

Vliv tvaru vrubu na mechanické chování termoplastů

Bc. Martin Bárta

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin BÁRTA**

Osobní číslo: **T09680**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv tvaru vrubu na mechanické chování termoplastů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma
2. Zhotovte zkušební tělíska
3. Provedte experimentální zkoušky
4. Výsledky provedených zkoušek vyhodnoťte

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Žaludek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

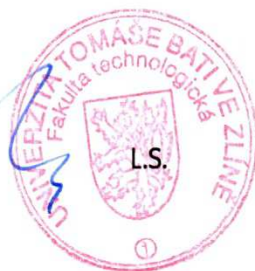
13. února 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph
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

.....

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

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k 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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).*

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

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

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Tato diplomová práce byla vypracována na téma „Vliv tvaru vrubu na mechanické chování termoplastů“. Teoretická část práce se zabývá použitými materiály a mechanickými zkouškami. Cílem praktické části práce bylo vytvoření různých tvarů vrubů, provedení zkoušky a vyhodnocení ovlivnění výsledku tvarem vrubu.

Klíčová slova: vrubová houževnatost, tvary vrubu, vrub

ABSTRACT

This thesis has been prepared on the 'Notch Effect on the Mechanical Behaviour of Thermoplastics'. Theoretical part deals with the materials used and mechanical tests. Practical part was to create different-shaped indents, the test and evaluation of influencing the outcome of the notches.

Keywords: notch strength, shape of the notch, notch

Rád bych poděkoval Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za odborné vedení diplomové práce, poskytnutí cenných připomínek, pomoc s experimentálním měřením a jeho věnovaný čas.

Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

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

Ve Zlíně

.....

podpis diplomanta

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 POUŽITÉ TERMOPLASTY | 11 |
| 1.1 VLASTNOSTI VYBRANÝCH POLYMERŮ..... | 11 |
| 1.1.1 Polypropylen (PP) | 12 |
| 1.1.2 Polyamidy (PA)..... | 13 |
| 1.1.3 Polystyren (PS)..... | 14 |
| 1.1.4 Polybutyléntereftalát (PBT) | 15 |
| 2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY TERMOPLASTŮ | 17 |
| 2.1 ZKOUŠKA TAHEM | 18 |
| 2.2 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY | 24 |
| 3 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI | 29 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 30 |
| 4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ | 31 |
| 4.1 MATERIÁL A ROZMĚRY VZORKŮ | 31 |
| 4.2 VYTVOŘENÍ VRUBŮ | 31 |
| 4.2.1 Tvary vrubů | 32 |
| 5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY | 37 |
| 5.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA | 37 |
| 5.1.1 PS | 39 |
| 5.1.2 PA 6 +30% GF | 41 |
| 5.1.3 PA 6..... | 43 |
| 5.1.4 PP | 45 |
| 5.1.5 PBT | 47 |
| 5.2 CHARPYHO KLADIVO..... | 48 |
| 5.2.1 PS | 50 |
| 5.2.2 PA 6 +30% GF | 51 |
| 5.2.3 PA 6..... | 52 |
| 5.2.4 PP | 53 |
| 5.2.5 PBT | 54 |
| 6 HODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ | 56 |
| 6.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA | 56 |
| 6.2 CHARPYHO KLADIVO..... | 57 |
| ZÁVĚR | 61 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 63 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 65 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 68 |
| SEZNAM TABULEK | 69 |
| SEZNAM GRAFŮ | 70 |
| SEZNAM PŘÍLOH | 71 |

ÚVOD

V dnešní době jsou polymery nedílnou součástí průmyslové výroby a jejich používání je důležité nebo nepostradatelné v mnoha výrobních sférách. Zejména kvůli jejich výborným vlastnostem, kterých nelze dosáhnout u klasických materiálů popřípadě jejich kombinací se proto staly velmi oblíbenými konstrukčními prvky. K největším výhodám polymerů patří jejich nízká hmotnost, jsou levné, odolné proti korozi a mnoho dalších.

S rostoucím podílem zastoupením polymerů v průmyslové výrobě a jejich prudkému vývoji (různé modifikace, plniva atd.) roste také problematika jejich bezproblémového používání a jejich správné funkčnosti. Proto s přibývajícím typy polymerů roste i potřeba se seznámat s novými vlastnostmi materiálů a sledovat jejich chování při různých podmínkách a zatížení.

Konstrukční prvky z polymerů mohou být často jsou namáhány rázovým zatížením a vyžaduje se tedy od těchto plastů vysoká houževnatost. Pro potřeby konstruktérů polymerních součástí namáhaných rázově, byly vytvořeny normalizované zkoušky. Mezi ty nejpoužívanější patří zkouška Charpyho kladivem.

Únavové procesy konstrukčních dílů z polymerů hrají důležitou roli, a proto je při návrhu součástí využíváno mnoho různých 2D, 3D výpočetních softwarů, které dokážou graficky znázornit požadované informace. Pevnost součásti je daná zvoleným materiálem a lze ji vhodnou aplikací jiného materiálu značně ovlivnit.

V této práci bude porovnáván vliv tvaru vrubu na mechanické vlastnosti daného polymeru. Mechanické vlastnosti se budou zkoušet na univerzálním trhacím stroji a Charpyho kladivu. Získané výsledky budou zpracovány a diskutovány.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POUŽITÉ TERMOPLASTY

Polymerní materiály jsou dnes hojně využívány téměř ve všech odvětvích lidského působení, nejvíce však v průmyslu. Důvody tak rozsáhlého rozšíření jsou jejich výborné vlastnosti podobné tradičním materiálům (kovy, sklo, dřevo, keramika), nebo naopak vlastnosti odlišné a tím umožňují zcela nové aplikace a konstrukční řešení. K výhodám těchto materiálů patří také jejich příznivá cena, mnohé se vyrábí synteticky ze snadno dostupných surovin.

Způsoby zpracování polymerů umožňují snadnou a rychlou výrobu předmětů ve velkých sériích.

Polymery jsou materiály s vysokou molekulovou hmotností, různého chemického složení.

Polymerní materiály rozdělujeme:

Podle původu:

- Přírodní
- syntetické

Podle deformace:

- Nevratné - Plastomery
- Vratné - Elastomery

Podle fixace tvarové změny:

- Fyzikální - Termoplasty
- Chemická – Reaktoplasty

Termoplastické materiály lze opakovaně působením tepla převést do stavu viskozního a opětovně ochlazením zafixovat nový tvar.

Reaktoplastické materiály zpravidla prochází viskozním stavem pouze jednou a jejich výsledný tvar je zafixován chemickou reakcí a vznikem vazeb mezi molekulami (síťování). Tyto materiály bývají nerozpustné a netavitelné.

1.1 Vlastnosti vybraných polymerů

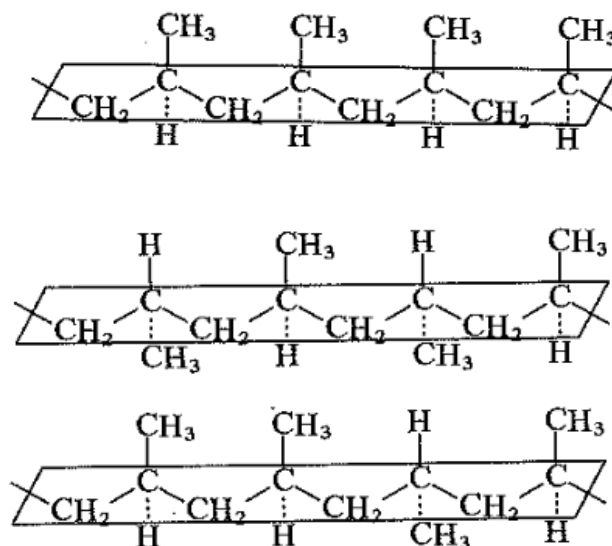
Zkoušené materiály v diplomové práci jsem volil dle jejich dostupnosti a jejich častému používání.

1.1.1 Polypropylen (PP)

Polypropylen je houževnatá, krystalická látka (stupeň krystalinity 60-75%) bez zápachu a s nízkou hustotou. Vykazuje výborné elektroizolační vlastnosti a díky vysoké krystalinitě je neprůhledný.

Vlastnosti a použití:

Rozlišujeme tři základní typy polypropylenu, a to izotaktický (obr.a), syndiotaktický (obr.b) a ataktický (obr.c). Základní řetězec leží v rovině a všechny methylové skupiny jsou uspořádány na jedné straně roviny (izotaktický), střídavě nad rovinou a pod rovinou (syndiotaktický) nebo statisticky distribučně (ataktický).



Obrázek 1 – základní typy řetězců PP

Při polymeraci propylenu vzniká vždy určité množství ataktického podílu. Vzhledem k tomu, že ataktické podíly jsou měkké, parafínového až blátivého charakteru, je žádoucí co nejvíce snížit množství ataktického podílu. Ataktický podíl snižuje teplotu tání, zhoršuje mechanické pevnosti i odolnost proti rozpouštědlům, zlepšuje ovšem rázovou houževnatost. [1]

Z tepelných vlastností je pozoruhodný vysoký bod tání (165 °C) a teplota použití až do 150 °C). [18]

Je nerozpustný ve všech organických rozpouštědlech, při teplotách vyšších než 80 °C je rozpustný v chlorovaných a aromatických uhlovodících.

Zpracovává se lisováním, vstřikováním, vytlačováním, vytlačovacím vyfukováním atd.

Z PP vyrábíme např. desky, fólie, trubky, láhve, obalové materiály, vlákna. [1]

PP GF30 - obsahuje 30% skelných vláken, má dobrou dlouhodobou teplotní stabilitu, vysokou tuhost a velmi dobrou chemickou odolnost. Má nejrůznější využití v chemickém, textilním, potravinářském průmyslu a laboratorní technice.

1.1.2 Polyamidy (PA)

Polyamidy jsou lineární polymery obsahující v řetězcích amidové skupiny –CONH–. Nejvýznamnější a nejrozšířenější jsou polyamidy s alifatickými řetězci.[1]

K jednoduchému označování alifatických polyamidů byl zaveden systém, který udává počet uhlíkových atomů ve stavebních jednotkách řetězců.[1]

- **PA 6** je polyamid z kyseliny 6-aminokapronové nebo 6-kaprolaktamu
- **PA 66** je polyamid z hexamethyldiaminu a kyseliny adipové

Vlastnosti a použití:

Řetězce molekul jsou vzájemně spojovány vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami, které na sebe vzájemně působí velkými soudržnými silami. To vede k vysoké pevnosti materiálu a zvýšení jeho teploty měknutí (200-250 °C).

Polyamidy jsou houževnaté, tvrdé, s vysokou odolností proti oděru a vysokou chemickou odolností. Mají také výborné elektroizolační vlastnosti, které snižuje určitá hydroskopičnost materiálu. Podíl krystalické fáze ovlivňuje mechanické vlastnosti. Podíl krystalické fáze je ovlivněn způsobem a rychlostí chlazení.

Polyamidy mají úzké zpracovatelské rozmezí teplot. Zpracovávají se všemi postupy typickými pro termoplasty. Lze je také svařovat, lepit, pokovovat.

Polyamid 66 má výhodu ve vysokém bodu tání a v poněkud vyšší pevnosti a nižší navlhavosti než polyamid 6. Další výhodou ve srovnání s polyamidem 6 je to, že neobsahuje volný polymer, takže odpadá jeho odstraňování. Polyamid 66 slouží v širokém měřítku jako plast i jako materiál pro výrobu vláken, fólií a nátěrových hmot.[1]

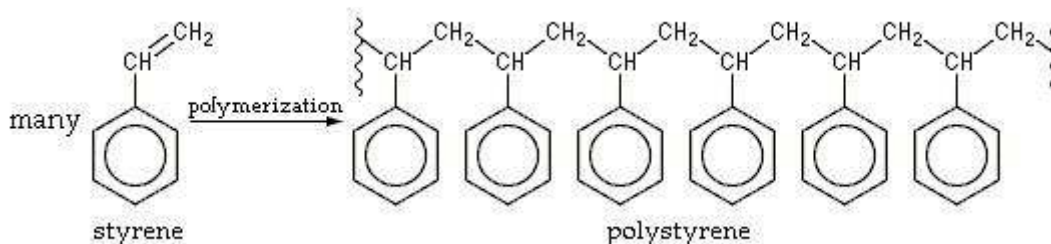
PA 6 GF30 – je to materiál s vysokou nasákavostí, vysokou odolností proti otěru, vysokou pevností při vysokém provozním zatížení. Dobře tlumí vibrace a dobře se obrábí. Je vhod-

ný ke svařování, lepení. Největší uplatnění je v průmyslu výroby strojů a vozidel, dále pak v potravinářství.

PA 6 GF30 a *PA 6.6 GF30*– je to materiál s vysokou nasákavostí, vysokou odolností proti otěru, vysokou pevností při vysokém provozním zatížení. Dobře tlumí vibrace a dobře se obrábí. Je vhodný ke svařování, lepení. Největší uplatnění je v průmyslu výroby strojů a vozidel, dále pak v potravinářství.

1.1.3 Polystyren (PS)

Je termoplastický polymer, využívaný v mnoha technických odvětvích. Je snadné jej zpolymerizovat všemi známými polymeračními technikami. Pro výrobu kopolymerů a homopolymerů se však nejčastěji používá radikálová polymerace. Nejdůležitějšími způsoby výroby polystyrenu jsou polymerace v monomerní fázi a suspenzí.



Obrázek 2 – složení polystyrenu

Vlastnosti a použití:

Tento materiál je tvrdý, křehký, viditelné světlo propouští z 90%, má výborné elektroizolační vlastnosti. Za běžných podmínek je dostatečně odolný vůči oxidaci, ale není doporučován pro venkovní použití, protože fotooxidací žloutne a křehne. [12]

Klasický polystyren je bez zápachu a není toxický, téměř nevstřebává aroma a díky těmto vlastnostem je hojně využíván v potravinářství. Má dobrou rozměrovou stálost a malou nasákavost vody.

Rozpouští se v aromatických a chlorovaných uhlovodících, esterech a ketonech. Odolává účinkům alkoholů, minerálních olejů a zásad. Teplotní hranice jeho použitelnosti je asi 75°C. [12]

Díky snadné zpracovatelnosti polystyrenu jej především vstříkujeme, je bez problémů vybarvitelný na pestrou paletu transparentních a krycích odstínů, ale také značně křehký, po-

užívá se hlavně k výrobě nenáročného spotřebního zboží, jakým jsou různé kelímky, misky, podnosy, dětské hračky, ozdobné předměty atd. [12]

Pěnový polystyren- je speciální druh polymerního styrenu kde materiál je vytvořený z jednotlivých “buňek” o průměru 80-150 mikrometrů. Měrná hmotnost tohoto materiál se pohybuje mezi 15-40 kg/m³. Pěnový polystyrene je ve velkých objemech používán ve stavebnictví při zateplování budov, v tepelné izolační technice všeobecně, na dekorační účely a taktéž na balení citlivých produktů jako je elektronika apod. [15]

Pěnový polystyren se vyrábí dvěma způsoby:

- 1) PS se zahřeje v autoklávě na 170°C v přítomnosti vhodného množství nadouvadla (obvykle etylén). Získaná těstovitá látka se přetlačí přes tvarovací dýzy a po opuštění dýzy plyn expanduje za tvorby “pěnové” struktury.
- 2) Nadouvadlo (petroléter, pentan, hexan) se přidává do monomer, který se potom zpracuje suspenzním způsobem za zvýšeného tlaku. Vznikají bezbarvé perličky o průměru 0,2-3 mm. Perličky se dále zpracovávají ve třech stupních: [15]
 - a. Předpěnění
 - b. Chlazení
 - c. Dopěňování

Polystyren lze zpracovávat všemi technologiemi používaných při zpracování termoplastů, dle žádaného typu výrobku. Nejvíce jsou zastoupeny technologie vstřikování, tvarování, vytlačování.

1.1.4 Polybutyléntereftalát (PBT)

Je to semikrystalický polymer, který je řazen mezi tzv. inženýrské plasty pro náročné aplikace. [2]

Je obtížně zápalný a dobře odolává povětrnostním vlivům (2-4 roky).

Vlastnosti a použití

Má dobré technické vlastnosti díky své krystalické povaze a poměrně vysoké $T_m = 225^\circ\text{C}$. Vysoká rychlost krystalizace přispívá k reprodukovatelné hodnotě smrštění ve formě a snadné zpracovatelnosti na rozměrově přesné výrobky. Smrštění výrazně závisí na teplotě formy

PBT má vysokou mechanickou pevnost a tuhost ($E = 2000-2700 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 50-58 \text{ MPa}$), houževnatost, výborné elektroizolační vlastnosti, výbornou chemickou odolnost, vysoký lesk povrchu výrobků. Mechanické vlastnosti strmě závisí na polymeračním stupni.

Mezi jeho další modifikace patří vyztužení vláknitým plnivem (skelná vlákna nebo minerální plniva). [2]

Díky výše uvedeným vlastnostem jej používáme pro mechanicky a elektricky namáhané díly přístrojů spotřební elektroniky, elektrických strojů pro domácnost a elektrické výbavy automobilů. Pro dílce palivového systému automobilů, galanterní zboží, kalkulačky apod. [2]

2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY TERMOPLASTŮ

Mechanické vlastnosti pevných látek jsou odezvou materiál na působení vnějšího zatížení nebo vnějších sil. Konstrukce výrobku a volba jeho materiálu se řídí znalostmi různých mechanických, fyzikálních, chemických, technologických vlastností materiálu. Z jakého materiálu bude výrobek vyroben se rozhodujeme právě podle znalosti těchto vlastností a požadovaných kritérií na výrobek. Například zda-li bude vystaven povětrnostním vlivům, chemickému prostředí, dynamickému namáhání, tepelnému namáhání atd.

Mechanické vlastnosti materiálu jsou prakticky čtyři:

- pružnost
- plasticita
- pevnost
- houževnatost

Pružnost- vlastnost těles nabýt původního tvaru, přestane-li na ně působit síly, které vyvolaly jejich přetvoření. [3]

Plasticita- schopnost pevné hmoty podřet deformace, vyvolané účinkem vnějších sil.[3]

Pevnost- schopnost materiálu nebo součásti odolávat účinkům působení sil, aniž by došlo v některém místě k porušení. [3]

Houževnatost- odolnost materiálu s velkou tvárlivostí a pevností proti vzniku lomu. Je podmíněna velkou schopností k plastické deformaci. [3]

Mechanické zkoušky lze dělit z několika hledisek. Nejčastěji je dělíme podle nejdůležitějších parametrů, které významně ovlivňují mechanickou zkoušku. Mechanické zkoušky lze dělit podle:

Teploty, za které zkouška probíhá:

- *za okolní teploty* (rozumí se teploty cca 20°C)
- *za zvýšené teploty*
- *za snížené teploty*

Rychlosti deformace:

- *statické zkoušky* – rychlost zatížení pomalu narůstá

- *cyklické zkoušky* – zkušební těleso je cyklicky namáháno. Rychlost zkoušení se udává v počtech cyklů za jednotku času.
- *Dynamické rázové zkoušky* – zatížení probíhá jednorázově do porušení tělesa v čase několik ms.

