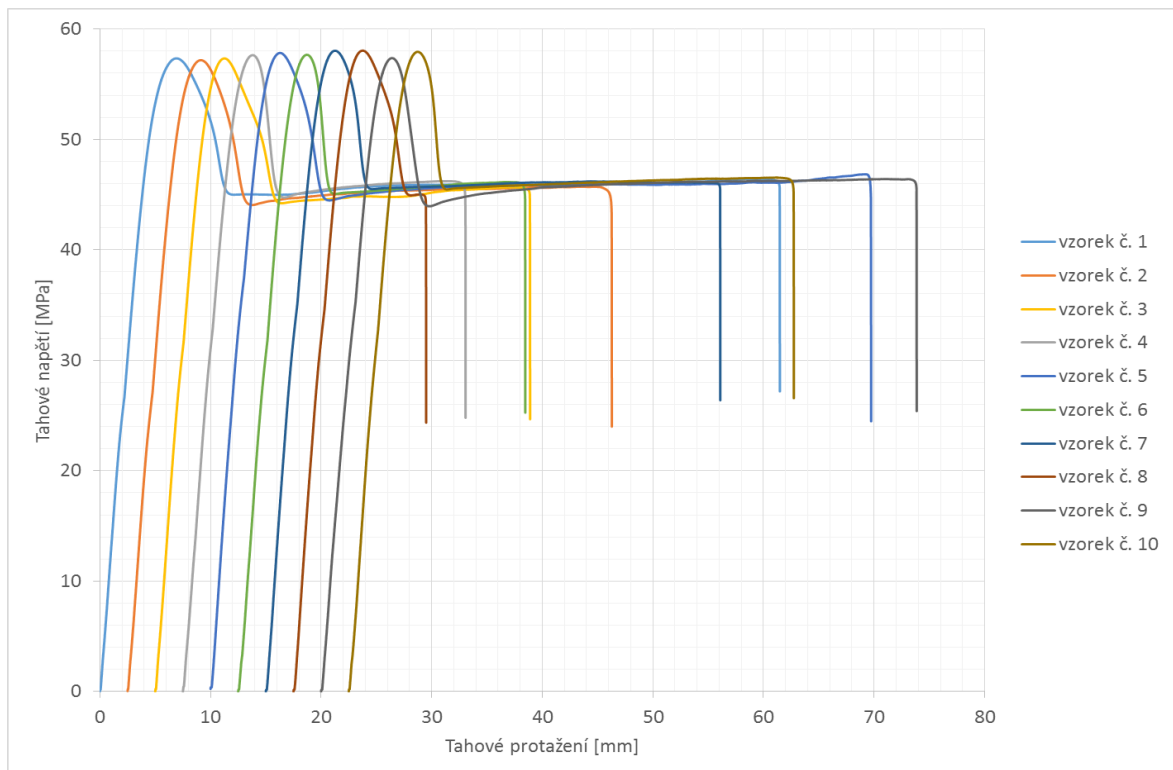
### 6.2.5 Výsledky a diskuse

Důležité materiálové charakteristiky jsou zaznamenány v následujících tabulkách, které jsou doplněny grafy průběhu zkoušek. V grafech 3 - 9 jsou křivky zastupující jednotlivé vzorky vzájemně posunuty o určitou část a barevně odlišeny pro větší přehlednost. Grafy 10 a 11 porovnávají moduly a meze pevnosti všech testovaných materiálů.

### 6.2.5.1 Výsledné hodnoty a průběh zkoušky pro PC/ASA

**Tabulka 4:** Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PC/ASA, rychlost zatěžování 5 mm/min

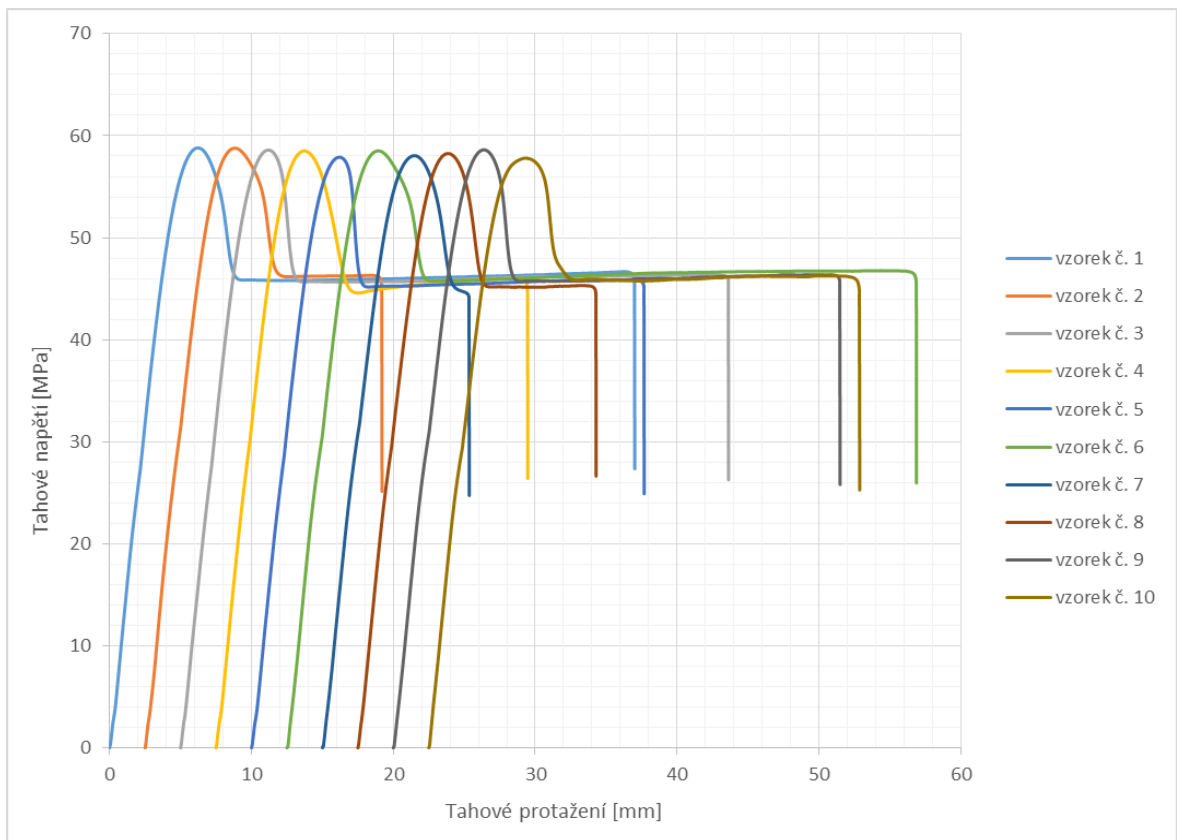
Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Pevnost v tahu $\sigma_M$ [MPa]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,96	10,16	56,3	1363,66	1348,04
2	3,96	10,18	55,1	1389,47	1335,53
3	3,97	10,19	54,3	1428,83	1356,52
4	3,97	10,16	57,6	1333,74	1332,80
5	3,96	10,16	57,6	1436,13	1477,56
6	3,96	10,17	57,7	1366,64	1321,75
7	3,95	10,16	57,9	1433,82	1445,74
8	3,94	10,15	57,8	1430,82	1471,93
9	3,97	10,19	57,4	1247,33	1332,97
10	3,94	10,16	57,9	1466,21	1340,55
<b>Průměr</b>	<b>3,96</b>	<b>10,17</b>	<b>57,0</b>	<b>1390</b>	<b>1376</b>
<b>Chyba</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,4</b>	<b>±20</b>	<b>±20</b>



**Graf 3:** Závislost tahového napětí na protažení PC/ASA, rychlost zatěžování 5 mm/min

**Tabulka 5:** Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PC/ASA, rychlost zatěžování 10 mm/min

Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Pevnost v tahu $\sigma_M$ [MPa]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,97	10,16	56,0	1416,72	1366,24
2	3,97	10,17	55,7	1468,61	1357,64
3	3,98	10,17	58,6	1348,29	1340,99
4	3,97	10,17	53,7	1409,54	1336,40
5	3,99	10,23	57,9	1379,98	1334,28
6	3,97	10,16	58,4	1442,51	1357,16
7	3,98	10,19	58,0	1401,52	1346,80
8	3,97	10,23	58,3	1398,73	1363,28
9	3,97	10,17	58,6	1414,75	1356,94
10	3,97	10,17	57,8	1399,69	1388,25
<b>Průměr</b>	<b>3,97</b>	<b>10,18</b>	<b>57,3</b>	<b>1408</b>	<b>1355</b>
<b>Chyba</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,5</b>	<b>±10</b>	<b>±5</b>



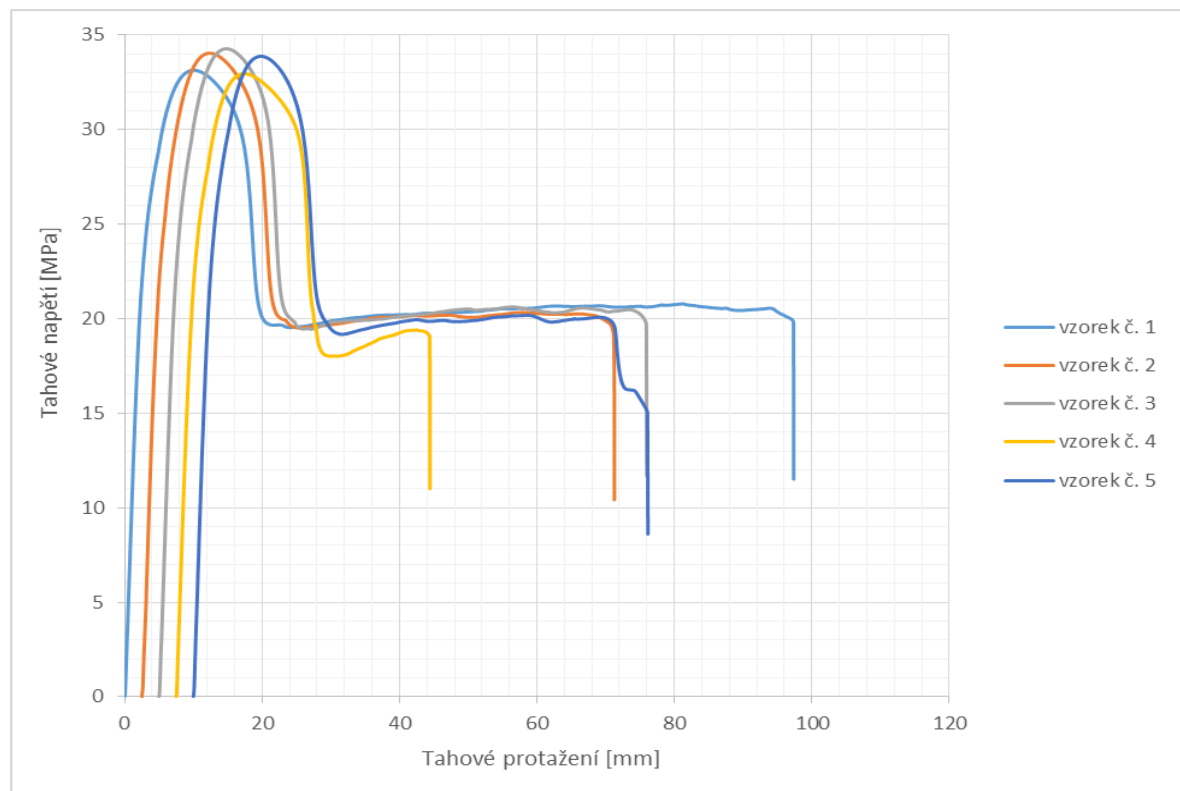
**Graf 4:** Závislost tahového napětí na protažení PC/ASA, rychlost zatěžování 10 mm/min



## 6.2.5.2 Výsledné hodnoty a průběh tahové zkoušky pro PP

Tabulka 6: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PP, rychlost zatěžování 50 mm/min

