

Vliv tvaru vrubu na pevnost plastů a kompozitů

Eva Čalová

Bakalářská práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Eva ČALOVÁ**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv tvaru vrubu na pevnost plastů a kompozitů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Navrhněte a zhotovte typová zkušební tělesa**
- 3. Provedte experimentální zkoušky v laboratorních podmínkách**
- 4. Provedte vyhodnocení experimentálních zkoušek**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. František Rulík, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

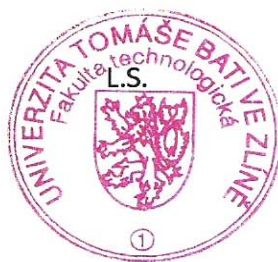
13. února 2007

Termín odevzdání bakalářské práce:

31. května 2007

Ve Zlíně dne 16. února 2007


prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o vlivu tvaru vrubu na pevnost plastů a kompozitů. Teoretická část je zaměřena na charakteristické vlastnosti nejčastěji používaných plastů a kompozitů, nejrozšířenější způsoby výroby, základní metody pro jejich zkoušení a tvary možných vrubů. V praktické části je popsána výroba zkušebních vzorků, postup při ohybové zkoušce a vyhodnocení naměřených hodnot.

Klíčová slova: ohyb, vrub, pevnost

ABSTRACT

The Bachelor Thesis deals with a notch influence on strength of the plastic and composite materials. The Theoretical Part is centered on the characteristic features of the most used plastic and composite materials, the most extensive processes of the production, basic methods for testing of materials and it shows some shapes of the possible notches. The Practical Part contains the description of the production of the tested specimens, description of the bend test and the evaluation of the measuring data.

Keywords: bend, notch, strength

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Františkovi Rulíkovi, CSc. za trpělivost, ochotu věnovat mi svůj čas, připomínky a odbornou pomoc při zpracovávání této práce. Poděkování také patří Ing. Jiřímu Šálkovi, Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D a Ing. Ondřeji Bílkovi za technickou asistenci a pomoc při zhotovování praktické části.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala.

Ve Zlíně, 2007

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	7
I. TEORETICKÁ ČÁST	8
1 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ	9
1.1 POLYVINYLCHLORID PVC	10
1.2 POLYETYLEN PE.....	11
1.3 POLYPROPYLEN PP	11
1.4 TERMOPLASTICKÝ POLYESTER AXPET	12
1.5 HOUŽEVNATÝ POLYSTYREN HPS	13
1.6 BAKELIT	14
2 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ	15
2.1 KOMPOZITY S KRÁTKÝMI VLÁKNY	15
2.2 KOMPOZITY S DLOUHÝMI VLÁKNY	15
3 ZPŮSOBY VÝROBY	17
3.1 VYTLAČOVÁNÍ.....	17
3.2 VSTRÍKOVÁNÍ	18
3.3 PULTRUZE.....	19
4 ZKOUŠENÍ PLASTŮ A KOMPOZITŮ	20
4.1 ZKOUŠKA TAHEM.....	21
4.2 ZKOUŠKA TLAKEM.....	22
4.3 ZKOUŠKA OHYBEM	23
5 TVARY VRUBŮ	26
II. PRAKTICKÁ ČÁST	28
6 VÝROBA VZORKŮ	29
6.1 POUŽITÁ STROJNÍ ZAŘÍZENÍ A VOLBA TVARU VRUBU	30
6.2 PŘEHLED PŘIPRAVENÝCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	31
6.3 KONSTRUKČNÍ UMÍSTĚNÍ VRUBŮ	31
7 PROVEDENÍ EXPERIMENTU	33
8 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY	36
9 ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47
SEZNAM OBRÁZKŮ	48
SEZNAM TABULEK	49
SEZNAM PŘÍLOH	50

ÚVOD

Na počátku třetího tisíciletí představují polymerní materiály nejvýznamnější oblast ze všech materiálů podle objemu výroby a spotřeby. V konkurenci s klasickými materiály, zejména kovy, se polymery prosadily především svojí snadnou zpracovatelností, nízkou měrnou hmotností, odolností proti korozi a výhodným poměrem mezi vlastnostmi a cenou. I přes množství výhod však zůstává skutečností, že mají obecně malou tuhost a pevnost ve srovnání s kovy nebo keramikou. Tímto je dána hranice jejich použití v konstrukčních aplikacích.

Abychom zlepšili mechanické vlastnosti, můžeme polymerní materiály vyztužit přidáním práškových plniv nebo vláken, které mají vysokou tuhost, pevnost a teplotní stabilitu. Nejčastěji se používají skleněná vlákna pro své dobré mechanické vlastnosti a nízké ceny. Nejvýznamnější předností kompozitů, skupiny materiálů obsahující vláknové výztuže, je kombinace snadné tvarovatelnosti málo pevného polymeru s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. I ty nejjednodušší kompozity nabízejí nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a vynikající odolnost vůči korozi a elektrickou nevodivost. Tyto a další fyzikální a chemické vlastnosti jsou důvodem jejich prudkého vývoje v posledních desetiletích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ

K výrobě plastů používáme jako hlavní složku chemickou sloučeninu, kterou nazýváme polymerem. Polymery jsou organické nebo syntetické sloučeniny, v jejichž makromolekule se jako článek řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Existují ve formě prášku, past, granulí aj. Plastem se polymer stává tak, že jej smísíme s nezbytnými přísadami.

Mezi přísady patří především stabilizátory, jejichž účelem je udržení vlastností polymeru na původních hodnotách během zpracování, skladování a použití. Chrání před degradací jak při tepelném zpracování, tak při používání výrobku za vnějších podmínek (povětrnostních, slunečních). Pro zlepšení mechanických i tepelných vlastností se přidávají plniva ve formě prášku nebo vláken. Výrazně zvýší modul pružnosti, pevnost a houževnatost. Vhodným plnivem lze výrazně snížit cenu materiálu. Jako přísady pro zlepšení elektrické vodivosti slouží elektrovedivé saze nebo kovové prášky. Protože jsou některé plasty příliš tvrdé a neohebné (PVC), přidáváme pro odstranění těchto nežádoucích vlastností změkčovadla. Mezi jejich přednosti patří také zvýšení odolnosti materiálu proti mrazu. Pro úsporu a odlehčení materiálu se používají nadouvadla. Mezi další přísady patří maziva, retardéry hoření, barviva a pigmenty ovlivňující výsledný vzhled materiálu. [6]

Je zapotřebí věnovat pozornost mechanickému namáhání plastů v určitém prostředí. Například látky jako jsou saponáty snižují povrchové napětí plastu, což při současném působení malého mechanického namáhání způsobí jeho zesílení a následné porušení povrchu. Tento jev se nazývá koroze za napětí. [8]

Základní dělení plastů je na:

- termoplasty
- reaktoplasty
- elastomery

Termoplasty – jsou to plasty, které zvýšením teploty postupně měknou (přecházejí v taveninu) a ochlazením tuhnou. Tento proces je opakovatelný. Podle teploty mohou termoplasty zaujímat pevný - elastický (hmota je tuhá a dělí se obráběním), termoelastický (hmota je lehce tvářitelná) nebo termoplastický (hmota je viskózní) stav.

Mezi termoplasty patří např. PVC, PE, PP, AXPET, HPS.

Reaktoplasty - plasty, které mají v konečné fázi zpracování řetězce příčně propojeny chemickými vazbami a vytváří prostorovou trojrozměrnou síť. Při tváření pod vlivem teploty a tlaku nastává zesíťování (vytvrzování) plastu. Po prvním zpracování již nejsou dále tepelně zpracovatelné. Jsou to materiály na bázi umělých pryskyřic. [5]

Typickým představitelem reaktoplastů je bakelit. Dále mezi reaktoplasty patří umakart, používaný na koupelnová jádra, texgumoid, ze kterého se vyrábí kluzná ložiska a ozubená kola a epoxidy využívané zejména při výrobě lepidel a laminátů.

Elastomery - tyto plasty se vyznačují vysokou elasticitou, mohou se roztahovat a vrátet do původního stavu. Při vulkanizaci dochází k zesíťování, kdy se tvárný kaučuk mění na pryž. [5]

Mezi typické elastomery patří kaučuky, které se používají převážně v gumárenském průmyslu na výrobu pneumatik, těsnění, hadic atd. a polyuretany vhodné pro výrobu tlumících prvků a podrážek obuvi.

1.1 Polyvinylchlorid PVC

Polyvinylchlorid je díky svým vlastnostem široce používaným plastem v mnoha různých oborech. Je to typický amorfní polymer bez zápachu a barvy, který se vyskytuje jak v měkčené, tak v tvrdé formě. Měkčený typ PVC obsahuje velké procento změkčovadel. Změkčovadla významně ovlivňují tepelné vlastnosti, především hodnoty rázové a vrubové houževnatosti při nízkých teplotách a také způsobují vyšší absorpci vlhkosti, která snižuje izolační vlastnosti. Naopak tvrdý typ PVC neobsahuje téměř žádná změkčovadla. Mezi jeho vynikající vlastnosti patří nehořlavost, odolnost vůči vodě, kyselinám a zásadám. Má vysokou tvrdost a pevnost, odolnost proti oděru. Jeho tepelné zpracování je obtížné, protože tavenina poměrně špatně teče. Pro zlepšení je nutno přidat stabilizátory, maziva a změkčovadla. Nežádoucím jevem při tepelném zpracování je uvolňování plynného chlorovodíku, kvůli čemuž je nahrazován jinými termoplasty. [5]

Použití: - tvrdý PVC: potrubí, armatury, okna

- měkčený PVC: podlahoviny, hračky, ubrusy

1.2 Polyetylen PE

Polyetylen patří mezi polymery s nejvyšší spotřebou. Je to bílá hořlavá látka bez chuti a zápachu. Je to typický plast, jehož vlastnosti jsou velmi citlivé na strukturu. Strukturální závislost vlastností je proto základním vodítkem pro rozlišení jednotlivých druhů polyetylenů. Zřejmě nejvíce používaný je nízkohustotní LDPE a vysokohustotní HDPE polyetylen. Nízkohustotní polyetylen má dobré tokové vlastnosti, je měkký, ohebný, houževnatý i za nízkých teplot, ale jeho slabinou je nízká pevnost a náchylnost ke korozi za napětí. Mezi nevýhody vysokohustotního polyetyleny patří opět náchylnost ke korozi za napětí a nízké mechanické vlastnosti, má ale výborné dielektrické vlastnosti a oproti LDPE má vyšší odolnost vůči rozpouštědlům, je tvrdší a pevnější. Většina vyráběných polyetylenů je schválena pro styk s potravinami podle zahraničních norem. [8]

Použití: - LDPE: obalové a zemědělské fólie, telekomunikační kabely

- HDPE: láhve, kanystry, vodovodní potrubí, mikrotenové sáčky

1.3 Polypropylen PP

Polypropylen je klasický představitel komoditních polymerů. Některé jeho aplikace jej však řadí i mezi konstrukční materiály. Je zajímavé, že v posledních letech význam polypropylenu znovu zřetelně roste. Důvodem jsou jednak nově vyvinuté modifikace a kompozity na jeho základě a nové pozoruhodné aplikace. Nejpoužívanějším typem tohoto krystalického polymeru je izotaktický polypropylen. Díky krystalické fázi je izotaktický polypropylen pevný, tuhý a poměrně tvrdý materiál s uspokojivou houževnatostí, pokud teplota neklesne pod teplotu skelného přechodu amorfní matrice. Z tepelných vlastností je pozoruhodný vysoký bod tání a poměrně vysoká maximální teplota použití. Za normální teploty je izotaktický polypropylen nerozpustný ve všech organických rozpouštědlech. Má nízkou odolnost proti ultrafialovému záření. Elektrické vlastnosti izotaktického polypropylenu vyplývají z jeho nepolárnosti. Vykazuje výborné elektro-izolační vlastnosti. Kladen je také důraz na snadnou recyklovatelnost polymerních výrobků. [8]

Použití: - injekční stříkačky, nádoby autobaterií

1.4 Termoplastický polyester AXPET

Axpet je obchodní název pro termoplastický polyester, který se vyrábí ze suroviny A-PET. Výborně odolává ultrafialovým paprskům a dobře vede světlo. Má světelnou propustnost do 90% při dokonalé optické kvalitě a vysokém povrchovém lesku. Vyznačuje se extrémní rázovou pevností a to i při teplotách pod bodem mrazu. Vysoká rázová pevnost zaručuje navíc zmenšení možných ztrát poškozením hotových výrobků při transportu. Je vhodný pro styk s potravinami. Vyhovuje předpisům Správy pro kontrolu potravin a léčiv a direktivám Evropské komise. Desky lze snadno ohýbat za studena. Tepelné tvarování je obtížné, neboť zahřátí může vést k rekrystalizaci a zblednutí materiálu, pokud bude teplota vyšší než 120°C. Výrobky nežloutnou a zachovávají si své mechanické vlastnosti. Desky AXPET ve standardním provedení bez UV ochrany vykazují velmi dobrou barevnou stálost i při dlouhodobém vystavení UV záření a nasazení ve venkovním prostředí. Překonávají svou vynikající chemickou odolností akrylové a polykarbonátové výrobky. Polotovary mohou být řezány, vrtány a frézovány standardními nástroji k opracování kovů a plastů. Desky se dále dají řezat a ohýbat jako karton. Lze na ně aplikovat sítotisk při použití tiskařské barvy.