Napětového stavu, který v tělese při zkoušce vzniká:

- *Jednoosá napjatost* – klasické zkoušky jako tah, tlak, ohyb apod.
- *rovinná napjatost* – zkoušky stříhem, smykem, přetlakem apod.
- *Prostorová napjatost* – zkoušky těles s vruby a trhlinami, kombinace namáhání (např. tah a krut, ohyb a krut) apod.

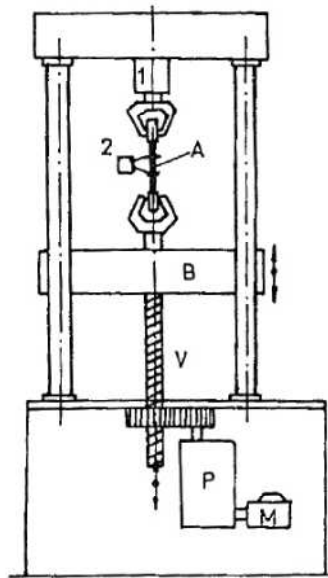
2.1 Zkouška tahem

Je nejrozšířenější statickou zkouškou. je nutná téměř u všech technických materiálů, protože jí získáme některé základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích, jejichž tvary a rozměry jsou normalizovány. Trhací zkouškou zjišťujeme pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a zúžení (kontrakci) zkoušeného materiálu. [4]

Podstatou zkoušky je protažení tělesa ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí zkoušení do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu (poměrné prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty.[5]

Zkušební zařízení

K základnímu vybavení laboratoře mechanických zkoušek patří univerzální zkušební stroj, na kterém se provádí zkoušky tahem, tlakem a zkouška ohybem. Se sériovou výrobou zkušebních strojů se začalo na konci minulého století. Princip stroje zůstal zachován do dnešní doby. Stroj (obr.3) tvoří pevný rám, v jehož horní části je umístěn dynamometr 1- zařízení pro měření síly. Zkušební těleso A je jedním koncem uchyceno k dynamometru a druhým koncem k pohyblivému příčnicku B. Příčnick je uváděn do pohybu motorem M, přes vřetenou V a převodovou skříň P. Při pohybu příčnicku dochází k postupnému zatěžování a deformaci zkušebního tělesa. Deformace tělesa je registrována průtahoměrem 2. Vhodnou úpravou uchycení zkušebního tělesa a průtahoměru se na tomto stroji provádí i ostatní mechanické zkoušky. [6]



Obrázek 3 - Schéma univerzálního trhacího stroje

Měřené veličiny

Pevnost v tahu (mez pevnosti v tahu) σ_{Pt} je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F , kterou snese zkušební tyč a původního průřezu tyče S_0 .

$$\sigma_{Pt} = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Byla-li původní délka zkušební tyče l_0 a délka zjištěná při přetržení l , je celkové prodloužení (změna délky):

$$\Delta l = l - l_0 \text{ [mm]} \quad (2)$$

Poměrné prodloužení ε je dáno poměrem změny délky Δl k původní délce zkušební tyče l_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \text{ [-]} \quad (3)$$

Tažnost δ je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech původní délky:

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

U tažnosti uvádíme index (δ_5 , δ_{10}), zda byla získána na krátké či dlouhé tyči.

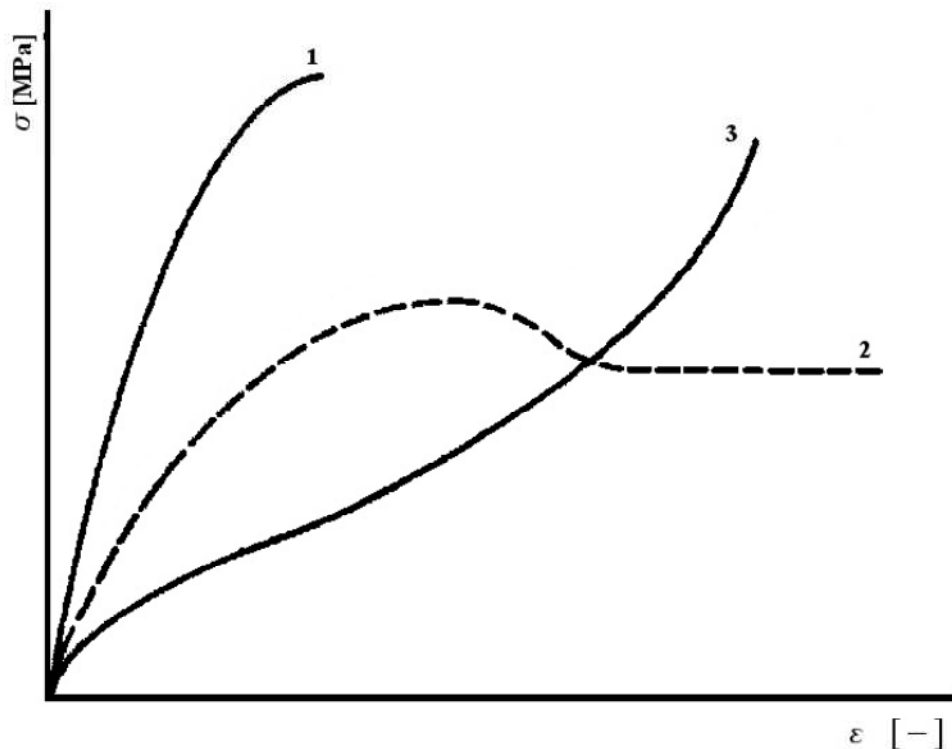
Kontrakce (zúžení průřezu) φ je dána poměrem zúžení průřezu tyče po přetržení k původnímu průřezu tyče S_0 . Vyjadřujeme ji v procentech:

$$\varphi = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

Trhací stroje kreslí v průběhu trhací zkoušky pracovní diagram, udávající závislost poměrného prodloužení ε na napětí σ (nebo změny délky Δl na zatěžující síle F). V pružnosti a pevnosti má význam jen diagram ε - σ . [4]

Tahové diagramy polymerních materiálů

Definice a jednotky veličin měřených u zkoušek polymerních materiálů jsou analogické, jako u kovů. Avšak napětí, které se u kovů značí R se v této oblasti značí σ . V diagramu na obr.4 můžeme porovnat výsledky tahových zkoušek různých typů polymerů. Křivka označená číslem 1 popisuje chování látek s vysokou pevností a malou tažností. Tyto materiály nejsou houževnaté a patří mezi ně např. formaldehydové a epoxidové pryskyřice, polystyren, polymethylmetakrylát. Průběh křivky číslo 2 je přiřazen plastickým materiálům. Zpočátku je průběh lineární s výraznou plastickou oblastí, kde se výrazně projeví horní mez kluzu. Po překonání meze kluzu se materiál orientuje a výrazně klesá napětí. K přetržení vzorku dochází až při mnohonásobném protažení. Třetí křivka je charakteristická pro elastomerní materiály. Průběh tohoto diagramu je nelineární a plynulý. Z diagramu je patrné, že z počátku se projevují velké deformace při malých napětích. Rozměry zkušebních těles pro trhací zkoušku jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 527. Existuje několik typů zkušebních těles, rozdělených dle zkoušeného materiálu. [7]



Obrázek 4 - Tahové diagramy polymerních materiálů

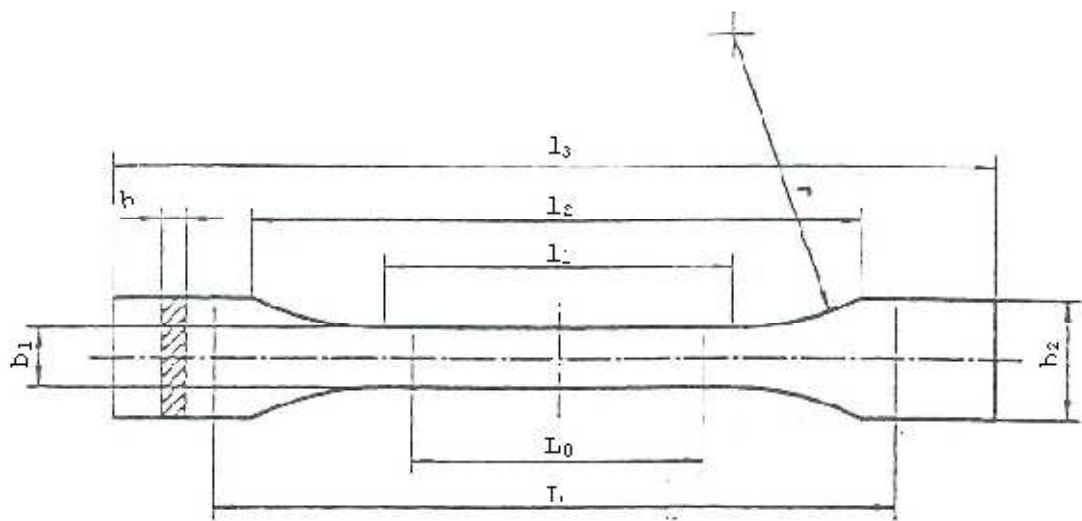
Zkušební tělesa

Rozměry a tvar lopatek se řídí normu ČSN EN ISO 527-2. Zkušební tělesa mají tvar lopatek (obr.5). Mohou být zhotovena přímo vstřikováním nebo je lze také mechanicky obrábět z lisovaných desek materiálu. Tělesa musí být pevně uchycena do čelistí zkušebního zařízení a nesmí dojít k prokluzu mezi lopatkou tělesa čelistí v průběhu zkoušky.[9]

Zkušebních těles existuje několik typů. Pro přímo tvářené tělesa nejčastěji volíme typ 1A, typ 1B se používá pro mechanicky obráběné tělesa.

Pokud z nějakých důvodů nelze získat tělesa standardních rozměrů, lze použít i tělesa typu 1BA a 1BB s tím, že rychlost zkoušení určuje norma ISO 527-1. Výsledky modulu pružnosti u těchto těles nejsou srovnatelné s výsledky u standardních těles. Kvůli malým délkám a rychlému průběhu zkoušky se tato veličina velmi obtížně měří u tohoto typu těles.

Rozměry zkušebních těles dle normy jsem uvedl do tabulky 1 a 2. [9]

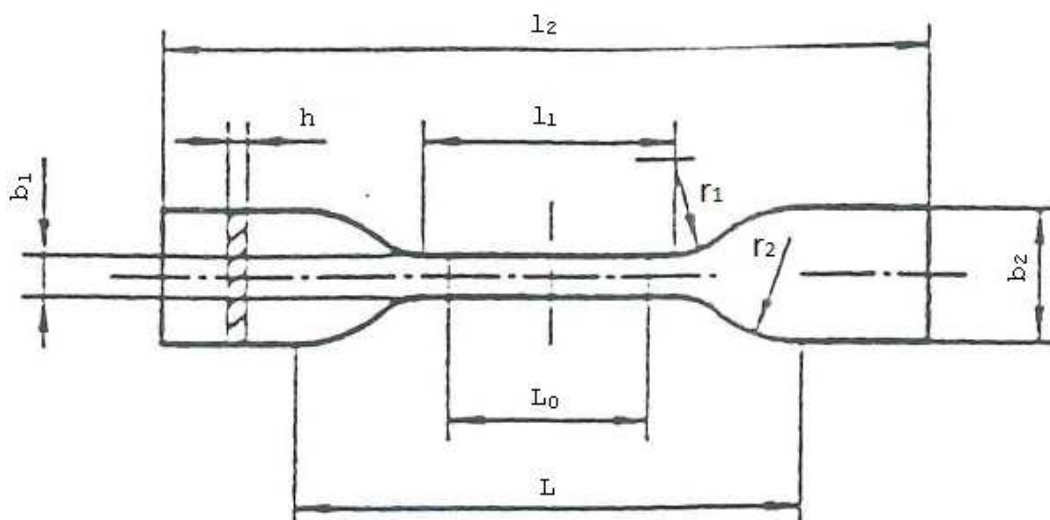


Obrázek 5 – tvar zkušebního tělesa pro trhací zkoušku (typ 1)

| rozměry v mm | 1A | 1B | 1BA | 1BB |
|---|--------------|---------------|---------------|---------------|
| l_3 celková délka [mm] délka zúž. rovnoběž. části | ≥ 150 | ≥ 150 | ≥ 75 | ≥ 30 |
| l_1 [mm] | 80 ± 2 | $60 \pm 0,5$ | $30 \pm 0,5$ | $12 \pm 0,5$ |
| r Poloměr [mm] rozpětí mezi širokými rovnoběž. částmi [mm] | 20-25 | ≥ 60 | ≥ 30 | ≥ 12 |
| l_2 | 104-113 | 106-120 | 58 ± 2 | 23 ± 2 |
| b_2 šířka konců [mm] | $20 \pm 0,2$ | $20 \pm 0,2$ | $10 \pm 0,5$ | $4 \pm 0,2$ |
| b_1 šířka zúžené rovnoběž. Části [mm] | $10 \pm 0,2$ | $10 \pm 0,2$ | $5 \pm 0,5$ | $2 \pm 0,2$ |
| h doporučená tloušťka [mm] počáteční měřená délka | $4 \pm 0,2$ | $4 \pm 0,2$ | ≥ 2 | ≥ 2 |
| L_0 [mm] | $50 \pm 0,5$ | $50 \pm 0,5$ | $25 \pm 0,5$ | $10 \pm 0,2$ |
| L počáteční vzdálenost čelistí [mm] | 115 ± 1 | l_{20}^{+5} | l_{20}^{+2} | l_{20}^{+1} |

Tabulka 1 – rozměry zkušebních těles typu 1 pro tahovou zkoušku

Existuje také typ 5, který rozlišujeme na typ 5A a typ 5B. Tento tvar zkušebních těles se nejčastěji používá pro pryžové materiály.



Obrázek 6 - tvar zkušebních tělesa pro trhací zkoušku (typ 5)

| | Rozměry v mm | 5A | 5B |
|-------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| l_2 | Celková délka minimální [mm] | ≥ 75 | ≥ 35 |
| b_2 | šířka konců [mm] | $12,5 \pm 1$ | $6 \pm 0,5$ |
| l_1 | délka zúžené rovnoběž. části [mm] | 25 ± 1 | $12 \pm 0,5$ |
| b_1 | šířka zúžené rovnoběž. části [mm] | $4 \pm 0,1$ | $2 \pm 0,1$ |
| r_1 | malý radius [mm] | $8 \pm 0,5$ | $3 \pm 0,1$ |
| r_2 | velký radius [mm] | $12,5 \pm 1$ | $3 \pm 0,1$ |
| L | počáteční vzdálenost čelistí [mm] | 50 ± 2 | 20 ± 2 |
| L_0 | počáteční měřená délka [mm] | $20 \pm 0,5$ | $10 \pm 0,2$ |
| h | Tloušťka [mm] | ≥ 2 | ≥ 1 |

Tabulka 2 - rozměry zkušebních těles typu 5 pro tahovou zkoušku

2.2 Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy

Zkušební těleso umístěné vodorovně na podpěrách je přeraženo úderem rázového kyvadla, přičemž směr nárazu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami.

V případě rázu na užší stranu, tj. v případě, kdy se používají tělesa opatřená vrubem, dopadá kladivo na stranu protilehlou k vrubu.

Zkušební zařízení

Zkušební stroj je kyvadlové kladivo s tuhou konstrukcí. Musí být schopno měřit rázovou energii W spotřebovanou k přeražení zkušebního tělesa. Hodnota této energie je definována jako rozdíl mezi počáteční energií kyvadla E a energií kyvadla zbývající po přeražení zkušebního tělesa. Musí být provedena přesná korekce hodnoty energie na ztráty způsobené třením a odporem vzduchu.

Kyvadlo musí být pevně uchyceno k základnímu bloku, jehož hmotnost musí být alespoň 40x vyšší, než je hmotnost nejtěžšího používaného kyvadla. Základní blok musí být nastavitelný tak, aby poloha břitu kyvadla procházela středem vzdáleností mezi podpěrami zkušebního tělesa s maximální odchylkou $\pm 0,2$ mm a musí být ustaven tak, aby se dotýkal zkušebního tělesa tvaru hranolu po celé šířce nebo tloušťce. Dotyková přímka musí být kolmá k podélné ose zkušebního tělesa s přesností na $\pm 2^\circ$. [8]

Břit rázového kyvadla je vyroben z kalené oceli, musí být zkosen do úhlu $30^\circ \pm 1^\circ$ a zaoblen na poloměr $R_1 = 2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$.

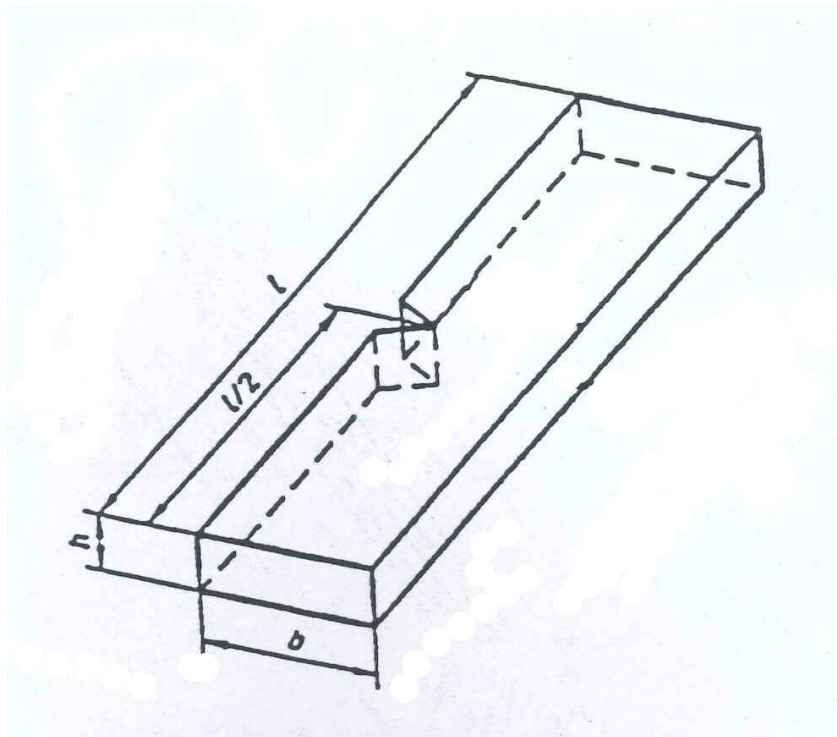
Vzdálenost mezi osou rotace a bodem nárazu ve středu zkušebního tělesa musí být v rozmezí $\pm 1\%$ z délky kyvadla L_p .

