

Bimodularita termoplastů a krátkovláknových kompozitů

Bimodularity of thermoplastics and short-fiber reinforced composites

Bc. Miroslav Mynarčík

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je seznámit se s kompozity - jejich druhy, složení, vlastnosti apod. Dále také s termoplasty jako je polypropylén (PP), polyamid (PA) apod., které se budou používat v praktické části diplomové práce, kde hlavním cílem je zkoumání jejich bimodularity, kterou rozumíme výrazně odlišné hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku. Měření bude probíhat na zařízení Zwick 1456.

Klíčová slova: Kompozit, termoplast, bimodularita, tah, tlak, ohyb

ABSTRACT

The purpose of the graduation thesis is to present composites - their types, their structure, nature, etc. Another purpose is the presentation of thermoplastics as polypropylene (PP), polyamid (PA) etc. which are going to be used in the practical part of the thesis in which the main purpose is the research of their bimodularity. Bimodularity means distinctively different values of elasticity module in tension and pressure. Measurements will be carried out on the equipment Zwick 1456.

Keywords: Composites, thermoplastic, bimodularity, tension, compression, flexion

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při tvorbě mé diplomové práce, vstřícné jednání, cenné rady a ochotu. Dále pak Ing. Vladimíru Šumberovi a Ing. Jiřímu Šálkovi za technickou asistenci.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ÚVOD DO STRUKTURY A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	13
1.1 STRUKTURA KOMPOZITŮ.....	15
1.1.1 Klasifikace kompozitů	15
1.1.2 Typy produktů vláken	17
1.1.3 Vlákná jako výztuž	20
1.1.4 Matrice	33
2 VYUŽITÍ KOMPOZITŮ.....	36
3 BIMODULARITA.....	41
3.1 ÚVOD.....	41
3.2 MECHANISMY PRO BIMODULÁRNÍ CHOVÁNÍ.....	42
3.3 MODUL PRUŽNOSTI V OHYBU BIMODULÁRNÍHO MATERIÁLU.....	43
4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	45
4.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	45
4.1.1 Tvar a rozměry.....	47
4.2 TLAKOVÁ ZKOUŠKA.....	48
4.2.1 Tvar a rozměry.....	49
4.3 OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	49
4.3.1 Tvar a rozměry.....	50
5 TERMOPLASTY.....	52
II PRAKTICKÁ ČÁST	53
6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	54
7 POUŽITÉ MATERIÁLY.....	55
7.1 POLYPROPYLEN – DOW PP H777-25R; SCOLEFIN PP 53G10-0	55
7.2 POLYAMID - PA 6 RAVAMID B-NC; PA 6 RAVAMID B GF30 NC	58
7.3 POLYKARBONÁT - PC CALIBRE 303 EP 22.....	60
7.4 POLYSTYRÉN - KRASTEN 552 M.....	61
8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ.....	64
8.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG 420 C ALLROUNDER ADVANCE	64
8.2 ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456.....	65
9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ.....	67

10	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	68
10.1	PARAMETRY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ.....	69
10.1.1	Polypropylen-DOW PP H777-25R;SCOLEFIN PP 53G10-0, PP+15%GF.....	69
10.1.2	Polyamid - PA 6 Ravamid B-NC; PA 6 Ravamid B GF30 NC.....	69
10.1.3	Polykarbonát - PC Calibre 303 EP 22.....	70
10.1.4	Polystyrén - KRASTEN 552 M.....	71
11	MĚŘENÍ A ANALYTICKÝ VÝPOČET EXPERIMENTU.....	72
11.1	MĚŘENÍ.....	72
11.1.1	Zkouška tahem.....	72
11.1.2	Zkouška tlakem.....	73
11.1.3	Zkouška ohybem.....	76
11.1.4	Přehled naměřených hodnot.....	78
11.2	ANALYTICKÉ VÝPOČTY.....	81
11.2.1	Neplněný polypropylén (PP).....	81
11.2.2	Neplněný polyamid 6 (PA6).....	82
11.2.3	Polykarbonát (PC).....	83
11.2.4	Polystyren (PS).....	84
11.2.5	PP+15%GF.....	85
11.2.6	PP+30%GF.....	86
11.2.7	PA+30%GF.....	87
11.2.8	Přehled analytických výpočtů.....	88
	ZÁVĚR.....	89
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	93
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	95
	SEZNAM TABULEK.....	98
	SEZNAM PŘÍLOH.....	101

ÚVOD

Nejen objevování nových, ale taktéž vylepšování již známých materiálů je předmětem úsilí, které lidskou společnost provází po celou dobu její existence. Snahy o snižování energií nebo např. snahy o použití materiálů odolných proti korozi, které snižují ztráty vzniklé korozi kovů, leží v zájmu všech vyspělých společností, ale také i ekologických hnutí. Použití materiálů s velkou antikorozní odolností ve speciálním a ekologickém stavebnictví je schopno prodloužit životnost konstrukcí i ve velmi agresivních prostředích, a snížit tak náklady na jejich údržbu na minimum. Nové materiály, které po skončení svého užitného cyklu výrobku, dobře recyklovatelné, snižují ekologickou zátěž životního prostředí. Plasty samotné, které mají většinu těchto atributů, byly v důsledku svých omezených mechanických vlastností dosud použitelné pouze tam, kde netvořily nosnou část konstrukce. Polymerní kompozity se svými vlastnostmi vyrovnají tradičním konstrukčním materiálům, a jsou tedy použitelné i u již zmiňovaných nosných prvků konstrukcí a proto jsou tedy nejnadějnějšími kandidáty pro náhradu kovů a jiných tradičních materiálů v konstrukčních aplikacích i ve speciálním stavebnictví.

Největšího rozšíření v této oblasti dosáhly kompozity, ve kterých jsou pojivem organické polymery a výztužemi jsou různé typy anorganických či organických vláken. Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými maticemi je kombinace snadné tvarovatelnosti málo pevného polymeru s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. I ty nejjednodušší kompozity, jako je polyesterová pryskyřice vyztužená skleněnými ručně kladenými vlákny a rohožemi, nabízejí nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a vynikající odolnost vůči působení korozních, především kyselých prostředí, nízkou tepelnou vodivost, elektrickou nevodivost a zanedbatelný útlum elektromagnetického záření. Tyto a další fyzikální a chemické vlastnosti mohou být odborníkem znalým materiálového inženýrství šity na míru konečné aplikaci prostřednictvím variací ve strukturálních parametrech (typ pojiva, typ vláken, forma výztuže, použitá aditiva, prostorové uspořádání výztuží, obsah výztuže atp.). Technologicky zvládnout schopnost napodobit přírodu umožnila velmi rychlý rozvoj aplikací kompozitů v technické praxi. To umožnilo kompetentní design výrobků z kompozitů a skutečné využití všech nabízených výhod. Byly již syntetizovány a v praktických podmínkách ověřeny pryskyřice umožňující kontinuální použití kompozitů při teplotách 250 - 350 °C. Byla rovněž vyrobena a komercializována vlákna, jejichž modul pružnosti je 600 - 850 GPa (4 x více než ocel a 12 x více než hliník)

s pevnostmi až 6 GPa. Nezanedbatelným atributem tohoto vývoje je i automatizace výroby, která umožnila dosažení vynikající reprodukovatelnosti vlastností a snížení ceny těchto materiálů na úroveň srovnatelnou s tradičními konstrukčními materiály. Velkou měrou přispěl ke komercializaci původně vojenských materiálů průmysl sportovních potřeb (lyže, tenisové rakety, golfové hole, rybářské pruty), automobilový průmysl, silnoproudá elektrotechnika, radiokomunikace a speciální stavebnictví. V posledním desetiletí se na tomto trendu začínají projevovat i vlivy medicínských, především ortopedických a stomatologických oborů, ekologické stavitelství a hromadná doprava. [1]