Použití: při výrobě oken, ochranných štítů motocyklů, signálních zařízení, lékařských přístrojů. Barevné tabule mají využití v reklamní technice a výstavnictví. [14]

V tab.1. jsou uvedeny nejběžnější hodnoty základních vlastností materiálu AXPET. [15]

Fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota:	1,33	g/cm ³
Index lomu při 20 °C:	1,57	
Propustnost světla (deska 2mm):	85	%
Mechanické vlastnosti		
Napětí v tahu:	56	N/mm ²
Prodloužení při napětí v tahu:	4	%
Pevnost v tahu:	25	N/mm ²
Prodloužení při roztržení:	>100	%
Modul pružnosti v tahu:	2400	N/mm ²

Hraniční napětí při ohybu:	77 - 83	M/mm ²
Termické vlastnosti		
Teplota skelného přechodu:	81	°C
Tepelná vodivost:	0,25	W/m °C
Koeficient lineární roztažnosti:	0,050	mm/m °C
Teplota tvarové stálosti (HDT/ a (1,8 N/mm ²):	63	°C

Tab. 1. Vlastnosti materiálu AXPET

1.5 Houževnatý polystyren HPS

Pro některé aplikace se ukázalo nutné odstranit nevýhodné vlastnosti polystyrenu, zejména jeho křehkost, ale zachovat přitom jeho přednosti. Jednou z možností je vhodná modifikace polystyrenu. Při výrobě se do makromolekuly polystyrenu zabudují molekuly kaučuku, a tak vznikne houževnatý polystyren. Houževnatý polystyren je amorfní termoplast, který díky přítomnosti kaučuku ztrácí průhlednost a je zakalený. Získává naopak odolnost vůči prudkým úderům, za cenu snížení pevnosti a modulu pružnosti. Citlivost ke vrubům a zářezům je malá. Teplotní použitelnost je přibližně od -40°C do 75°C. Na povětrnosti žloutne a ztrácí houževnatost. Je náchylný ke korozi za napětí. Snadno hoří a přitom uvolňuje značné množství sazí. Díky své viskoelasticitě je vhodný pro tepelné tvarování (např. vakuové tvarování). Zpracovává se všemi základními technologiemi. Výrobky lze svařovat, lepit, lakovat či potiskovat. Vyskytuje se v široké nabídce barev. [8]

V tab.2. jsou uvedeny nejčastější hodnoty základních vlastností materiálu HPS. [8]

Fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Hustota:	1,04	g/cm ³
Mechanické vlastnosti		
Smrštění:	0,3-0,7	%
Tažnost:	40-50	%
Pevnost v tahu:	19-33	N/mm ²
Modul pružnosti v tahu:	1800	N/mm ²

Modul pružnosti v ohybu:	600	M/mm ²
Pevnost v ohybu:	38	M/mm ²
Termické vlastnosti		
Teplota skelného přechodu:	80	°C
Tepelná vodivost:	0,18	W/m °C
Teplota tvarové stálosti(HDT/ a (1,8 N/mm ²):	60-75	°C

Tab. 2. Vlastnosti materiálu HPS

Použití: výroba krytů elektrických přístrojů, zejména televizí, klávesnic počítačů, obalů, kelímků na jogurty. Čiré a opálové desky lze použít pro světelnou reklamu a nápisy v interiérech. [8]

1.6 Bakelit

Bakelit je prvně vyrobená umělá pryskyřice. Chemickou podstatou tohoto nehořlavého materiálu je fenolformaldehydová pryskyřice vyztužená krátkými vlákny dřeva. Tento křehký materiál má výborné izolační vlastnosti. I přes své klady byl však později nahrazen termoplasty. [3]

Použití:- zásuvky, vypínače

2 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITŮ

Kompozitem je nazýván materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dvě nebo více komponent nebo fází o výrazně se lišících fyzikálních a chemických vlastnostech. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Pro zařazení mezi kompozity musí materiál splňovat tyto podmínky: [6]

- podíl výztuže musí být větší než 5%
- vlastnosti výztuže a matrice se musí lišit
- kompozit musí být připraven mísením složek

Podle geometrie výztuže dělíme kompozity na částicové a vláknové. Nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech jsou skleněná vlákna. Ty se vyrábějí především ze skloviny označované jako sklo E. Skleněná vlákna jsou amorfní, jejich pevnost v tahu je značně závislá na stavu povrchu. Poškození povrchu vlákna při sdružování do svazků snižuje pevnost vytaženého vlákna až o 50%. Před poškozením lámáním se vlákna chrání lubrikačními povlaky - vosky, mazivy. Před použitím lubrikačních vláken pro výztuž kompozitu je nutno mazivo odstranit (rozpustit). Vlákno má průměr od 3,5 do 20 μm . Při výrobě se najednou táhne 51 až 408 vláken, které se navíjejí na buben. [11]

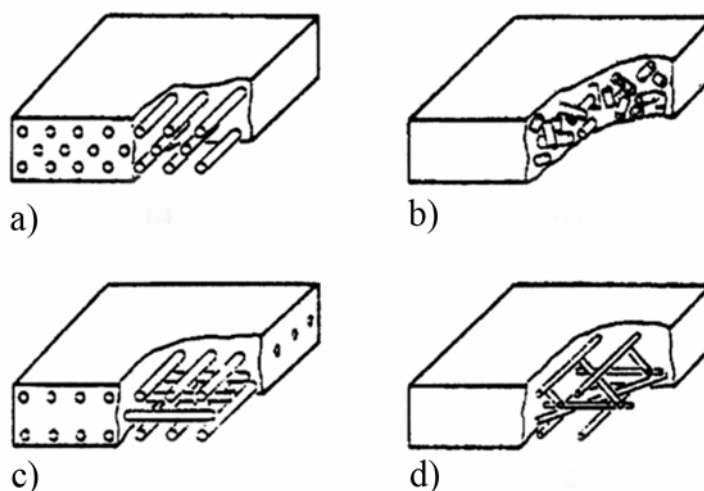
2.1 Kompozity s krátkými vlákny

Krátkovláknové kompozity se svými vlastnostmi liší od systémů s jednoparametrickými částicemi. Rozdíl mezi částicemi a krátkými vlákny je dán zejména poměrem délky a průměru vlákna (štíhlosti). Krátkovláknový kompozit musí mít poměr $L/D < 100$. Vlastnosti kompozitu závisí na orientaci vláken (viz obr.1.). V závislosti na směru krátkých vláken v polymerní matici se mění nejen elastické konstanty, ale i fyzikální vlastnosti. Vytužující vlákna mají mnohem vyšší pevnost a tuhost než běžné pojivo. Základní a omezující strukturu tvoří rovinný systém vláken, ideálně usměrněných v jednom směru. [11,13]

2.2 Kompozity s dlouhými vlákny

Dlouhovláknový kompozit musí mít poměr $L/D > 100$. Při vnějším namáhání kompozitu dochází na rozhraní vlákno-polymer ke vzniku smykových sil, které při adhezi mezi

vlákna a polymerem umožní přenos veškerého napětí z matrice do vláken. Velice často jsou kompozity z epoxidové pryskyřice plněné skleněnými vlákny. Jsou to bezbarvé až nažloutlé sloučeniny, které obsahují velmi reaktivní epoxidovou skupinu. Teplota skelného přechodu je v rozmezí teplot 60-130°C a má velký vliv na vytvrzovací rychlost. Se zvyšující se teplotou skelného přechodu vytvrzovací rychlost klesá. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty, dochází jen k malému smrštění a to je výhodné pro výrobky s požadovanou přesností rozměrů a pro výrobu kompozitů. Epoxidová pryskyřice má nejlepší přilnavost k povrchově neupravené skleněné výztuži. Dále vykazuje nejlepší mechanické a elektrické vlastnosti, ceněná je i její odolnost proti vodě, kyselinám a zásadám. Díky těmto vlastnostem se rozvinulo použití epoxidové pryskyřice v lepidlech, lisovacích a nátěrových hmotách a pojivech pro lamináty. [11]



Obr. 1. Orientace vláken v kompozitu

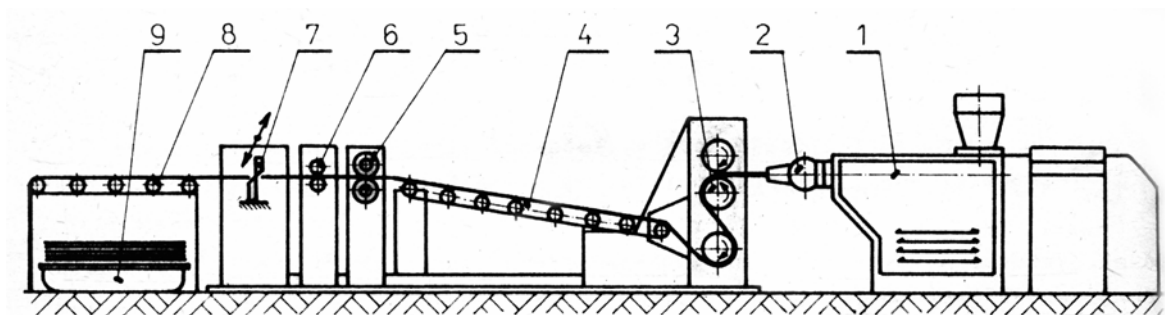
- a) jednosměrně orientovaný dlouhovláknový kompozit
- b) krátkovláknový kompozit s náhodně orientovanými vlákny
- c) dlouhovláknový dvousměrně orientovaný kompozit
- d) kompozit s náhodně orientovanými dlouhými vlákny

3 ZPŮSOBY VÝROBY

Plasty se zpracovávají různými technologickými postupy. Mezi nejrozšířenější technologie výroby plošných materiálů z plastů patří válcování a vytlačování. Výroba kompozitů se nejčastěji provádí vstřikováním a pultruzí.

3.1 Vytlačování

Vytlačování je technologický proces založený na převedení materiálu do plastického stavu s následným vytlačením přes profilovaný otvor (tzv. hubici) do volného prostoru. Nejběžnější způsob plastikace je pomocí šneku. Šnek je uložen ve šnekové komoře, kde se materiál (např. ve tvaru granulí) přemění v taveninu. Za šnekovou komorou je vytlačovací hlava s hubicí, která udává tvar profilu. Při vytlačování desek či fólií (viz obr.2.) vstupuje vytlačovaný materiál bezprostředně za hlavou (2) do kalibrovacího ústrojí, kde dochází k zafixování tvaru a rozměru. Z kalibračního ústrojí pokračuje pás na tříválcový chladicí stroj (3), kde se ochlazuje. Dochlazení probíhá na válečkovém dopravníku (4) s noži (5), které ořezávají okraje. Vytlačená deska se řeže na manipulační délky řezacím ústrojím (7). [9]



Obr. 2. Vytlačovací linka

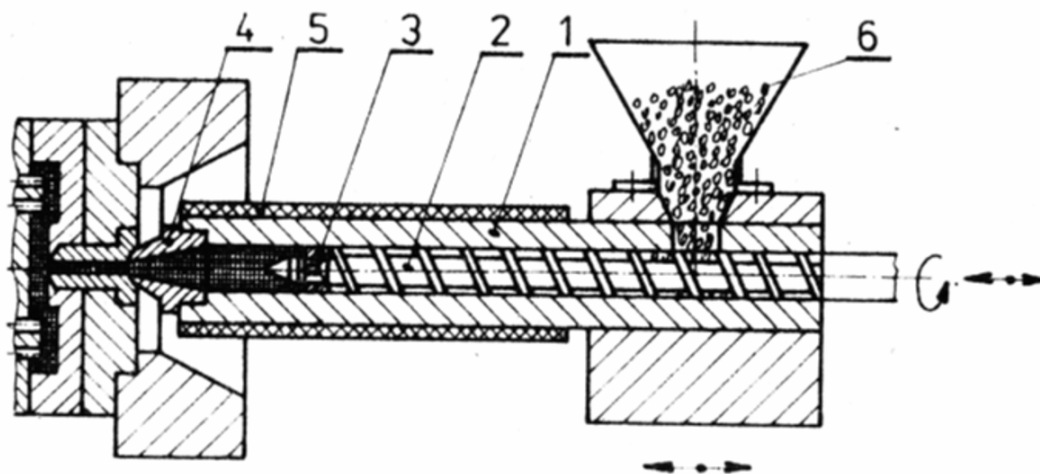
- | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 – vytlačovací stroj | 4 – válečkový dopravník | 7 – pila |
| 2 – vytlačovací hlava | 5 – kotoučové nože | 8 – manipulační ústrojí |
| 3 – chladicí válce | 6 – odtah | 9 – paleta |