Podpěry zkušební tělesa jsou dva pevně zabudované hladké bloky uspořádané tak, aby byla v okamžiku rázu podélná osa zkušební tělesa tvaru přímého pravoúhlého hranolu vodorovná s přesností 1:200 a nárazová plocha zkušební tělesa byla rovnoběžná s břitem kyvadla s přesností 1:200. [8]

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa nesmí být zkroucená a musí mít vzájemně kolmé, respektive rovnoběžné dvojice povrchů. Povrchy a hrany nesmí obsahovat vrypy, nerovnosti, propadliny, přetoky.

U zkušebních těles je nutno provádět vizuální kontrolu zda-li splňují výše uvedená kritéria. Tělesa, která vykazují měřitelné nebo viditelné odchylky, z měření vyřadíme nebo je upravíme na požadované rozměry. [8]



Obrázek 7 - Zkušební těleso pro Charpyho zkoušku

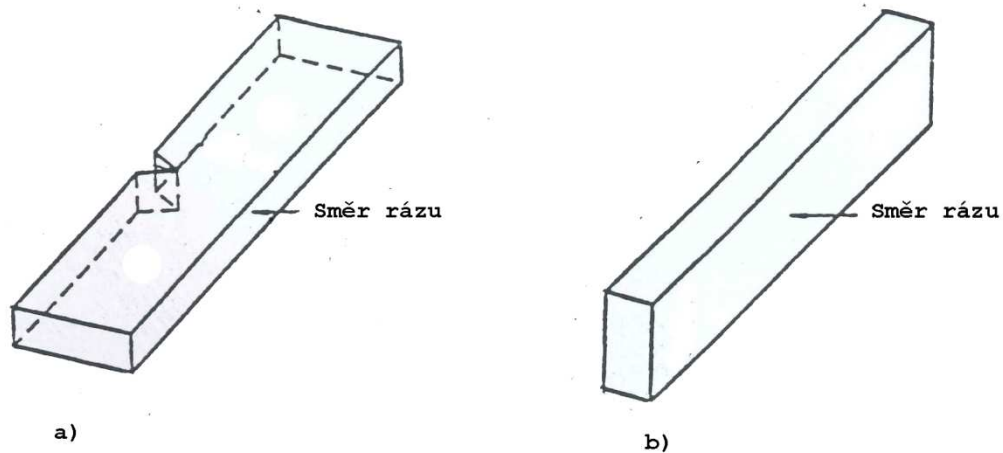
| | | typ 1 | typ 2 | typ 3 |
|----------|---------------|--------|--------------|--------------|
| l | délka [mm] | 80±2 | 25h | 11 nebo 13 h |
| b | šířka [mm] | 10±0,2 | 10 nebo 15 h | 11 nebo 15 h |
| h | tloušťka [mm] | 4±0,2 | 3 | 3 |
| L | rozpětí [mm] | 62 | 20h | 6 nebo 8 h |

Tabulka 3 – rozměry zkušebních těles pro Charpyho zkoušku

V předcházející tabulce platí, že $h \leq b \leq l$. Tloušťky uvedené v tabulce jsou nejvíce preferované. Pokud je vzorek vytvořen z desky nebo dílu, tak má tloušťku desky nebo dílu.

Typy zkušebních těles 2 a 3 se používají pro materiály vyztužené dlouhými vlákny, tedy pro tělesa vykazující mezivrstevový smykový lom.

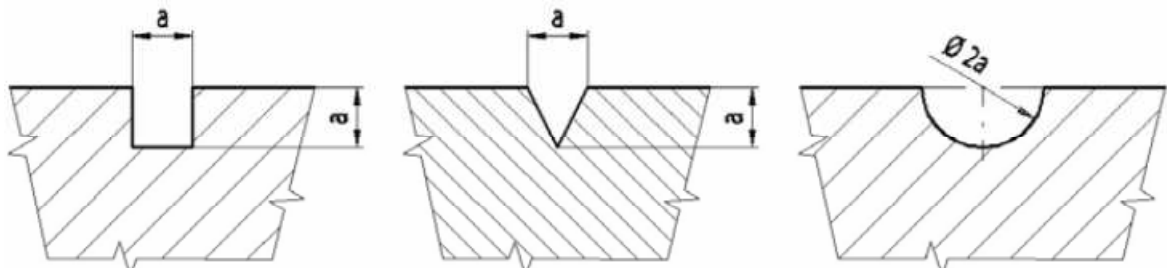
U těchto typů zkušebních těles volíme i směr rázu, dle zkoušeného materiálu. Volit můžeme mezi kolmým rázem na širší stranu (obr.8 A) a rovnoběžným rázem na širší stranu (tloušťka desky z níž bylo zkušební těleso vyrobeno je rovnoběžná se směrem rázu (obr.8 B). Rozměry těles nejsou blíže určeny, jejich specifikem je poměr rozpětí k rozměru zkušebního tělesa ve směru rázu (tab.3).



Obrázek 8 – směr rázu u Charpyho zkoušky

Vruby

Vrubem rozumíme ta místa na výrobku, která zapříčiňují změny silového toku v součásti. Vruby můžeme rozdělit na technologické (nedokonalosti materiálu) a na konstrukční (mají svoji funkci na součásti). Nejčastější typy vrubů jsou vytvořeny ze základních geometrických tvarů (obr.9). Tvary typu „V“ se mohou lišit např. v poloměru kořene vrubu.



Obrázek 9 – příklady typů tvaru vrubu

Postup zkoušky

Změří se tloušťka h a šířka b ve středu každého zkušební tělesa.

Provede se kontrola, zda má kladivo předepsanou rychlost rázu a zda je správně zvoleno tak, že absorbovaná energie W leží v intervalu 10% - 80% celkové energie kyvadla E .

Provede se slepý pokus (bez zkušební tělesa) a zaznamená se celková ztráta energie třením a zjistíme zda jsou vyhovující. [8]

Kyvadlo se zvedne a zajistí, zkušební těleso se umístí na podpěry stroje tak, aby břit kyvadla dopadal na střed zkušební tělesa. Tělesa opatřená vrubem se musí ustavit tak, aby střed vrubu byl přesně v rovinně rázu.

Kyvadlo se uvolní, zaznamená se rázová energie absorbovaná zkušebním tělesem a zahrnou se nezbytné korekce na ztráty třením.

Mohou nastat 4 případy přeražení vzorku s následujícím označením:

- C úplné přeražení – těleso je rozděleno na dva nebo více kusů
- H kloubové přeražení – dvě části zkušební tělesa drží pohromadě pouze tenkou obvodovou vrstvou v podobě kloubu bez zbytkové tuhosti
- P částečné přeražení – neúplné přeražení, které neodpovídá definici kloubového přeražení
- NB nepřeraženo – stav, kdy nedojde k přeražení tělesa a to je pouze ohnuto a protlačeno mezi podpěrami.

Vyjadřování získaných výsledků

Rázová houževnatost Charpy zkušebních těles bez vrubu a_{cU} [kJ/m²], se vypočte podle následující rovnice:

$$a_{cU} = \frac{W_B}{hb} \cdot 10^3 [MPa] \quad (5)$$

Vrubová houževnatost Charpy zkušebních těles opatřených vrubem a_{cN} [kJ/m²], se vypočte podle následující rovnice:

$$a_{cN} = \frac{W_B}{hb_n} \cdot 10^3 [MPa] \quad (6)$$

kde:

W_b je energie při přeražení [J]

- h tloušťka zkušebního tělesa [mm]
b šířka zkušebního tělesa [mm]
b_n šířka zkušebního tělesa pod vrubem [mm]
N je typ vrubu A, B nebo C

Pokud není průhyb měřen přímo zařízením pro měření posunutí, lze jej počítat ze záznamu síla-čas dle rovnice:

$$s(t) = v_0 t - \frac{L_p \cdot g}{M_H} \int_0^t \int_0^{t_1} F(t) dt dt_1 \quad [mm] \quad (7)$$

kde:

- v₀ je rychlost nárazu [m/s]
t čas po nárazu, kdy se počítá průhyb [s]
L_p délka kyvadla [m]
M_H horizontální moment kyvadla [mm]
F(t) síla měřená v čase t po nárazu
g gravitační zrychlení [m/s²]

3 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této práce je vytvořit na zkušebních tělíscích různé tvary vrubů a vyhodnotit vliv tvaru vrubu na mechanické chování materiálu. Bude provedena zkouška pevnosti v tahu a zkouška vrubové houževnatosti na Charpyho kladivě pro různé materiály.

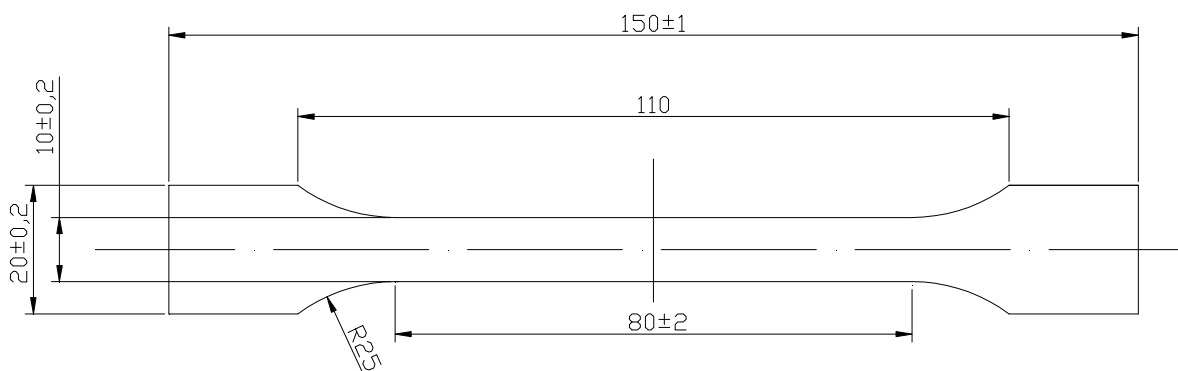
Získané výsledky z obou zkoušek pro každý typ vrubu budou vzájemně mezi sebou porovnány a bude vyhodnocen vliv tvaru vrubu na mechanické vlastnosti. Z těchto výsledků se stanoví závěr práce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

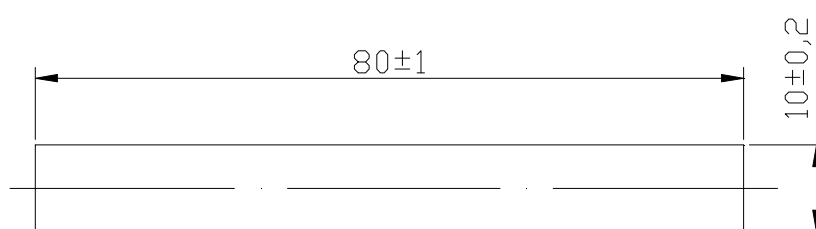
4.1 Materiál a rozměry vzorků

Pro tahovou zkoušku byla použita standardní zkušební tělíska dle normy ČSN EN ISO 527-2 o tloušťce 4 mm. Tělesa byla zhotovena z PA 6, PA 6 + 30% skleněných vláken, PP, PBT, PS.



Obrázek 10 – tvar zkušebního tělesa pro trhací zkoušku (typ 1)

Pro zkoušku vrubové houževnatosti byla použita zkušební tělíska dle normy ČSN EN ISO 179 o tloušťce 4 mm. Zkušební tělíska byla zhotovena z materiálů: PA 6, PA 6 + 30% skleněných vláken, PP, PBT, PS.



Obrázek 11 – tvar zkušebního tělesa pro Charpyho metodu

4.2 Vytvoření vrubů

Do připravených zkušebních tělísek byly vytvořeny různé tvary vrubů. Vrubu byly vytvořeny mechanickou vrubovačkou CEAST s digitálním mikrometrem s přesností 0,001 mm a možností výměny vrubovacích nožů.



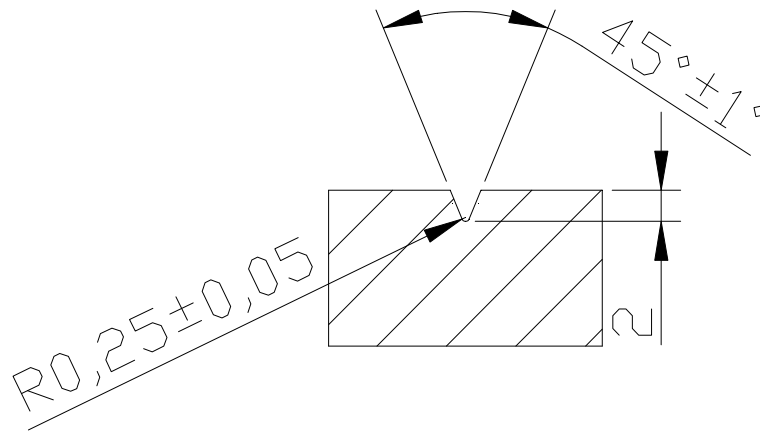
Obrázek 12 – použitá mechanická vrubovačka

4.2.1 Tvary vrubů

K porovnání byly vytvořeny čtyři typy vrubu, z nichž tři jsou ve tvaru „V“ a jeden ve tvaru pravoúhelníku. Vruby byly vyřezány do hloubky 2 mm. U tělísek pro tahovou zkoušku byla tělesa opatřena vrubem z obou stran. Na tělískách pro zkoušku vrubové houževnatosti metodou Charpy byl vrub vytvořen pouze na jedné straně. Zkoušena byla také tělesa bez vrubu.

Vrub V1

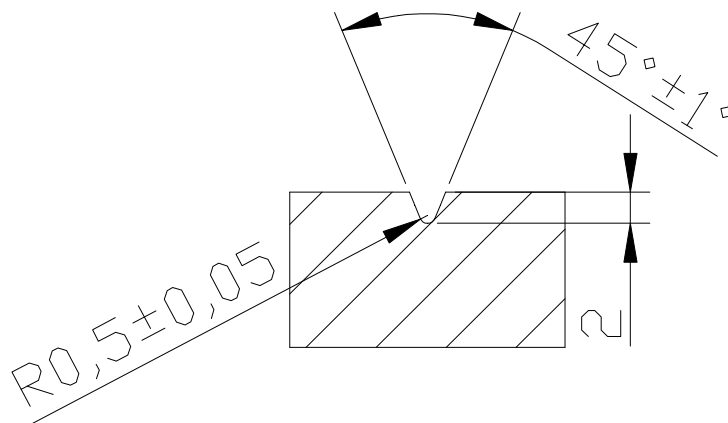
Tento vrub byl zhotoven vrubovacím nožem s označením 6530.045.



Obrázek 13 – Tvar vrubu V1

Vrub V2

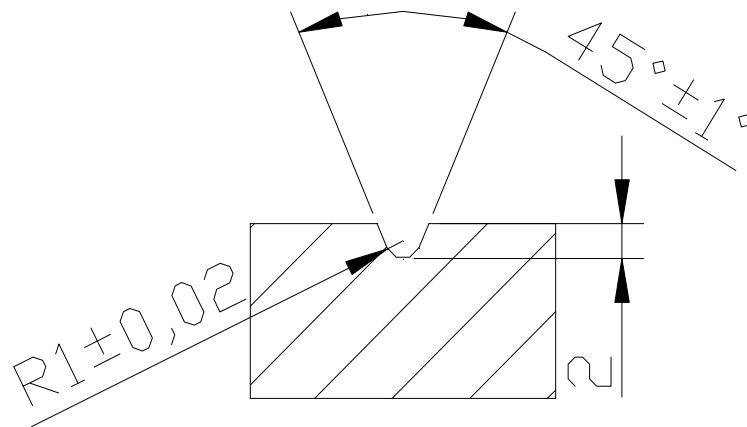
Tento vrub byl zhotoven vrubovacím nožem s označením 6530.061.



Obrázek 14 – Tvar vrubu V2

Vrub V3

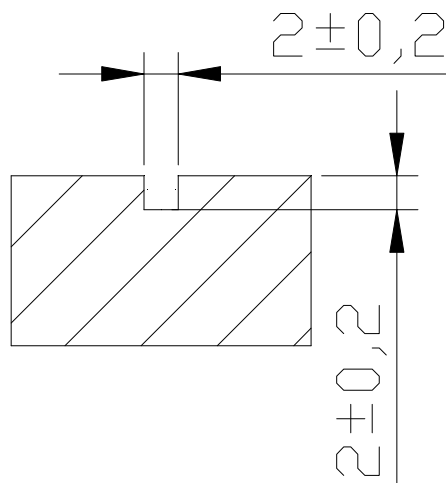
Tento vrub byl zhotoven vrubovacím nožem s označením 6530.053.



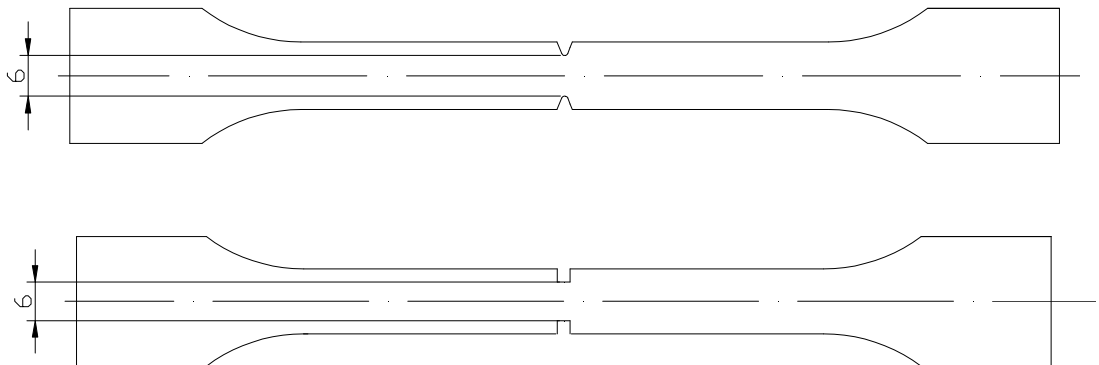
Obrázek 15 – Tvar vrubu V3

Vrub C

Tento vrub byl zhotoven vrubovacím nožem s označením 6530.049.