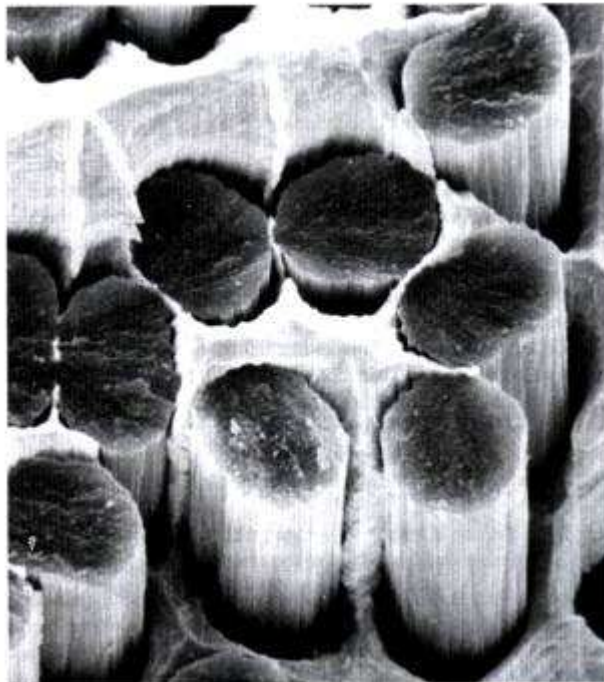
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD DO STRUKTURY A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá **výztuž**, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá se **matrice**. Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5 %
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- kompozit musí být připraven smícháním složek

Podle těchto podmínek nelze za kompozit považovat plast, obsahující malá množství tuhých barviv, např. částic sazí (černý pigment) nebo oxidů (např. TiO_2 -bílý pigment) nebo částic elastomerů (přidávaných pro zlepšení houževnatosti; nejde o výztuž, modul pružnosti materiálu se naopak zmenší), ani slitinu kovů, v které během ochlazování nebo při tepelném zpracování došlo k vyloučení tvrdé fáze. Kompozity mohou být typu kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer.



Obr. 1. Slitina AgCu, zpevněná uhlíkovými vlákny. [4]

Největšího průmyslového rozšíření dosáhly ve světě kompozity na bázi organických pryskyřic vyztužených různými typy keramických/anorganických vláken. Hlavním důvodem tohoto stavu je energetická nenáročnost jejich výroby ve srovnání s kovovými či keramickými kompozity a tradičními materiály (ocel, cement) a nízké teploty finálního zpracování (80-180 °C). Nejvýznamnější předností kompozitů s organickými matricemi je synergická kombinace snadné tvarovatelnosti nepevné pryskyřice s pevností a tuhostí vyztužujících vláken. Polymerní kompozity (FRC, GRP ; jelikož je většina výztuže ve formě skleněných vláken, používá se označení GRP, z *anglického* „*glass reinforced plastics*“, obecnější je označení FRC z *anglického* „*fiber reinforced composites*“) nabízejí nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a vynikající odolnost vůči působení korozivních prostředí. Při použití skleněných či organických výztuží mají FRC i vynikající izolační vlastnosti (tepelné, elektrické) a prakticky nulový útlum elektromagnetického záření v širokém intervalu frekvencí od kHz až po GHz. GRP mají ve srovnání s jednotlivými komponentami, t.j. skleněnými vlákny a pryskyřicí, podstatně odlišné unikátní vlastnosti. Nevyztužená pryskyřice má nízkou hustotu a je snadno zpracovatelná a má relativně dobrou stabilitu proti působení širokého spektra prostředí a chemikálií. Nevýhodami, které omezují či úplně vylučují jejich použití v konstrukčních aplikacích, je velmi nízký modul pružnosti (do 6 GPa), nízká pevnost (100 MPa), křehkost a relativně malá creepová odolnost. Skleněná vlákna mají sice požadovanou tuhost a pevnost, jsou však velmi křehká a náchylná k poškození v některých agresivních prostředích. Je navíc velmi obtížné udržet je v požadovaném prostorovém uspořádání, zvláště, pokud působí tlakové složky napětí. Jestliže však se vyrobí kompozitní materiál tím, že prostorově vhodně umístíme skleněná, uhlíková či organická vlákna (*výztuž*) v pryskyřici, která se potom nazývá *pojivem* neboli *matricí*, dostaneme novou entitu s vlastnostmi nedosažitelnými jednotlivými komponentami samotnými. GRP jsou lehké, pevné, tuhé, houževnaté, mají vysokou odolnost proti crepu a jsou snadno vyrobitelné ve velmi komplikovaných tvarech. [2]

1.1 Struktura kompozitů

1.1.1 Klasifikace kompozitů

V současné době existuje široké spektrum FRC materiálů, které se liší jednak pojivem (pryskyřicí), typem a charakterem výztuží (typ vláken, tkaniny apod.), ale mnohdy také i způsobem výroby (laminace, tažení, navíjení, odstředivé lití, RTM, atd.). Kompozity můžeme rozdělit na dva základní typy a to dle použití materiálu matrice. Prvním typem je termoplastická matrice a druhým typem rozumíme reaktoplastickou matici:

Termoplasty, kterými jsou například polystyren (PS), polypropylen (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET) a další, jsou tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty. Po ochlazení opět přejdou do pevného skupenství. Charakteristickým strukturním znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek (několik tisíc až několik milionů). Z toho důvodu bývá tento typ makromolekul označován jako polymer. Jednotlivé makromolekuly nejsou vzájemně vázány chemickými vazbami. Jejich vzájemné interakce, které zaručují kohezní pevnost polymerního tělesa jsou většinou slabé, van der Waalsovské interakce, vodíkové můstky, atd. [2]