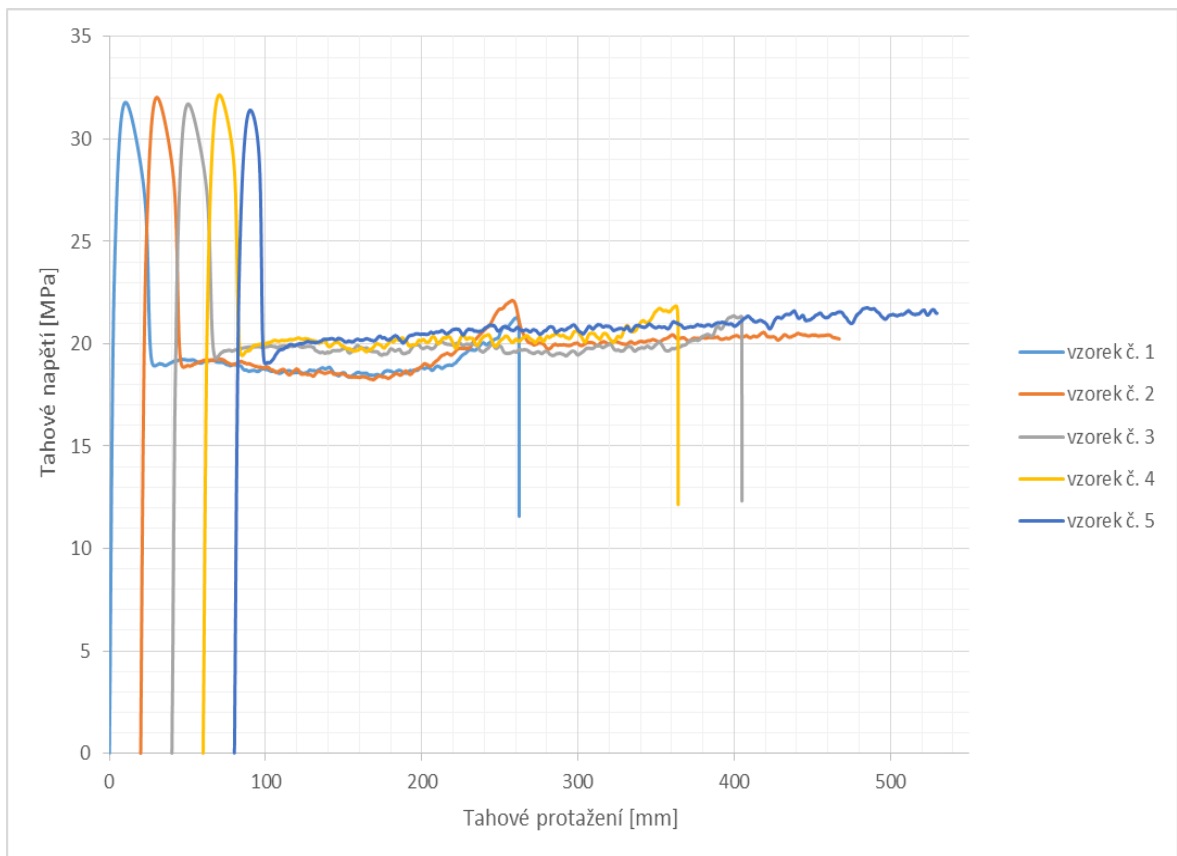
Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Pevnost v tahu $\sigma_M$ [MPa]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,87	10,02	33,15	1052,22	1000,24
2	3,87	10,02	34,05	1121,45	1023,95
3	3,87	10,01	34,28	1081,65	1034,68
4	3,88	9,98	32,96	1040,63	992,20
5	3,86	10,02	33,88	1083,47	1030,86
<b>Průměr</b>	<b>3,87</b>	<b>10,01</b>	<b>33,7</b>	<b>1076</b>	<b>1016</b>
<b>Chyba</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,3</b>	<b>±14</b>	<b>±9</b>



Graf 5: Závislost tahového napětí na protažení PP, rychlost zatěžování 50 mm/min

**Tabulka 7:** Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PP, rychlost zatěžování 50 mm/min

Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Pevnost v tahu $\sigma_M$ [MPa]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,88	10,01	31,78	1007,68	945,46
2	3,87	10,01	32,03	1008,18	951,31
3	3,88	10,01	31,71	1024,70	920,93
4	3,87	10,02	32,15	1002,57	937,70
5	3,88	10,02	31,41	1011,43	956,49
<b>Průměr</b>	<b>3,88</b>	<b>10,02</b>	<b>31,8</b>	<b>1011</b>	<b>942</b>
<b>Chyba</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,1</b>	<b>±3</b>	<b>±6</b>

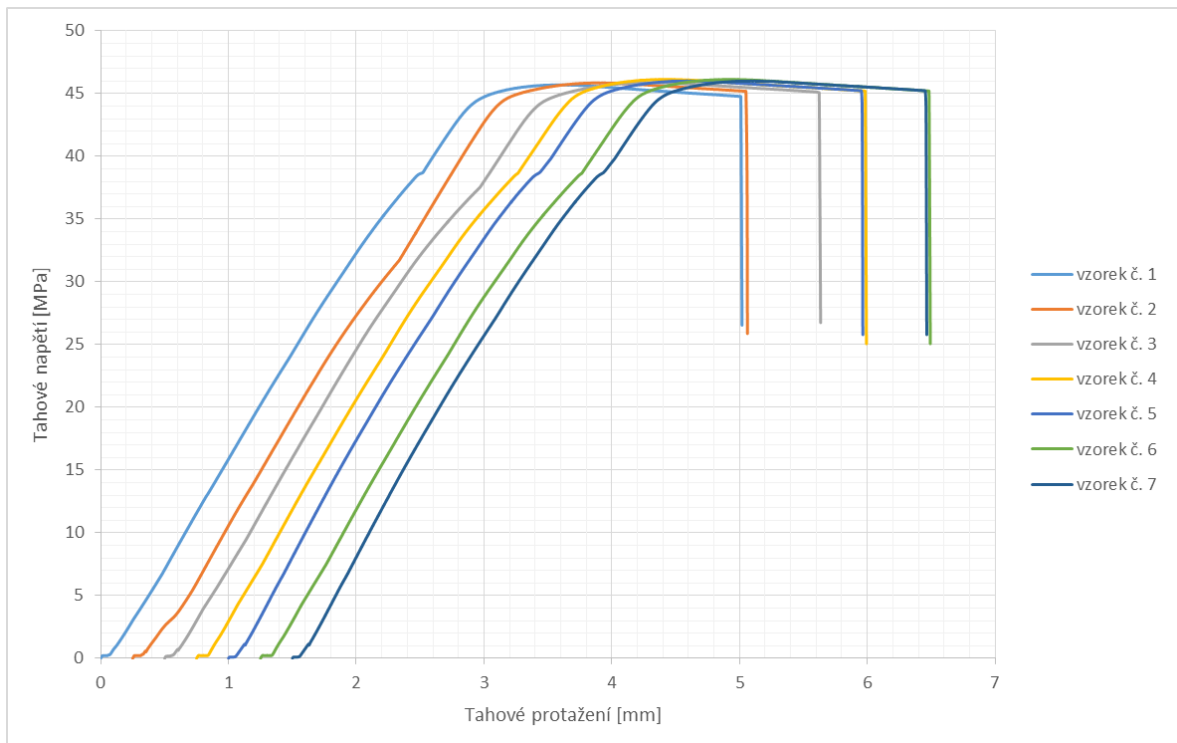


**Graf 6:** Závislost tahového napětí na protažení PP, rychlost zatěžování 30 mm/min

### 6.2.5.3 Výsledné hodnoty a průběh tahové zkoušky pro PS

Tabulka 8: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PS (žlutý), rychlost zatěžování 2 mm/min

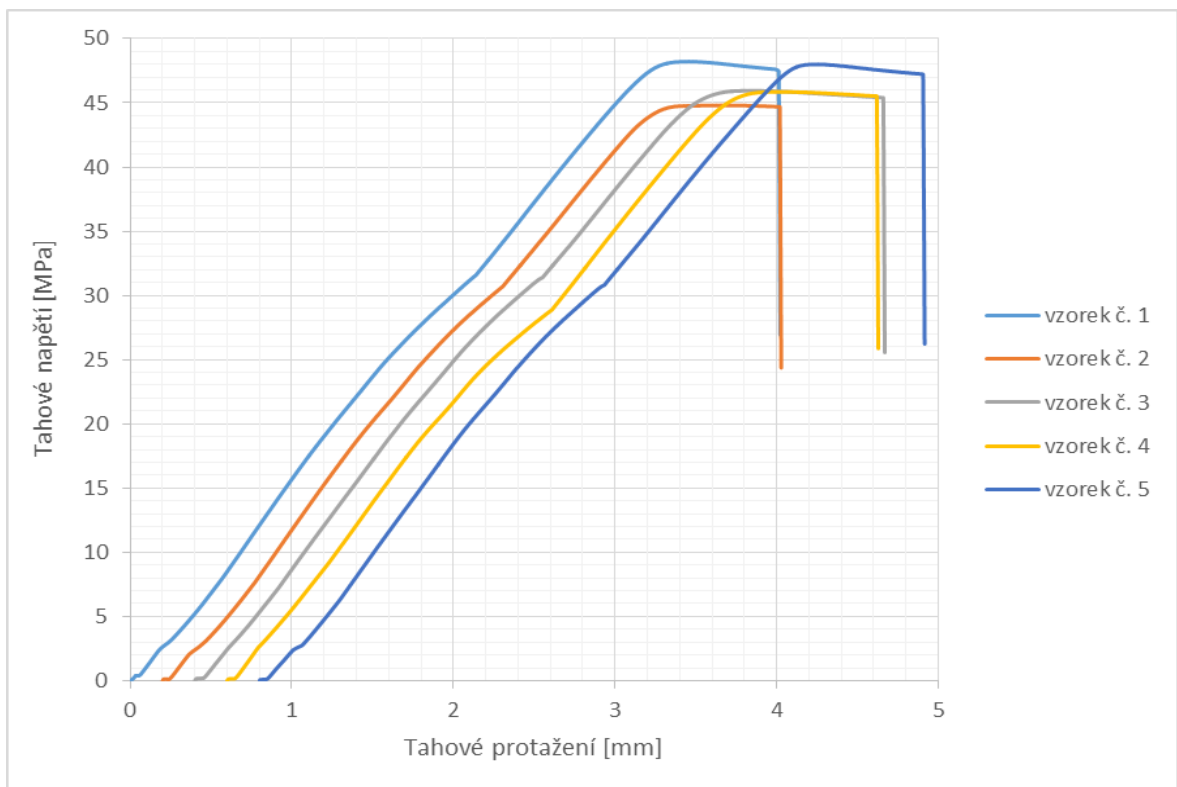
Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Pevnost v tahu $\sigma_M$ [MPa]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,92	10,16	45,71	1806,51	1748,65
2	3,93	10,16	45,80	1851,99	1845,12
3	3,92	10,16	45,69	1747,00	1727,27
4	3,92	10,16	45,84	1747,95	1734,62
5	3,90	10,17	45,86	1794,36	1755,47
6	3,91	10,16	46,13	1824,09	1752,28
7	3,91	10,14	45,98	1886,75	1904,30
<b>Průměr</b>	<b>3,92</b>	<b>10,16</b>	<b>45,9</b>	<b>1808</b>	<b>1781</b>
<b>Chyba</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,01</b>	<b>±0,1</b>	<b>±16</b>	<b>±21</b>