Vytlačování se používá hlavně pro výrobu desek, fólií, trubek, hadic a kabelů. Nevýhodou vytlačovací linky je její složitost, která vyžaduje náročnou kontrolu procesu. Výhodou je schopnost zpracovat velké množství druhů termoplastů. [8]

3.2 Vstřikování

Vstřikování patří k nejrozšířenějším a nejdůležitějším technologiím zpracování termoplastů. Představuje takový způsob tváření, při kterém je přesně určená dávka zpracovaného materiálu vstříknuta velkou rychlostí z plastikační jednotky (viz obr.3.) do uzavřené tvarové dutiny kovové formy, kde hmota ochlazením ztuhne ve finální výrobek. Plastikační jednotka je součástí vstřikovacího stroje a zásoba polymeru se v ní stále doplňuje. Polymer bývá nejčastěji ve formě granulí. Mezi základní funkce plastikační jednotky patří roztavit polymer na taveninu a pomocí pístu nebo šneku ji vstříknout do dutiny formy. Po ochlazení se forma v dělicí rovině otevře, výrobek se vyhodí pomocí vyhazovací soustavy a celý proces se po opětovném uzavření formy opakuje. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností. Jejich tvar může být velice jednoduchý, ale stejně tak i značně složitý. Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů. PVC vyžaduje pro vstřikování speciálně upravené složení. [8]

Vstřikování termoplastů obsahujících krátká vlákna se v principu neliší. Protože tavenina má horší tekutost, musí se počítat s vysokými vstřikovacími tlaky a vyšší teplotou taveniny. Tvrdá plniva, zejména skleněná vlákna, způsobují oděr nejvíce šneku, pracovní komory i trysky, stejně jako vtokových kanálů a vlastní tvarové dutiny formy. Proto je nutno počítat s jejich menší životností. Vlákna na rozdíl od matrice neuvolňují při ochlazování a tunutí žádné skupenské teplo, takže vyztužený plast ve formě chladne rychleji a rychleji ztrácí tekutost. To opět vyžaduje úpravy technologických podmínek, konkrétně zvýšení teploty taveniny i zvýšení vstřikovacího tlaku. [8]



Obr. 3. Plastikační jednotka

1 – pracovní válec

2 – šnek

3 – zpětný uzávěr

4 – vstřikovací uzávěr

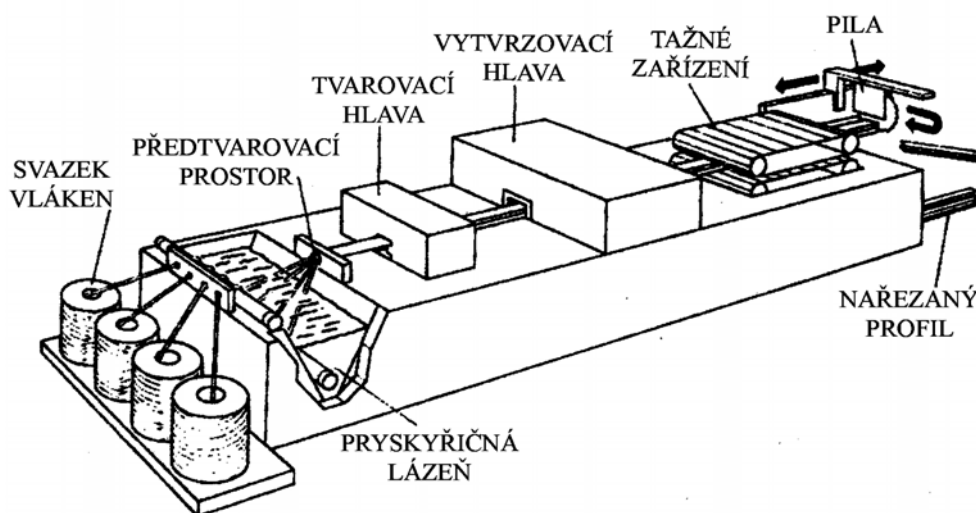
5 – topné těleso

6 – násypka

Vstřikováním se vyrábí přístrojové desky a nárazníky osobních automobilů, nádoby kuchyňských robotů, pouzdra vysavačů, skříně televizorů, přepravky na zeleninu, kbelíky atd. Výhodou vstřikovacího procesu je jeho plná automatická, značné využití zpracovávaného materiálu (téměř 100%). Mezi nevýhody jednoznačně patří vysoká cena strojního zařízení a formy. Dále zhoršené podmínky pro odvod tepla a složitá technologie výroby formy. Vstřikování je proto vhodné pro velkosériovou a hromadnou výrobu. [8]

3.3 Pultruze

Výrobní postup pultruze spočívá v tažení svazku vláken, rohoží a tkanin s předepsaným předpětím pryskyřičnou lázní, kde dojde k prosycení vláken pryskyřicí. Po prosycení putuje výztuž do předtvarovacího prostoru. Za předtvarovacím prostorem jsou tvarovací a vytvrzovací hlavy, které určí polotovaru žádaný tvar. Za nimi je tažné zařízení. Tažné zařízení je nositelem pohybu celé linky. Na konci linky je pila, která řeže profil na požadovanou délku (viz obr.4.).



Obr. 4. Pultruzní linka

Pultruzí se vyrábí vláknové kompozity. Mezi hlavní výhody pultruze patří v podstatě neomezené možnosti tvarů průřezů, vysoká produktivita a stupeň automatizace. Nevýhodami jsou velké pořizovací náklady, drahý provoz, nutnost velmi kvalitního řídicího systému. [11]

4 ZKOUŠENÍ PLASTŮ A KOMPOZITŮ

Mezi základní metody zkoušení materiálů patří: [2]

- a) Chemické zkoušky - zahrnují metody stanovení chemického složení materiálu často bez jeho porušení (polarografie, fotometrie, spektrální analýza, kvantometrie).
- b) Fyzikální zkoušky - jsou určeny ke zjišťování vlastností elektrických, magnetických, teplotní roztažnosti, tepelné vodivosti, měrné hmotnosti. Dále zde patří zkoumání krystalické stavby materiálu a studium poruchy krystalové mřížky.
- c) Fyzikálně-chemické zkoušky - jejich cílem je vyšetřování odolnosti materiálů vůči různým druhům agresivního prostředí (chemická a elektrochemická koroze).
- d) Hodnocení struktury - slouží ke studiu nedokonalosti struktury, vnitřní stavby materiálů a ke sledování strukturálních změn, které nastanou v důsledku mechanického, tepelného a chemicko-tepelného zpracování materiálu.
- e) Mechanické zkoušky - jsou to zkoušky určené ke zjištění mechanických vlastností materiálu, které nejvýrazněji charakterizují jeho odolnost vůči vnějšímu zatížení. Na základě výsledků zkoušek je dána záruka mechanických vlastností materiálu.
- f) Technologické zkoušky - udávají vhodnost zkoušeného materiálu pro mechanické, chemické nebo jiné zpracování (obrobitelnost, tvářitelnost, chemická aktivita).
- g) Defektoskopické zkoušky - nám poukazují na vnitřní a povrchové vady konstrukčních materiálů.

Mechanické zkoušky

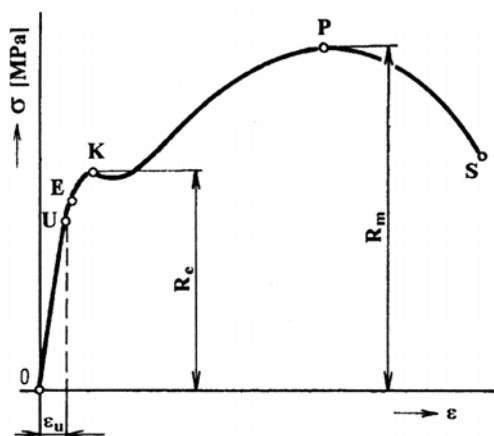
Pomocí mechanických zkoušek se zjišťují vlastnosti, která vyjadřují deformační chování materiálu a podmínky jeho porušení za působení vnějšího zatížení. Díky znalosti výsledků těchto zkoušek jsme schopni správně dimenzovat součásti. Podle způsobu působení vnějšího zatížení se mechanické zkoušky dělí na statické a dynamické. Při statických zkouškách zatěžující síla pomalu narůstá a doba působení zatížení je několik minut až několik dní (u dlouhodobých zkoušek). U dynamických zkoušek působí zatížení rázově po dobu zlomku sekundy nebo se cyklicky opakuje. Poněvadž je materiál u většiny zkoušek namáhán až do úplného porušení (přetržení, zlomení), zhotovují se proto zkušební tělesa.

Jejich tvar je normalizován. Zkoušky se provádějí na trhacích strojích, které jsou buď jednoúčelové nebo univerzální.

Podle způsobu působení zatěžující síly rozdělujeme statické zkoušky na zkoušky pevností v tahu, tlaku, ohybu, krutu a smyku. [2]

4.1 Zkouška tahem

Je to nejrozšířenější statická zkouška, která slouží k určení pevnosti materiálu. Uvažujeme, že napětí v tahu je rozloženo po celém průřezu zkušební tělesa rovnoměrně. Zkušební těleso zatěžujeme pozvolna narůstající silou ve směru jeho podélné osy, zatěžující síla způsobí deformaci a následné přetržení. Výsledkem tahové zkoušky je pracovní diagram (viz obr.5.), který vyjadřuje závislost velikosti napětí σ na poměrném prodloužení ε . [4]



Obr. 5. Pracovní diagram tahové zkoušky

- **U – mez úměrnosti** – do meze úměrnosti je napětí přímo úměrné deformaci, platí Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Tato oblast je v diagramu tvořena přímkou, kde je konstantou úměrnosti modul pružnosti E .

- **E – mez pružnosti** – stanovení hodnoty pro mez pružnosti je obtížné, proto se v praxi stanovuje smluvní hodnota napětí způsobující trvalou deformaci 0,1% původní délky
- **K – mez kluzu** – oblast, kdy napětí stoupá pomalu (nebo se jeho nárůst zastaví), zatímco prodloužení se stále zvětšuje.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

R_e ...napětí na mezi kluzu [MPa]

F_e ...síla na mezi kluzu [N]

S_0 ...původní průřez zkušebního tělesa [mm^2]

- **P – mez pevnosti** – maximální napětí, které snesl zkušební vzorek.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

R_m ...napětí na mezi pevnosti [MPa]

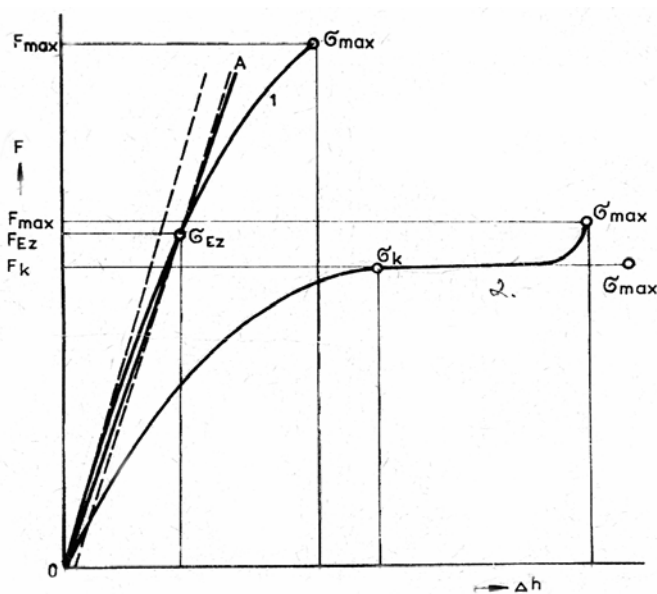
F_{\max} ...síla na mezi pevnosti [N]

S_0 ...původní průřez zkušebního tělesa [mm^2]

- **S** – bod, kdy došlo k přetržení součásti.

4.2 Zkouška tlakem

Pro tlakové zkoušky platí tytéž zákonitosti jako pro tahové zkoušky, změněn je pouze směr působící síly, která způsobí porušení průřezu zkušebního tělesa. Výsledky tlakových zkoušek jsou převážně zobrazovány tlakovými křivkami zatížení F - deformace Δh . Průběh tlakových křivek pro křehké plasty se liší od průběhu tlakových křivek pro houževnaté plasty (viz obr.6.).