Reaktoplasty, jakými jsou například epoxidy, nenasycené polyestery, melaminy či fenol formaldehyd, jsou obvykle dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídkého medu tvořené relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzení probíhá buď za pokojové teploty nebo za zvýšených teplot. Způsob, kterým vytvrzování probíhá do značné míry ovlivňuje vlastnosti výsledného reaktoplastu. Jelikož při vytvrzování dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými malými molekulami, vzniká místo dlouhých lineárních molekul, které jsou charakteristické pro termoplasty, třídímní polymerní síť s různou hustotou „ok“. V ideálním případě je celý makroskopický výrobek jedinou makromolekulou. Tento fakt způsobuje, že vytvrzený reaktoplast zůstává v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti creepu a vysokým teplotám, i když to na druhé straně zvyšuje i jeho křehkost a omezuje recyklovatelnost. [2]

Vláknové kompozity můžeme rozdělit dle délky a prostorového uspořádání vyztužujících vláken. Z tohoto hlediska je možno dělit vláknové kompozity na:

- **jednosměrné** (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru):

- krátkovláknové (poměr délka/průměr je < 100)

- dlouhovláknové (délka/průměr je > 100 či kontinuální vlákna, t.j. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce)

- prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů různé šíře)

- tažené profily (tyčovina)

- **mnohosměrné** (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry

Obr. 2.)

- krátkovláknové (poměr délka/průměr je < 100)

- dlouhovláknové (délka/průměr je > 100 či kontinuální vlákna, t.j. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce)

- prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vláknové rohože či tkaniny)

- lamináty (střídání vrstev jednosměrných kompozitů s různými vzájemnými orientacemi vyztuže)

- lamináty s tkanou vyztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi)

- lamináty s netkanou vyztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do rohoží aniž by byla tkána)

- tažené profily (komplikovanější tvary průřezu lineárních prvků s konstantním průřezem - profilů - s kombinací vyztužujících vláken a netkaných či tkaných rohoží, (desky, trubky, komplikované profily) [2])

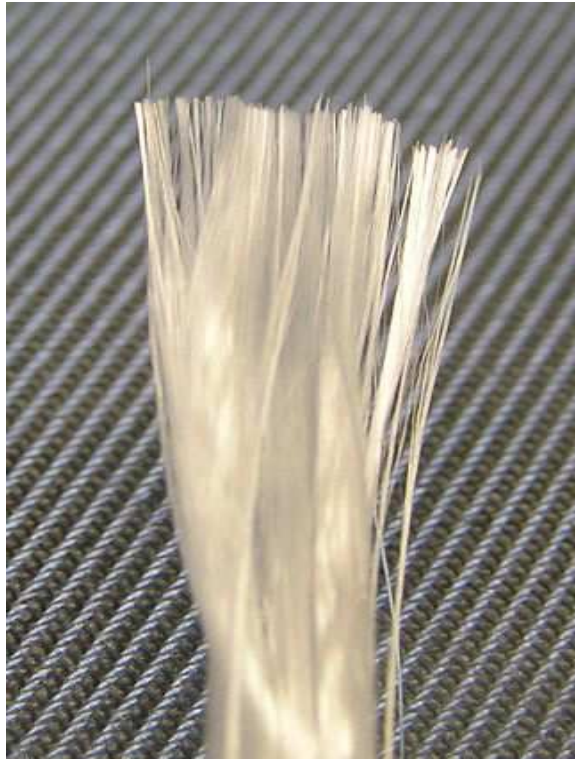


Obr. 2. Trojrozměrný vláknový kompozit.[4]

1.1.2 Typy produktů vláken

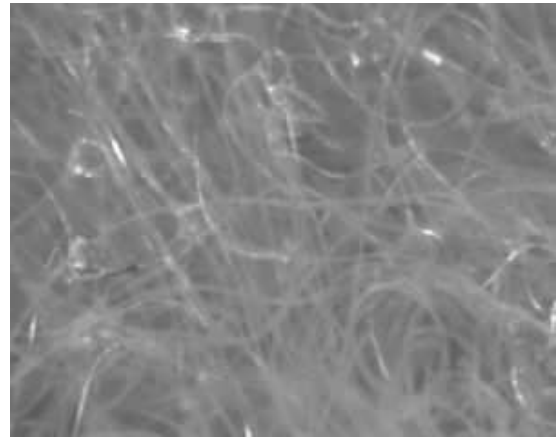
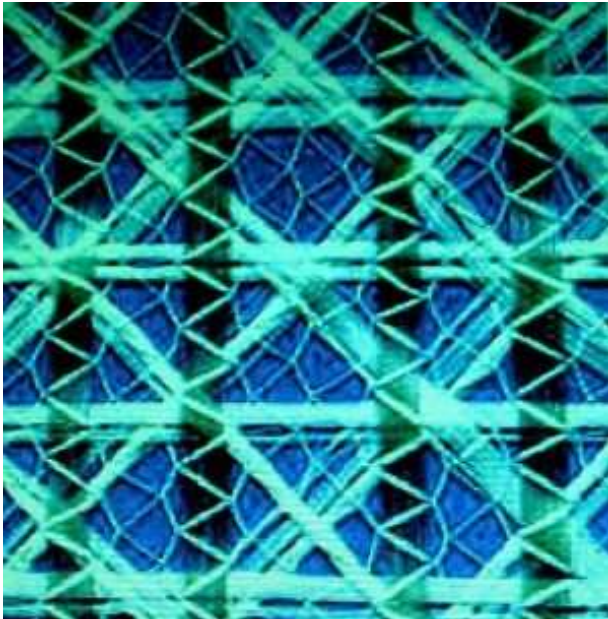
Sdružením elementárních vláken (monovláken) vznikají prameny. Ty jsou dále zpracovány na následující polotovary:

- **sekané prameny** (angl. “chopped fibers”). Jsou určeny pro přípravu lisovacích a vstříkovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebné délky.
- **mletá vlákna** (angl. “milled fibers”). Mletím lze získat krátká vlákna jen v případě křehkých vláken)
- **prameny bez zákrutů**
- **rovingy (pramence)** – obr. 3. (angl. “tow”) Pro výrobu profilů tažením (pultruzí), pro navíjení a pro výrobu prepregů. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti (u skleněných vláken do 15 kg). Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších cívkách s kónickým zakončením (rovingy kolem 3k, číslo před k znamená kolik tisícovek elementárních vláken je v pramenci).