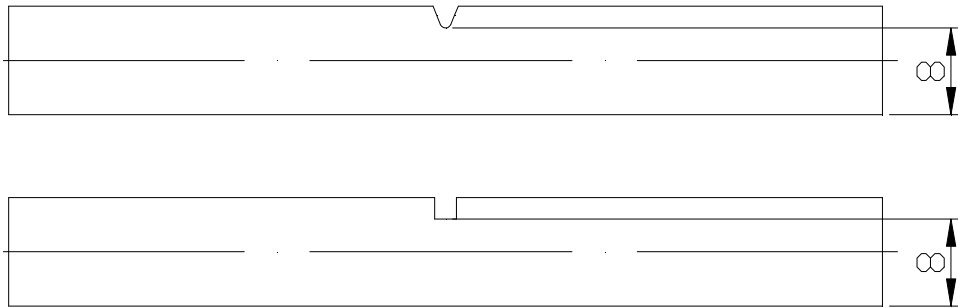
Obrázek 16 – Tvar vrubu C

Zkušební těleso pro tahovou zkoušku

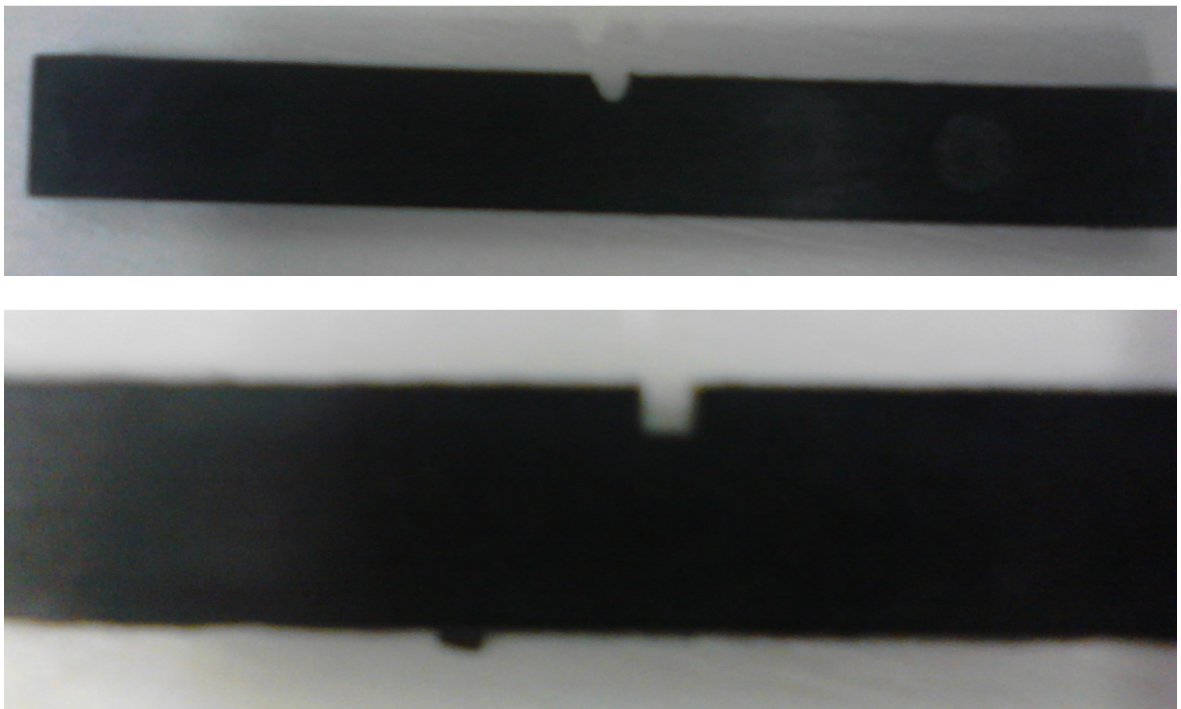
Obrázek 17 – Náčrt tělesa s vruby pro tahovou zkoušku



Obrázek 18 – fotografie tělesa s vruby pro tahovou zkoušku

Zkušební těleso pro zkoušku metodou Charpy

Obrázek 19 – náčrt tělesa s vrubem pro zkoušku vrubové houževnatosti

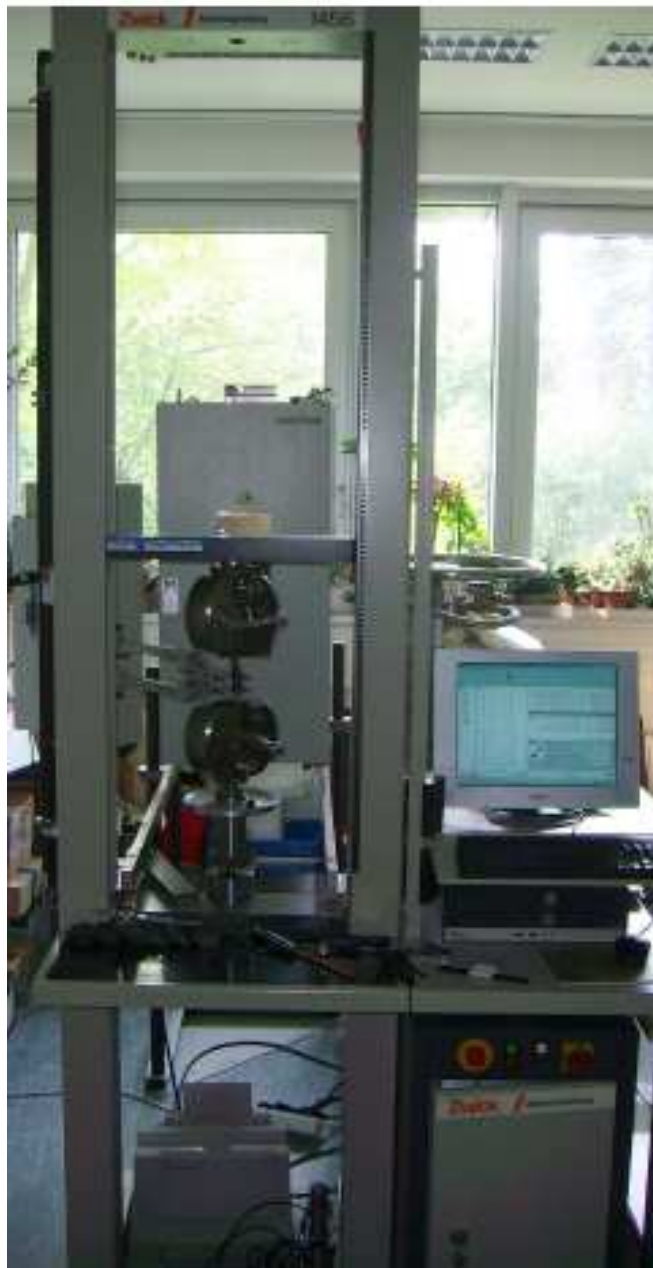


Obrázek 20 – fotografie vrubů na tělesech pro zkoušku vrubové houževnatosti

5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

5.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška se uskuteční na zkušebním stroji typu ZWICK 145 665. Stroj je propojen s osobním počítačem a vybaven zkušebním programem TestXpert. Tento program nám umožňuje rychlé a snadné vyhodnocení měřených a žádaných veličin spolu s tahovým diagramem.



Obrázek 21 – univerzální zkušební stroj ZWICK

Parametry zkušebního stroje ZWICK 145 665:

Celková výška: 2012 mm

Celková šířka: 630 mm

Strojová výška: 1284 mm

Pracovní šířka: 420 mm

Rozpětí běžných čelistí: 15 mm

Hmotnost: 150 kg

Maximální zkušební síla: 20 kN

Parametry tahové zkoušky:

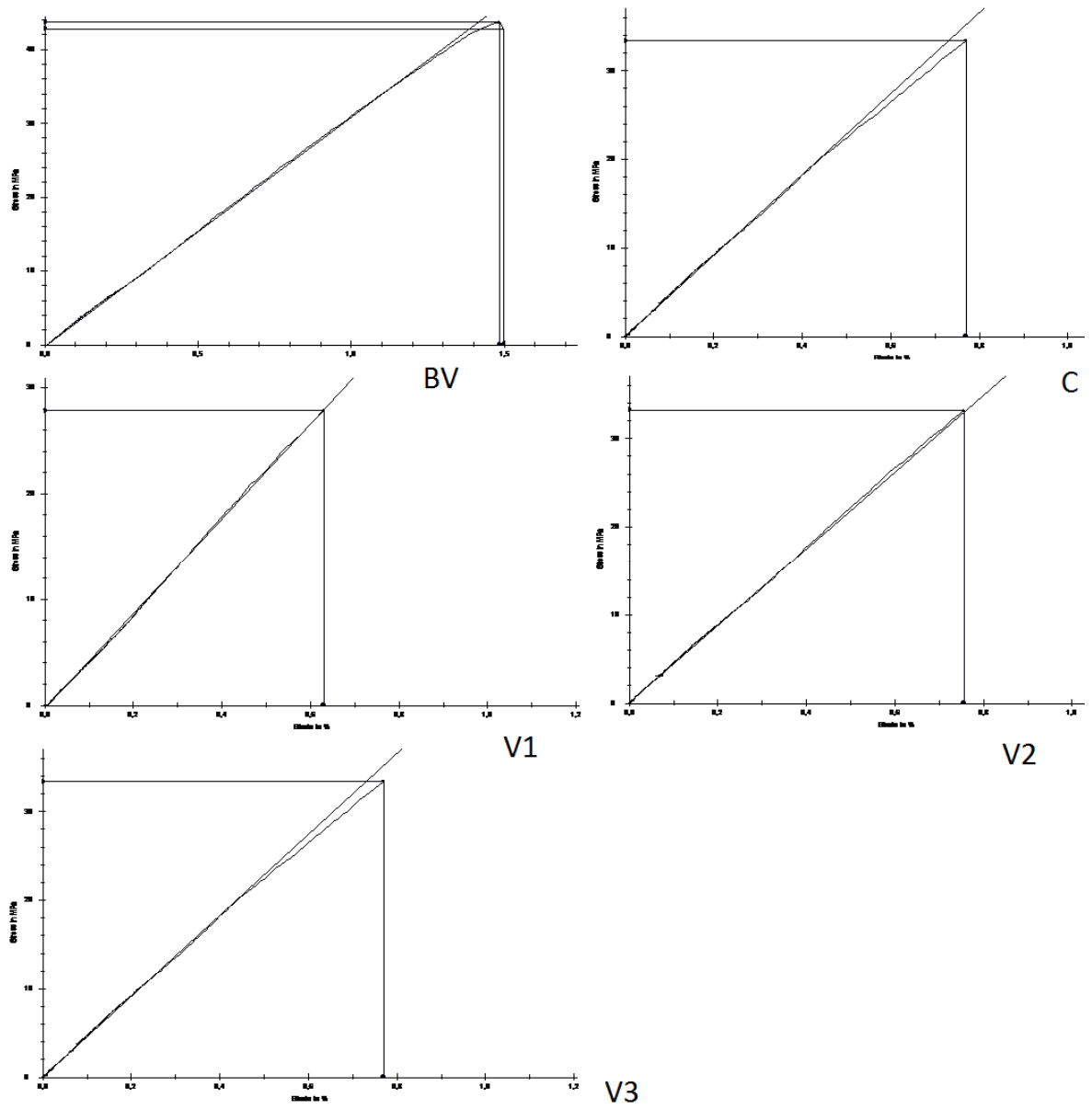
Tloušťka tělíka $a_0 = 4$ mm

Pracovní šířka tělíka $b_0 = 6$ mm

Rychlost zkoušky $v = 50$ mm/min

Měření bylo prováděno v sériích po pěti vzorcích. Ke každému materiálu je uveden společný graf, ve kterém je zobrazena závislost σ - ε pro každý typ vrubu. V následujících tabulkách jsou uvedeny průměry naměřených hodnot, směrodatné odchylky a variační koeficient pro různé typy vrubů.

5.1.1 PS

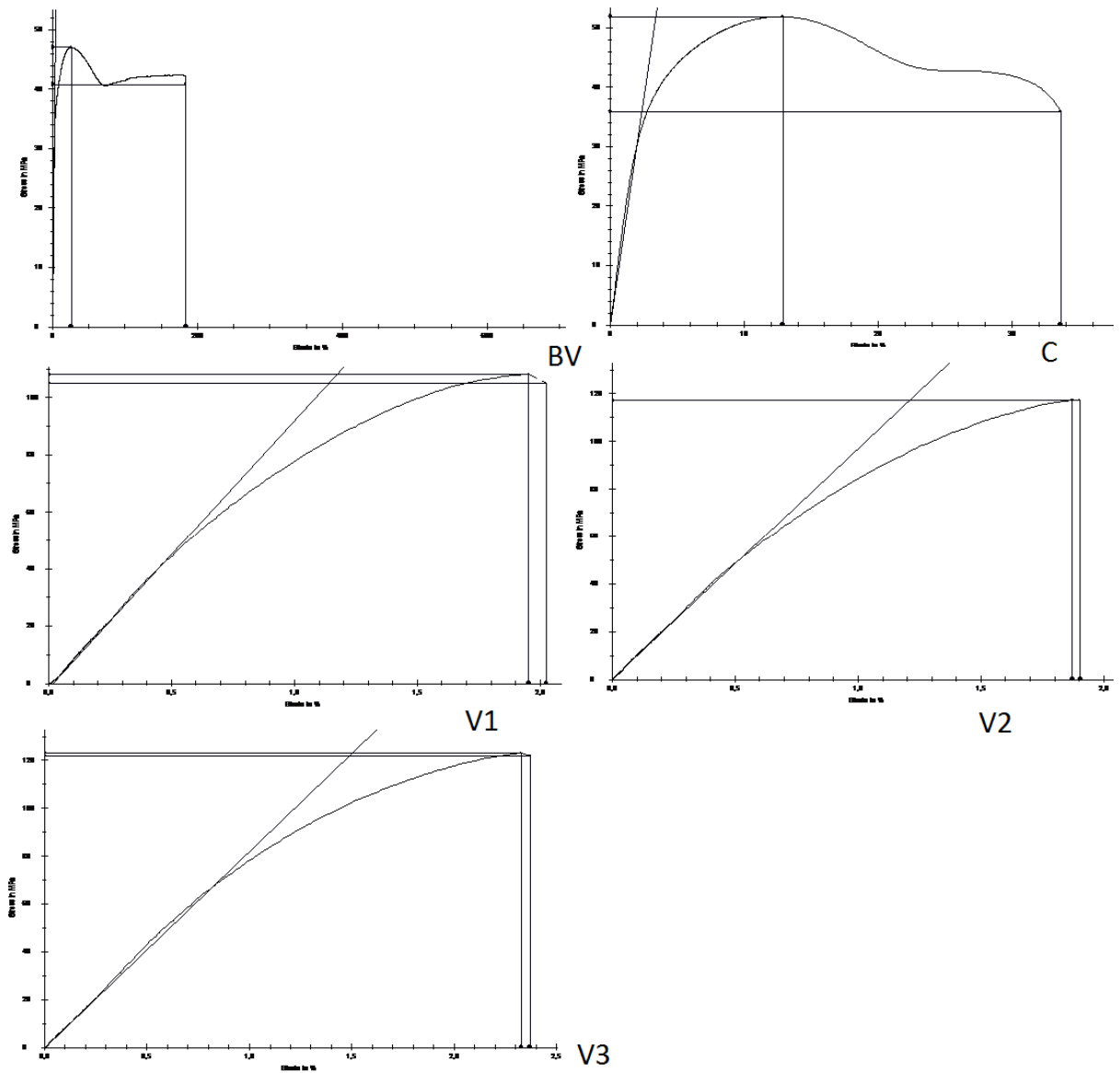


Obrázek 22 – tahové diagramy těles s vruby z PS

| PS | σ_m [MPa] | σ_B [MPa] | E [MPa] | ϵ_m [%] | ϵ_B [%] | ϵ_{Fm} [mm] | ϵ_B [mm] | F_m [N] |
|-----------|---------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| V1 | 26,82 | 26,82 | 4369,83 | 0,63 | 0,63 | 0,13 | 0,13 | 633,71 |
| sm.od. | 0,83 | 0,83 | 190,99 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 18,49 |
| var.koef. | 3,11 | 3,11 | 4,37 | 4,81 | 4,81 | 5,23 | 5,23 | 2,92 |
| V2 | 31,68 | 31,42 | 4686,27 | 0,71 | 0,71 | 0,14 | 0,14 | 745,41 |
| sm.od. | 1,3 | 1,38 | 358,39 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 28,34 |
| var.koef. | 4,12 | 4,4 | 7,65 | 4,38 | 4,48 | 5,42 | 5,51 | 3,8 |
| V3 | 32,48 | 32,13 | 4363,45 | 0,76 | 0,76 | 0,15 | 0,15 | 764,33 |
| sm.od. | 0,56 | 1,05 | 169,62 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 12,67 |
| var.koef. | 1,71 | 3,27 | 3,89 | 1,39 | 0,63 | 1,57 | 0,96 | 1,66 |
| C | 30,89 | 30,18 | 4171,25 | 0,74 | 0,74 | 0,15 | 0,15 | 728,11 |
| sm.od. | 0,33 | 0,92 | 83,23 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 | 8,03 |
| var.koef. | 1,06 | 3,03 | 2 | 1,75 | 1,3 | 1,93 | 1,54 | 1,1 |
| BV | 43,14 | 42,97 | 3224,34 | 1,43 | 1,43 | 0,28 | 0,29 | 1702,17 |
| sm.od. | 0,42 | 0,31 | 207,33 | 0,06 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 17,02 |
| var.koef. | 0,98 | 0,72 | 6,43 | 4,25 | 4,48 | 4,5 | 4,71 | 1 |