Obr. 6. Tlakové křivky

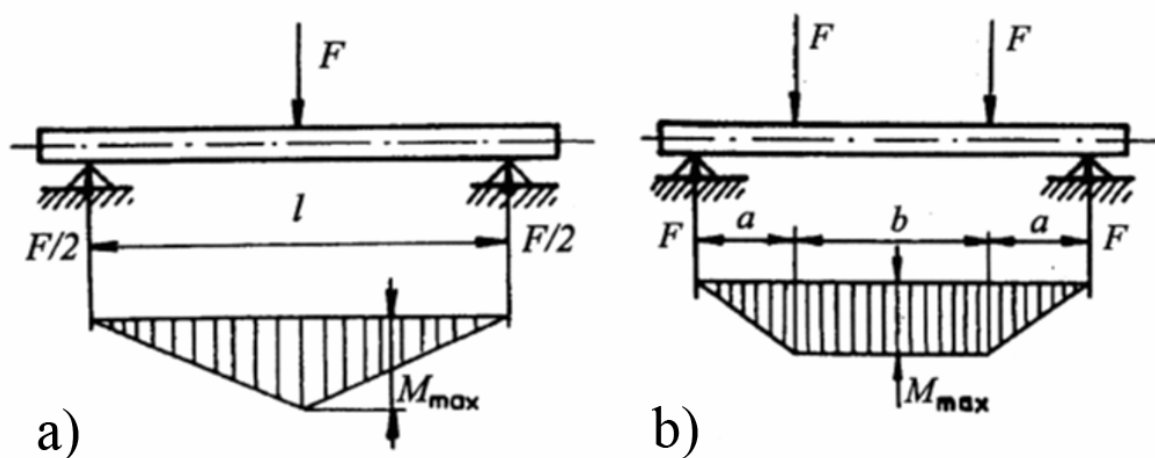
1 – křivka deformace křehkých plastů

2 - křivka deformace houževnatých plastů

U křehkých plastů probíhá deformace podle křivky 1. Napětí v tlaku stoupá celkem rovnoměrně až do meze pevnosti σ_{max} , která je i destrukční mezí. Překročí-li napětí mez pevnosti, dojde k roztržení nebo pomalejšímu rozdrčení materiálu. Křivka 2 znázorňuje průběh stlačování houževnatých plastů. Méně strmější začátek ukazuje na menší tuhost, po překročení určité hranice se zkušební těleso deformuje, aniž dochází k jeho viditelné destrukci. Tlakové vlastnosti jsou konstrukčně zajímavé až do meze kluzu σ_k , která se stanovuje smluvně. Pro výpočet pevnosti v tlaku se dosazuje maximální dosažená hodnota tlakového napětí. [7]

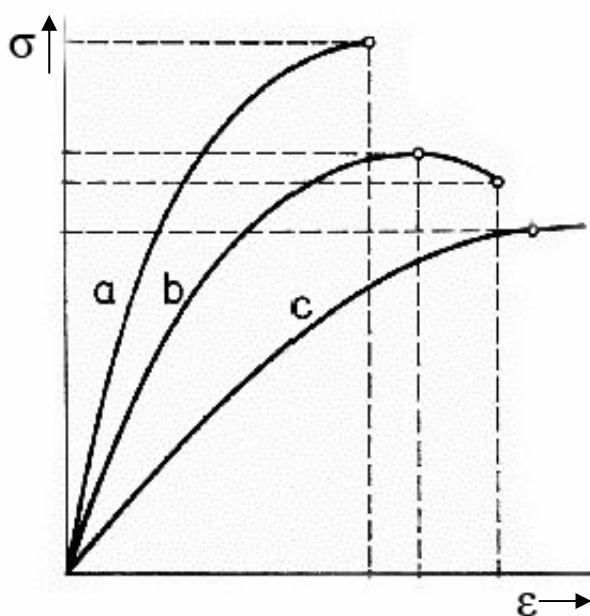
4.3 Zkouška ohybem

Podstatou ohybové zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa volně uloženého na dvou podpěrách. V případě zkoušky tříbodovým ohybem působí zatěžující síla uprostřed mezi podpěrami (obr.7a). U zkoušky čtyřbodovým ohybem (obr.7b) působí dvě stejné síly mezi podpěrami a jejich působiště jsou od podpěr stejně vzdálená o hodnotu a .



Obr. 7. Zkouška tříbodovým a čtyřbodovým ohybem

Ohybová zkouška umožňuje stanovit modul pružnosti E u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek. Zkušební těleso z křehkého plastu praskne při určitém průhybu, kdežto zkušební těleso z houževnatého plastu nepraskne vůbec. Při ohybové zkoušce se jedná vlastně o namáhání tahem a tlakem současně. V horních vrstvách je napětí tlakové, které se směrem k neutrální ose zmenšuje a přes nulové se mění na tahové napětí v dolní polovině. Výsledkem zkoušky jsou ohybové křivky napětí σ – deformace ε (obr.8.), ze kterých se určí všechny charakteristické hodnoty. [4]



Obr. 8. Ohybové křivky

a - plasty lámající se před mezí kluzu

b - plasty se zlomí před dosažením smluvního průhybu tj. 1,5 násobku tloušťky tělesa

c - plasty bez meze kluzu

Ohybové napětí pro tříbodový ohyb se určí z rovnice:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{\frac{F \cdot l}{4}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

M_o ... ohybový moment [Nmm] W_o ... modul průřezu v ohybu [mm^3]

F ... zatěžující síla [N] l ... vzdálenost podpěr [mm]

b ... šířka součásti [mm] h ... výška součásti [mm]

Průhyb y se vypočítá dle ČSN EN ISO 178: [16]

$$y = \frac{\varepsilon \cdot l^2}{6 \cdot h} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

l ... vzdálenost podpěr [mm] h ... výška součásti [mm] ε ... deformace [-]

Modul pružnosti E se vypočítá dle ČSN EN ISO 178: [16]

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

σ_1 ... napětí stanovené při průhybu y_1 [MPa]

σ_2 ... napětí stanovené při průhybu y_2 [MPa]

Ohybové napětí pro čtyřbodový ohyb se určí z rovnice:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F \cdot a}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

M_o ... max. ohybový moment [Nmm] W_o ... modul průřezu v ohybu [mm^3]

F ... zatěžující síla [N] l ... vzdálenost podpěr [mm]

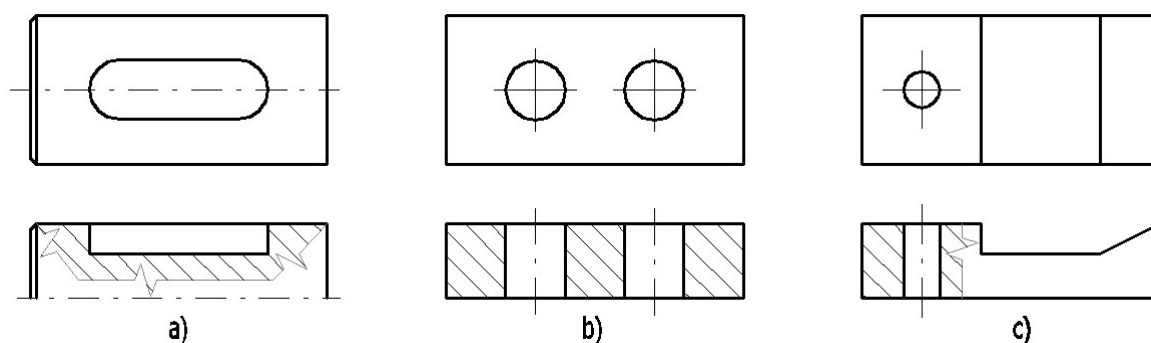
b ... šířka součásti [mm] h ... výška součásti [mm]

a ... vzdálenost působíště síly od podpěry [mm]

Zkouška čtyřbodovým ohybem se používá pro stanovení ohybových vlastností u vzorků malých rozměrů.

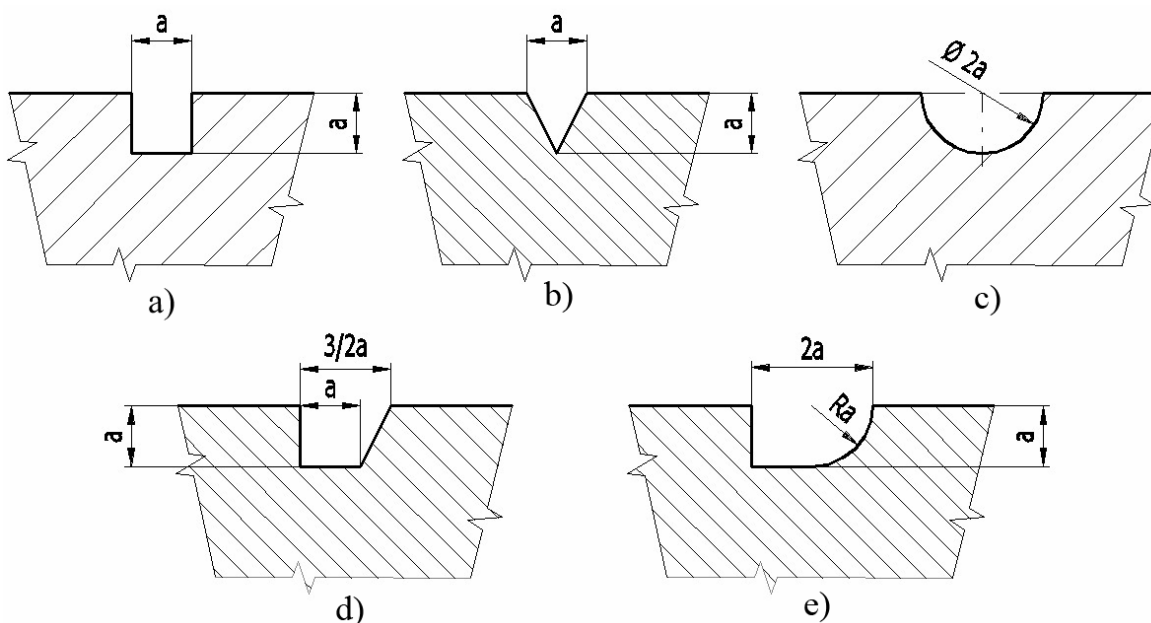
5 TVARY VRUBŮ

Všechna místa, která mají vliv na rozložení napětí v průřezu, se nazývají vruby. Vruby dělíme na konstrukční (obr.9.) a technologické. Konstrukční vruby jsou otvory, drážky, zápichy, náhlé změny průřezu provedené na součásti z funkčních důvodů. Mezi technologické vruby řadíme všechny nedokonalosti materiálu, které mají vliv na rozložení napětí (koroze, struska ve svárech, vady vzniklé při povrchových úpravách). Praxe prokázala, že při cyklickém namáhání vzniká většina lomů právě v místech vrubů. [10]



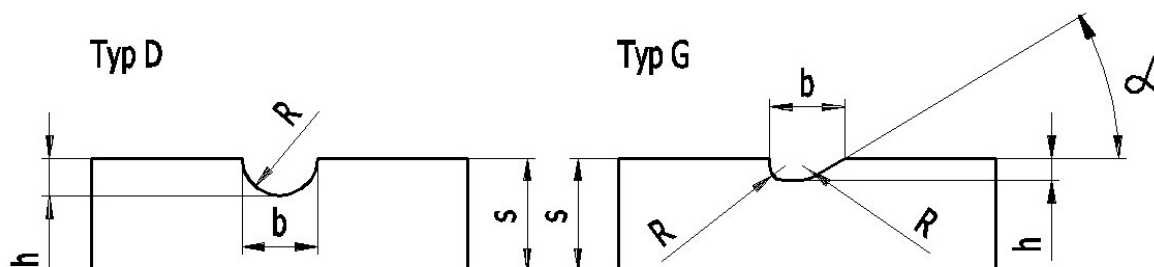
Obr. 9. Konstrukční vruby

Vzhledem k tomu, že existuje nekonečné množství variací tvarů vrubů, se vychází nejčastěji při zkoumání jejich vlivu na pevnost plastů a kompozitů z vrubů utvořených ze základních geometrických útvarů (krychle, trojúhelník, koule) a jejich kombinací (obr.10.).