Obr. 3. Roving ze skleněných filamentů (Filament je v textilní terminologii mezinárodní označení pro všechna vlákna neomezené délky). [6]

- **jednoduchá příze** (angl. “yarn”) a **kablovaná příze** - vzniká zkrucováním pramenů a jejich sduřováním. Používá se pro výrobu technických tkanin. Návin příze má kónický tvar.
- **rovingové tkaniny** (angl. “fabrics“), tkané z rovingů. Jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů
- **tkaniny z příze**. Nejsou většinou určeny pro výrobu kompozitních konstrukcí, ale slouží jako izolační, filtrační tkaniny a geotextilie.
- **rohože** (angl. “mat”) – Netkané textilie, rovinně ležící nahodile uspořádaná kontinuální nebo na větší délky (cca 25 - 50 mm) sekané prameny. Sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivy, rozpustnými v rozpouštědlových pryskyřicích. Použije-li se k výrobě rohoží kontinuálních vláken, není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem (jsou vzájemně propletena). Dále se rohože vyrábí ze sekaných vláken nebo filamentů ze skla, uhlíku nebo syntetických materiálů. Jsou to netkané, velmi lehké textilie (6-80 g/m²) pojené v matrici kompozitů rozpustnými pojivy – *Obr. 4.*



Obr. 4. Rohož z multiaxiálně uložených rovingů a filamentů [7]

Obr. 5. Náhodně uspořádaná kontinuální vlákna. [8]

- **prepregy** (angl. “prepregs”) – *Obr. 6.*

Jsou různě široké role (nebo kotouče), obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polovytvrzenou reaktoplastickou nebo termoplastickou matici. Je možné též vyrobit pramenový nebo rovingový prepreg (vlákna jsou impregnovaná reaktoplastickou polovytvrzenou nebo termoplastickou maticí). Prepregy se používá k získání špičkových polymerních kompozitů. [5]



Obr. 6. Prepreg z uhlíkových vláken. [9]

1.1.3 Vlákná jako výztuž

Největší pevnost a tuhost dosahují vláknové kompozity s kontinuálními vlákny. Matrice (pojivo výztuže) může být:

- **polymerní (reaktoplastická nebo termoplastická)**
- **kovová**
- **skleněná**
- **sklokeramická**
- **keramická**
- **uhlíková**

Kontinuální vlákna mohou být:

- **skleněná**
- **čedičová**
- **uhlíková**
- **polymerní**
- **proteínová**
- **borová**
- **keramická**

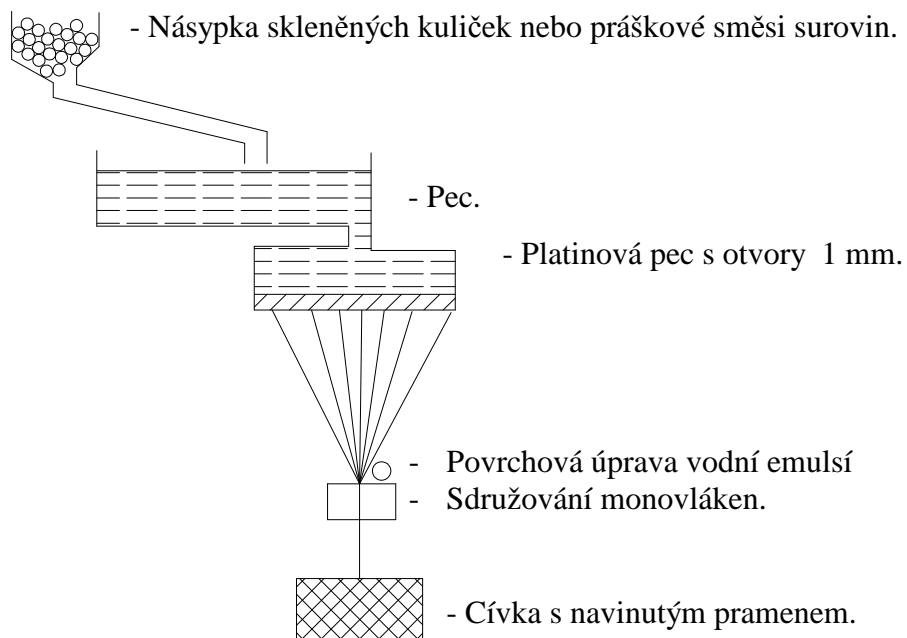
Vláknové **mikrokompozity** obsahují vlákna o průměru 100 až 102 μm . Některé kompozity obsahují vlákna o průměru pod 1 μm v podobě krátkých (diskontinuálních) nanovláken a zařazují se proto mezi **nanokompozity**. Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý příčný průřez vláken. V tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při velmi malých příčných rozměrech menší (tenká vlákna mají oproti stejně dlouhým vláknům větších průměrů významně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou přednostně orientovány (protaženy) v podélném směru vlákna. Whiskery jsou monokrystaly o velmi malých příčných rozměrech (nm) a krátké délce. Dosahují velmi vysoké pevnosti (řádově 104 MPa), protože neobsahují defekty. [5]

Jako základní materiál se pro whiskery nejčastěji používá grafit a karbid křemíku (SiC).

Whiskery se dosud používají výhradně jako výztuž do kompozitů.

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg a B) s velmi malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla vytékajícího tryskami (průměr trysky 1 mm) ze dna zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování „monovláken“. Monovlákná se po povrchové úpravě (sizing) sdružují do pramene a navíjejí na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (pramenec nebo káblík). Schéma výroby skleněných vláken je na následujícím obrázku.



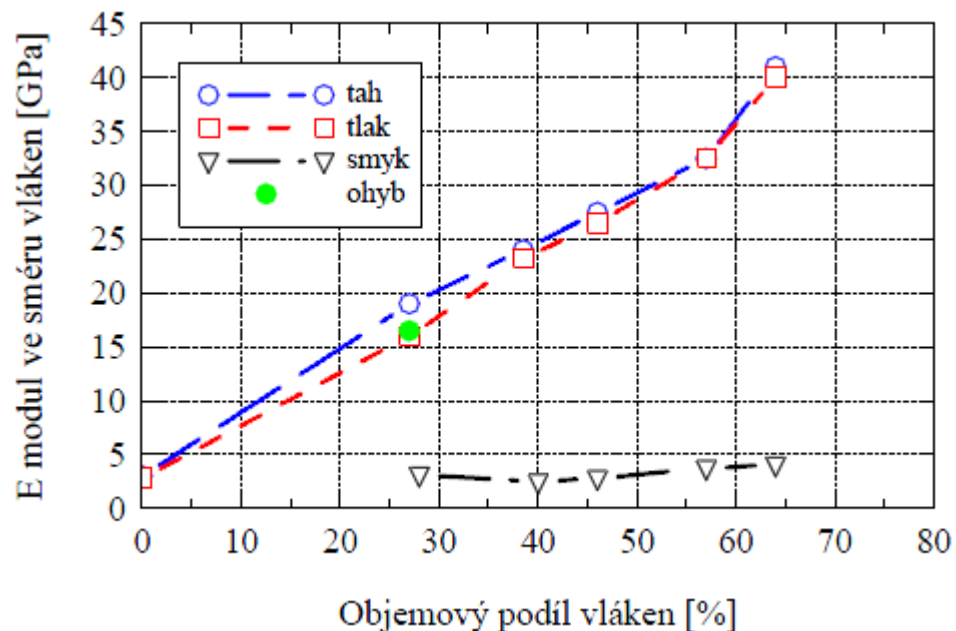
Obr. 7. Výroba skleněných vláken.