Graf 7: Závislost napětí na protažení PS (žlutý), rychlost zatěžování 2 mm/min

**Tabulka 9:** Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PS (čirý), rychlost zatěžování 1 mm/min

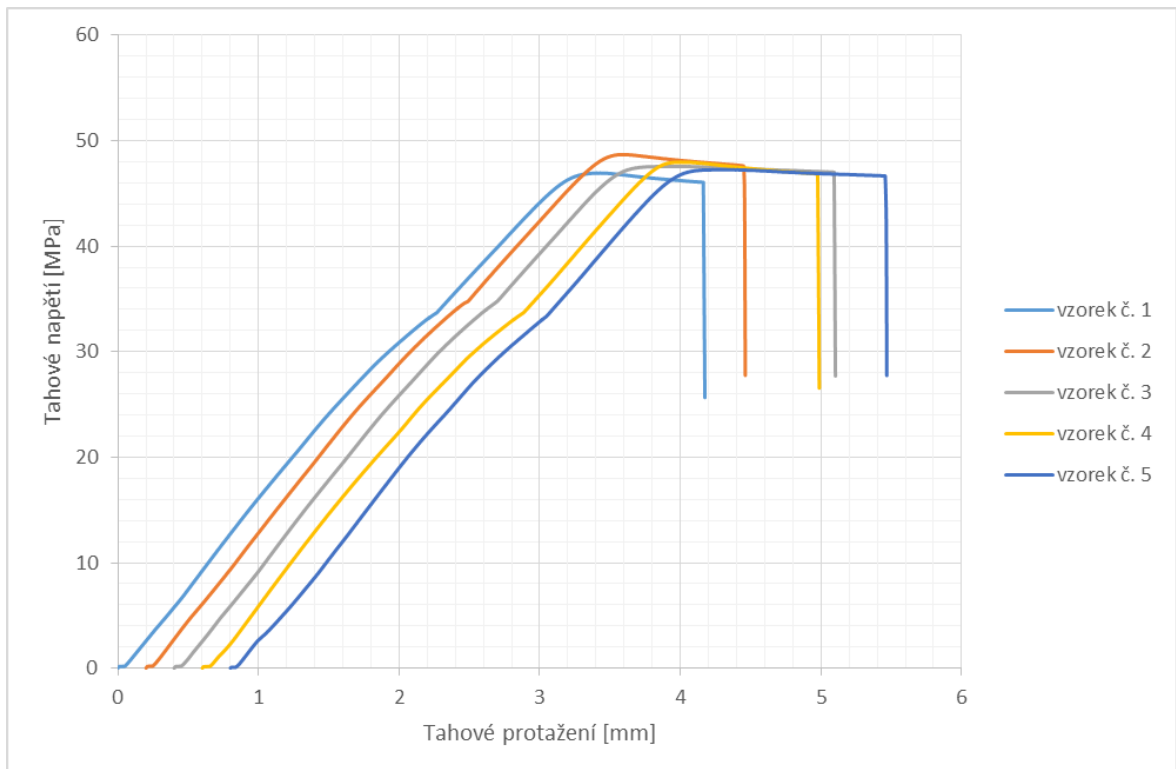
Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Pevnost v tahu $\sigma_M$ [MPa]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	10,44	3,99	48,20	1702,33	1673,76
2	10,16	3,93	44,80	1701,37	1694,88
3	10,15	3,89	45,94	1731,35	1696,83
4	10,30	3,96	45,85	1799,33	1771,44
5	10,14	3,91	47,98	1742,33	1739,27
<b>Průměr</b>	<b>10,24</b>	<b>3,94</b>	<b>46,6</b>	<b>1735</b>	<b>1715</b>
<b>Chyba</b>	<b>±0,06</b>	<b>±0,02</b>	<b>0,7</b>	<b>±18</b>	<b>±18</b>



**Graf 8:** Závislost tahového napětí na protažení PS (čirý), rychlost zatěžování 1 mm/min

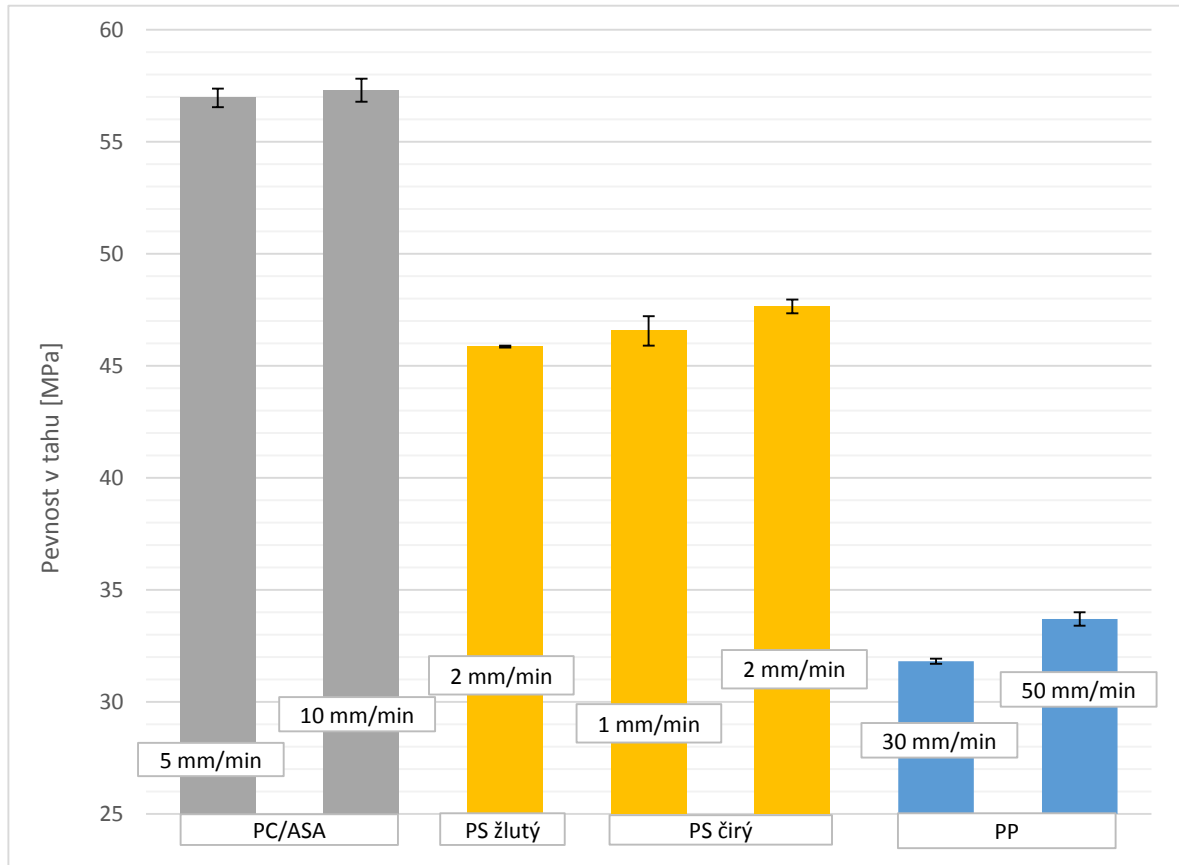
*Tabulka 10: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PS (čirý), rychlost zatěžování 2 mm/min*

Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Pevnost v tahu $\sigma_M$ [MPa]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,94	10,15	46,88	1790,47	1760,01
2	3,89	10,14	48,64	1775,41	1752,30
3	3,91	10,14	47,56	1720,30	1690,76
4	3,91	10,14	47,94	1692,07	1708,64
5	3,95	10,17	47,24	1744,72	1713,24
<b>Průměr</b>	<b>3,92</b>	<b>10,15</b>	<b>47,7</b>	<b>1745</b>	<b>1725</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>±0,3</b>	<b>±18</b>	<b>±13</b>



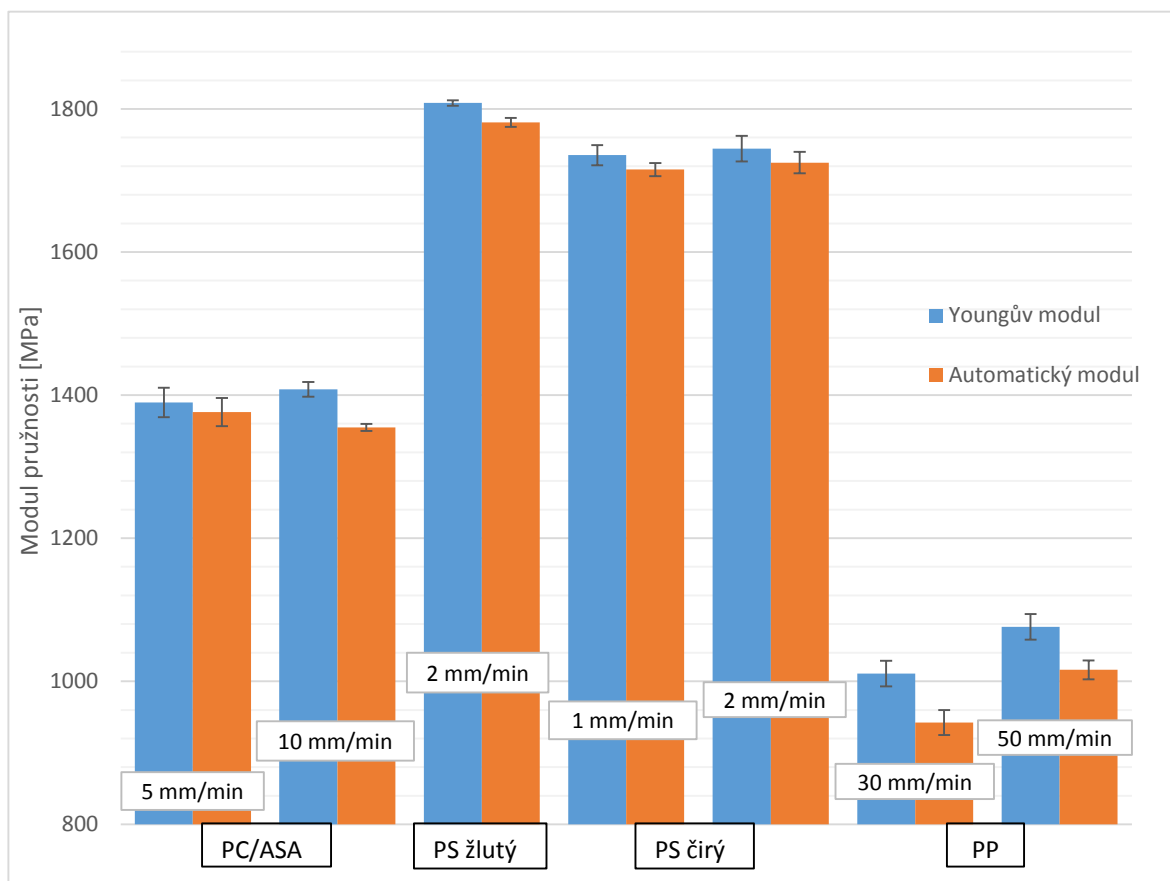
*Graf 9: Závislost tahového napětí na protažení PS (čirý), rychlost zatěžování 2 mm/min*

#### 6.2.5.4 Porovnání pevnosti a modulu pružnosti testovaných materiálů



**Graf 10:** Porovnání meze pevnosti v tahu pro testované materiály a rychlosti zatěžování

**Diskuse ke grafu 10:** Z grafu je zřejmé, že nejpevnějším materiálem ze všech tří testovaných je scanblend. Druhý nejpevnější je polystyren a pochopitelně nejméně pevným je polypropylen. Z grafu lze také vidět, že rychlost zatěžování má vliv na pevnost polymeru a to tak, že přímo úměrně.



**Graf 11:** Porovnání Youngova a Automatického modulu pro testované materiály a rychlosti zatěžování

**Diskuse ke grafu 11:** Nejvyšší modul pružnosti v tahu měl polystyren. Druhý byl scanblend a na posledním místě byl polypropylen. Z grafu je též patrné, že Youngův modul je vždy vyšší než modul automatický a měl by být i přesnější, což vyplývá z metodiky vyhodnocování a většího množství vyhodnocovaných oblastí. Závislost modulu pružnosti na rychlosti deformace je obdobná jako u grafu 10, tudíž přímá úměra. Žlutý polystyren byl pravděpodobně připraven jiným technologickým postupem a proto má větší modul pružnosti než čirý a zároveň nižší mez pevnosti.

### 6.3 Ohybová zkouška

Zkouška v tříbodovém ohybu byla také prováděna na univerzálním testovacím přístroji Instron 3345. Místo pneumatických čelistí byly upevněny na spodní statickou část ocelové podpěry a na horní pohyblivou část zatěžovací trn. Vzorky byly kondicionovány při laboratorní teplotě po dobu 4 hodin. Zkouška probíhala při teplotě 21°C a vlhkosti 60%.