Tabulka 4 – tabulka získaných hodnot pro PS z tahové zkoušky

5.1.2 PA 6 +30% GF

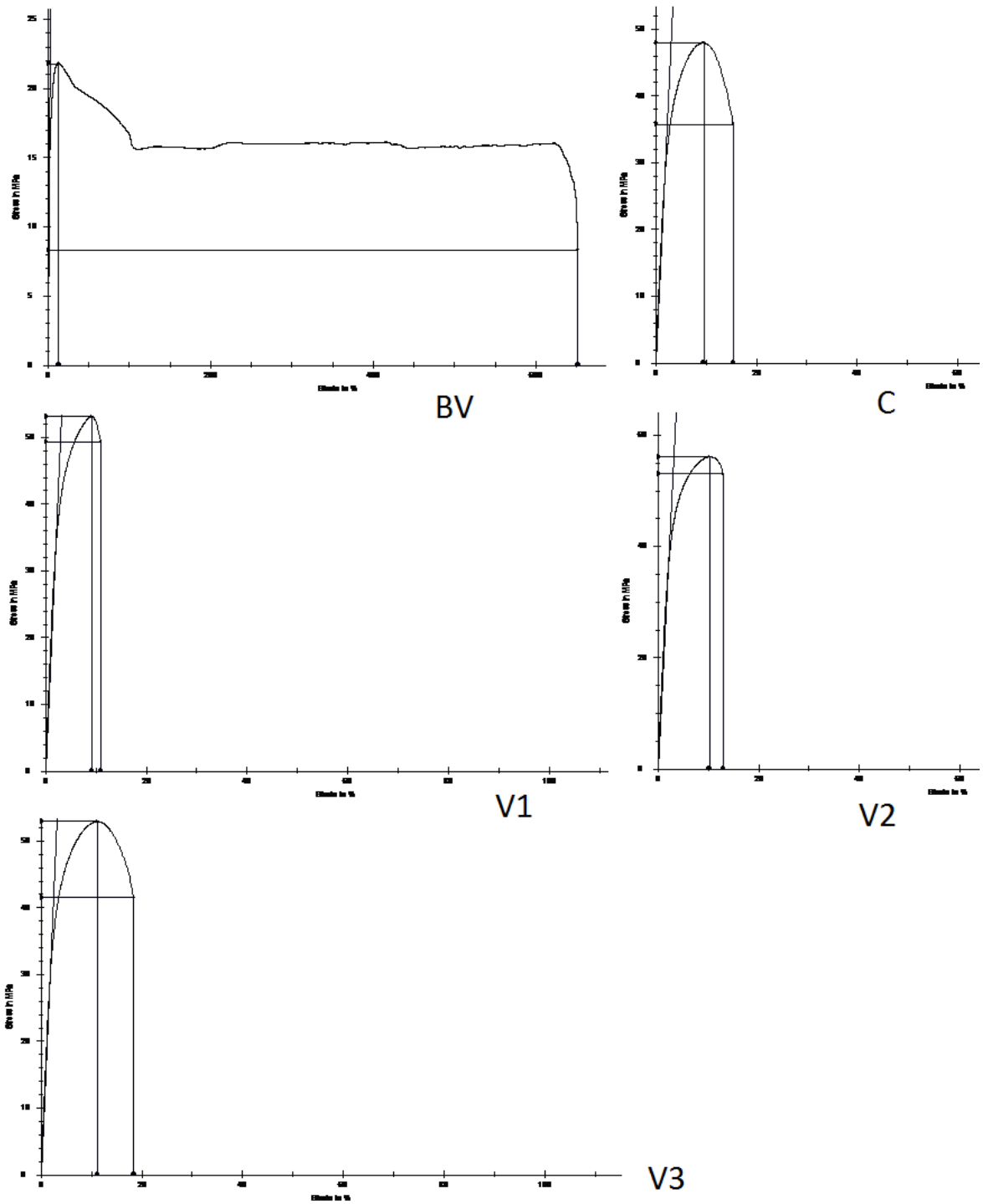


Obrázek 23 - tahové diagramy těles s vruby z PA6+30%GF

| PA6+30%GF | σ_m [MPa] | σ_B [MPa] | E [MPa] | ϵ_m [%] | ϵ_B [%] | ϵ_{Fm} [mm] | ϵ_B [mm] | F_m [N] |
|-----------|---------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| V1 | 112,49 | 112,41 | 9141 | 1,89 | 1,9 | 0,38 | 0,38 | 2664,41 |
| sm.od. | 3,03 | 2,94 | 367,41 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,02 | 57,17 |
| var.koef. | 2,69 | 2,62 | 4,02 | 5,4 | 5,15 | 5,52 | 5,22 | 2,15 |
| V2 | 112,45 | 111,49 | 9395,43 | 1,97 | 2,01 | 0,39 | 0,4 | 2670,38 |
| sm.od. | 2,97 | 3,87 | 272,75 | 0,09 | 0,11 | 0,02 | 0,02 | 70,28 |
| var.koef. | 2,65 | 3,47 | 2,9 | 4,55 | 5,24 | 4,4 | 5,05 | 2,63 |
| V3 | 115,9 | 113,91 | 9046,63 | 1,99 | 2,01 | 0,4 | 0,4 | 2756,7 |
| sm.od. | 1,6 | 3,15 | 597,71 | 0,08 | 0,09 | 0,01 | 0,02 | 39,87 |
| var.koef. | 1,38 | 2,77 | 6,61 | 3,81 | 4,42 | 3,68 | 4,36 | 1,45 |
| C | 121,45 | 121,09 | 8298,15 | 2,31 | 2,33 | 0,46 | 0,47 | 2879,82 |
| sm.od. | 3,46 | 3,28 | 530,26 | 0,2 | 0,2 | 0,04 | 0,04 | 83,51 |
| var.koef. | 2,85 | 2,71 | 6,39 | 8,65 | 8,67 | 8,93 | 8,95 | 2,9 |
| BV | 120,85 | 117,64 | 7401,98 | 4,23 | 5,74 | 0,84 | 1,15 | 4760,77 |
| sm.od. | 1,48 | 1,65 | 497,77 | 0,34 | 0,38 | 0,07 | 0,08 | 63,25 |
| var.koef. | 1,22 | 1,4 | 6,72 | 8,03 | 6,54 | 8,18 | 6,62 | 1,33 |

Tabulka 5- tabulka získaných hodnot pro PA6+30GF z tahové zkoušky

5.1.3 PA 6

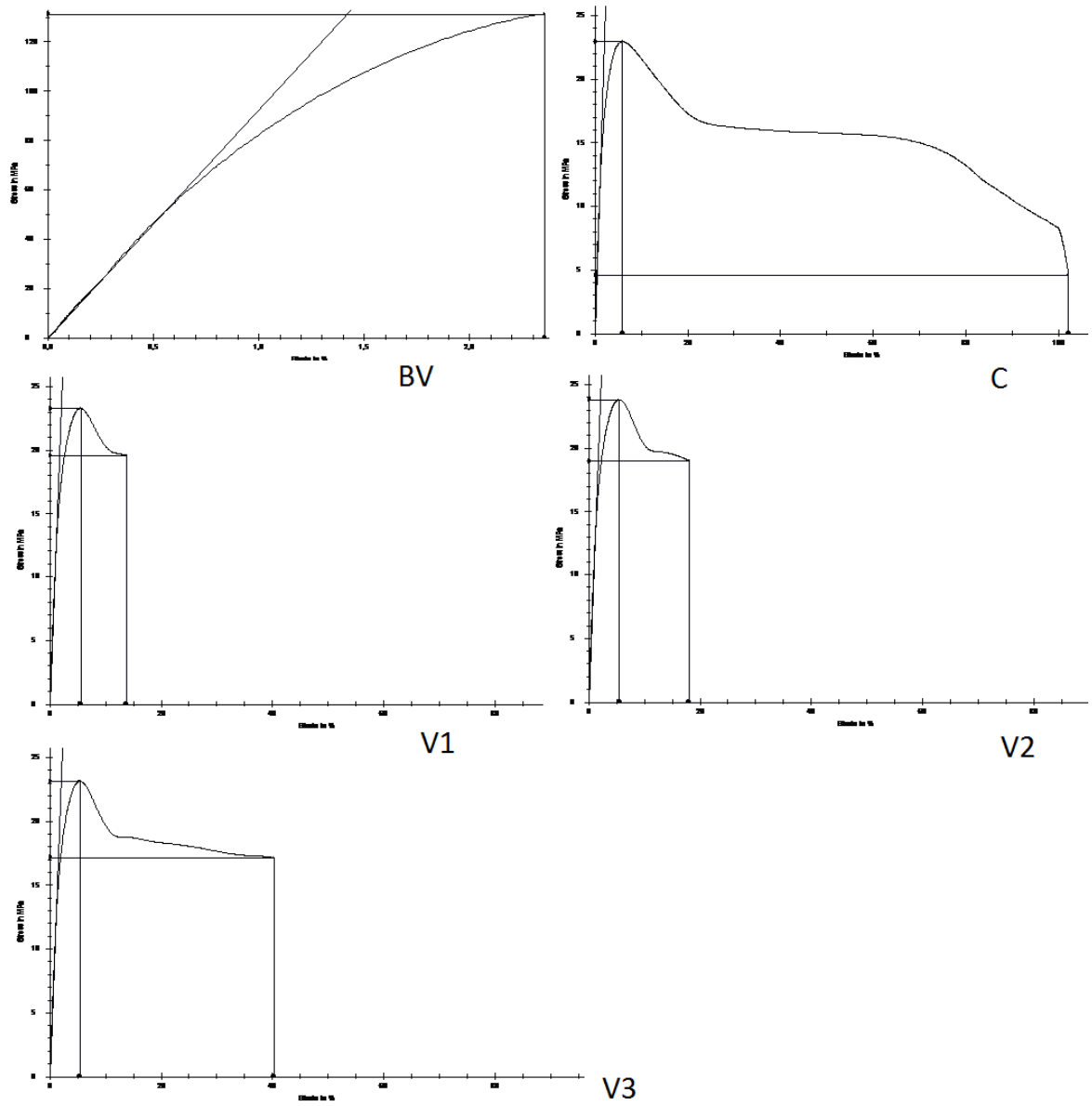


Obrázek 24 - tahové diagramy těles s vruby z PA6

| PA6 | σ_m [MPa] | σ_B [MPa] | E [MPa] | ϵ_m [%] | ϵ_B [%] | ϵ_{Fm} [mm] | ϵ_B [mm] | F_m [N] |
|-----------|---------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| V1 | 53,83 | 50 | 1726,31 | 9,55 | 11,63 | 1,91 | 2,33 | 1251,83 |
| sm.od. | 1,38 | 1,38 | 46,77 | 0,29 | 0,61 | 0,06 | 0,12 | 32,11 |
| var.koef. | 2,57 | 2,77 | 2,71 | 3,04 | 5,21 | 3,03 | 5,19 | 2,56 |
| V2 | 54,72 | 50,3 | 1755,09 | 10,64 | 13,82 | 2,13 | 2,76 | 1275,25 |
| sm.od. | 1,1 | 1,63 | 66,63 | 0,58 | 0,93 | 0,12 | 0,19 | 23,65 |
| var.koef. | 2,01 | 3,23 | 3,8 | 5,42 | 6,75 | 5,46 | 6,78 | 1,85 |
| V3 | 52,79 | 42,38 | 1679,79 | 10,88 | 17,53 | 2,18 | 3,51 | 1239,18 |
| sm.od. | 0,68 | 3,74 | 70,63 | 0,42 | 2,3 | 0,08 | 0,46 | 17,41 |
| var.koef. | 1,28 | 8,82 | 4,2 | 3,9 | 13,13 | 3,9 | 13,13 | 1,41 |
| C | 49,65 | 37,86 | 1632,38 | 8,98 | 14,47 | 1,8 | 2,89 | 1164,87 |
| sm.od. | 1,26 | 2,09 | 65,97 | 0,38 | 0,96 | 0,08 | 0,19 | 29,32 |
| var.koef. | 2,54 | 5,51 | 4,04 | 4,27 | 6,65 | 4,2 | 6,62 | 2,52 |
| BV | 46,64 | 38,26 | 1324,52 | 25,42 | 139,12 | 5,08 | 27,82 | 1819,15 |
| sm.od. | 1,01 | 1,74 | 54,79 | 2,38 | 74,83 | 0,48 | 14,96 | 37,45 |
| var.koef. | 2,17 | 4,54 | 4,14 | 9,38 | 53,79 | 9,37 | 53,79 | 2,06 |

Tabulka 6 - tabulka získaných hodnot pro PA6 z tahové zkoušky

5.1.4 PP

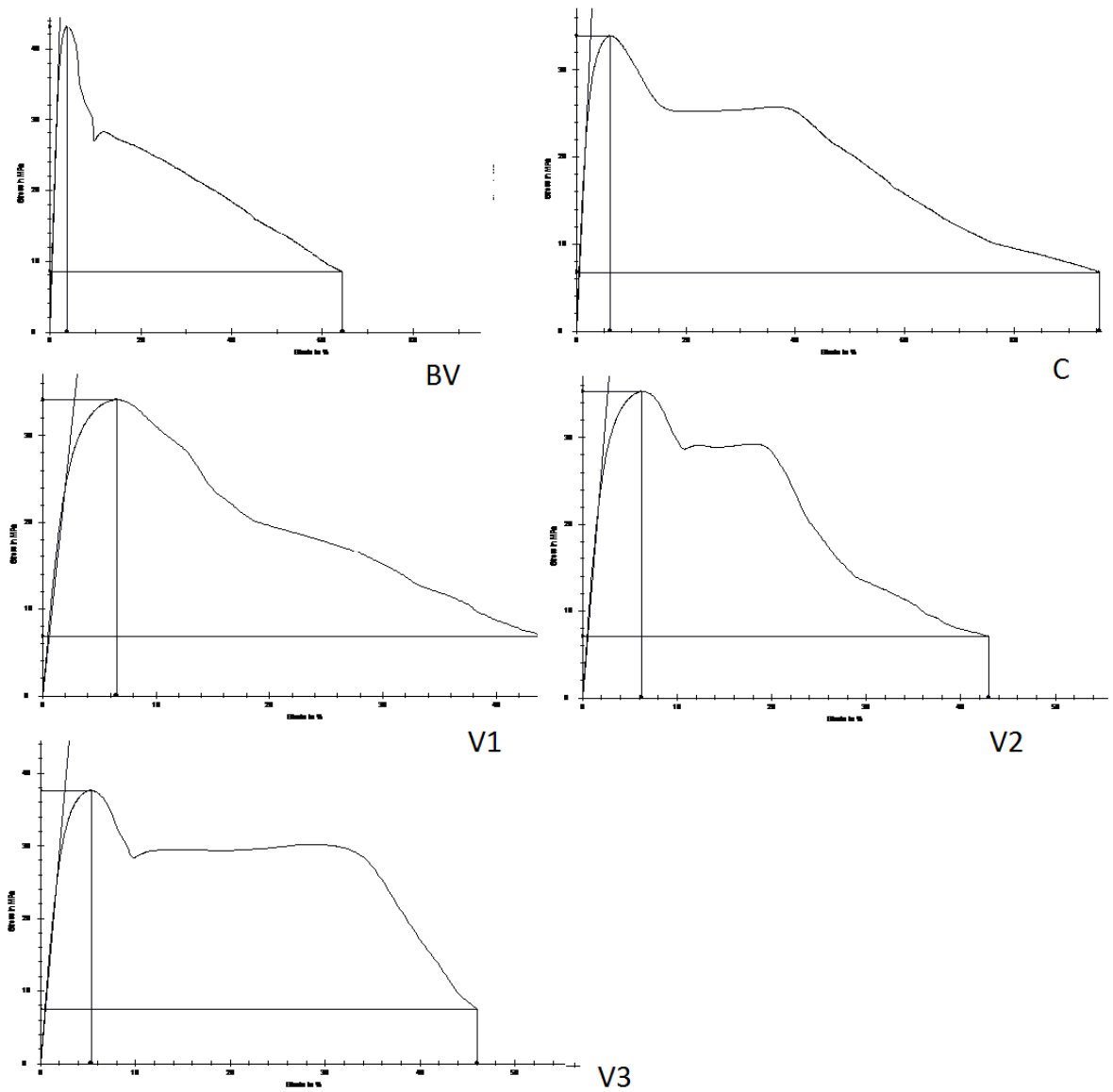


Obrázek 25 - tahové diagramy těles s vruby z PP

| PP | σ_m [MPa] | σ_B [MPa] | E [MPa] | ϵ_m [%] | ϵ_B [%] | ϵ_{Fm} [mm] | ϵ_B [mm] | F_m [N] |
|-----------|---------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| V1 | 38,42 | 37,89 | 1509,48 | 4,29 | 4,34 | 0,86 | 0,87 | 915,48 |
| sm.od. | 0,22 | 0,27 | 34,39 | 0,07 | 0,07 | 0,01 | 0,01 | 6,04 |
| var.koef. | 0,56 | 0,71 | 2,28 | 1,6 | 1,71 | 1,61 | 1,71 | 0,66 |
| V2 | 38,32 | 38,27 | 1536,13 | 4,33 | 4,4 | 0,87 | 0,88 | 915,98 |
| sm.od. | 0,64 | 0,61 | 37,39 | 0,19 | 0,24 | 0,04 | 0,05 | 15,18 |
| var.koef. | 1,66 | 1,6 | 2,43 | 4,35 | 5,49 | 4,36 | 5,5 | 1,66 |
| V3 | 38,56 | 38,19 | 1539,09 | 4,48 | 4,6 | 0,89 | 0,92 | 935,2 |
| sm.od. | 0,22 | 0,83 | 34,95 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,02 | 6,56 |
| var.koef. | 0,58 | 2,17 | 2,27 | 2,25 | 2,12 | 2,18 | 2,05 | 0,7 |
| C | 39,68 | 39,23 | 1457,69 | 5,09 | 5,23 | 1,02 | 1,05 | 940,75 |
| sm.od. | 0,17 | 0,92 | 114,84 | 0,12 | 0,18 | 0,02 | 0,04 | 2,51 |
| var.koef. | 0,42 | 2,34 | 7,88 | 2,31 | 3,37 | 2,37 | 3,43 | 0,27 |
| BV | 35,06 | 14,2 | 768,79 | 14,25 | 39,64 | 2,85 | 7,93 | 1387,84 |
| sm.od. | 0,41 | 2,05 | 47,95 | 0,14 | 18,65 | 0,03 | 3,73 | 20,93 |
| var.koef. | 1,16 | 14,42 | 6,24 | 0,96 | 47,06 | 0,97 | 47,06 | 1,51 |