Pro kompozity se využívá skleněných vláken typu E, C, S, které mají vlastnost odolávání kyselinám. Oproti tomu alkáliím odolávají skleněná vlákna pro kompozity označovaná jako ACR. Posledním typem jsou křemenná vlákna.

Tab. 1. Složení sklovin (hmotnostní procenta).

Oxid	Sklo E	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Křemenné vlákno
SiO ₂	52-56	65	64-68	64	99,9
Al ₂ O ₃	12-16	25	3-5	1	
CaO	16-25	-	11-15	5	
MgO	0-5	10	2-3		
TiO ₂				3	
ZrO ₂				13	
B ₂ O ₃	5-10	-	4-6		
Na ₂ O, K ₂ O	<0,8	<0,3	Až 10	14	

Skleněná **vlákna z E skloviny** jsou nejlevnější (~70 Kč/kg) a přitom mají dobré mechanické a elektrické vlastnosti (nevodivost, velký povrchový odpor, relativně malou relativní permitivitu a malé dielektrické ztráty (relativní permitivita se pohybuje mezi 5,9 až 6,4, ztrátový činitel (tangens ztrátového úhlu) při frekvenci 1 MHz 0,0039) a poměrně dobrou odolnost proti hydrolyze (rozkladu v horké vodě). [5]



Obr. 8. Závislost modulu pružnosti ve směru vláken na objemovém podílu vláken jednosměrně vyztužený kompozit E sklo/polyester.[10]

Skleněná **vlákna z S skloviny**, která obsahují větší podíl oxidu křemíku a hliníku disponují větší teplotou tavení, ale za to jsou dražší. Používají se většinou v kompozitech s epoxidovou matricí. Vlákna mají větší pevnost v tahu a větší modul pružnosti v tahu než standardní vlákna z E skla. Na základě skla S je možno získat nové biomateriály, které jsou vhodné pro dočasné implantáty a jsou kompatibilní s řadou termoplastů.

Vlákna z skloviny C s vyšším podílem alkálií mají nižší teplotu měknutí, jsou méně pevná a jejich mechanické vlastnosti rychleji klesají s rostoucí teplotou. V prostředí obsahujícím kyseliny, větší podíl alkalických prvků zlepšuje odolnost proti rozpouštění, v samotné vodě se však alkalické prvky rychle vyluhují. Pro alkalické prostředí jsou více vhodná **vlákna ze skloviny ACR**. Tato sklovina je odolná vůči zásaditému prostředí (výroba střešních šablon s cementovým pojivem, tzv. „ekologický“ eternit). Pokud nejsou k dispozici, vyhovuje i E sklo.

Křemenná vlákna mají stejně nízkou relativní permitivitu jako polymerní aramidová vlákna, ale oproti nim mají o dva řády menší ztrátový činitel při vysokých frekvencích proudu, menší koeficient délkové roztažnosti a menší adsorpci vlhkosti. Křemenná vlákna pro tepelné izolace mají oproti E vláknům vyšší tepelnou odolnost (teplota měknutí asi 980 °C). Výroba křemenných vláken spočívá v rozemletí čistého krystalického křemene a smísení s dalšími přísadami, z kterých je po roztavení taženo vlákno. Vlákno o průměru 9 μm stojí cca 220 \$/kg, vlákna většího průměru jsou levnější (při průměru 14 μm 130 \$/kg). Vedle tkanin a rohoží pro tepelné izolace se křemenná vlákna používají pro kryty radarů letadel), desky plošných spojů mobilních telefonů a počítačů (s kvanoesterovým pryskyřicemi) a pro vojenské letouny. **Dutá skleněná vlákna** jsou lehčí než plná, při stejné pevnosti a modulu pružnosti. [5]

Tab. 2. Vlastnosti skleněných vláken. [5]

	Sklo E	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Křemenné sklo
Průměr [μm]	9-13	9-13	9-13		8,9
Hustota [g / cm^3]	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
Modula pružnosti [GPa]	72,4	85,5	69	75	69
Pevnost v tahu [GPa]	až 3,45	až 4,6	až 3	1,7	3,45
Prodloužení [%]	4,8	5,7	4,8		5
Součinitel tepelné roztažnosti	5	5,6	7,2		
Součinitel tepelné vodivosti	1	1	1		
Teplota měknutí [$^{\circ}\text{C}$]	800	970	750		980
Relativní permitivita při frekvenci 1 MHz		5-5,4			3,78
Ztrátový činitel [$\tan \delta$] při 10 GHz	0,0039				0,002

O mikrostrukturu skleněných vláken je relativně málo poznatků vzhledem k jejich amorfnímu stavu, který je způsoben nepatrnou krystalizační rychlostí směsi oxidů při ochlazování taveniny. Předpokládá se, že na vysoké pevnosti skleněných vláken, vedle tzv. velikostního faktoru (malý povrch a malé defekty v tenkém vlákně), se podílí také odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. Zatímco jádro obsahuje nahodile orientovanou síť kovalentně vázaných atomů, povrch má pravděpodobně semi-orientovanou strukturu. Na povrchu tak vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému rozvoji trhlin při tahovém zatížení vlákna. Podobný mechanismus je v souladu se skutečností, že jakékoliv narušení povrchových vrstev (např. mechanické poškrábání) vede k drastickému poklesu tahové pevnosti vlákna. Předpokládaná tenká povrchová vrstva s preferovanou orientací kovalentních vazeb se však neprojevuje měřitelnou anizotropií elastických veličin skleněného vlákna. Při mikromechanických výpočtech se uvažují stejně velké hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν ve směru podélném a příčném. Povrch skleněných vláken je hydrofilní. Oxidy SiO_2 a Al_2O_3 vytvářejí hydroxylové skupiny ($-\text{M}$, $-\text{OH}$, kde M je Si nebo Al), ke kterým jsou molekuly vody vázány vodíkovými můstky. Na povrchu vláken a v jeho mikroskopických trhlínkách je při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu 65 %