*Obrázek 17: Hlavice pro tříbodový ohyb*

#### 6.3.1 Postup měření

Pro měření byly použity ploché lopatky stejných rozměrů jako u tahové metody. Testované materiály byly ohýbány dvěma způsoby a to působením silou na užší a na širší plochu tělesa. Jako délka vzorku byla zvolena pracovní délka lopatky, což je 60 mm. Pro přesné umístění vzorku byly před zkouškou označeny středy každého tělesa a místa kde se budou dotýkat podpěry.

#### 6.3.2 Parametry ohybové metody

Stejně jako u tahové zkoušky i zde bylo třeba zadat parametry potřebné pro správné vyhodnocení ohybové zkoušky. Společné parametry pro všechny materiály byly vzdálenost podpěr, která byla 50 mm, rychlost zatěžování byla zvolena 2 mm/min. Dále byly zadány rozměry těles uvedené ve výsledcích a způsob ukončení zkoušky. Jako zakončení zkoušky byla zvolena u houževnatých materiálů (PC/ASA a PP) velikost průhybu 14 mm v uspořádání 60 x 10 x 4 a 7 mm v uspořádání 60 x 4x 10 a u křehkého PS bylo jako zakončení zkoušky zvolen 40% úbytek napětí, tudíž porušení vzorku. Uspořádáním jsou myšleny rozměry vzorku v mm (délka x šířka x tloušťka).



### 6.3.3 Vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení ohybové zkoušky proběhlo podobně jako u zkoušky tahové. Způsob vyhodnocení Youngova a Automatického modulu je popsán v bodě 6.2.4. Mez pevnosti je vyhodnocována z křivky podle vzorce (6) vyjádřeného v bodě 4.1.2.9.

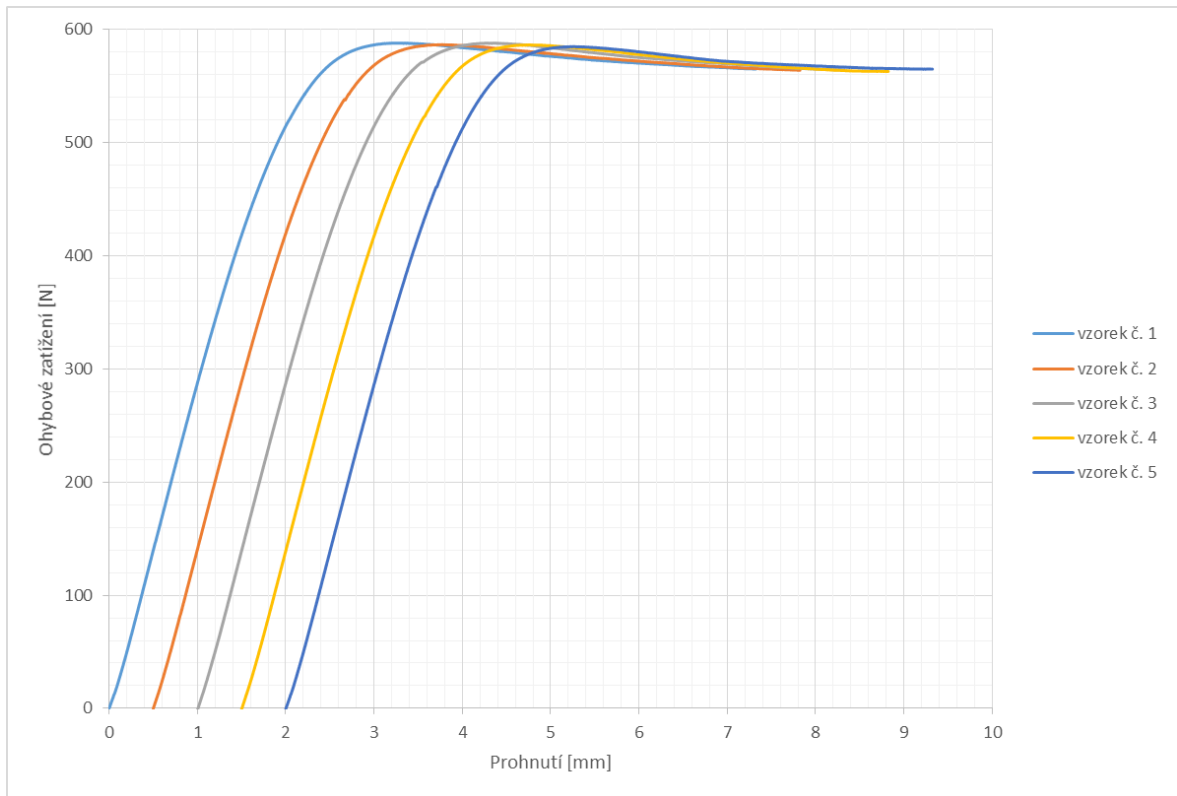
### 6.3.4 Výsledky a diskuse

Výsledky byly zpracovány do tabulek, které jsou doplněny grafy závislosti působící síly na průhybu vzorku pro jednotlivé materiály a jejich uspořádání. V grafech 17 a 18 se nachází grafické porovnání aritmetických průměrů modulů i pevností všech testovaných materiálů a diskuse k těmto grafům stejně jako u tahové zkoušky.

#### 6.3.4.1 Výsledné hodnoty a průběh ohybové zkoušky pro PC/ASA

*Tabulka 11: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PC/ASA, uspořádání 60x4x10 mm*

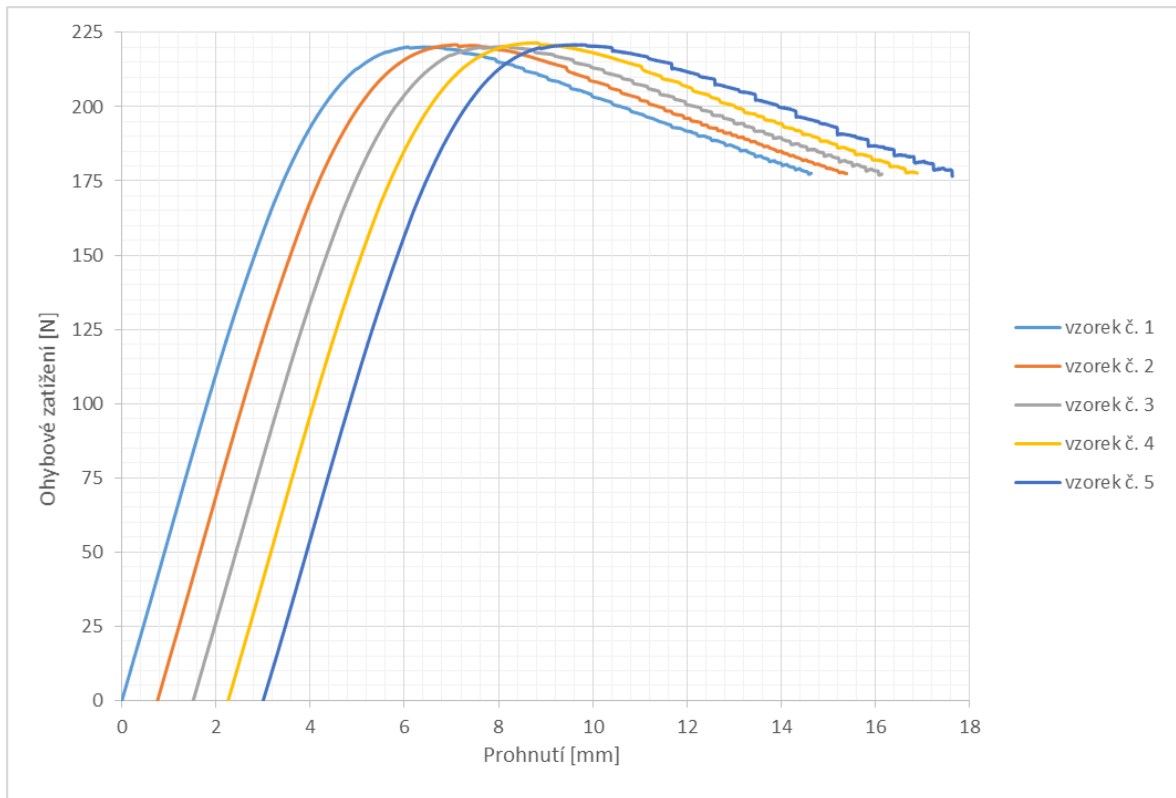
Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Mez pevnosti $\sigma_M$ [MPa]	Ohybové zatížení $F_{max}$ [N]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	10,16	3,97	107,4	586,5	2248,2	2213,8
2	10,17	3,97	106,8	585,1	2248,0	2188,7
3	10,17	3,96	107,5	586,7	2258,9	2201,2
4	10,16	3,96	107,2	584,8	2251,4	2193,7
5	10,16	3,97	106,8	583,3	2249,7	2205,2
<b>Průměr</b>	<b>10,16</b>	<b>3,97</b>	<b>107,1</b>	<b>585,3</b>	<b>2251</b>	<b>2201</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>2</b>	<b>4</b>



Graf 12: Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PC/ASA, uspořádání 60x4x10 mm

Tabulka 12: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PC/ASA, uspořádání 60x4x10 mm

Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Mez pevnosti $\sigma_M$ [MPa]	Ohybové zatížení $F_{max}$ [N]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,97	10,16	102,3	218,0	2754,3	2730,5
2	3,97	10,17	102,4	219,2	2734,1	2704,0
3	3,97	10,16	102,3	218,1	2737,0	2697,7
4	3,97	10,18	102,8	219,7	2741,0	2690,6
5	3,97	10,17	103,0	220,0	2732,8	2683,5
<b>Průměr</b>	<b>3,97</b>	<b>10,17</b>	<b>102,6</b>	<b>219,0</b>	<b>2740</b>	<b>2701</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>4</b>	<b>8</b>

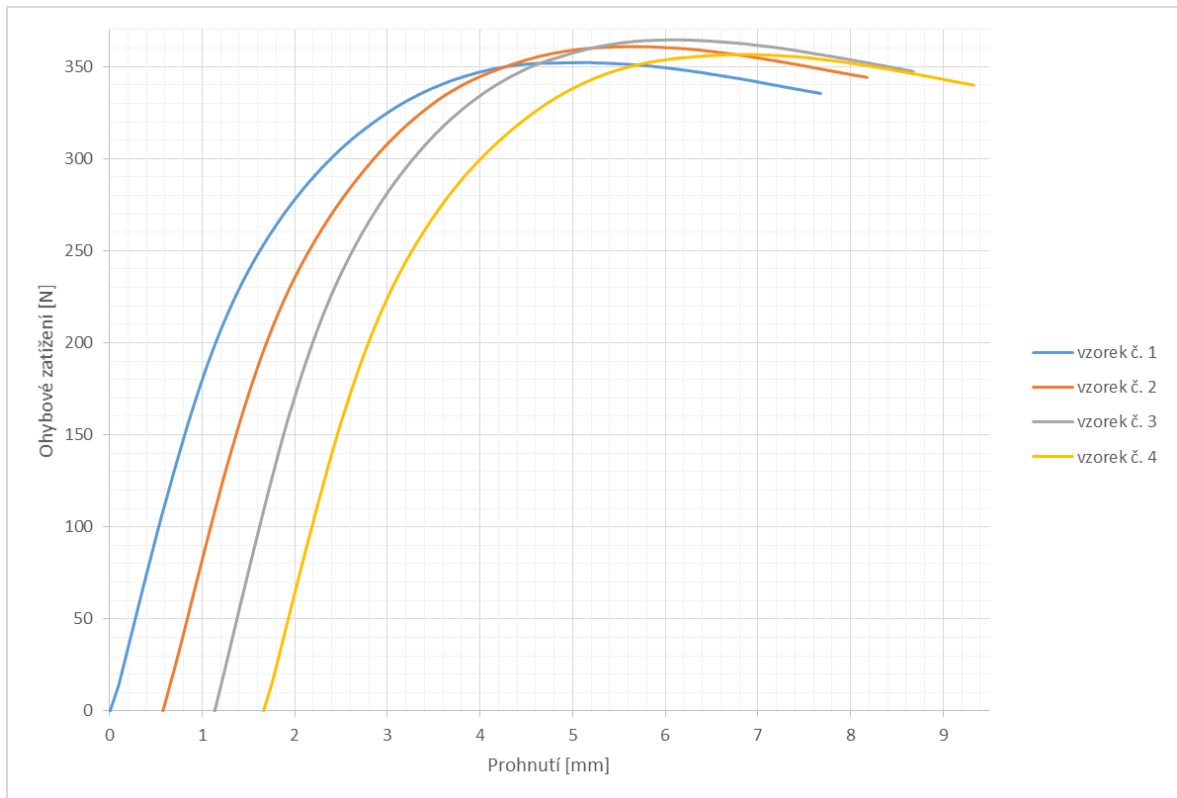


Graf 13: Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PC/ASA, uspořádání 60x10x4 mm