Obr. 10. Vraby tvořené ze základních geometrických útvarů a jejich kombinace

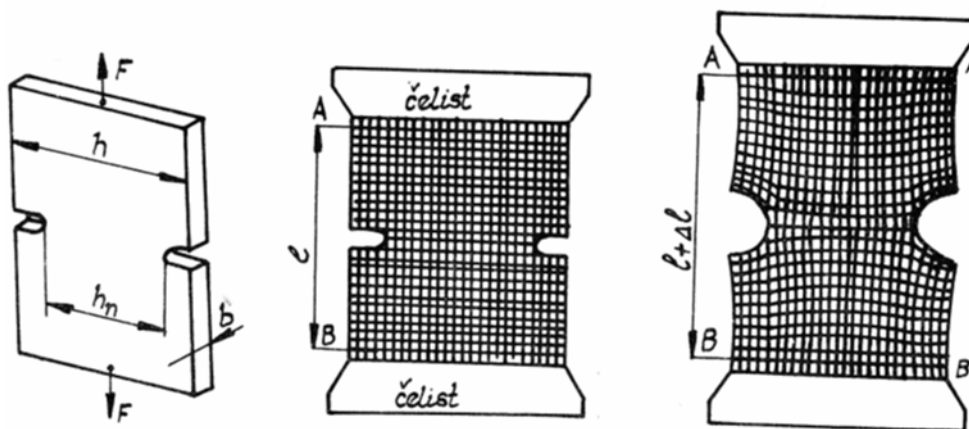
Naměřené výsledky je možno porovnat s normalizovanými vruby, jejichž tvar je přesně stanoven dle příslušné ČSN 01 4960, jako jsou zápichy typu D a G nebo vruby normalizovanými pro zkoušku vrubové houževnatosti plastů. [1]



Obr. 11. Zápich typu D a G

Vruby mají dvojí účinek na napjatost: [10]

- vrub vyvolává ve svém okolí nerovnoměrné rozložení napětí
- vrub způsobuje změnu stavu napjatosti. Jednoosou napjatost mění na víceosou, která se projeví při zatěžování jak v pružném, tak v plastickém stavu.



Obr. 12. Vliv vrubu na napjatost

Z obr.12. je zcela jasně patrné, že v místě vrubu dochází k akumulaci napětí, které vyvolá poměrně značnou deformaci a porušení materiálu. Bude tedy jistě zajímavé sledovat, jaký bude vliv tvarů vybraných vrubů na deformaci a s ní související pevnost vybraných materiálů. Experimentální zkoušky budou provedeny ohybovou zkouškou na trhacím přístroji Zwick 145 665 v laboratořích UTB.

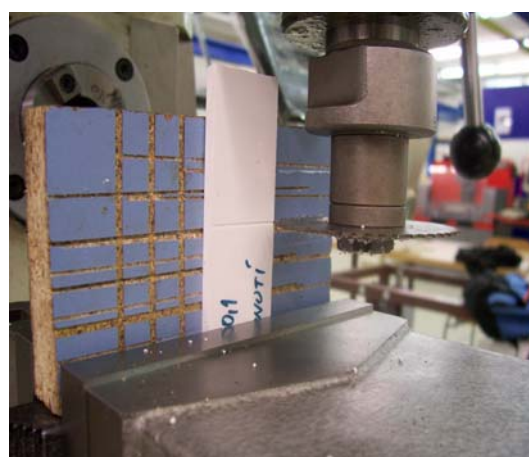
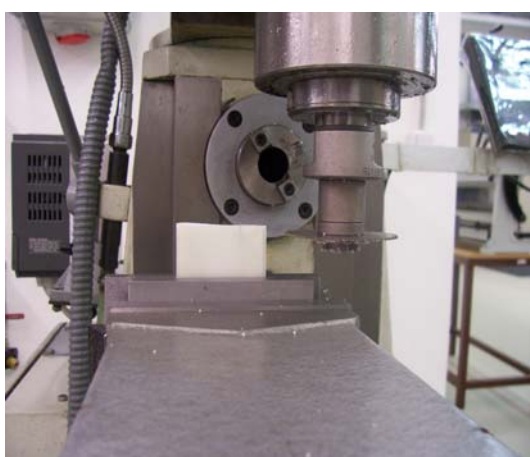
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VÝROBA VZORKŮ

Jako výchozí materiál jsem použila polyesterové a polystyrenové tabule o různých tloušťkách (1-5mm), polypropylenové destičky o rozměru 50x50mm a již nařezané kompozitní pruty na délku 80mm. Tabule byly nejprve nařezány na pásové pile na menší části (obr.13.). Polyesterové a polystyrenové vzorky z tabulí o tloušťce 1mm byly nastříhány na pákových nůžkách. Pro úpravu vzorků na šířku 10mm a jejich následné opatření vrubem, jsem jako nejdostupnější řešení zvolila frézování (obr.14.).



Obr. 13. Dělení materiálu



Obr. 14. Frézování vrubů

6.1 Použitá strojní zařízení a volba tvaru vrubu

K výrobě vzorků bylo využito strojního zařízení umístěného v laboratořích ÚVI. Pro měření rozměrů bylo použito posuvné měřidlo s přesností 0,01mm.

Pásová pila Zeveta PP320

Technické údaje:

- průměr kol	320mm
- výška řezu	230mm
- rozměr stolu	560x560mm
- příkon motoru	1,1kW

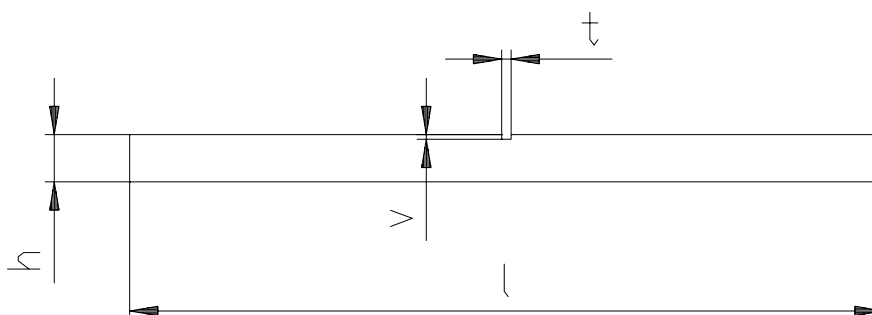
Pákové nůžky

Univerzální frézka FHV-50PD

Technické údaje:

- otáčky vertikálního vřetene	115 - 1750ot/min
- pracovní zdvih v ose Z	380mm
- rozsah rychlosti posuvu	18 - 300mm/min
- kužel vřetene	Mk IV

Pro výrobu vzorků byla použita kotoučová fréza o průměru 63mm a šířce 1mm. Otáčky nastaveny na 150ot/min. Vzhledem k záměru vyhodnotit vliv vrubu na více druhů materiálů, jsem zvolila pouze jeden typ vrubu a to ve tvaru pravoúhlé drážky (obr.15.).



Obr. 15. Zkušební tělísko

6.2 Přehled připravených zkušebních vzorků

Rozměr vzorků l x b [mm]	Tloušťka materiálu h [mm]	Hloubka vrubu - v [mm]				
		bez vrubu	0,1	0,2	0,3	0,5
AXPET						
70 x 10	1	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	
80x10	3	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks
	4	6 ks*	6 ks	6 ks	6 ks*	6 ks*
	5	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks
HPS						
70x10	1	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	
100x10	3	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks
90x10	4	6 ks*	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks*
	5	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks
30% PP (L)						
50x10	2	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	
	3	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks
30% PP (T)						
50x10	2	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	
	3	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks	6 ks
0% PP						
50x10	2	6ks	6ks	6ks	6ks	
Kompozit s dlouhými vlákny						
80x10	3	5ks				

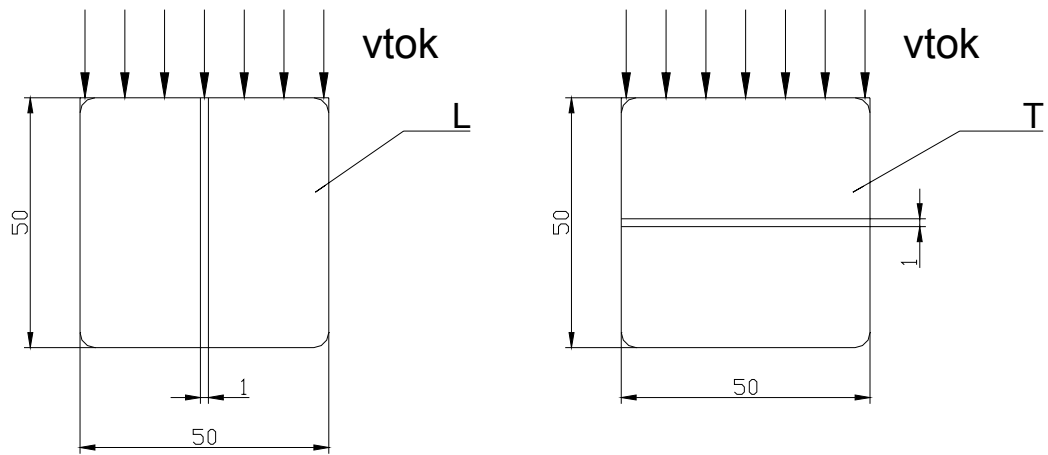
Tab. 3. Přehled připravených zkušebních vzorků

U označených vzorků (*) došlo ke ztrátě naměřených dat.

6.3 Konstrukční umístění vrubů

Polyesterové a polystyrenové tabule byly zřejmě vyrobeny vytlačováním nebo válcováním, proto jsem neuvažovala o směru, ve kterém frézovat vrub. Také u neplněného polypropylenu jsem ke směru toku nepřihlížela. Avšak o destičkách z plněného polypropylenu jsem věděla, že jsou vyrobeny vstřikováním. Na základě poznatku, že směr krátkých vláken v polymerní matici má vliv na fyzikální vlastnosti (viz kap. 2.1), jsem se rozhodla frézovat vrub jak ve směru toku taveniny (L), tak kolmo na směr vstřikování (T)

(obr.16.). Z důvodu malého množství vzorků kompozitu s dlouhými vlákny jsem zkoušela pouze základní materiál – bez vrubu.



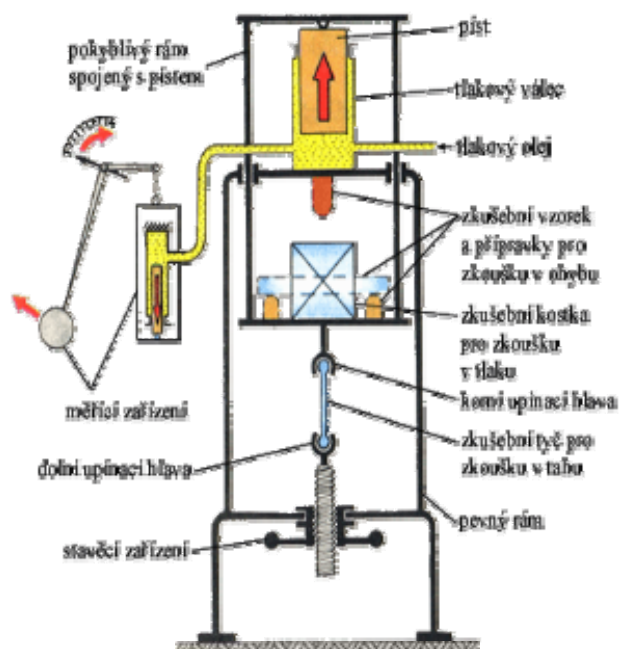
Obr. 16. Konstrukční umístění vrubů

7 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Pro účely této bakalářské práce jsem použila na měření zkušební stroj Zwick 145 665 nacházející se v laboratořích ÚVI. Jde o klasický trhací přístroj pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky. Přístroj je vybaven počítačem se softwarem TestXpert v7.11, který vyhodnocuje naměřené hodnoty pro danou kategorii zkoušek: tah - tlak, ohyb a cyklické namáhání. Naměřené a výsledné hodnoty jsou zobrazeny jak v tabulce, tak i v grafu, zaznamenávajícím průběh zkoušky. Zadané parametry lze i po zkoušce měnit a opětovně vyhodnocovat.

Technická specifikace přístroje:

- maximální zkušební síla	20kN
- strojová výška	1284mm
- celková výška	2012mm
- celková šířka	630mm
- šířka pracovního prostoru	420mm
- hmotnost	150kg



Obr. 17. Zkušební stroj Zwick 145 665

Pro vlastní experiment jsem vycházela z platné normy **ČSN EN ISO 178: Plasty - Stanovení ohybových vlastností**

Tato norma uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností plastů za definovaných podmínek. Definiuje standardní zkušební těleso, ale tam kde je to vhodné, lze volit alternativní rozměry těles. Udává řadu hodnot rychlostí zkoušky. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí (tříbodový ohyb) . Viz kap. 4.3 – obr.7.