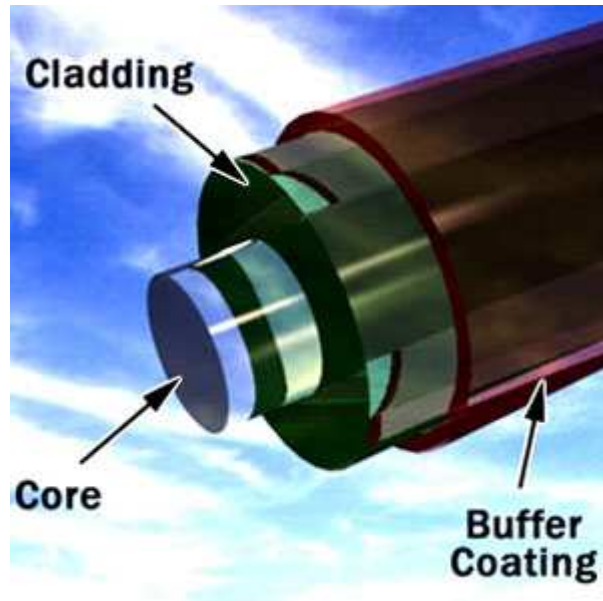
adsorbováno asi 0,1 % hmotnostních vody. Adsorpce vlhkosti na povrch čerstvě vyrobených vláken je velmi rychlá (rychlost navlhání je možno demonstrovat například vážením čerstvě vyžíhaných skleněných vláken na analytických vahách – vlákna rychle těžknou). Adsorbovaná vlhkost působí v povrchových defektech vláken jako tenzoaktivní látka, snižující lomovou energii skla. Pevnost čerstvě vyrobeného vlákna je proto větší než pevnost vlákna s rovnovážným obsahem vody, daným vlhkostí okolní atmosféry. Vysoký podíl adsorbované vody je překážkou vytvoření dobré vazby mezi vláknem a polymerní matricí. Proto je nutno výrobky ze skleněných vláken chránit před vzdušnou vlhkostí polyethylenovými obaly a navlhlá vlákna se musí před použitím vysoušet. Vysušování skleněných vláken v horkovzdušné sušárně se před jejich použitím doporučuje i při skladování vláken v relativně suchém prostředí. [5]

Při manipulaci s nechráněnými vlákny dochází při jejich vzájemném kontaktu k abrazi a následnému snížení pevnosti. Proto se každé jednotlivé vlákno ihned po vytažení z platínové trysky ve dnu tavicí pece, vydloužení a ochlazení na teplotu okolí pokrývá tenkým ochranným povlakem, jehož tloušťka odpovídá hmotnostnímu podílu 0,3 až 1,5 %. Jsou používány lubrikační látky, kde lubrikační látku je nutno před výrobou kompozitu z povrchu vláken odstranit, aby bylo dosaženo potřebné soudržnosti vláken a matrice. Dále jsou používány vazebné prostředky, které mají dobrou afinitu jak ke skleněným vláknům, tak k polymerní matrici

- Skleněná optická vlákna

Optické vlákno je skleněné vlákno, které prostřednictvím světla přenáší signály ve směru své podélné osy. Optická vlákna jsou široce využívána v komunikacích, kde umožňují přenos na delší vzdálenosti a při vyšších přenosových rychlostech dat než jiné formy komunikace. Vlákna se používají místo kovových vodičů, protože signály jsou přenášeny s menší ztrátou a zároveň jsou vlákna imunní vůči elektromagnetickému rušení. Vlákna se používají také pro osvětlení a jsou pak balena ve svazcích, takže mohou být použita k přenosu obrazů, což umožňuje zobrazení v těsných prostorech. Speciálně konstruovaná vlákna se používají pro řadu dalších aplikací, včetně snímače a vláknového laseru. Optické vlákno je válečkový dielektrický vlnovod, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny (zpravidla světlo či infračervené záření) ve směru osy vlákna s využitím principu totálního odrazu (když se světlo pohybuje v hustém (těžko proniknutelném) prostředí a dopadá na rozhraní pod šik-

mým úhlem (větší než mezní úhel), světlo bude kompletně odraženo) na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Vnitřní část vlákna se nazývá jádro („*Core*“) – obr.9., okolo jádra je plášť („*Cladding*“) a primární ochrana („*Buffer Coating*“). K vazbě optického signálu na jádro musí být index lomu jádra vyšší, než má obal. U optických vláken používaných v datových sítích se udává průměr jádra a pláště v mikrometrech.



Obr. 9. Princip skleněného optického vlákna.

[11]

Uhlíková vlákna

Je známo, že krystal grafitu je vysoce anizotropní, ve směru kolmém k bazálním rovinám (k základním mřížky) šesterečné mřížky působí jen slabé Van der Waalsovy vazby, kdežto v rovinách bazálních vrstev, v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány velmi pevnými kovalentními vazbami. Teoretická pevnost grafitového monokrystalu namáhaného tahem ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami činí přibližně 100 GPa a teoretický modul pružnosti v tahu je přibližně 1000 GPa. Polykrystalický grafit s náhodně orientovanými krystaly je měkký a drobný v důsledku málo pevné vazby mezi hustě obsazenými rovinami. Modul pružnosti v tahu je pouze 10 GPa a pevnost v tahu 20 MPa. Při smykovém namáhání ve směru rovnoběžném s rovinami se pevné kovalentní vazby mezi uhlíkovými atomy v bazálních rovinách neporušují a dochází k snadnému pohybu těchto rovin vůči sobě. To je příčinou známého mazacího účinku grafitu (např. při suchém tření). Vysoc-

ké pevnosti a tuhosti aromatických rovin je využito v uhlíkových vláknech, ve kterých jsou bazální roviny orientovány převážně rovnoběžně s podélnou osou vlákna. Na rozdíl od krystalu grafitu nejsou aromatické roviny ve vláknu pravidelně uspořádány ve sledu ABABA... (jak by odpovídalo hexagonální mřížce), ale jsou vedle sebe umístěn nahodile, v tzv. turbostratickém uspořádání. Vzdálenost mezi aromatickými rovinami je potom mírně větší, než je tomu u mřížky grafitu (0,34 až 0,345 nm oproti 0,335 nm u grafitu). Z těchto důvodů je nesprávný termín „grafitová vlákna“, ačkoliv některé zahraniční firmy pro vysoce tuhá uhlíková vlákna tento název používají. Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a nejnověji z vláken novoloidu – vláken fenolaldehydových. [5]

Tab. 3. Porovnání vlastností uhlíkových vláken. [5]