### 6.3.4.2 Výsledné hodnoty a průběh ohybové zkoušky pro PP

Tabulka 13: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PP, uspořádání 60x4x10 mm

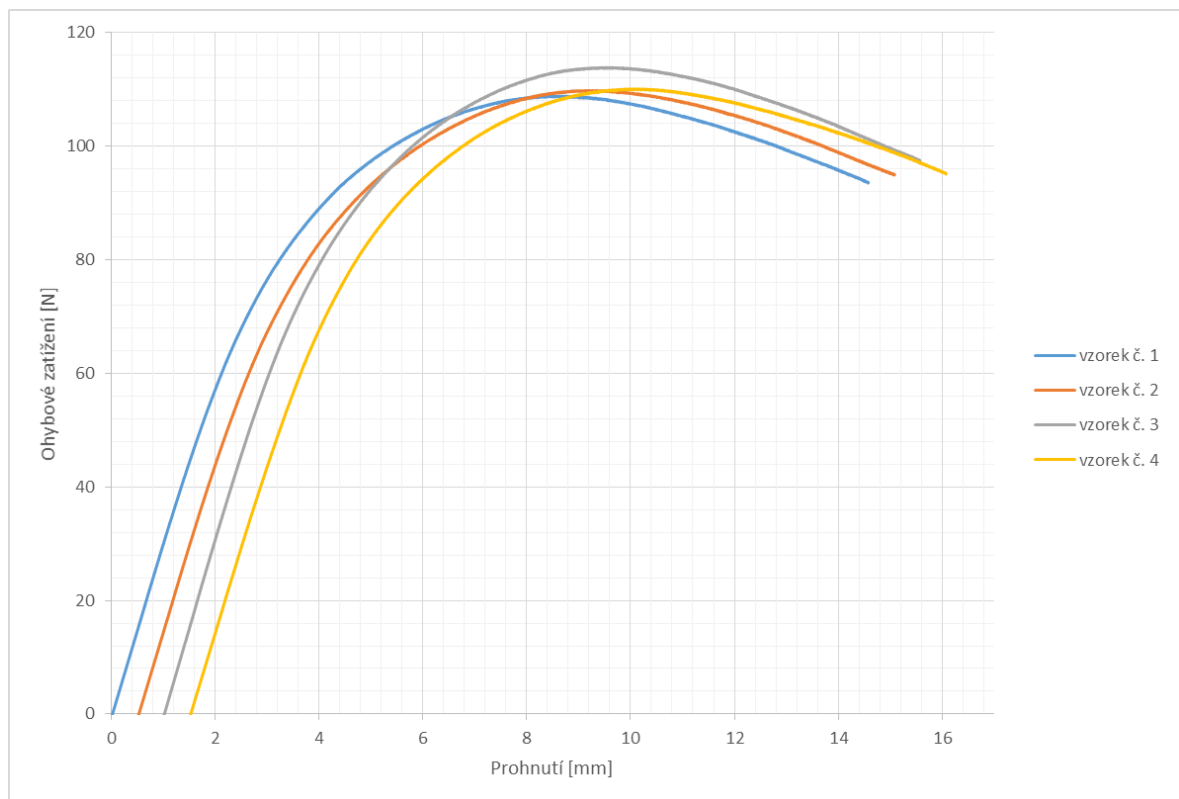
Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Mez pevnosti $\sigma_M$ [MPa]	Ohybové zatížení $F_{max}$ [N]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	10,23	3,95	63,9	352,1	1490,4	1333,1
2	10,17	3,90	67,0	360,8	1520,6	1369,9
3	10,04	3,92	69,2	364,5	1659,2	1492,2
4	10,24	3,94	64,7	356,5	1478,7	1333,2
<b>Průměr</b>	<b>10,17</b>	<b>3,93</b>	<b>66,2</b>	<b>358,5</b>	<b>1537</b>	<b>1382</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>1,2</b>	<b>3</b>	<b>42</b>	<b>38</b>



**Graf 14:** Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PP, uspořádání 60x4x10 mm

**Tabulka 14:** Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PP, uspořádání 60x10x4 mm

Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Mez pevnosti $\sigma_M$ [MPa]	Ohybové zatížení $F_{max}$ [N]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,91	10,09	52,9	108,7	1344,5	1244,0
2	3,94	10,19	52,1	109,8	1286,1	1185,2
3	3,98	10,08	53,5	113,8	1329,1	1235,2
4	3,91	10,06	53,7	109,9	1363,2	1265,4
<b>Průměr</b>	<b>3,93</b>	<b>10,1</b>	<b>53,1</b>	<b>110,5</b>	<b>1331</b>	<b>1232</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,4</b>	<b>1,1</b>	<b>16</b>	<b>17</b>

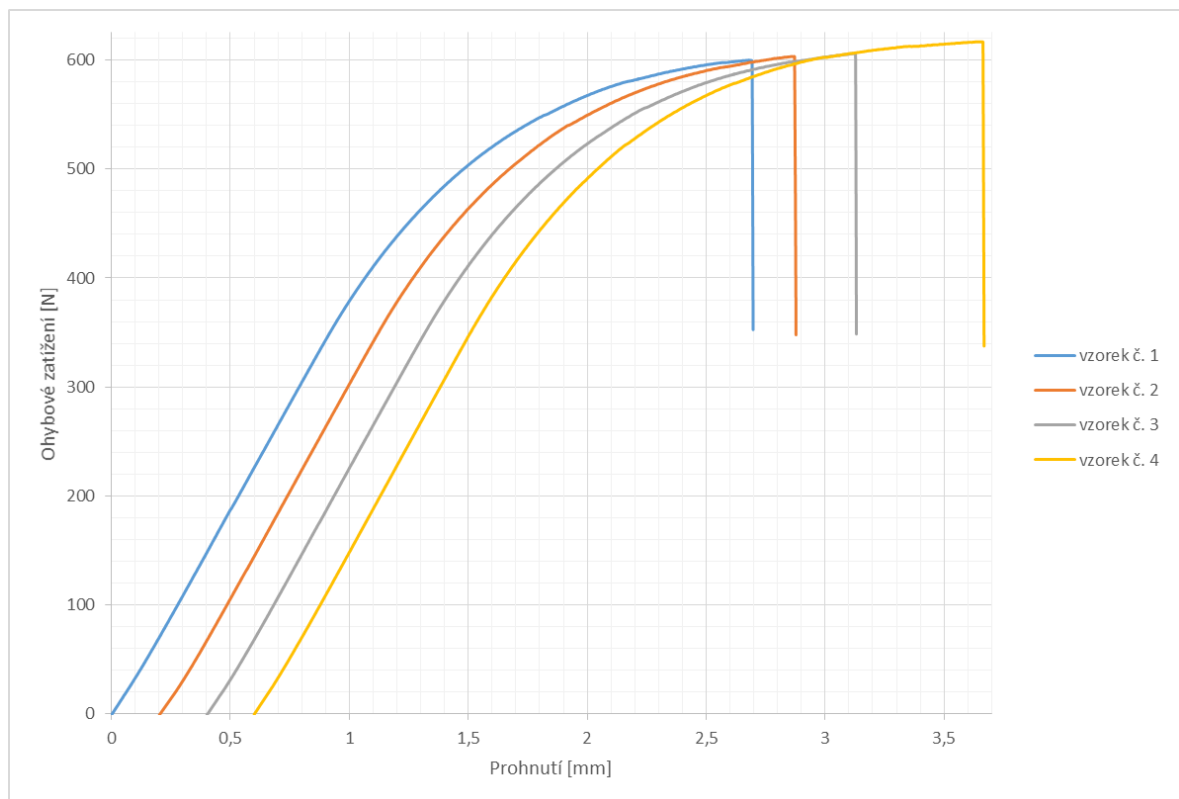


**Graf 15:** Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PP, uspořádání 60x10x4 mm

### 6.3.4.3 Výsledné hodnoty a průběh zkoušky pro PS

**Tabulka 15:** Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PS, uspořádání 60x4x10 mm

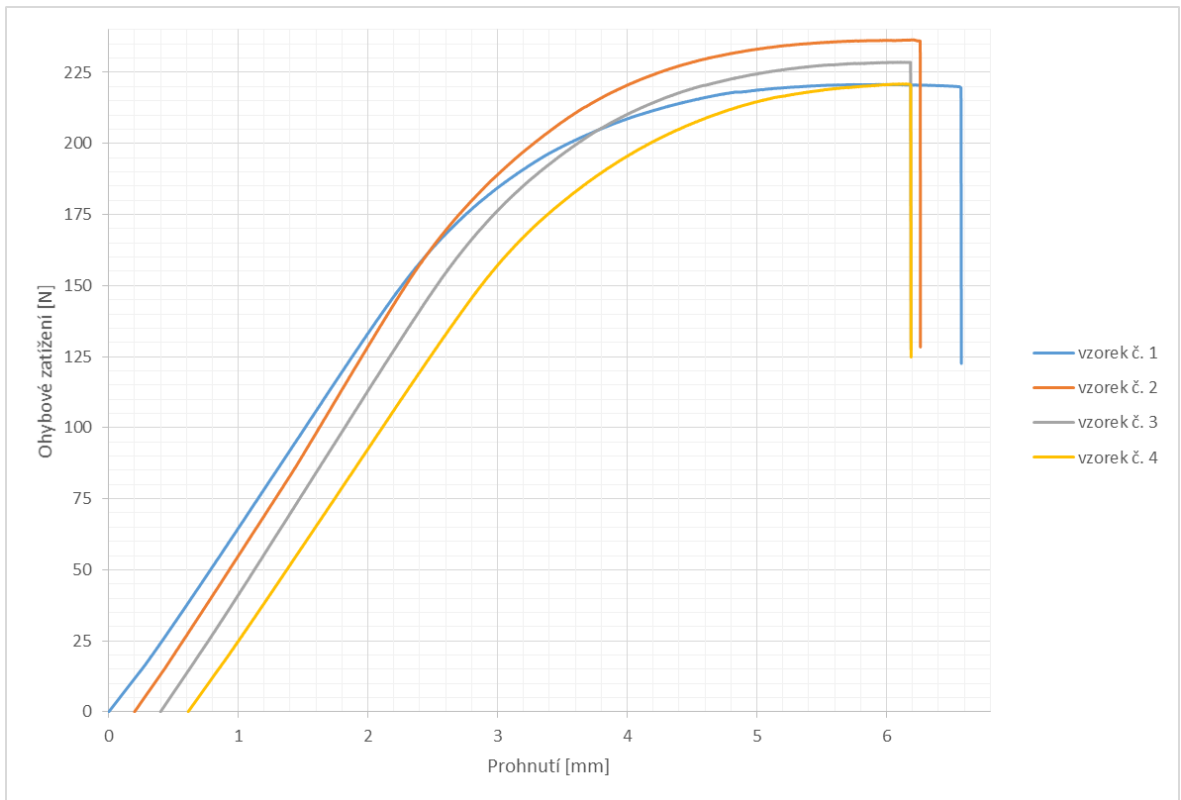
Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Mez pevnosti $\sigma_M$ [MPa]	Ohybové zatížení $F_{max}$ [N]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	10,16	3,94	104,1	598,3	2983,4	2955,0
2	10,19	3,93	110,2	601,3	2969,2	2956,4
3	10,19	3,93	107,8	603,9	2969,5	2955,4
4	10,19	3,94	104,5	616,1	2983,8	2919,0
<b>Průměr</b>	<b>10,18</b>	<b>3,94</b>	<b>106,7</b>	<b>604,9</b>	<b>2976</b>	<b>2946</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>1,5</b>	<b>4,3</b>	<b>4</b>	<b>9</b>