Metoda je vhodná pro následující materiály:

- vstříkované a vytlačované termoplasty
- lisovací reaktoplasty
- vlákny vyztužené reaktoplastové a termoplastové kompozity

Podpěry a zatěžovací trn

Poloměr trnu (R_1) a poloměr podpěr (R_2) dle normy jsou:

$$R_1 = 5\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$$

$$R_2 = 2\text{mm} \pm 0,1\text{mm} \text{ pro tloušťky tělesa} \leq 3\text{mm}$$

$$R_2 = 5\text{mm} \pm 0,1\text{mm} \text{ pro tloušťky tělesa} > 3\text{mm}$$

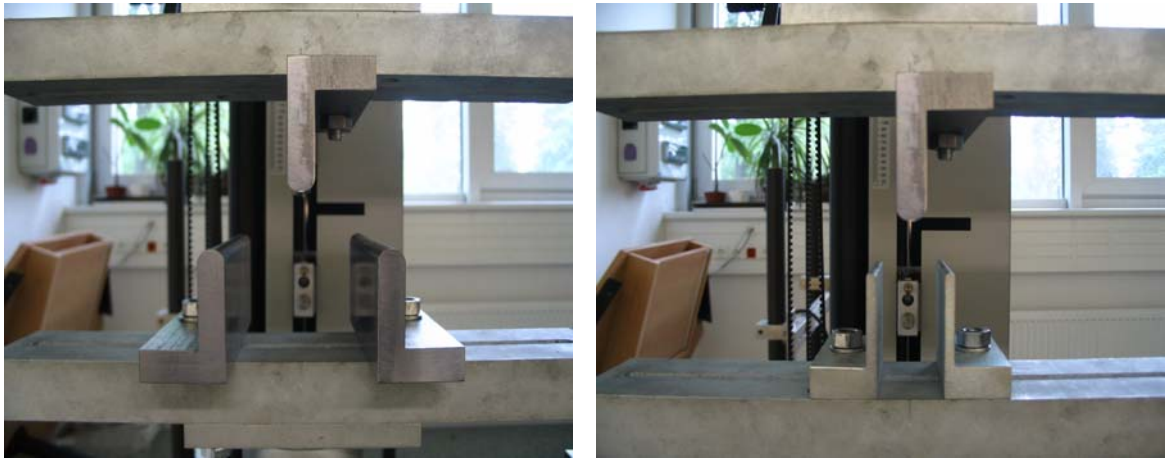
Uvedené hodnoty R_1 a R_2 byly v našem případě dodrženy.

Rozpětí podpěr L má být nastaveno tak, aby vyhovovalo následujícímu vztahu (s přesností 0,5 %):

$$L = (16 \pm 1)h \quad ,\text{pak}$$

- pro $h = 1\text{mm}$: $L = 15 \div 17\text{mm}$ vzdálenost podpěr zvolena 30mm
- pro $h = 2\text{mm}$: $L = 30 \div 34\text{mm}$ vzdálenost podpěr zvolena 32mm
- pro $h = 3\text{mm}$: $L = 45 \div 51\text{mm}$ ponechána vzdálenost podpěr 32mm
- pro $h = 4\text{mm}$: $L = 60 \div 68\text{mm}$ vzdálenost podpěr zvolena 64mm
- pro $h = 5\text{mm}$: $L = 75 \div 85\text{mm}$ ponechána vzdálenost podpěr 64mm

Vzdálenosti podpěr jsem nemohla v některých případech dle stanoveného vztahu dodržet, z důvodu malé délky vzorku.

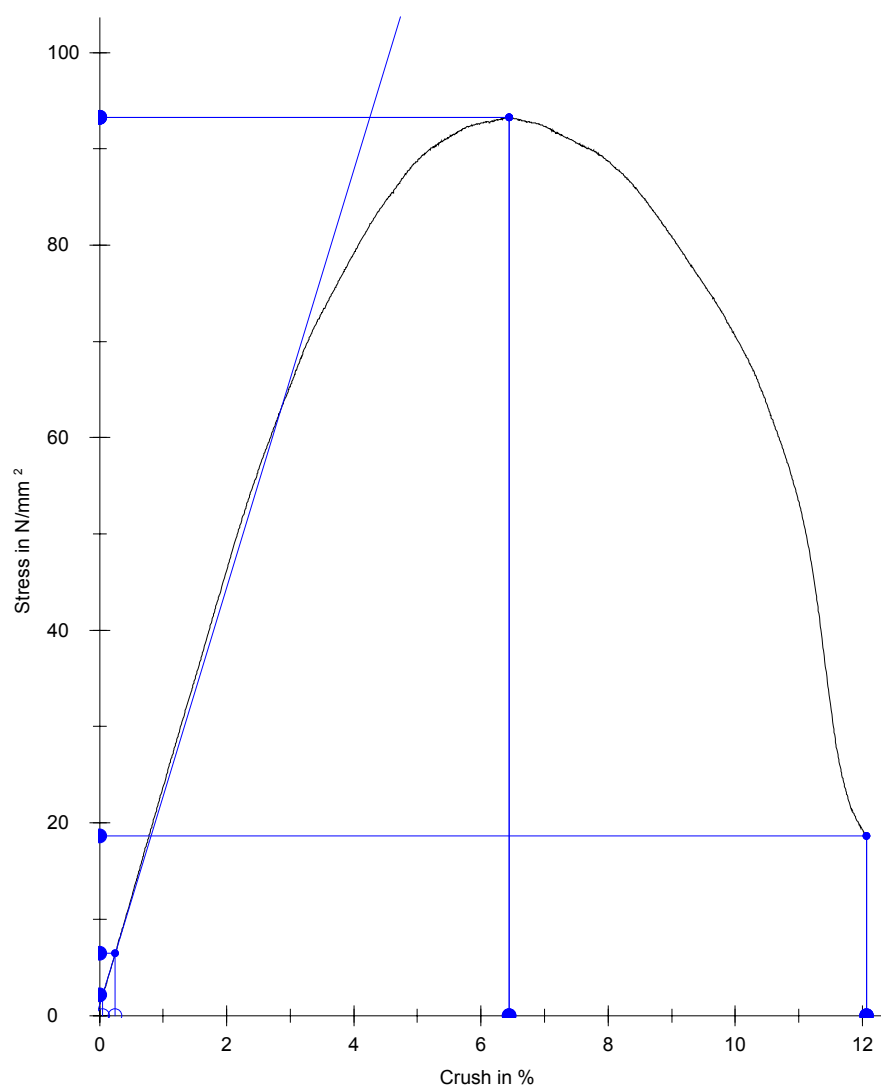


Obr. 18. Vzdálenosti a poloměry podpěr

Rychlost zkoušky se nastaví dle zkoušeného materiálu. Nejčastěji je volena hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1% za minutu. Rychlost zkoušky jsem v programu TestXpert nastavila na 10mm/min pro všechny druhy vzorků.

8 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

Z tab.3. je zřejmé, že zkoušky byly prováděny na velkém množství vzorků (cca 365ks) a proto v další části jako příklad vyhodnocování uvádím graf (obr.19.) a tabulku (tab.4.) s naměřenými hodnotami pro vzorek materiálu AXPET: $h = 4\text{mm}$ a $v = 0,1\text{mm}$.



Obr. 19. Diagram ohybové zkoušky pro AXPET, $h=4\text{mm}$, $v=0,1\text{mm}$

Výsledkem zkoušky je ohybová křivka napětí (Stress) - poměrná deformace (Crush), ze kterých se vyhodnocují všechny potřebné charakteristické hodnoty (napětí, průhyby, deformace). Každému bodu – hodnotě v grafu odpovídá daná hodnota deformace.

V Příloze č.1 na přiloženém CD jsou pak uvedeny diagramy s výslednými průměrnými křivkami pro všechna měření.

Sub-series #2	a0	b0	Rm	ϵ FMax	RB	ϵ Break	ϵ Break	ϵ Fmax.	E	F-E1	F-E2
n = 6	mm	mm	N/mm ²	%	N/mm ²	%	mm	mm	N/mm ²	N	N
x	3,977	10,1	95,22	6,47	24,36	15,13	26,01	11,10	2264,00	3,70	11,23
s	0,005164	0,09649	3,40	0,12	5,16	2,89	4,99	0,19	110,43	0,15	0,49
v	0,13	0,96	3,57	1,78	21,19	19,07	19,19	1,75	4,88	4,12	4,33
P($\mu \leq$) = 0,95	3,982	10,2	98,79	6,59	37,18	22,30	38,40	11,30	2379,86	3,86	11,74
P($\leq \mu$) = 0,95	3,971	9,994	91,66	6,35	11,55	7,97	13,62	10,90	2148,14	3,54	10,72

Tab. 4. Statistické hodnoty pro AXPET, h=4mm, v=0,1mm

V tabulce značí:

a0	tloušťka materiálu [mm]	E	modul pružnosti [MPa]
b0	šířka materiálu [mm]	x	průměr
Rm	napětí na mezi pevnosti [MPa]	s	směrodatná odchylka
ϵ F Max	poměrná deformace [%]	v	variační koeficient
ϵ Break	poměrná deformace při přelomení [%]		
ϵ Fmax	průhyb [mm]		

Naměřené hodnoty pevnosti v MPa

Naměřené hodnoty pevností pro všechny experimentálně vyšetřované vzorky (viz Příloha č.2 na příloženém CD) jsou souhrnně zpracovány do tab.5.

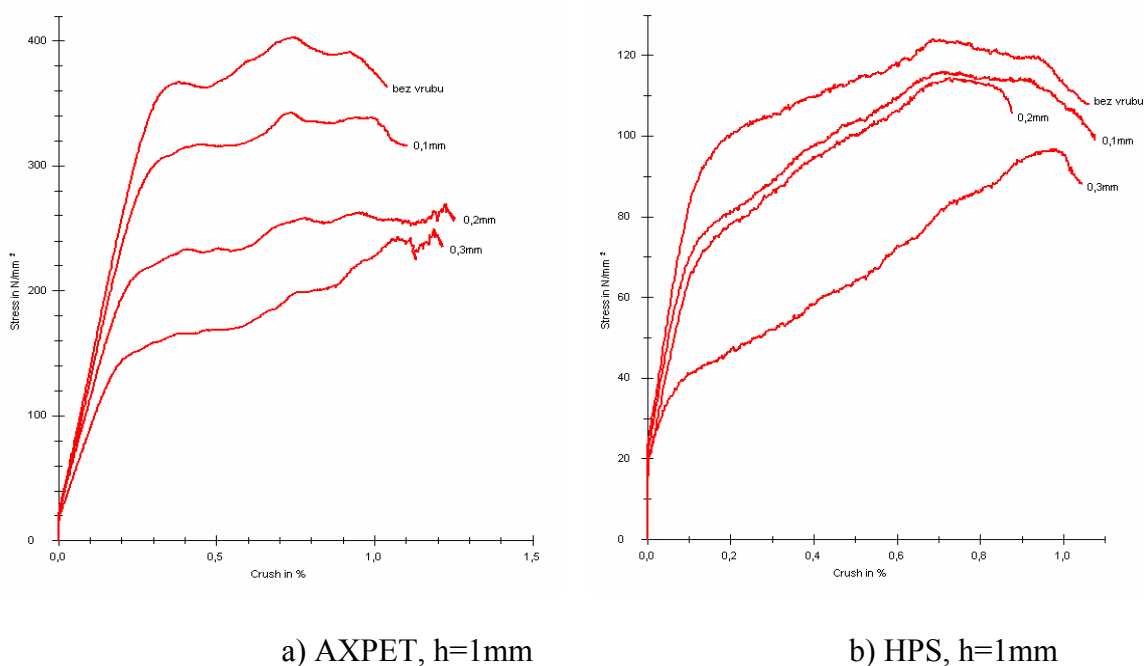
Tloušťka materiálu t [mm]	Hloubka vrubu – v [mm]				
	bez vrubu	0,1	0,2	0,3	0,5
AXPET					
1	403,90±5,73	345,01±7,56	271,32±6,32	249,88±15,13	
3	121,88±0,99	118,58±1,35	114,44±2,34	108,46±3,93	101,04±2,82
4		96,36±2,18	92,19±2,39		
5	108,97±0,61	102,08±0,43	100,62±1,12	98,97±1,05	96,15±0,47
HPS					
1	125,01±3,19	116,86±3,73	116,83±2,12	100,07±4,33	
3	53,78±0,76	51,81±0,46	21,10±0,28	18,95±0,67	17,68±0,29
4		33,47±0,26	33,08±0,31	31,28±0,15	
5	13,62±0,19	13,29±0,19	12,91±0,24	12,31±0,20	11,24±0,28
30% PP (L)					
2	128,70±1,89	106,06±2,72	99,84±1,66	94,05±2,09	
3	136,59±1,50	125,44±1,63	113,90±2,42	97,48±4,43	92,14±4,42
30% PP (T)					

2	157,82±9,55	131,70±3,32	118,81±1,72	101,81±1,33	
3	151,80±3,08	146,21±4,77	128,42±3,77	119,19±5,50	104,31±3,20
0% PP					
2	107,31±2,82	100,98±1,09	99,34±1,35	93,53±3,41	
Kompozit s dlouhými vlákny					
3	1965,71±41,13				

Tab. 5. Pevnosti vzorků

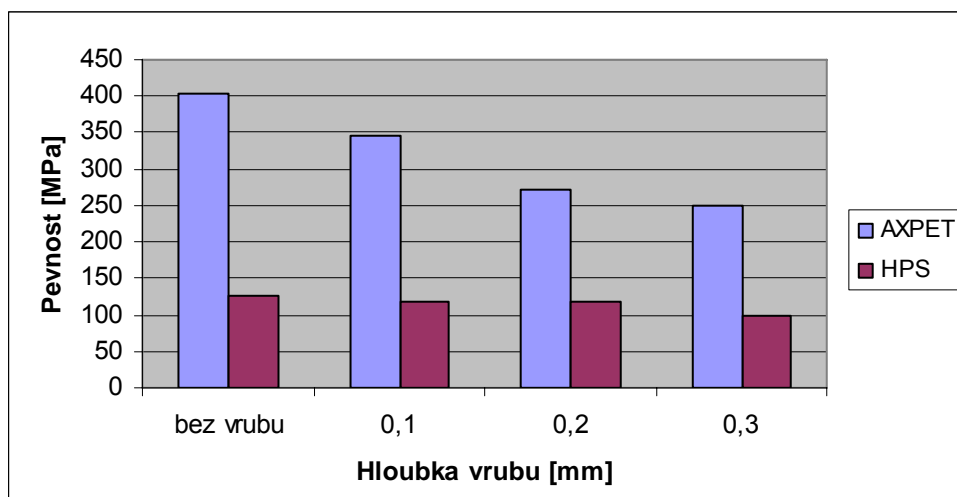
Porovnání materiálů AXPET a HPS, h = 1mm

Na následujících grafech je zobrazen průběh ohybové zkoušky pro vzorky z materiálu AXPET a HPS tloušťky 1mm opatřených různou hloubkou vrubu (obr.20.). Pro tyto vzorky je provedeno grafické porovnání dosažených pevností (obr.21.).