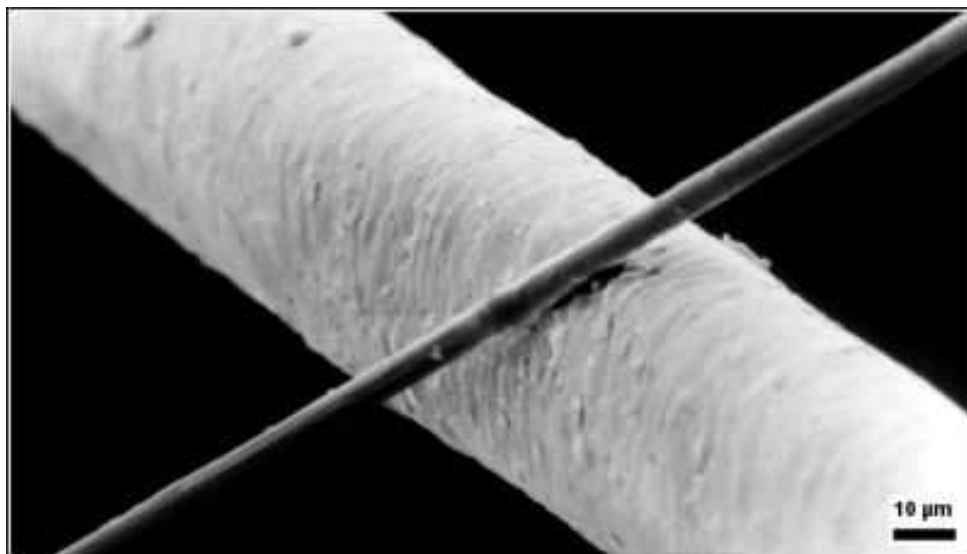
		Novoloid		PAN	
Teplota Zpracování [°C]		800	2000	1500	2000
Hustota [g/cm³]		1,5	1,4	1,8-1,9	1,9-2,0
Obsah uhlíku [% hmotnostních]		95	99,8	93	99,
Pevnost v tahu [Mpa]		500-700	400-600	1500-3000	
Poměrné prodloužení při přetržení [%]		2,0-3,0	1,5-2,5	1.0-1,5	
Modul pružnosti [Gpa]		200-300	150-200	150-300	
Teplota počátku ztráty hmotnosti na vzduchu [°C]		476	573	560	
Tepelná odolnost, ztráty hmotnosti	350 °C	0	0	0	
	400 °C	2,8	2,2	2,4	
Chemická afinita k epoxidovým pryskyřicím		dobrá		horší	

Hlavní druhy uhlíkových vláken

Výrobní sortiment zahraničních firem tvoří:

- *karbonizovaná vlákna*, která mají střední modul pružnosti a dobrou pevnost v tahu. Lze je považovat za standardní uhlíková vlákna (HS – “High Strength”, AS – “Average Strength”, HT nebo HTA – “High Tenacity”)
- *vysokomodulová grafitizovaná vlákna* (HM – “High Modulus”)
- *vlákna vysoce pevná, se středním modulem pružnosti* (IM – “Intermediate Modulus”)
- dutá uhlíková vlákna
- *vlákna s vysokým modulem pružnosti* (VHM – “Very High Modulus”, UHM – “Ultra High Modulus”)
- *diskontinuální vlákna porušená tahem* (SBCF, “Stretch-Broken Carbon Fiber”)
- *mletá uhlíková vlákna*
- *recyklovaná uhlíková vlákna*

Ani nejtuzší grafitizovaná vlákna nelze považovat za čistě uhlíková, obsah uhlíku nedosahuje 100%. Vlákna z uhelných mezofázových smol (zbytků po destilaci černého uhlí a ropy) od firmy Mitsubishi Chem.Co. se vyrábějí ve dvou provedeních: jednak jako vlákna pro letecký průmysl (menší počet monovláken), jednak jako vlákna pro průmyslové použití (velký počet monovláken). Z následující tabulky – *Tab. 4.* je zřejmé, že uhlíková vlákna mají oproti skleněným vláknům menší průměry. Při menším průměru lze totiž vlákna lépe ohnout, takže je lze použít při výrobě tkanin a pletenin, ačkoliv jsou křehčí než skleněná vlákna.



Obr. 10. Uhlíkové vlákno průměru 6 μ m v porovnání s lidským vlasem.[12]

Tab. 4. Vlastnosti některých uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20 °C (podle prospektu firmy Toray Industries, Inc.) [5]

	T300	M40J	T800G	T1000G	M60J
Průměr [μm]	7-8	7	5-6	5	4
Hustota [g / cm^3]	1,76	1,77	1,81	1,8	1,92
Modul E [GPa] osový		377	294	294	588
příčný	230	40	21		
Pevnost v tahu [MPa]	3,53	4,41	5,49	5,3-6,8	4,21
Prodloužení při přetržení [%]	1,5	1,2	1,9	2,0-2,5	0,7
Souč. délkové tep. roztažnosti					
[$10^{-6} 1 / \text{K}$]					
osový	-0,7	-0,5			
příčný	10	7			
Tepelná vodivost [W/mK]	8,5	70	7		
Obsah uhlíku [%]	92-97	99	92-97	96	96

Uhlíková vlákna se vyznačují těmito zvláštnostmi:

- křehkostí - prodloužení při přetržení je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skleněných vláken.
- anizotropií mechanických vlastností - ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti výrazně menší, na úrovni hodnot polykrystalického grafitu.
- záporným koeficient délkové teplotní roztažnosti a, tj. při ohřevu se vlákno zkracuje. Ve směru kolmém má a kladnou hodnotu a je větší než u vláken skleněných.
- v podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor (jen $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}$ u nejtěžších vláken)

Úprava povrchu uhlíkových vláken

Vyrobená uhlíková vlákna jsou podobně jako vlákna skleněná dodatečně upravena. Účelem je:

- odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s matricí.
- omezit další adsorpci plynů na povrch vláken
- zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím
- chránit vlákna před vzájemnou abrazí (uhlíková vlákna jsou křehčí než skleněná)

Jestliže reaktivita ploch aromatických rovin je malá, jejich hrany a rohy jsou vysoce reaktivní a vážou kyslík, oxidy uhlíku, karboxylové kyseliny, karbonylové a hydroxylové a při-

padně aminové a kyanové skupiny. Vlhkost a plynné látky mohou způsobit potíže při výrobě kompozitů, protože zůstávají pouze fyzikálně vázány. Během vytvrzování matrice za vyšších teplot se odpařují za vzniku mikroskopických plynových bublinek obalujících vlákna.

Zabránit se tomu dá buď:

- odplyněním povrchů vláken vakuovou desorpcí
- rozpuštěním adsorbovaných látek v pryskyřici při vhodném režimu vytvrzování
- úpravou povrchu vláken