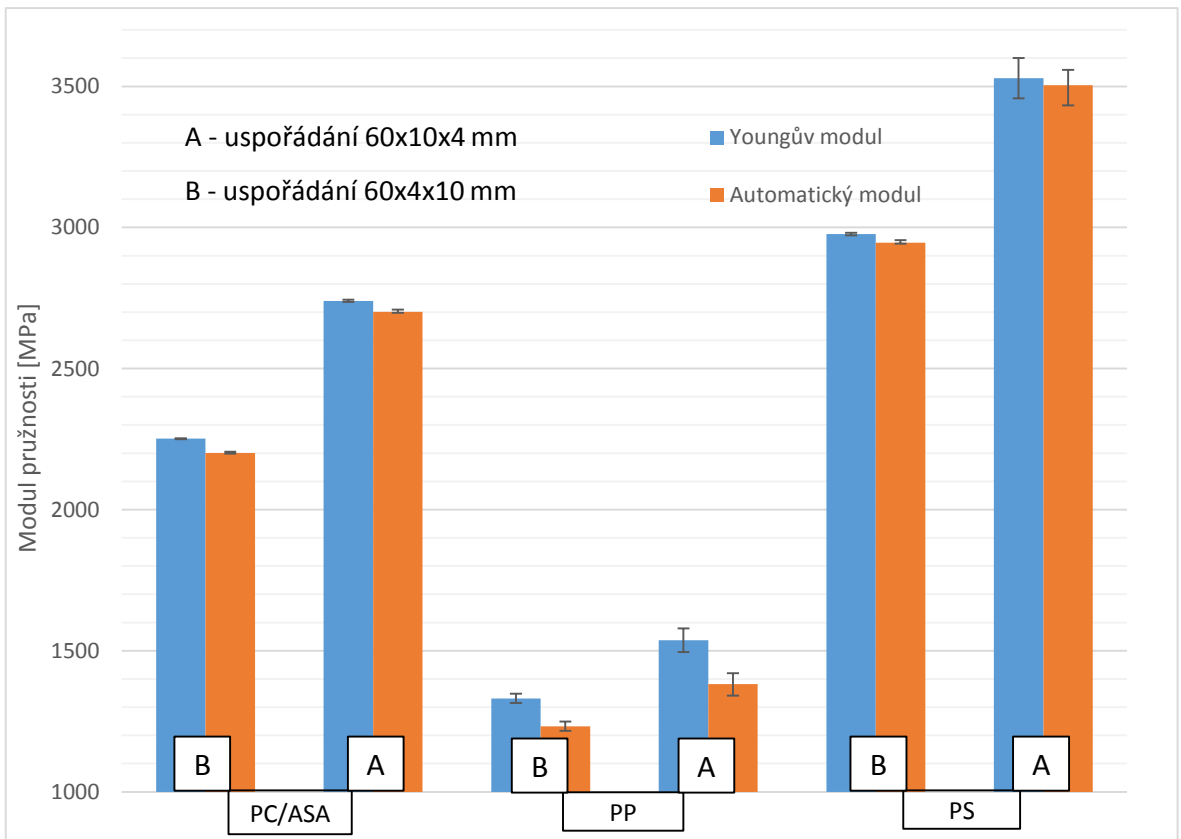
**Graf 16:** Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PS, uspořádání 60x4x10 mm

**Tabulka 16:** Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PS, uspořádání 60x10x4 mm

Vzorek č.	Tloušťka b [mm]	Šířka h [mm]	Mez pevnosti $\sigma_M$ [MPa]	Ohybové zatížení $F_{max}$ [N]	Youngův modul E [MPa]	Automatický modul $E_a$ [MPa]
1	3,95	10,22	110,4	220,7	3430,4	3424,2
2	3,97	10,18	110,5	236,4	3709,4	3618,6
3	3,95	10,17	111,1	228,6	3574,9	3575,8
4	3,94	10,20	113,1	220,8	3400,4	3398,1
<b>Průměr</b>	<b>3,95</b>	<b>10,20</b>	<b>111,2</b>	<b>226,6</b>	<b>3529</b>	<b>3504</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,6</b>	<b>4,4</b>	<b>71</b>	<b>55</b>

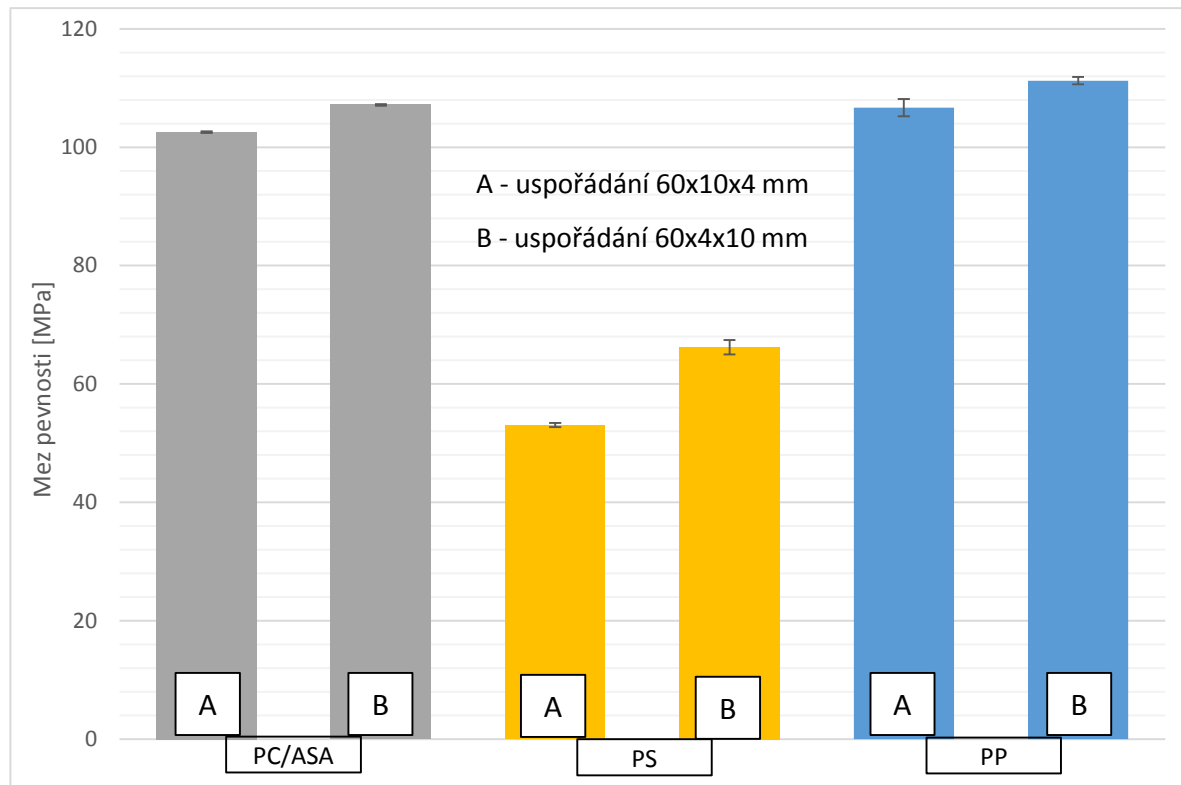


**Graf 17:** Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PS, uspořádání 60x10x4 mm



**Graf 18:** Porovnání ohybových modulů pro testované materiály

**Diskuse ke grafům 18 a 19:** Podle předpokladu uspořádání vzorku výrazně ovlivňuje modul pružnosti v ohybu a to tak že působením ohybovým zatížením na užší část je modul pružnosti nižší než při zatěžování části širší.



**Graf 19:** Porovnání pevností v ohybu pro testované materiály



## 6.5 Rázová zkouška v ohybu (Charpyho kladivo)

Rázová zkouška byla provedena na neinstrumentovaném Charpyho kladivu (obr. 18). Na stejném přístroji proběhla jak zkouška rázové houževnatosti těles bez vrubu tak i zkouška vrubové rázové houževnatosti pro dva typy vrubů. Byly používány dvě kladiva s rozdílnou hmotností, tudíž i rozdílnou výstupní prací, kvůli zpřesnění výsledků u křehkých vzorků krystalického PS. Měření probíhalo v laboratoři při teplotě 21°C a vlhkosti 58%. Testované vzorky byly kondicionovány při laboratorní teplotě. A rozměry vzorků byly shodné s těmi použitými pro ohybovou zkoušku, tudíž měly rozměry 60 x 10 x 4 mm a rázová síla působila na užší část tělesa. V případě těles s vrubem se vrub nacházel přímo naproti působící síle.



*Obrázek 18: Charpyho kladivo*

### 6.5.1 Postup měření

Nejprve byly změřeny rozměry těles a to jeho šířka a tloušťka. Následně byla část tělísek opatřena vrubem typu V, část ostrým vrubem a některé se nechaly bez vrubu. Poté proběhla samotná dynamická zkouška, které ještě předcházelo měření ztrátové energie.

### 6.5.2 Parametry Charpyho kladiva

*Tabulka 17: Parametry Charpyho kladiva*

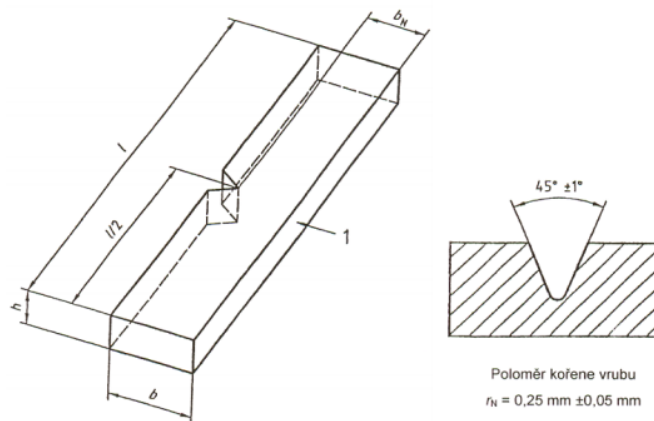
Kladivo č.	1	2
Energie pádu	3,92 J	0,98 J
Hmotnost závaží	0,937 kg	0,234 kg
Délka ramene	220 mm	
Vzdálenost podpěr	42 mm	

### 6.5.3 Parametry vrubů

Byly vytvořeny dva typy vrubů. Vrub č. 1 byl vytvořen nožem a jeho hloubka byla  $0,5 \pm 0,01$  mm. Druhý byl vytvořen speciálním vrubovacím zařízením a měl hloubku  $0,5 \pm 0,02$  mm a byl typu V. Oba vruby byly aplikovány na užší část vzorků materiálu PC/ASA a PS, PP byl měřen pouze bez vrubu.



*Obrázek 19: Zařízení Instron Notchvis použité pro tvorbu vrubu č. 2*



*Obrázek 20: Těleso s vrubem, a tvar vrubu (V) [10]*

#### 6.5.4 Typy přerušení

Po rázové zkoušce mohou nastat 4 různé stavy vzorku, buď je kompletně rozdělen na 2 části, tomuto typu přelomení se říká typ C (complete break), nebo obě části drží pohromadě tenká vrstva, jedná se o přelomení typu H (hinge break). Může nastat také stav kdy se těleso pouze nalomí, toto přerušení je typu P (partial break) anebo k přerušení vůbec nedojde a jedná se o typ N (non-break). [18]

#### 6.5.5 Korekce ztrát

Při měření bylo potřeba korigovat vzniklé ztráty při pohybu kladiva. Ztráty vznikají třením samotného kladiva, třením mezi stupnicí a měřicí ručičkou, kterou kladivo při pohybu posunuje a také odporem vzduchu. Korekce ztrát proběhla před započítáním samotného testování vzorků pro každé kladivo zvlášť. Korekce probíhala způsobem, že se proběhla zkouška dvacetkrát bez přítomnosti vzorku a aritmetický energie spotřebovaná na pohyb je energie ztrát  $E_z$ .

Ztrátová energie pro kladivo č. 1:  $E_{z1} = 0,1 \pm 0,02 J$

Ztrátová energie pro kladivo č. 2:  $E_{z2} = 0,096 \pm 0,001 J$

Tato energie se připočítává k energii  $E_p$ , kterou kladivo vykoná při samotném přeražení vzorku a výsledná energie se nazývá energie korigovaná  $E_K$ . [9]

$$E_K = E_p + E_{zi} \quad (12)$$

#### 6.5.6 Výsledky a diskuse

Byla prováděna rázová zkouška pro tělesa s vrubem i bez vrubu a výsledné hodnoty jsou zaznamenány v následující tabulce a veškeré hodnoty potřebné pro výpočet jsou v tabulkách níže. Rázová i vrubová houževnatost byla vypočtena ze vzorce (10).