Tabulka 7 - tabulka získaných hodnot pro PP z tahové zkoušky

5.1.5 PBT



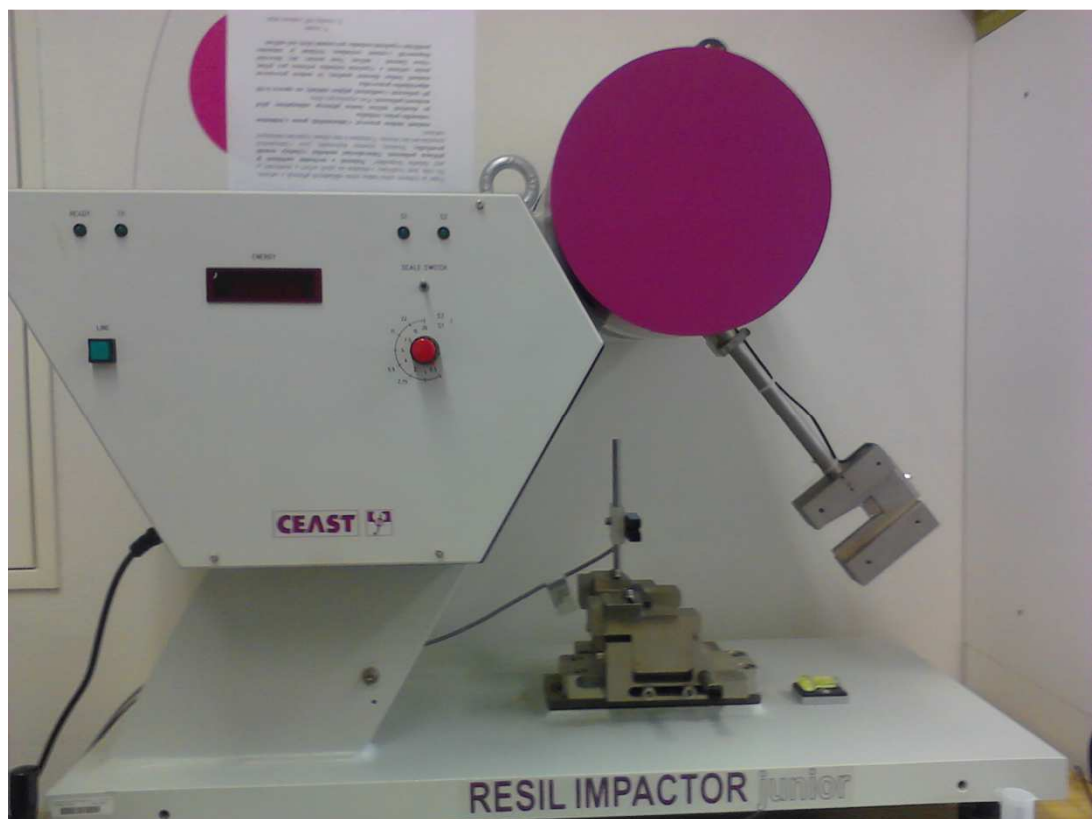
Obrázek 26 - tahové diagramy těles s vruby z PBT

| PBT | σ_m [MPa] | σ_B [MPa] | E [MPa] | ϵ_m [%] | ϵ_B [%] | ϵ_{Fm} [mm] | ϵ_B [mm] | F_m [N] |
|-----------|---------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| V1 | 34,57 | 6,89 | 1247,91 | 6,46 | 45,76 | 1,29 | 9,15 | 809,73 |
| sm.od. | 0,97 | 0,19 | 54,55 | 0,56 | 6,76 | 0,11 | 1,35 | 18,26 |
| var.koef. | 2,8 | 2,76 | 4,37 | 8,66 | 14,77 | 8,66 | 14,77 | 2,26 |
| V2 | 34,99 | 6,98 | 1288,27 | 6,37 | 57,85 | 1,27 | 11,57 | 811,63 |
| sm.od. | 1,04 | 0,21 | 80,01 | 0,53 | 14,3 | 0,11 | 2,86 | 22,01 |
| var.koef. | 2,96 | 2,99 | 6,21 | 8,26 | 24,72 | 8,29 | 24,72 | 2,71 |
| V3 | 37,66 | 7,52 | 1492,83 | 5,44 | 58,71 | 1,09 | 11,74 | 864,4 |
| sm.od. | 0,56 | 0,11 | 84,17 | 0,18 | 10,35 | 0,04 | 2,07 | 12,78 |
| var.koef. | 1,49 | 1,47 | 5,64 | 3,3 | 17,63 | 3,34 | 17,63 | 1,48 |
| C | 34,09 | 6,8 | 1297,71 | 6,05 | 97,21 | 1,21 | 19,44 | 790,25 |
| sm.od. | 1,26 | 0,25 | 72,59 | 0,35 | 4,01 | 0,07 | 0,8 | 30,64 |
| var.koef. | 3,68 | 3,66 | 5,59 | 5,8 | 4,13 | 5,74 | 4,13 | 3,88 |
| BV | 40,06 | 9,81 | 1684,25 | 13,29 | 148,27 | 2,66 | 29,65 | 1533,56 |
| sm.od. | 4,96 | 3,46 | 382,16 | 2,98 | 105,33 | 0,6 | 21,07 | 191,43 |
| var.koef. | 12,39 | 35,28 | 22,69 | 22,42 | 71,04 | 22,43 | 71,04 | 12,48 |

Tabulka 8 - tabulka získaných hodnot pro PBT z tahové zkoušky

5.2 Charpyho kladivo

Zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy se uskuteční na Charpyho kladivě CEAST Resil Impactor. Tento přístroj je propojen s programem DAS8WIN, ve kterém zadáváme parametry zkoušené série, získáváme výsledky, a který dokáže výsledky zpracovat i do přehledné grafické podoby.



Obrázek 27 – Charpyho kladivo

Parametry zkušebního stroje CEAST Resil Impactor 6963:

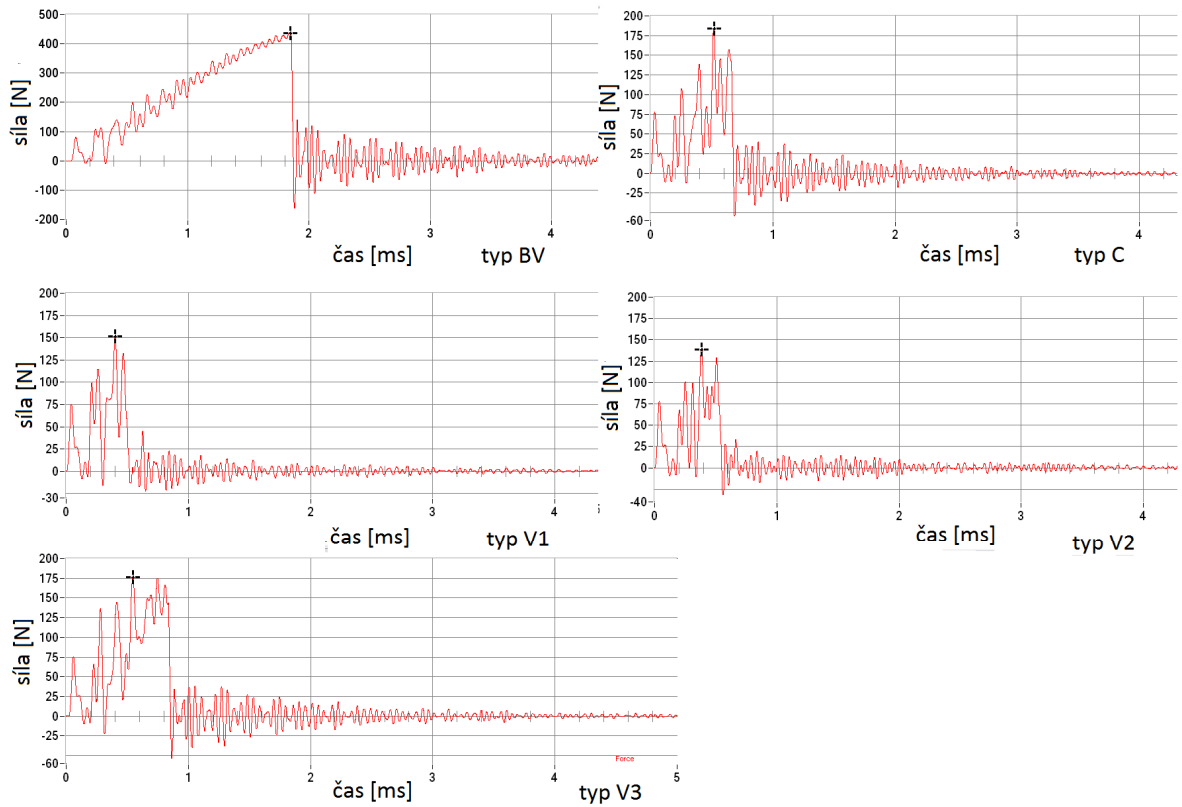
| | |
|----------------------|--------------------|
| Typ brzdy : | manuální |
| Potenciální energie: | 1-25 J |
| Rozměry: | 900 x 500 x 800 mm |
| Hmotnost: | 180 kg |

Parametry zkoušky vrubové houževnatosti:

| | |
|------------------------|------------------------|
| Tloušťka tělíska | $a_0 = 4 \text{ mm}$ |
| Pracovní šířka tělíska | $b_0 = 8 \text{ mm}$ |
| Hmotnost kladiva | $m = 2,192 \text{ kg}$ |
| Délka kyvadla | $l = 0,5 \text{ m}$ |
| Úhel kyvadla | 40° |
| Nominální rychlost | $v = 1,51 \text{ m/s}$ |

Měření bylo prováděno v sériích po pěti vzorcích. Ke každému materiálu je uveden graf, ve kterém je zobrazena závislost síly na čase F-t pro každý typ vrubu. Měření bylo provedeno na pěti materiálech, a to PS, PA6, PA6+30% GF, PP a PBT.

5.2.1 PS

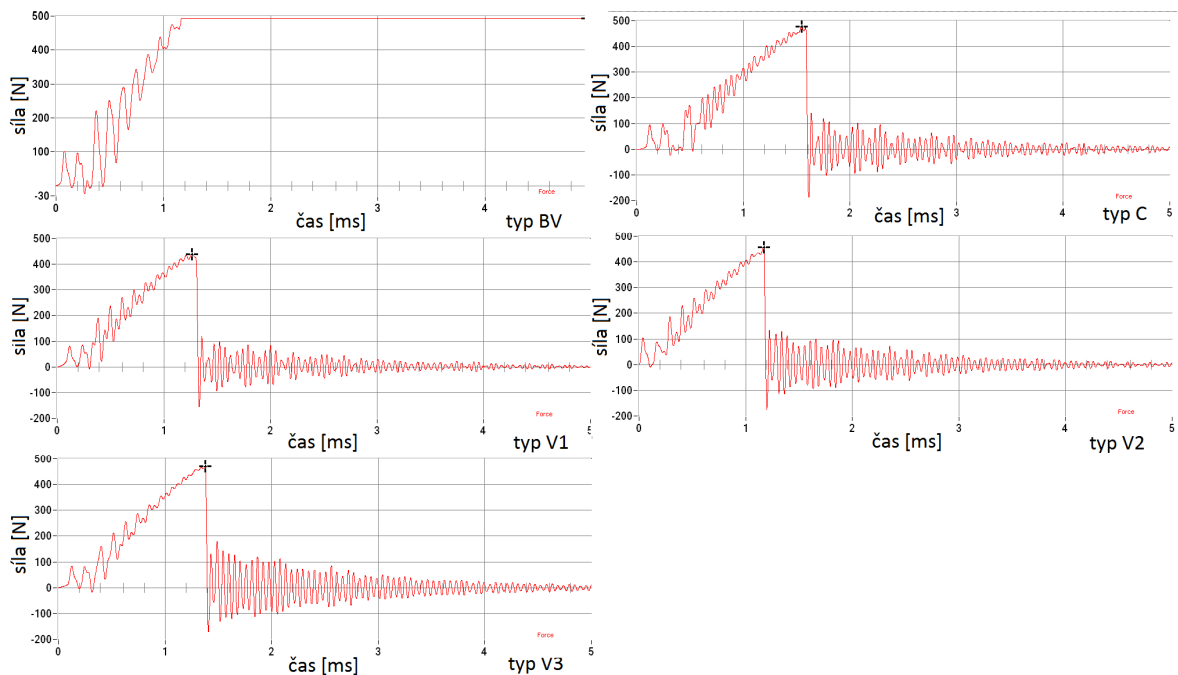


Obrázek 28 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PS

| typ vrubu | PS | Fmax [N] | Smax [mm] | Sb [mm] | DEFmax [mm] |
|-----------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| bez vrubu | průměr | 444,2667 | 2,737809 | 2,812563 | 6,780331 |
| | sm.od. | 12,70712 | 0,104069 | 0,087843 | 0,06113 |
| | var.koef. | 2,860247 | 3,801162 | 3,123239 | 0,90158 |
| C | průměr | 168,1597 | 0,80166 | 0,961969 | 7,494009 |
| | sm.od. | 9,553651 | 0,082081 | 0,054222 | 0,005071 |
| | var.koef. | 5,681295 | 10,23893 | 5,636584 | 0,067668 |
| V1 | průměr | 182,7655 | 0,770509 | 0,851944 | 7,509802 |
| | sm.od. | 18,36624 | 0,053568 | 0,058198 | 0,004896 |
| | var.koef. | 10,04908 | 6,95233 | 6,831181 | 0,065194 |
| V2 | průměr | 171,8837 | 0,837157 | 0,986671 | 7,494419 |
| | sm.od. | 14,65808 | 0,075984 | 0,047351 | 0,004486 |
| | var.koef. | 8,527903 | 9,07641 | 4,799056 | 0,059854 |
| V3 | průměr | 192,3415 | 1,031933 | 1,190892 | 7,444252 |
| | sm.od. | 9,724723 | 0,068051 | 0,056435 | 0,0068 |
| | var.koef. | 5,055968 | 6,594528 | 4,738916 | 0,091343 |

Tabulka 9 - tabulka získaných hodnot pro PS z Chyrpyho kladiva

5.2.2 PA 6 +30% GF

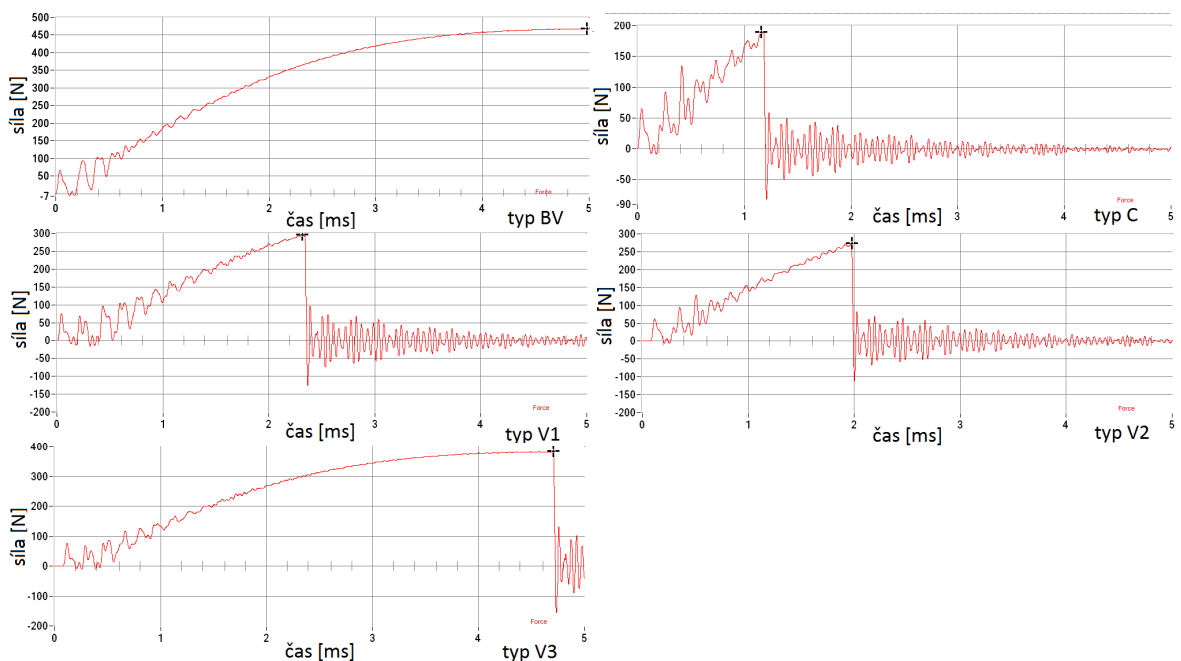


Obrázek 29 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PA6+30% GF

| typ vrubu | PA 6+30% GF | Fmax [N] | Smax [mm] | Sb [mm] | DEFmax [mm] |
|-----------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| bez vrubu | průměr | 493,3541 | 5,4261 | 5,4863 | 5,449 |
| | sm.od. | 2,1567234 | 0,14101 | 0,14722 | 0,052465 |
| | var.koef. | 0,01954682 | 6,472111 | 6,07589 | 0,569112 |
| C | průměr | 471,7855348 | 2,205593 | 2,263811 | 6,95356 |
| | sm.od. | 14,45958517 | 0,14189 | 0,148884 | 0,042565 |
| | var.koef. | 3,064864032 | 6,433172 | 6,576681 | 0,612132 |
| V1 | průměr | 447,458716 | 1,908489 | 1,983095 | 7,021347 |
| | sm.od. | 6,078517663 | 0,059612 | 0,041041 | 0,011968 |
| | var.koef. | 1,358453293 | 3,123511 | 2,06955 | 0,170452 |
| V2 | průměr | 475,8480714 | 2,006702 | 2,068801 | 6,979452 |
| | sm.od. | 6,337457906 | 0,076213 | 0,084606 | 0,023749 |
| | var.koef. | 1,331823808 | 3,797913 | 4,089625 | 0,340271 |
| V3 | průměr | 494,8549074 | 2,308238 | 2,386276 | 6,905559 |
| | sm.od. | 0,0967284 | 0,133091 | 0,132363 | 0,023857 |
| | var.koef. | 0,01954682 | 5,765907 | 5,54686 | 0,345479 |