Obr. 20. Průměrné ohybové křivky

Z tab.5. a následujících grafů jasně vidíme pevnostní rozdíly uvedených dvou materiálů. Přestože ani jeden ze vzorků HPS nepraskl (ukázaly tím svou houževnatost), dosahovaly nízkých hodnot na mezi pevnosti (cca 100-125MPa) vzhledem k naměřeným hodnotám u AXPETu (cca 250-400MPa). Po ukončení zatěžování se vracely do původní polohy.

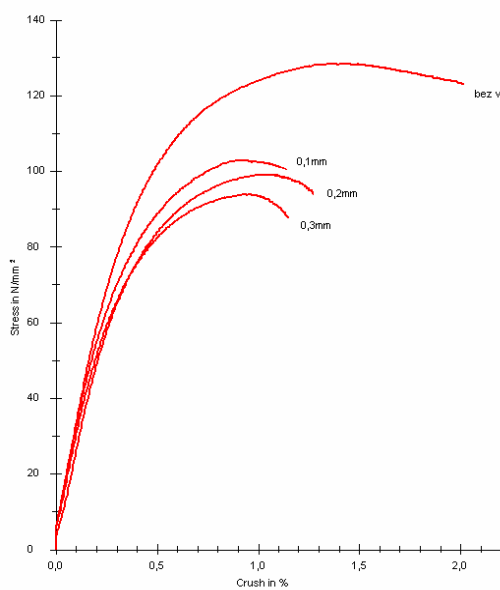


Obr. 21. Grafické porovnání dosažených pevností

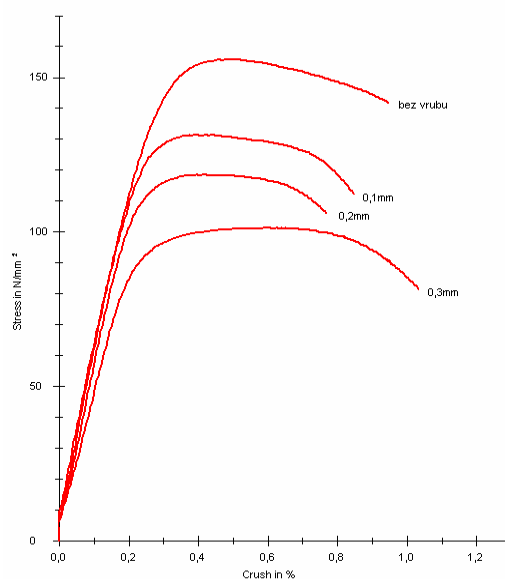
U vzorků z AXPETu však sledujeme větší rozdíly pevnosti v závislosti na hloubce vrubu. Z toho můžeme usoudit, že HPS má menší citlivost na přítomnost vrubu.

Porovnání kompozitů 30% PP L+T a 0% PP, h = 2mm

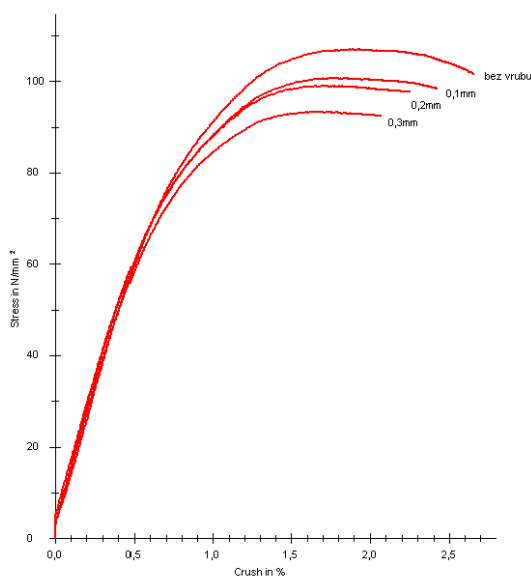
Jako další uvádím porovnání vzorků z plněného a neplněného polypropylenu tloušťky 2mm.



a) 30% PP (L)

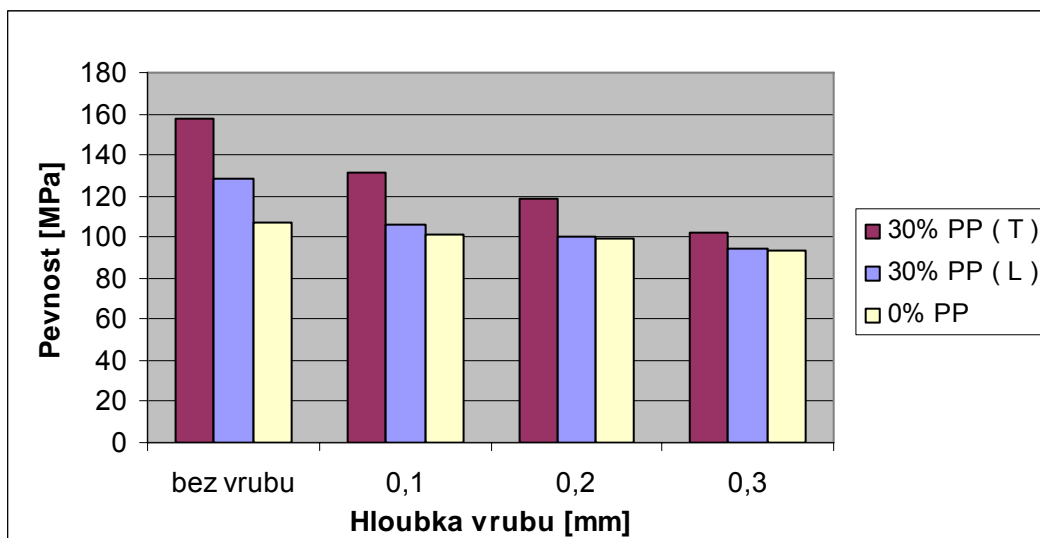


b) 30% PP (T)



c) 0% PP

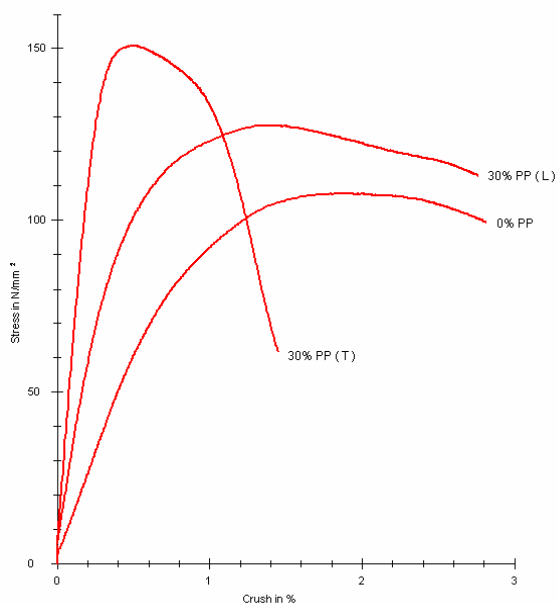
Obr. 22. Průměrné ohybové křivky



Obr. 23. Grafické porovnání dosažených pevností

Z ohybových křivek (obr.22.a,b) můžeme u plněného kompozitu sledovat výrazný pokles pevnosti při porušení povrchové vrstvy vzorků vrubem $v = 0,1\text{mm}$. Rozdíl u 30% PP (L) činí 22MPa, u 30% PP (T) je to 26MPa. Poklesy pevnosti mezi ostatními hloubkami vrubů u plněného kompozitu již nejsou zdaleka tak zřetelné. Z obr.24. vyniká pevnostní rozdíl mezi vzorky ze 30% PP nařezanými v příčném směru na tok taveniny a nařezanými ve směru podélném. Směr T má o 29MPa vyšší hodnotu než směr L. Neplněný PP sice vykazuje ve všech případech nejnižší pevnost (jeho nejvyšší hodnota 107MPa pro vzorek

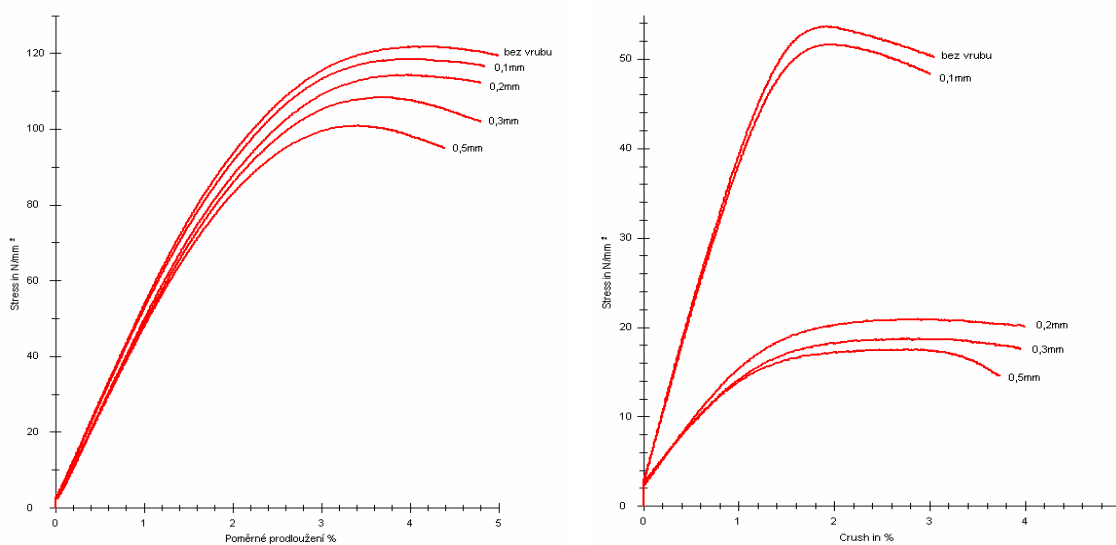
bez vrubu je téměř shodná s hodnotou 101MPa pro vzorek z 30% PP (T) s $v = 0,5\text{mm}$, ale při hloubkách vrubů 0,2 a 0,3mm můžeme sledovat přiblížení se naměřených hodnot s 30%PP (L).



Obr. 24. Porovnání průměrných ohybových křivek kompozitů bez vrubu

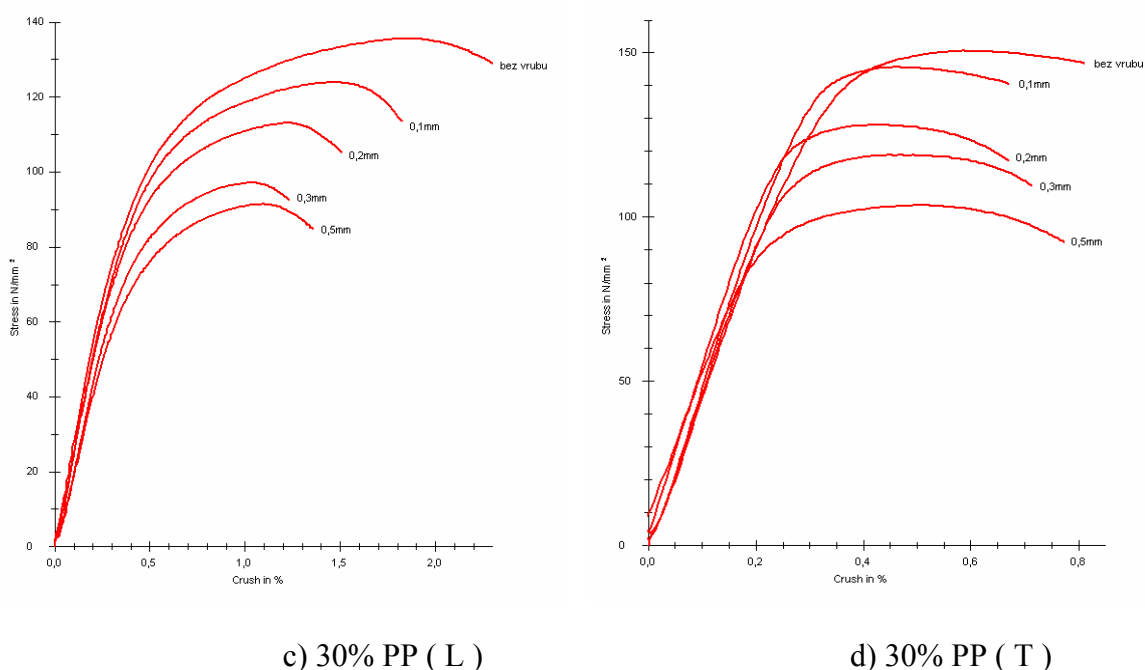
Porovnání materiálů AXPET, HPS a 30% PP L+T, h = 3mm

Provedla jsem také porovnání plastů (AXPET, HPS) a kompozitů (30% PP L+T) pro tloušťku 3mm dohromady.