### 6.5.6.1 Rázová a vrubová houževnatost

Nejprve byl každý materiál podroben zkoušce bez vrubu pro PC/ASA tato zkouška dopadla nepřerušením vzorku (tudíž přerušením typu N). Vzhledem k tomu, že pro další část práce bylo potřeba vzorky přelomené, dále proběhlo měření jen s vruby a tento výsledek je pouze orientační.



Obrázek 19: zkušební těleso PC/ASA po rázové zkoušce

Tabulka 18: Rázová a vrubová houževnatost testovaných materiálů

Materiál	Vrub č.	Typ přerušení	$a_{c(N)}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Chyba
PC/ASA	1	C	62,8	1,3
	2	C i H	92,0	0,6
PS	0	C	9,4	0,3
	1	C	8,7	0,2
	2	C	7,3	0,1
PP	0	C	72,4	3,0

**Diskuse k tabulce 18:** Z tabulky je zřejmé, že vrub ovlivňuje rázovou respektive vrubovou houževnatost materiálu, což bylo předpokládáno. U houževnaté polymerní směsi PC/ASA se lépe projevil ostrý vrub provedený nožem, který lépe iniciuje trhlinu než vrub typu V, který není ve vrcholu ostrý (obr 19). Rozdíl mezi hodnotou udávanou výrobcem (55 kJ/m<sup>2</sup> při 23°C) je pravděpodobně způsoben nedodržením podmínek stanovených normou.

**Tabulky s hodnotami potřebnými pro výpočet rázové a vrubové houževnatosti***Tabulka 19: hodnoty pro výpočet vrubové houževnatosti pro PC/ASA, vrub č. 1*

	Šířka [mm]	Tloušťka vzorku [mm]	Tloušťka vrubu [mm]	$E_P$ [J]	$E_K$ [J]	$a_{cn}$ [J/m <sup>2</sup> ]
1	10,16	3,98	0,50	2,26	2,36	61,18
2	10,15	3,98	0,48	2,47	2,57	66,74
3	10,20	3,93	0,53	2,21	2,31	60,77
4	10,15	3,92	0,49	2,16	2,26	59,51
5	10,14	3,93	0,47	2,40	2,50	65,87
<b>Průměr</b>	<b>10,16</b>	<b>3,95</b>	<b>0,49</b>	<b>2,30</b>	<b>2,40</b>	<b>62,82</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>1,33</b>

*Tabulka 20: hodnoty pro výpočet vrubové houževnatosti pro PC/ASA, vrub č. 2*

	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Tloušťka vrubu [mm]	$E_P$ [J]	$E_K$ [J]	$a_{cn}$ [J/m <sup>2</sup> ]
1	10,15	3,99	0,50	3,38	3,48	90,49
2	10,15	3,97	0,50	3,44	3,54	92,61
3	10,16	3,98	0,50	3,46	3,56	92,80
4	10,16	3,96	0,50	3,46	3,56	93,34
5	10,15	3,96	0,50	3,36	3,46	90,45
<b>Průměr</b>	<b>10,15</b>	<b>3,97</b>	<b>0,50</b>	<b>3,42</b>	<b>3,52</b>	<b>91,94</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,56</b>



*Tabulka 23: hodnoty pro výpočet vrubové houževnatosti pro PS, vrub č. 2*

	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Tloušťka vrubu [mm]	$E_P$ [J]	$E_K$ [J]	$a_{cN}$ [J/m <sup>2</sup> ]
1	10,16	3,95	0,50	0,18	0,27	7,15
2	10,15	3,94	0,50	0,18	0,27	7,18
3	10,14	3,93	0,50	0,19	0,28	7,46
4	10,15	3,91	0,50	0,20	0,29	7,74
5	10,14	3,94	0,50	0,18	0,27	7,17
6	10,16	3,93	0,50	0,18	0,27	7,17
<b>Průměr</b>	<b>10,15</b>	<b>3,93</b>	<b>0,50</b>	<b>0,18</b>	<b>0,28</b>	<b>7,31</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,10</b>

*Tabulka 24: hodnoty pro výpočet rázové houževnatosti pro PP*

	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	$E_P$ [J]	$E_K$ [J]	$a_c$ [J/m <sup>2</sup> ]
1	10,17	3,94	2,94	3,04	75,89
2	10,11	3,95	3,04	3,14	78,55
3	10,09	3,86	2,99	3,09	79,47
4	10,03	3,88	2,40	2,50	64,35
5	10,03	3,86	2,40	2,50	64,65
6	10,04	3,85	2,79	2,89	74,88
<b>Průměr</b>	<b>10,06</b>	<b>3,88</b>	<b>2,73</b>	<b>2,83</b>	<b>72,38</b>
<b>Chyba</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>3,02</b>

## 6.6 Zkoumání lomových ploch

Po rázové zkoušce byly vybrány některé vzorky, které byly foceny fotoaparátem Canon EOS D600 s objektivem Tamron AF 70-300mm f/4,0-5,6 Di LD Macro a následná úprava probíhala v programu Zoner Photo Studio 15.

### 6.6.1 Lomové plochy a profil lomu, PC/ASA



*Obrázek 20: Snímky lomových ploch PC/ASA, vrub č. 1*



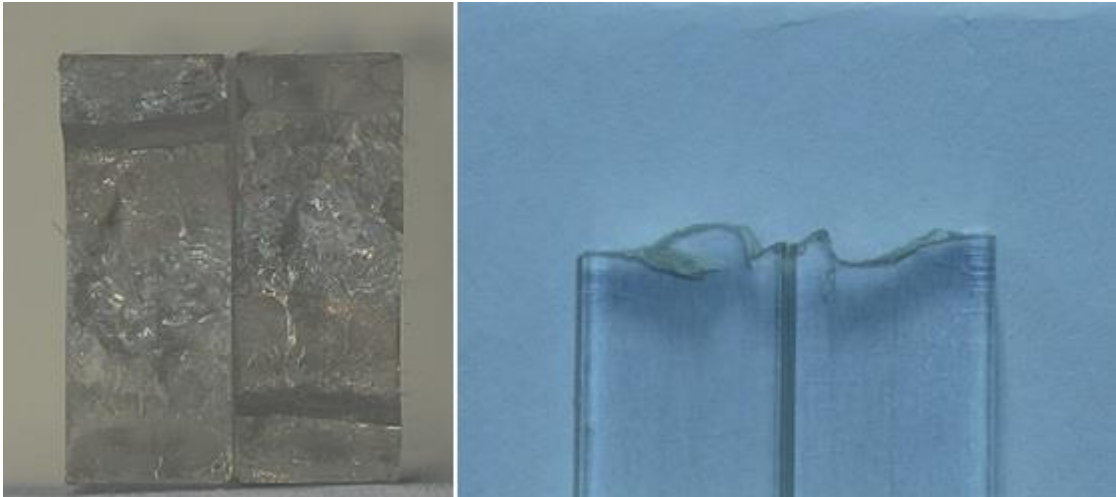
*Obrázek 21: Snímky lomových ploch PC/ASA, vrub č. 2*

**Diskuse k obrázkům 20 a 21:** Na snímcích jsou zachyceny lomové plochy materiálu scanblend jak z předního pohledu, tak i z profilu pro oba aplikované vruby. Z fotek příslušícím k prvnímu vrubu je patrné menší přetvoření než u vrubu č. 2, tudíž bylo potřeba na přelomení



menší energii a potvrzuje se výsledek z předchozí části, že vzorky s vrubem č. 1 mají menší vrubovou houževnatost.

### 6.6.2 Lomové plochy a profil lomu, PS



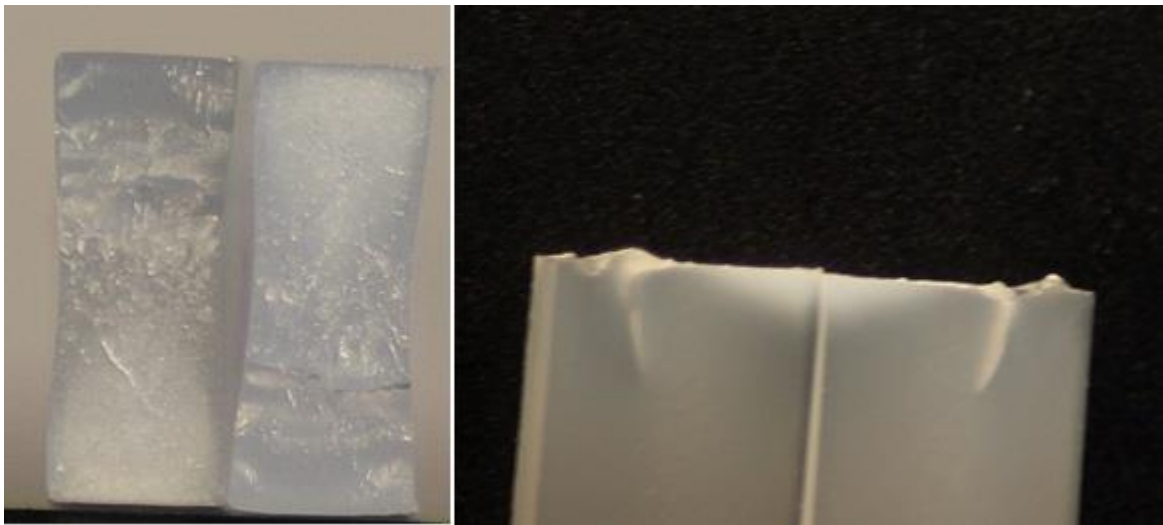
*Obrázek 22: Snímky lomových ploch PS, bez vrubu*



*Obrázek 23: Snímky lomových ploch PS, vrub č. 2*

**Diskuse k obrázkům 22 a 23:** Na těchto snímcích můžeme porovnat lom vzniklý působením rázu bez vrubu a s vrubem u křehkého PS. Na obrázku 22 je vidět že trhlinka nemá působiště ve vrubu a šíří se chaoticky. Obrázek 23 znázorňuje lom iniciovaný vrubem, který je křehký.

### 6.6.3 Lomové plochy a profil lomu, PP



*Obrázek 24: Snímky lomových ploch PP, bez vrubu*

**Diskuse k obrázkům 24:** Polypropylen je zástupcem houževnatých materiálů, které se při rázovém namáhání chovají, jako křehké. [10]

Na snímcích je tedy vyobrazen křehký lom s mírným přetvořením v místech, kde došlo k vytvoření trhliny.

## ZÁVĚR

V této práci je obsažena část teoretická, která se zabývá charakteristikou, strukturou a rozdělením polymerů jejich mechanickým testováním, a také charakteristikou a topografií povrchů materiálů a metodami, které se používají ke zkoumání povrchů.

Práce byla založena na praktické části, ve které bylo za úkol naměřit důležité materiálové charakteristiky tří polymerních materiálů, kterými byly Scanblend, PS a PP. Výsledky bylo nutné poté mezi sebou porovnat. Veškeré výsledky jsou uvedeny v tabulkách u příslušné zkoušky. Mez pevnosti v tahu a ohybu stejně jako ohybový a tahový modul pružnosti jsou zaznamenány v grafech a vzájemně porovnány v diskusi ke grafům.

Tahová zkouška byla prováděna pro různé rychlosti zatěžování a bylo zjištěno, že měřené tahové mechanické vlastnosti všech tří testovaných materiálů jsou tím vyšší, čím je vyšší rychlost zatěžování. U ohybové zkoušky proběhlo měření pro různě orientovaný vzorek. Zde bylo zjištěno, že když je vzorek zatěžována užší částí má nižší ohybový modul a vyšší mez pevnosti v ohybu, než při zatěžování části širší.