Tabulka 10 - tabulka získaných hodnot pro PA6+30%GF z Chyryho kladiva

5.2.3 PA 6

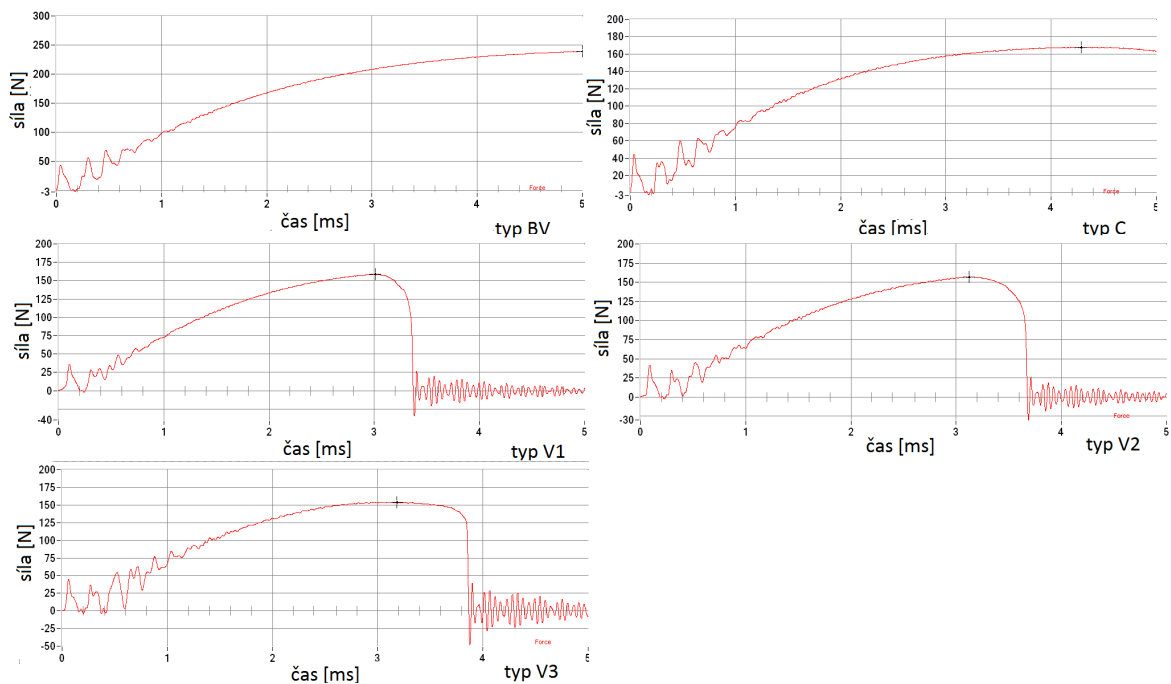


Obrázek 30 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PA6

| typ vrubu | PA 6 | Fmax [N] | Smax [mm] | Sb [mm] | DEFmax [mm] |
|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-------------|
| bez vrubu | průměr | 466,8525 | 6,163163 | 6,196748 | 6,196748 |
| | sm.od. | 4,471067 | 0,019174 | 0,019202 | 0,019202 |
| | var.koef. | 0,957705 | 0,311106 | 0,309879 | 0,309879 |
| C | průměr | 185,7157 | 2,181791 | 2,238039 | 9,141783 |
| | sm.od. | 6,99057 | 0,146584 | 0,131753 | 0,019933 |
| | var.koef. | 3,764125 | 6,718513 | 5,886988 | 0,218038 |
| V1 | průměr | 274,6561 | 2,789665 | 2,815957 | 8,142666 |
| | sm.od. | 9,015085 | 0,705686 | 0,71212 | 0,77624 |
| | var.koef. | 3,282318 | 25,29644 | 25,28872 | 9,532997 |
| V2 | průměr | 284,4739 | 3,620284 | 3,652158 | 8,859986 |
| | sm.od. | 19,57176 | 0,35391 | 0,35364 | 0,07057 |
| | var.koef. | 6,879986 | 9,775745 | 9,683038 | 0,796497 |
| V3 | průměr | 343,9609 | 5,876647 | 5,98079 | 8,520471 |
| | sm.od. | 23,21025 | 0,975507 | 1,085371 | 0,128314 |
| | var.koef. | 6,747933 | 16,59971 | 18,14763 | 1,505947 |

Tabulka 11 - tabulka získaných hodnot pro PA6 z Chyryho kladiva

5.2.4 PP

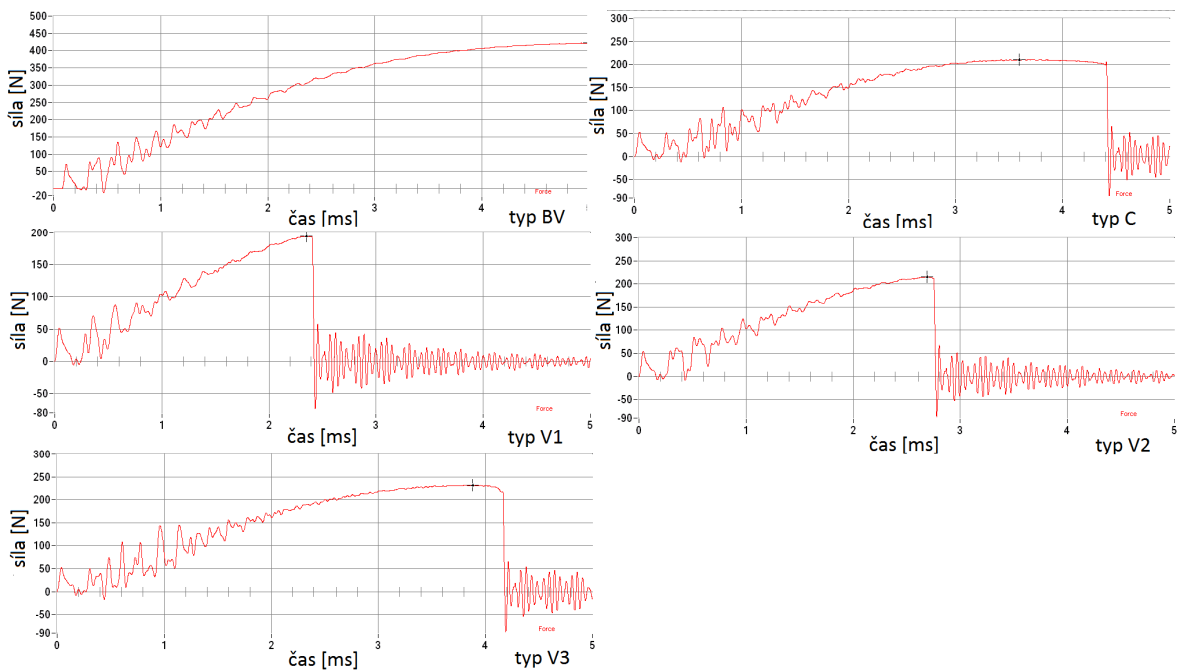


Obrázek 31 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PP

| typ vrubu | PP | Fmax [N] | Smax [mm] | Sb [mm] | DEFmax [mm] |
|-----------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| bez vrubu | průměr | 241,0918 | 6,860169 | 6,850582 | 6,860169 |
| | sm.od. | 2,314378 | 0,010746 | 0,006937 | 0,010746 |
| | var.koef. | 1,035016 | 0,004806 | 0,003102 | 0,004806 |
| C | průměr | 152,3449 | 6,029569 | 6,240712 | 7,079787 |
| | sm.od. | 2,023191 | 0,472809 | 0,597633 | 0,010682 |
| | var.koef. | 0,904794 | 0,211446 | 0,267268 | 0,004777 |
| V1 | průměr | 158,0518 | 4,827499 | 4,827499 | 7,079787 |
| | sm.od. | 2,566457 | 0,106807 | 0,106807 | 0,010682 |
| | var.koef. | 1,147748 | 0,047765 | 0,047765 | 0,004777 |
| V2 | průměr | 156,0205 | 5,71612 | 5,71612 | 7,081371 |
| | sm.od. | 3,451806 | 0,280052 | 0,280052 | 0,026609 |
| | var.koef. | 1,543686 | 0,125243 | 0,125243 | 0,0119 |
| V3 | průměr | 170,0943 | 6,129721 | 7,010105 | 7,010106 |
| | sm.od. | 3,549365 | 0,209361 | 0,017751 | 0,017751 |
| | var.koef. | 1,587316 | 0,093629 | 0,007939 | 0,007938 |

Tabulka 12 - tabulka získaných hodnot pro PP z Charpyho kladiva

5.2.5 PBT



Obrázek 32 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PBT

| typ vrubu | PBT | Fmax [N] | Smax [mm] | Sb [mm] | DEFmax [mm] |
|-----------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| bez vrubu | průměr | 409,3967 | 6,490583 | 6,495728 | 6,495727 |
| | sm.od. | 6,494043 | 0,024012 | 0,024513 | 0,024513 |
| | var.koef. | 1,586247 | 0,36995 | 0,377367 | 0,377366 |
| C | průměr | 212,1705 | 4,75817 | 5,084304 | 7,020335 |
| | sm.od. | 0,893742 | 0,125498 | 0,315434 | 0,023504 |
| | var.koef. | 0,421238 | 2,637519 | 6,204075 | 0,334798 |
| V1 | průměr | 195,189 | 3,47923 | 3,547873 | 7,072107 |
| | sm.od. | 2,645033 | 0,135152 | 0,112015 | 0,016908 |
| | var.koef. | 1,457806 | 2,694641 | 2,281873 | 0,189472 |
| V2 | průměr | 212,509 | 4,095923 | 4,217873 | 7,070007 |
| | sm.od. | 2,885033 | 0,114152 | 0,10015 | 0,007708 |
| | var.koef. | 1,357605 | 2,786964 | 2,374422 | 0,109022 |
| V3 | průměr | 237,8031 | 5,597628 | 6,139159 | 6,88267 |
| | sm.od. | 2,982891 | 0,088037 | 0,133825 | 0,0108 |
| | var.koef. | 1,254353 | 1,572755 | 2,179853 | 0,156921 |

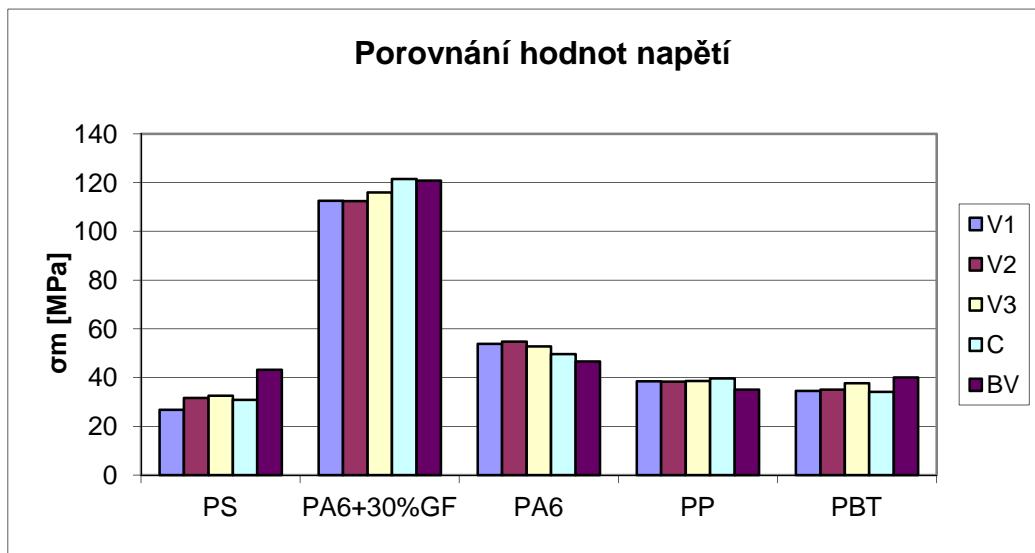
Tabulka 13 - tabulka získaných hodnot pro PBT z Chyryho kládva

6 HODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

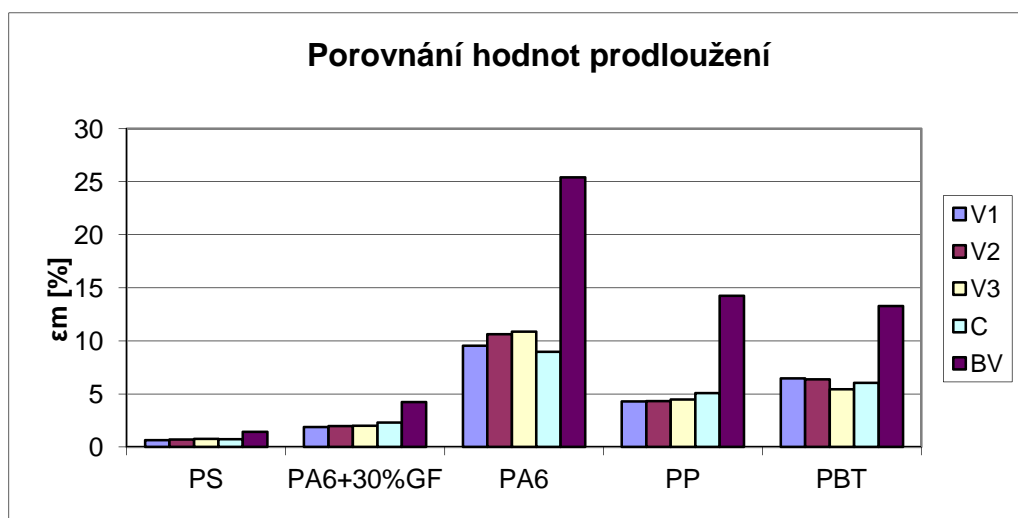
6.1 Tahová zkouška

Ze získaných hodnot v experimentální části při zkoušce tahem jsem vytvořil tabulky s průměrnými hodnotami, které jsem zpracoval do sloupcových grafů. V těchto sloupcových grafech jsou porovnávány hodnoty působícího maximálního napětí σ_m [MPa], prodloužení, při působení maximální síly ε_m [%] a maximální síly F_m [MPa].

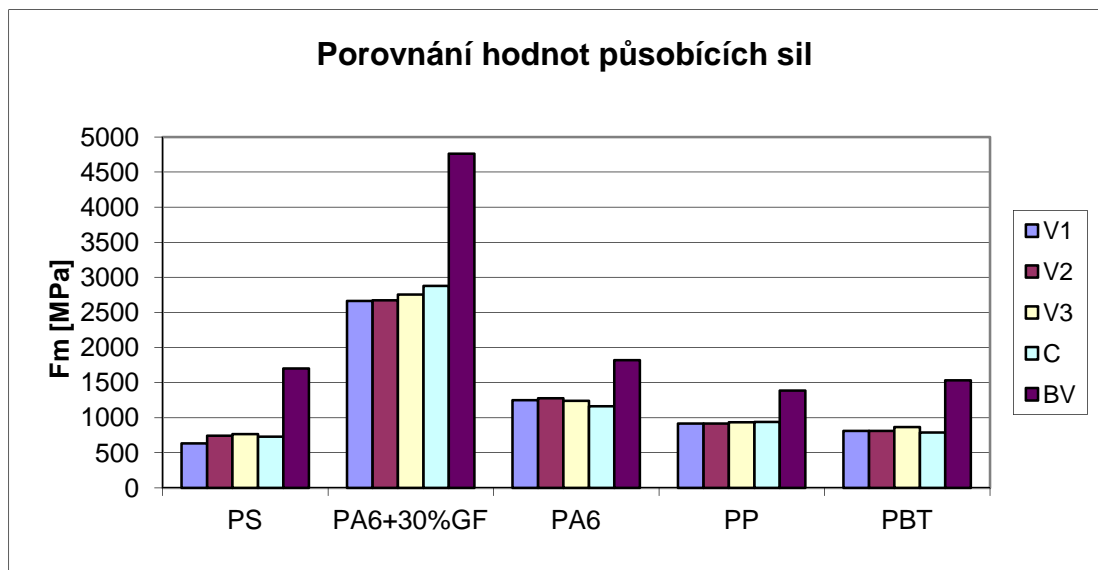
Tyto grafy byly zpracovány v programu Microsoft Excel 2010. Naměřené hodnoty, grafy vyhodnocené programem TestXpert a zdrojová data těchto grafů jsou uloženy v příloze na CD.



Graf 1 – porovnání hodnot napětí, pro všechny vruby a materiály



Graf 2 - porovnání hodnot prodloužení, pro všechny vruby a materiály



Graf 3 - porovnání hodnot maximální působící síly, pro všechny vruby a materiály

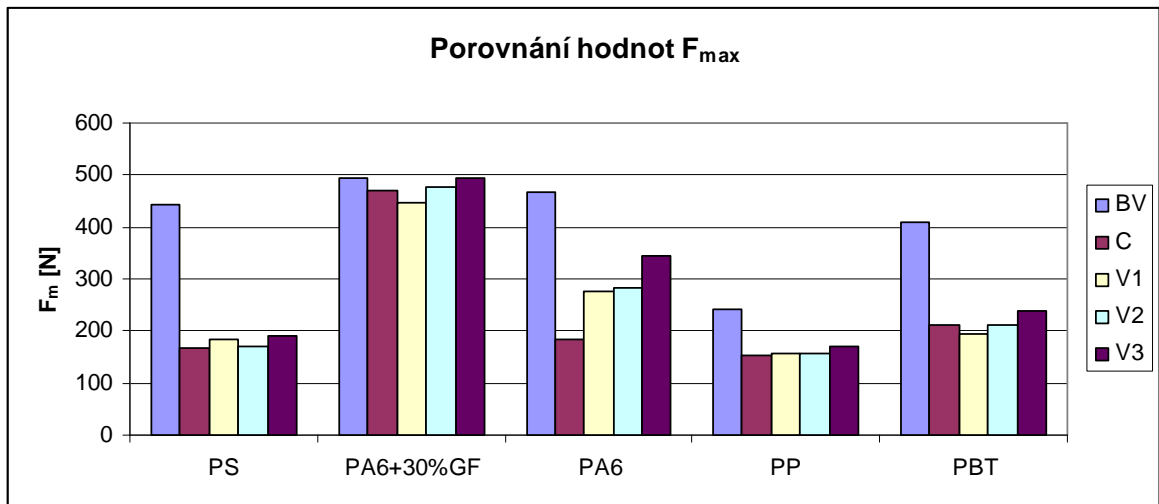
Porovnáním hodnot získaných z grafů 1, 2 a 3 lze konstatovat, že:

- Působící maximální síla je výrazně vyšší u těles bez vrubu a u těles s vruby se síly srovnávají, přičemž se dá říci, že hodnoty maximální síly rostou od V1 do V3, kde výjimku tvoří PA6
- Při porovnání napětí, nejsou rozdíly mezi tělesy s vrubem a bez vrubu výrazné rozdíly, ale opět se dá říci, že hodnota roste od V1 do V3, výjimkou je PA6
- Prodloužení při maximální působící síle u vzorků bez vrubu je minimálně dvakrát vyšší než u vzorků s vrubem
- Napětí na tělesech bez vrubu je u dvou materiálů (PA6, PP) menší než u těles s vrubem
- Hodnoty prodloužení při působení maximální síly jsou u těles bez vrubu výrazně vyšší, než u těles opatřenými vruby a hodnota prodloužení roste od V1 k V3. Toto neplatí u PBT.

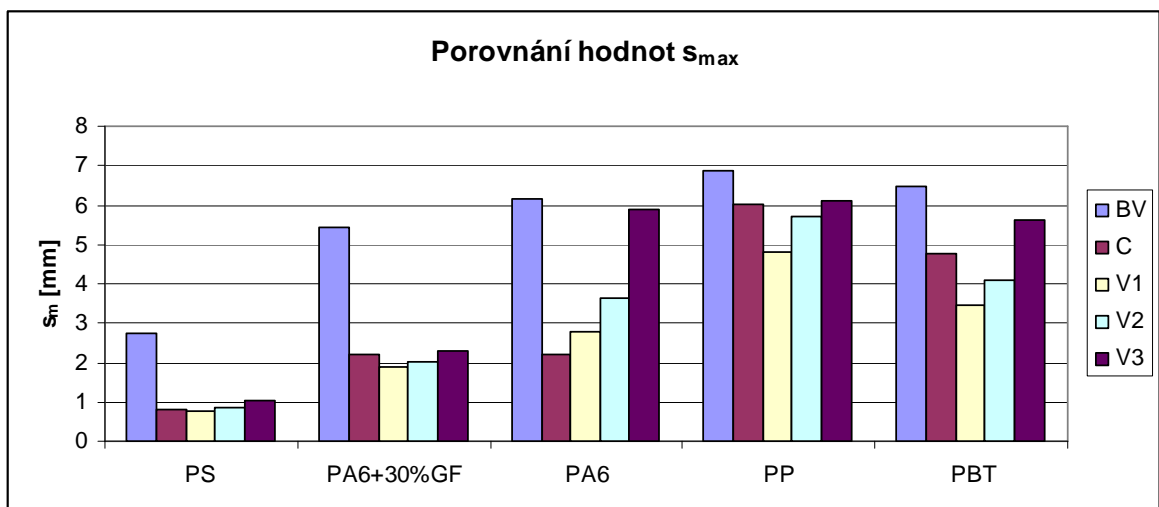
6.2 Charpyho kladivo

Podobně jako u zkoušky tahem byly vytvořeny sloupcové grafy i pro zkoušku rázové houževnatosti Charpyho kladivem. V těchto grafech je porovnávána maximální působící síla F_m [MPa], deformace při působení maximální síly s_m [mm] a celková maximální deformace $DE_{f_{max}}$ [mm].