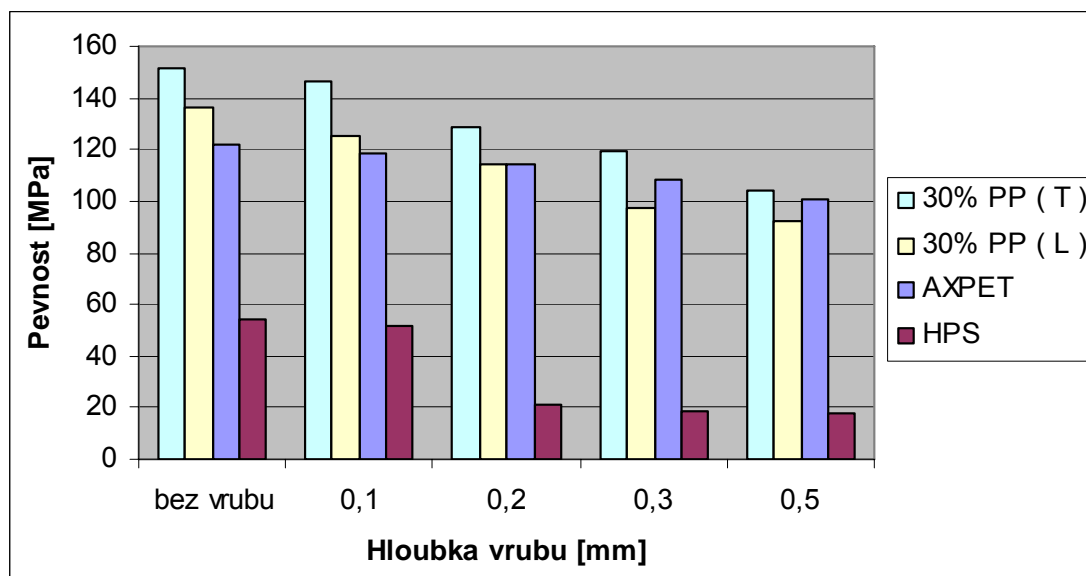


a) AXPET

b) HPS



Obr. 25. Průměrné ohybové křivky

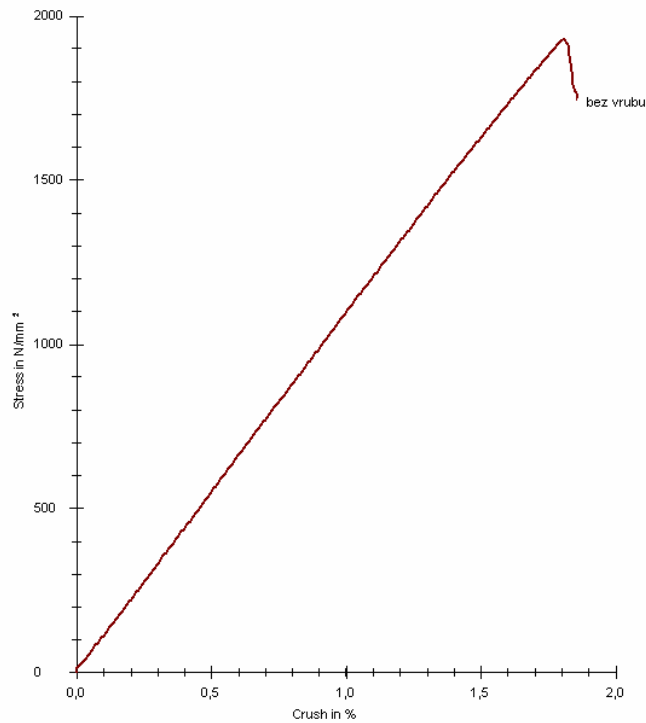


Obr. 26. Porovnání plastů a kompozitů

Uvedené obr. 25.-26. dokumentují prakticky shodné rozložení pevností všech zkoušených materiálů s ohledem na velikost vrubu. Pouze u vzorků z HPS je viditelný rozdíl pevností mezi vzorkem s $v = 0,1\text{mm}$ a ostatními a to o 30MPa. U hloubky vrubu 0,2mm začínají zkušební tělíska z AXPETu vykazovat vyšší hodnoty v pevnosti než 30% PP (L) a pro hloubku vrubu 0,5mm se dokonce přibližují pevnosti 30% PP (T) o cca 3MPa. Trvale nejnižší hodnoty vykazuje HPS bez ohledu na hloubku vrubu.

Kompozit plněný dlouhými vlákny

Jako poslední zkoušený materiál uvádím kompozit vyztužený dlouhými skleněnými vlákny ve směru své podélné osy. Vzorky o tloušťce $h = 3\text{mm}$ byly bez vrubu.



Obr. 27. Průměrná ohybová křivka

Tento materiál se jednoznačně prokázal nejvyšší pevností (cca 1965MPa). Těchto hodnot mohl dosáhnout díky skleněným vláknům, které tvoří v kompozitech součást nosoucí zatížení a dodávají kompozitu tuhost a pevnost. Mechanické vlastnosti jednosměrně vyztuženého plastu jsou ve směru vláken dány v podstatě pouze vlastnostmi vláken. Viz kap. 2.2.

9 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zkoumat vliv tvaru vrubu na pevnost plastů a kompozitů.

V první fázi experimentální části byly připraveny vzorky pro ohybovou zkoušku z následujících materiálů: termoplastický polyester AXPET, houževnatý polystyren HPS, polypropylen plněný 30% skelných vláken, čistý polypropylen PP a kompozit s dlouhými vlákny. Vzhledem k zadání bakalářské práce a velkému počtu zkoušených vzorků, jsem se při ohybové zkoušce zaměřila pouze na vyhodnocování naměřené pevnosti materiálů.

Nejvyšší pevnost v ohybu (cca 1965MPa) měl kompozit s dlouhými vlákny. Vzorky ze 30% plněného polypropylenu nařezané podélně se směrem toku taveniny (T) dosahovaly ve všech případech vyšších hodnot než vzorky nařezané příčně (L). Nejnižší hodnoty pevnosti vykazoval HPS. Tato zkouška potvrdila vliv vrubu na pevnost zkoušeného materiálu.

Na základě dílčích porovnání výsledků z kap.8 jsem dospěla k těmto závěrům:

- pevnost v ohybu má v závislosti na rostoucí hloubce vrubu klesající hodnotu
- kompozit vyztužený dlouhými vlákny má jednoznačně nejvyšší pevnostní hodnoty
- významně se projevil vliv orientace vláken při namáhání kompozitů
- zmenšování průřezu vrubem nevyvolává u HPS takové snížení pevnosti v ohybu jako u ostatních materiálů. Z toho lze usoudit, že má větší odolnost vůči vrubům

Závěrem lze konstatovat, že cíl bakalářské práce byl splněn v plném rozsahu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LEINVEBER, J. – ŘASA, J. – VÁVRA, P.: Strojnické tabulky, Praha: Scientia, spol. s.r.o. 1999. 985 s. ISBN 80-7183-764-6
- [2] LUKOVICS, I.: Konstrukční materiály a technologie, Brno: Učební texty VUT 1992. 273 s. ISBN 80-214-0399-3
- [3] LAPČÍK, L. – RAAB, M.: Nauka o materiálech II, Zlín: Učební texty UTB 2004.
- [4] RYBNÍKÁŘ, F. – DITRYCH, Z. – KLÁCEL, Z. – ORDELT, O.: Analýza a zkoušení plastických hmot, Praha SNTL 1965
- [5] ZÁMORSKÝ, Z.: Nauka o polymerech II, Brno: Učební texty VUT 1980. 235 s.
- [6] PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu II, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001. 392 s. ISBN 80-7204-238-3
- [7] SCHÄTZ, M. – VONDRÁČEK P.: Zkoušení polymerů, Praha: SNTL 1979
- [8] Termoplasty v praxi 1.0, Praha: Nakladatelství Verlag Dashöfer, s.r.o. 2001
- [9] MAŇAS, M. – HELŠTÝN, J.: Výrobní stroje a zařízení – Gumárenské a plastikářské stroje II, Brno: Učební texty VUT. 199 s. ISBN 80-214-0213-X
- [10] OLIVA, J.: Technická mechanika II – Pružnost a pevnost, Brno: Učební texty VUT 1978. 333 s.
- [11] JANČÁŘ, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, Brno: Učební texty VUT 2003
- [12] PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu I, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2
- [13] ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, Zlín: Učební texty UTB
- [14] Charakteristika materiálu AXPET, dostupný z [www](http://www.industry.net.cz/ArticleDetail.asp?nBranchID=0&nArtID=107&nPage=23):
- <<http://www.industry.net.cz/ArticleDetail.asp?nBranchID=0&nArtID=107&nPage=23>>
- [15] Tabulka vlastností materiálu AXPET, dostupný z [www](http://www.izosklo.cz/pdf/pl01/07.htm):
- <<http://www.izosklo.cz/pdf/pl01/07.htm>>

[16] Technická norma: Plasty-stanovení ohybových vlastností ČSN EN ISO 178

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ	Napětí na mezi úměrnosti	[MPa]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
R_e	Mez kluzu v tahu	[MPa]
F_e	Síla na mezi kluzu	[N]
S_0	Původní průřez zkušebního vzorku	[mm ²]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
F_{max}	Síla na mezi pevnosti	[N]
σ_o	Napětí v ohybu	[MPa]
M_o	Maximální ohybový moment	[Nmm]
W_o	Modul průřezu v ohybu	[mm ³]
F	Zatěžující síla	[N]
l	Vzdálenost podpor	[mm]
b	Šířka součásti	[mm]
h	Výška součásti	[mm]
y	Průhyb zkušebního tělesa	[mm]
$\Delta\sigma$	Rozdíl napětí při měření modulu pružnosti	[MPa]
$\Delta\varepsilon$	Rozdíl poměrného prodloužení při měření modulu pružnosti	[-]
σ_1	Napětí stanovené při průhybu y_1	[MPa]
σ_2	Napětí stanovené při průhybu y_2	[MPa]
a	Vzdálenost působíště síly od podpěry	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Orientace vláken v kompozitu</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2. Vytlačovací linka</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3. Plastikační jednotka</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4. Pultruzní linka</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 5. Pracovní diagram tahové zkoušky.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 6. Tlakové křivky.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7. Zkouška třibodovým a čtyřbodovým ohybem</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 8. Ohybové křivky.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9. Konstrukční vruby</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10. Vruby tvořené ze základních geometrických útvarů a jejich kombinace</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 11. Zápich typu D a G</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12. Vliv vrubu na napjatost</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13. Dělení materiálu.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14. Frézování vrubů</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 15. Zkušební tělísko</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 16. Konstrukční umístění vrubů</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 17. Zkušební stroj Zwick 145 665.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 18. Vzdálenosti a poloměry podpěr.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 19. Diagram ohybové zkoušky pro AXPET, $h=4mm$, $v=0,1mm$.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 20. Průměrné ohybové křivky.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 21. Grafické porovnání dosažených pevností.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 22. Průměrné ohybové křivky.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 23. Grafické porovnání dosažených pevností.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 24. Porovnání průměrných ohybových křivek kompozitů bez vrubu.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 25. Průměrné ohybové křivky.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 26. Porovnání plastů a kompozitů.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 27. Průměrná ohybová křivka</i>	<i>43</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vlastnosti materiálu AXPET.....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 2. Vlastnosti materiálu HPS.....</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 3. Přehled připravených zkušebních vzorků.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4. Statistické hodnoty pro AXPET, $h=4mm$, $v=0,1mm$.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 5. Pevnosti vzorků.....</i>	<i>38</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Diagramy ohybových zkoušek

P II: Statistické hodnoty