Jako další zkouška byla provedena zkouška rázové a vrubové houževnatosti. Tentokrát byl proměnou veličinou vrub, který byl jednou typu V podruhé ostrý vytvořený nožem, a nakonec bylo několik vzorků ponecháno bez vrubu. U této zkoušky bylo zjištěno, že vzorky scanblendu opatřeny ostrým vrubem vykazovaly menší vrubovou houževnatost než vzorky s vrubem typu V. U Polystyrenu tomu ovšem bylo naopak. Polypropylen byl kvůli nedostatku vzorků testován pouze bez vrubu.

Zkouška rázové houževnatosti také posloužila jako zdroj lomových ploch pro následné zkoumání, ve kterém byly částečně potvrzeny výsledky z rázové zkoušky.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] STOKLASA, Karel. *Makromolekulární chemie I*. Zlín: UTB, 2005, 106 s.
- [2] STOKLASA, Karel. *Makromolekulární chemie II*. Zlín: UTB, 2005, 87 s.
- [3] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: (Netradiční úvod do současné materiálové vědy)*. 1. vyd. Praha: Encyklopedický dům, 1999, 228 s. ISBN 8086044130.
- [4] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2. Praha: VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3
- [5] Keramika, kompozity, polymery. *Polymery* [online]. Masarykova univerzita, Fakulta pedagogická [cit.2014-03-02].  
Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm>
- [6] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [7] Nauka o Materiálu. *Struktura a vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. ČVUT, Fakulta strojní [cit.2014-04-05].  
Dostupné z:  
[http://umi.fs.cvut.cz/files/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnosti-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/files/3_2__struktura-a-vlastnosti-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf)
- [8] STRÁNSKÝ, L., MOLLIKOVÁ, E., SEDLÁČEK, J. *Zkouška tahem*. Brno: VUT, 2002, 23 s.
- [9] RYBNÍKÁŘ, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 418 s.
- [10] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. 1. vyd. Pardubice: VŠCHT, 1984, 105 s. ISBN 80-851-1301-5.
- [11] ČSN EN ISO 527. *Plasty-stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997. Třídící znak 64064.
- [12] Zkouška rázem v ohybu. [online]. VUT Brno, Fakulta strojní [cit.2014-04-05].  
Dostupné z:  
<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
- [13] Strojírenská technologie. *Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost* [online]. SOŠ Hořovice. Dostupné z: [http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)

- [14] MLEZIVA, Josef. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Vyd. 1. Praha: Sobotáles, 1993, 525 s. ISBN 8090157041.
- [15] MANDÁT, Dušan. *Optické bezkontaktní topografické metody*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 36 s. ISBN 978-80-244-3075-1.
- [16] BRUNDLE, C. Richard, Charles A. EVANS, JR. a Shaun WILSON. *Encyclopedia of materials characterization: surfaces, interfaces, thin films*. Boston: Butterworth-Heinemann, 1992, xix, 751p. Materials characterization series. ISBN 07-506-9168-9.
- [17] INSTRON. *INSTRON BLUEHILL. Calculation Reference: Reference Manual – Software 2,0*
- [18] ČSN EN ISO 178. *Plasty - stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997. Třídící znak 640607.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$M_0$  Molekulová hmotnost monomeru [ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

$M$  Molekulová hmotnost polymeru [ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

$P$  Polymerační stupeň [1]

$T_g$  Teplota skelného přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_f$  Teplota tečení [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_m$  Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\sigma$  Normálové napětí [MPa]

$F$  Síla [N]

$S$  Plocha [ $\text{m}^2$ ]

$\tau$  Tečné napětí [MPa]

$S_0$  Počáteční plocha [ $\text{m}^2$ ]

$\varepsilon_l$  Prodloužení [mm, %]

$\varepsilon_s$  Zúžení [mm, %]

$l$  Původní délka [mm]

$l_0$  Konečná délka [mm]

$\mu$  Poissonovo číslo [1]

$E$  Modul pružnosti [MPa]

$\varepsilon$  Poměrné přetvoření [mm, %]

$\sigma_M$  Mezní napětí, mez pevnosti [MPa]

$F_{\max}$  Maximální dosažené zatížení [N]

$M$  Ohybový moment [N.m]

$W$  Moment odporu v ohybu [ $\text{m}^3$ ]

$L$  *Vzdálenost podpěr [mm]*

$b$  *Šířka zkušebního tělesa [mm]*

---

h	Tloušťka zkušebního tělesa [ <i>mm</i> ]
y	Velikost průhybu [ <i>mm</i> ]
A <sub>n</sub>	Práce vykonaná kladivem [J]
h <sub>1</sub>	Výška, které dosáhne kladivo bez vzorku [ <i>m</i> ]
h <sub>2</sub>	Výška, které dosáhne kladivo po přeražení vzorku [ <i>m</i> ]
m	Hmotnost kladiva [ <i>kg</i> ]
g	Gravitační zrychlení [ $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]
a <sub>c(N)</sub>	Rázová, vrubová houževnatost [ $\text{kJ}/\text{m}^2$ ]
RS	Průměrná drsnost [ $\mu\text{m}$ ]
RMS	Střední kvadratická odchylka drsnosti [ $\mu\text{m}$ ]
N	Počet měření [1]
z <sub>i</sub>	Výška jednotlivých nerovností [ $\mu\text{m}$ ]
z	Průměrná výška nerovností [ $\mu\text{m}$ ]
PC	Polykarbonát
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
PS	Polystyren
PP	Polypropylen
E <sub>Z</sub>	Ztrátová energie [J]
E <sub>K</sub>	Korigovaná energie [J]
E <sub>P</sub>	Energie přeražení [J]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<b>Obrázek 1:</b> Zjednodušené schéma vzniku polymeru (polyetylenu) [1].....	12
<b>Obrázek 2:</b> Molekulární struktura polymerů [5].....	14
<b>Obrázek 3:</b> Uspořádání merů v kopolymerech [5].....	15
<b>Obrázek 4:</b> Lamelární monokrystal [1].....	16
<b>Obrázek 5:</b> Schéma tvorby sférolitické struktury [1] .....	16
<b>Obrázek 6:</b> Disperze uspořádaných částí v amorfním prostředí [1].....	17
<b>Obrázek 7:</b> Rozdělení polymerů podle termického chování [6] .....	18
<b>Obrázek 8:</b> Termomechanická křivka pro amorfní polymer [1] .....	19
<b>Obrázek 9:</b> Termomechanická křivka pro krystalický polymer [1].....	20
<b>Obrázek 10:</b> Uspořádání ohybové zkoušky třibodovým ohybem [18].....	26
<b>Obrázek 11:</b> Charpyho kladivo a zkušební těleso opatřené vrubem [13] .....	29
<b>Obrázek 12:</b> Princip laserové interferometrie (Michelsonův interferometr) [15] .....	33
<b>Obrázek 13:</b> Strukturní vzorec styrenu a polystyrenu [14] .....	35
<b>Obrázek 14:</b> Struktura izotaktického PP [14] .....	36
<b>Obrázek 15:</b> Instron 3345.....	36
<b>Obrázek 16:</b> Tvar a rozměry vzorku pro tahovou zkoušku [9].....	38
<b>Obrázek 17:</b> Hlavice pro třibodový ohyb .....	48
<b>Obrázek 18:</b> Charpyho kladivo.....	57
<b>Obrázek 19:</b> zkušební těleso PC/ASA po rázové zkoušce zkoušce .....	60
<b>Obrázek 20:</b> Snímky lomových ploch PC/ASA, vrub č. 1 .....	64
<b>Obrázek 21:</b> Snímky lomových ploch PC/ASA, vrub č. 2 .....	64
<b>Obrázek 22:</b> Snímky lomových ploch PS, bez vrubu .....	65
<b>Obrázek 23:</b> Snímky lomových ploch PS, vrub č. 2 .....	65
<b>Obrázek 24:</b> Snímky lomových ploch PP, bez vrubu .....	66



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1: Zvolená rychlost zatěžování v tahu pro PC/ASA .....</i>	37
<i>Tabulka 2: Zvolená rychlost zatěžování v tahu pro PP .....</i>	37
<i>Tabulka 3: Zvolená rychlost zatěžování v tahu pro PS.....</i>	37
<i>Tabulka 4: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PC/ASA, rychlost zatěžování 5 mm/min .....</i>	39
<i>Tabulka 5: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PC/ASA, rychlost zatěžování 10 mm/min .....</i>	40
<i>Tabulka 6: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PP, rychlost zatěžování 50 mm/min .....</i>	41
<i>Tabulka 7: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PP, rychlost zatěžování 50 mm/min .....</i>	42
<i>Tabulka 8: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PS (žlutý), rychlost zatěžování 2 mm/min .....</i>	43
<i>Tabulka 9: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PS (čirý), rychlost zatěžování 1 mm/min .....</i>	44
<i>Tabulka 10: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PS (čirý), rychlost zatěžování 2 mm/min .....</i>	45
<i>Tabulka 11: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PC/ASA, uspořádání 60x4x10 mm.....</i>	49
<i>Tabulka 12: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PC/ASA, uspořádání 60x4x10 mm.....</i>	50
<i>Tabulka 13: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PP, uspořádání 60x4x10 mm .....</i>	51
<i>Tabulka 14: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PP, uspořádání 60x10x4 mm .....</i>	52
<i>Tabulka 15: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PS, uspořádání 60x4x10 mm .....</i>	53
<i>Tabulka 16: Hodnoty naměřené při ohybové zkoušce pro PS, uspořádání 60x10x4 mm .....</i>	54
<i>Tabulka 17: Parametry Charpyho kladiva .....</i>	58
<i>Tabulka 18: Rázová a vrubová houževnatost testovaných materiálů .....</i>	60
<i>Tabulka 19: hodnoty pro výpočet vrubové houževnatosti pro PC/ASA, vrub č. 1 .....</i>	61

---

<i>Tabulka 20: hodnoty pro výpočet vrubové houževnatosti pro PC/ASA, vrub č. 2 .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 21: hodnoty pro výpočet rázové houževnatosti pro PS .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 22: hodnoty pro výpočet vrubové houževnatosti pro PS, vrub č. 1 .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 23: hodnoty pro výpočet vrubové houževnatosti pro PS, vrub č. 2 .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 24: hodnoty pro výpočet rázové houževnatosti pro PP .....</i>	<i>63</i>

## SEZNAM GRAFŮ

<b>Graf 1:</b> Pracovní diagramy tahové zkoušky pro různé materiály [11] .....	24
<b>Graf 2:</b> Pracovní diagramy ohybové zkoušky pro různé materiály [10] .....	27
<b>Graf 3:</b> Závislost tahového napětí na protažení PC/ASA, rychlost zatěžování 5 mm/min .....	39
<b>Graf 4:</b> Závislost tahového napětí na protažení PC/ASA, rychlost zatěžování 10 mm/min .....	40
<b>Graf 5:</b> Závislost tahového napětí na protažení PP, rychlost zatěžování 50 mm/min	41
<b>Graf 6:</b> Závislost tahového napětí na protažení PP, rychlost zatěžování 30 mm/min	42
<b>Graf 7:</b> Závislost napětí na protažení PS (žlutý), rychlost zatěžování 2 mm/min .....	43
<b>Graf 8:</b> Závislost tahového napětí na protažení PS (čirý), rychlost zatěžování 1 mm/min .....	44
<b>Graf 9:</b> Závislost tahového napětí na protažení PS (čirý), rychlost zatěžování 1 mm/min .....	45
<b>Graf 10:</b> Porovnání meze pevnosti v tahu pro testované materiály a rychlosti zatěžování .....	46
<b>Graf 11:</b> Porovnání Youngova a Automatického modulu pro testované materiály a jednotlivé rychlosti zatěžování .....	47
<b>Graf 12:</b> Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PC/ASA, uspořádání 60x4x10 mm .....	50
<b>Graf 13:</b> Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PC/ASA, uspořádání 60x10x4 mm .....	51
<b>Graf 14:</b> Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PP, uspořádání 60x4x10 mm .....	52
<b>Graf 15:</b> Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PP, uspořádání 60x10x4 mm .....	53
<b>Graf 16:</b> Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PS, uspořádání 60x4x10 mm .....	54
<b>Graf 17:</b> Závislost zatížení na prohnutí vzorku pro PS, uspořádání 60x10x4 mm .....	55
<b>Graf 18:</b> Porovnání ohybových modulů pro testované materiály .....	55
<b>Graf 19:</b> Porovnání pevností v ohybu pro testované materiály .....	56