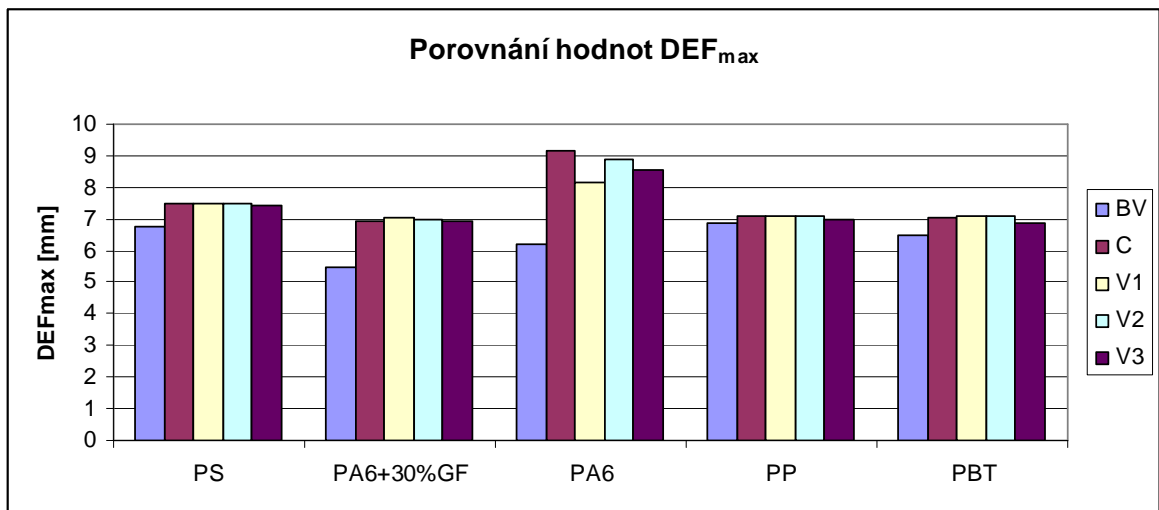
Tyto grafy byly zpracovány v programu Microsoft Excel 2010. Naměřené hodnoty, grafy vyhodnocené programem DAS8WIN a zdrojová data těchto grafů jsou uloženy v příloze na CD.



Graf 4 – porovnání hodnot F_{max} u zkoušky Charpyho kladivem



Graf 5 - porovnání hodnot s_{max} u zkoušky Charpyho kladivem



Graf 6 - porovnání hodnot DEF_{max} u zkoušky Charpyho kladivem

Srovnáním dat uvedených v grafech 4,5,6 lze říci, že:

- K přeražení, tělesa bez vrubu je potřeba výrazně vyšší síly, než u těles bez vrubu, toto však neplatí u materiálu PA6+30% GF, kde je potřebná síla srovnatelná
- Deformace při působení maximální síly je vždy největší u těles bez vrubu a roste od V1 do V3. Hodnoty s_m pro typ vrubu C se pohybují vždy nad hranicí hodnot V2, kromě případu u PA6
- U maximální deformace lze pozorovat, že je nejmenší u těles bez vrubu, u těles s vruby jsou hodnoty velmi podobné, ale nejmenší je vždy u těles s vrubem typu C

Dále jsem také provedl porovnání rázové a vrubové houževnatosti, kterou jsem spočítal pomocí programu Microsoft Excel 2010 z rovnic (5) a (6). Získané výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.

| mat. a typ vrubu | $\emptyset W_b$ [J] | a_{cN} [Mpa] |
|---------------------|---------------------|----------------|
| PA6+30%GF-C | 0,495 | 15,462 |
| PA6+30%GF-V1 | 0,428 | 13,387 |
| PA6+30%GF-V2 | 0,466 | 14,547 |
| PA6+30%GF-V3 | 0,542 | 16,929 |
| PA6+30%GF-BV | 1,417 | 44,285 |
| PA6 -C | 0,209 | 6,527 |
| PA6-V1 | 0,379 | 11,854 |
| PA6-V2 | 0,547 | 17,101 |
| PA6-V3 | 1,260 | 39,363 |
| PA6- BV | 1,840 | 57,514 |
| PS-C | 0,056 | 1,743 |
| PS-V1 | 0,043 | 1,345 |
| PS-V2 | 0,056 | 1,741 |
| PS-V3 | 0,094 | 2,924 |
| PS-BV | 0,658 | 20,561 |
| PBT-C | 0,641 | 20,026 |
| PBT-V1 | 0,421 | 13,151 |
| PBT-V2 | 0,508 | 15,879 |
| PBT-V3 | 0,929 | 29,047 |
| PBT-BV | 1,594 | 49,807 |
| PP-C | 0,631 | 19,735 |
| PP-V1 | 1,361 | 42,557 |
| PP-V2 | 1,339 | 41,686 |
| PP-V3 | 1,856 | 58,024 |
| PP-BV | 2,085 | 65,161 |

Tabulka 14 – tabulka vypočtených hodnot vrubové houževnatosti

Z tabulky 4 je patrné, že vrubová houževnatost je výrazně vyšší u těles bez vrubu a klesá od V3 do V1. Toto platí u všech zkoušených materiálů (u PP V1 a PP V2 jsou hodnoty téměř totožné). Hodnoty vrubové houževnatosti s tvarem vrubu C dosahují hodnot podobných jako V2, což neplatí u PP a PA6. To může být způsobeno buď charakteristikou materiálů nebo chybou lidského faktoru při měření.

ZÁVĚR

Cílem praktické práce bylo vyhodnotit vliv tvaru vrubu na mechanické chování termoplastů. Za tímto účelem byla zkušební tělesa opatřena čtyřmi typy vrubů a páté těleso bylo zkoušeno bez vrubu. Tělesa byla zhotovena z pěti různých materiálů, a to z PP, PBT, PA6, PA6+ 30% skleněných vláken, PS. Tato tělesa byla zkoušena v sériích po pěti kusech na trhacím univerzálním stroji a Charpyho kladivě. Zkoušky probíhaly podle mezinárodních norem.

Získané výsledky byly zpracovány specializovaným softwarem (TestXpert, DAS8WIN) do grafů a získaná data byla zpracována do příslušných tabulek a vybrané hodnoty byly porovnány ve sloupcových grafech. Všechna použitá data jsou obsahem práce a nebo přiložena na CD.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že:

- U zkoušky tahem bylo největší shody dosaženo u ϵ_m , kdy hodnota u těles bez vrubu je výrazně vyšší než u těles opatřených vrubem. Tato hodnota roste od V1 do V3 a tělesa s typem vrubu C se blíží hodnotám jako V2. Výjimku tvoří PA6, kde je hodnota u typu tělesa s vrubem C nejmenší a PBT, kde těleso s vrubem typu V3 je také nejmenší.
- U zkoušky na Charpyho kladivě bylo dosaženo největší shody výsledků při porovnávání hodnot deformace při působení maximální síly s_{max} . tato deformace je vždy nejvyšší u těles bez vrubu. U materiálů křehké povahy jsou tyto hodnoty výrazně vyšší než u těles s vrubem. U houževnatých materiálů (PP, PA6, PBT) se hodnoty u tvaru vrubu V3 blíží hodnotám těles bez vrubu.
- U všech materiálů platí, že deformace roste od V1 do V3. Hodnota deformace u těles s typem vrubu C je větší než V2, výjimku však tvoří PA6.

Závěrem lze říci, že výsledky získané z obou zkoušek se doplňují a částečně shodují. Z dostupných výsledků můžeme říci, že tvar vrubu s největším poloměrem kořene vrubu oslabuje materiál nejméně a naopak tvar vrubu s nejmenším poloměrem kořene vrubu oslabuje materiál nejvíce. Lze také pozorovat podobnost výsledků těles s vrubem V2 a pravouhelníkovým vrubem typu C.

Ovšem toto neplatí u všech měřených veličin a materiálů. Rozdíly mohou být způsobené lidským faktorem při vytváření vrubu nebo při samotném provádění experimentálních zkoušek.

Pro získání přesnějších výsledků a závislostí by bylo vhodné provádět měření, ve kterých by jedna měřená série obsahovala větší množství vzorků. Také by bylo vhodné a více průkazné opatřit tělesa více druhy vrubů jako např. ve tvaru „U“, lichoběžníkový a další.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MLEZIVA, Josef. *Polymery- výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha : Sobotáles, 1993. 225 s
- [2] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Termoplasty: Lineární polyestery a polyétery*. Liberec. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p14/polyestery.pdf
- [3] KORBAŘ, T.; STRÁNSKÝ, A. *Technický slovník naučný*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1963. 676 s. ISBN 04-029-63
- [4] HLUCHÝ, M., a kol. *Strojírenská technologie I : Nauka o materiálu*. 2.vyd. Praha:SNTL, 1978. 360 s. ISBN 04-212-78
- [5] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty- Stanovení tahových vlastností: základní principy*. Praha: ČNI, 1996
- [6] PLUHAŘ, J., a kol. *Nauka o materiálech*. Praha : SNTL, 1989. 552 s. ISBN 04-205-89
- [7] BÁRTA, Martin. *Speciální zkouška tahem pryžových kompozitů*. Zlín, 2009. 73 s. Bakalářská práce. UTB.
- [8] ČSN EN ISO 179. *Plasty- Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: ČNI, 1998.
- [9] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty- Stanovení tahových vlastností: zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: ČNI, 1996.
- [10] LUDĚK PTÁČEK A KOL. *Nauka o materiálu I*. první. Brno: CERM,s.r.o., 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- [11] ZELINGER, J., A. KUTA a J. ŠTĚPEK. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. Bratislava: SNTL, 1989.
- [12] VESELÝ, Karel a J. ŠTĚPEK. *Polymery*. Brno: ČSPCH, 1992. ISBN 80-02-00951-1.
- [13] DOLEŽEL, Břetislav a ŠTĚPEK. *Odolnost plastů a pryží*. první. Praha: SNTL, 1981. ISBN 04-631-81.
- [14] JANOVSÁ, Marie. *Vliv materiálu a tvaru vrubu na napjatost filmového spoje při zatížení*. Zlín, 2010. Diplomová práce. UTB Zlín. Vedoucí práce Ing. Antonín Polášek, Csc.

- [15] ZÁMORSKÝ, Z. *Nauka o polymerech*. Brno : VUT, 1980.
- [16] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. 1.vyd. Praha : VŠCHT, 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [17] Tul.cz [online]. 2006 [cit. 2010-12-18]. *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti*. Dostupné z WWW: WWW: <
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm >
- [18] HAVLÍČEK, V; OSTEN, M; ŠŇUPÁREK, J. *Přehled plastických hmot*. Praha : SNTL, 1960. 424 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|---------------|--|
| PP | Polypropylen |
| PA6 | Polyamid 6 |
| PA6+30GF | Polyamid 6 s 30% skleněných vláken |
| PBT | Polybutyléntereftalát |
| PS | Poylstyren |
| σ_{Pt} | Mez pevnosti v tahu [MPa] |
| F_{max} | Maximální síla [N] |
| S_0 | Počáteční průřez [mm ²] |
| Δl | Celkové prodloužení [mm] |
| l | Délka [mm] |
| l_0 | Počáteční délka [mm] |
| ε | Prodloužení [-] |
| δ | Tažnost [%] |
| φ | Kontrakce [%] |
| S | Průřez [mm ²] |
| l_3 | Celková délka [mm] |
| l_1 | Délka zúžené rovnoběžné části [mm] |
| r | Poloměr [mm] |
| l_2 | rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi [mm] |
| b_2 | šířka konců [mm] |
| b_1 | šířka zúžené rovnoběžné části [mm] |
| h | tloušťka [mm] |
| L | počáteční vzdálenost čelistí [mm] |
| E | energie kyvadla [J] |

| | |
|--------------------|--|
| W | rázová energie [J] |
| L_p | délka kyvadla [mm] |
| a_{cU} | rázová houževnatost Charpy těles bez vrubu [MPa] |
| a_{cN} | rázová houževnatost Charpy těles s vrubem [MPa] |
| W_b | energie při přeražení [J] |
| h | tloušťka [mm] |
| b | šířka [mm] |
| g | gravitační zrychlení [m/s^2] |
| t | čas [s] |
| v_0 | rychlost [m/s] |
| σ_m | maximální napětí [MPa] |
| σ_B | napětí při přeražení [MPa] |
| E | modul pružnosti v tahu [MPa] |
| ε_m | prodloužení při maximální deformaci [mm] |
| ε_B | prodloužení při přeražení [mm] |
| ε_{Fm} | prodloužení při působení max. síly [mm] |
| F_m | maximální síla [N] |
| m | hmotnost [kg] |
| a_0 | tloušťka vzorku [mm] |
| BV | označení tělesa bez vrubu |
| C | vrub typu C |
| V_1 | “V” vrub s poloměrem kořene 0,25 mm |
| V_2 | “V” vrub s poloměrem kořene 0,5 mm |
| V_3 | “V” vrub s poloměrem kořene 1 mm |
| b_0 | šířka vzorku [mm] |

s_{\max} deformace při max. síle [mm]

s_b deformace při přeražení [mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 – základní typy řetězců PP | 12 |
| Obrázek 2 – složení polystyrenu..... | 14 |
| Obrázek 3 - Schéma univerzálního trhacího stroje..... | 19 |
| Obrázek 4 - Tahové diagramy polymerních materiálů | 21 |
| Obrázek 5 – tvar zkušebních tělesa pro trhací zkoušku (typ 1) | 22 |
| Obrázek 6 - tvar zkušebních tělesa pro trhací zkoušku (typ 5)..... | 23 |
| Obrázek 7 - Zkušební těleso pro Charpyho zkoušku | 25 |
| Obrázek 8 – směr rázu u Charpyho zkoušky | 26 |
| Obrázek 9 – příklady typů tvaru vrubu | 26 |
| Obrázek 10 – tvar zkušebních tělesa pro trhací zkoušku (typ 1) | 31 |
| Obrázek 11 – tvar zkušebního tělesa pro Charpyho metodu | 31 |
| Obrázek 12 – použitá mechanická vrubovačka | 32 |
| Obrázek 13 – Tvar vrubu V1..... | 33 |
| Obrázek 14 – Tvar vrubu V2..... | 33 |
| Obrázek 15 – Tvar vrubu V3..... | 34 |
| Obrázek 16 – Tvar vrubu C | 34 |
| Obrázek 17 – Náčrt tělesa s vruby pro tahovou zkoušku | 35 |
| Obrázek 18 – fotografie tělesa s vruby pro tahovou zkoušku..... | 35 |
| Obrázek 19 – náčrt tělesa s vrubem pro zkoušku vrubové houževnatosti | 36 |
| Obrázek 20 – fotografie vrubů na tělesech pro zkoušku vrubové houževnatosti | 36 |
| Obrázek 21 – univerzální zkušební stroj ZWICK | 37 |
| Obrázek 22 – tahové diagramy těles s vruby z PS..... | 39 |
| Obrázek 23 - tahové diagramy těles s vruby z PA6+30% GF..... | 41 |
| Obrázek 24 - tahové diagramy těles s vruby z PA6..... | 43 |
| Obrázek 25 - tahové diagramy těles s vruby z PP | 45 |
| Obrázek 26 - tahové diagramy těles s vruby z PBT | 47 |
| Obrázek 27 – Charpyho kladivo | 49 |
| Obrázek 28 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PS | 50 |
| Obrázek 29 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PA6+30% GF..... | 51 |
| Obrázek 30 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PA6..... | 52 |
| Obrázek 31 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PP | 53 |
| Obrázek 32 - diagramy F-t na Charpyho kladivě z PBT | 54 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 – rozměry zkušebních těles typu 1 pro tahovou zkoušku | 23 |
| Tabulka 2 - rozměry zkušebních těles typu 5 pro tahovou zkoušku..... | 24 |
| Tabulka 3 – rozměry zkušebních těles pro Charpyho zkoušku | 25 |
| Tabulka 4 – tabulka získaných hodnot pro PS z tahové zkoušky | 40 |
| Tabulka 5- tabulka získaných hodnot pro PA6+30GF z tahové zkoušky..... | 42 |
| Tabulka 6 - tabulka získaných hodnot pro PA6 z tahové zkoušky | 44 |
| Tabulka 7 - tabulka získaných hodnot pro PP z tahové zkoušky..... | 46 |
| Tabulka 8 - tabulka získaných hodnot pro PBT z tahové zkoušky..... | 48 |
| Tabulka 9 - tabulka získaných hodnot pro PS z Chyrpyho kladiva..... | 51 |
| Tabulka 10 - tabulka získaných hodnot pro PA6+30%GF z Chyrpyho kladiva | 52 |
| Tabulka 11 - tabulka získaných hodnot pro PA6 z Chyrpyho kladiva | 53 |
| Tabulka 12 - tabulka získaných hodnot pro PP z Chyrpyho kladiva..... | 54 |
| Tabulka 13 - tabulka získaných hodnot pro PBT z Chyrpyho kladiva..... | 55 |
| Tabulka 14 – tabulka vypočtených hodnot vrubové houževnatosti..... | 60 |

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|--|----|
| Graf 1 – porovnání hodnot napětí, pro všechny vruby a materiály | 56 |
| Graf 2 - porovnání hodnot prodloužení, pro všechny vruby a materiály..... | 56 |
| Graf 3 - porovnání hodnot maximální působící síly, pro všechny vruby a materiály | 57 |
| Graf 4 – porovnání hodnot F_{\max} u zkoušky Charpyho kladivem | 58 |
| Graf 5 - porovnání hodnot s_{\max} u zkoušky Charpyho kladivem | 58 |
| Graf 6 - porovnání hodnot DEF_{\max} u zkoušky Charpyho kladivem | 59 |

SEZNAM PŘÍLOH

- PI Tahové diagramy zkoušených vzorků
- PII Naměřená data z trhací zkoušky
- PIII diagramy F-t získané z programu DAS8WIN
- PIV naměřená data ze zkoušky Charpyho kladivem
- PV Zdrojová data a porovnání ve sloupcových grafech