Nejčastěji se vyrobená vlákna chrání polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyimidů, které zabrání adsorpci látek a zároveň poskytují vláknům ochranu před abrazí. U vláken s aromatickými rovinami rovnoběžnými s povrchem (standardní vlákna z PAN) je účelné reaktivitu povrchu zvýšit a povrch vlákna zdrsnit. Nejběžnější je mokrá způsob, spočívající v čistě chemickém působení oxidačních látek (HNO_3 , chromová kyselina, chlornatan sodný) nebo elektrochemický způsob, spočívající v anodické oxidaci vláken v elektrolytech, např. v sulfidu amonném. U vláken s příznivější mikrotexturou lze aplikovat i suchý proces - termickou oxidaci. Kompozity vyrobené z očištěných a upravených uhlíkových vláken mají velkou smykovou pevnost rozhraní vláken a matrice i velkou mezilaminární (interlaminární) smykovou pevnost. Použije-li se navíc mezifáze v podobě tvárného polymerního povlaku, zlepšuje se odolnost kompozitu proti vzniku podélných trhlin v rozhraní vlákno/matrice, které se jinak objevují při mechanickém namáhání kompozitu bez této mezivrstvy. Lubrikační látky, jako polyvinylalkohol nebo silikonový olej, silně zhoršují až znemožňují vazbu vláken a matrice, ale na druhé straně zvyšují schopnost kompozitního dílu pohltit energii, např. při namáhání rázem. Vlákna se totiž při lomu snadno vytahují z matrice a nedochází k jejich porušení v rovině šířící se lomové trhliny. Proces vytahování vláken spotřebovává více energie než odpovídá energii spotřebované na tvorbu lomových povrchů vláken. Pro zvětšení houževnatosti při zachování dobré soudržnosti vláken a matrice je výhodné opatřit vlákna např. přílnavým povlakem kaučuku, který způsobí, že vytahování vláken je doprovázeno větším třením. Pro dobrou únavovou odolnost a vysokou statickou pevnost kompozitu jsou však samozřejmě jakékoliv nevratné procesy, odehrávající se v mezifázovém rozhraní vlákno/matrice, nepřijatelné. [5]

Tab. 5. Podíl použití uhlíkových vláken.[12]

Sektor	Podíl [%]	Příklady
Letectví	22	Trupy a křídla letadel
Větrné generátory	17	Rotory
Kompozity různých druhů	16	Vojenské a civilní lodě
Sportovní nářadí	14	Čluny, golfové hole, skluznice lyží
Auto	5	Nárazníky, části karoserií

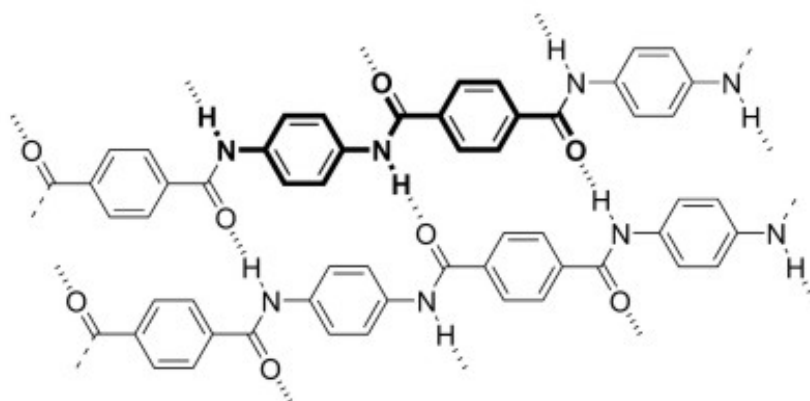
Polymerní vlákna

K největším přednostem polymerních vláken patří jejich malá hustota. Vlákná s malou hustotou a vysokou pevností v tahu mají velkou měrnou pevnost, vlákna velmi tuhá s malou hustotou mají velký měrný modul. Běžná polymerní vlákna, polyethyltereftalátová (PET), polyamidová (PA6 a PA66) a polyakrylonitrilová (PAN) mají pevnost a hlavně modul pružnosti v tahu hluboko pod hodnotami skleněných vláken. Dloužením z taveniny lze dosáhnout zvýšení pevnosti maximálně na 1000 MPa ale modul pružnosti se zvyšuje velmi málo (maximálně na hodnoty 5 až 10 GPa u PA, 15 GPa u PET). Kovalentní vazby mezi atomy uhlíku v páteři lineární makromolekuly by teoreticky poskytovaly (např. u PE s dokonale paralelními makromolekulami dostatečné délky) modul pružnosti v tahu řádově v 102 GPa. Vysokomodulová polymerní vlákna se proto vyrábí jinými postupy z jiných polymerů. Vychází se buď z roztoků polymerů nebo metodou analogickou dloužení z taveniny při použití tzv. LCP (z angl. "Liquid Crystal Polymer") polymerů (aromatické kopolyestery). [5]

- Aromatické polyamidy (aramidy, APA)

Nejznámější je kevlar, což je materiál, vyvinutý firmou DuPont v roce 1971, původně jako náhrada za ocel pro výztuhy pneumatik. Ukázalo se, že jeho možnosti využití jsou mnohem širší. Dnes se používá všude tam, kde je třeba mimořádně vysoké pevnosti a výjimečné teplotní stability. Z kevlaru se vyrábějí např. části letounů a raketoplánů, části brzd a podvozků, vesty chránící proti střelám, boty proti nášlapným minám, převodové řemeny, optické a telekomunikační kabely, ochranné přilby, různé druhy sportovního vybavení a řada dalšího. Kevlar je aramid, což je termín, vzniklý z označení aromatické polyamidy. Podle

Federální obchodní komise (The US Federal Trade Commission) je aramidové vlákno definováno jako „vlákno vyrobené z polyamidu s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem, jehož alespoň 85% peptidických vazeb spojuje dvě aromatická jádra“. Vyrábí se navíjením pevného vlákna z kapalného roztoku, což je umožněno iontovou složkou reakční směsi (chlorid vápenatý), která se váže na vodíkové můstky amidové skupiny, a volbou organického rozpouštědla (N-methylpyrrolidon). Chemicky řečeno se kevlar syntetizuje z monomeru 1,4-phenylene-diamine (para-phenylenediaminu) a terephthaloyl chloridu kondenzační reakcí za vzniku kyseliny chlorovodíkové jako vedlejšího produktu. Výsledkem je materiál s vlastnostmi tekutého krystalu s polymerovými řetězci orientovanými ve směru vlákna. Hexamethylphosphoramid (HMPA) byl první polymerizační roztok, ale toxikologické testy ukázaly, že má karcinogenní účinky, takže DuPont jej nahradil N-methyl-pyrrolidinem a roztokem chloridu vápenatého. Výroba kevlaru je nákladná díky obtížím spojenými s použitím jedovaté koncentrované kyseliny sírové, která je zapotřebí k tomu aby udržela vodou nerozpustný polymer v roztoku v průběhu syntézy a soukání. [13]



Obr. 11. Chemická struktura kevlaru.[13]

Charakteristickou vlastností všech polymerních vláken je, že vlákna nejsou křehká. Při působení tlakové síly ve směru kolmém na vlákno se vlákno plasticky přetvoří (výroba neprůstředních vest, ochranných rukavic a oděvů). Mez kluzu v tlaku je nízká, srovnatelná s hodnotami mezí kluzu běžných polymerů. Při případném působení tahové složky napjatosti v mikroobjemu kompozitu ve směru kolmém k ose vlákna může dojít i k podélnému rozštěpení a fibrilaci hmoty vlákna. Při textilním zpracování nehrozí povrchově nechráněným vláknům pokles pevnosti vzhledem k velké odolnosti aramidů proti abrazi. Krátká

vlákna Kevlaru se uplatňují jako výztuž termoplastů (zvláště polyamidů) pro aplikace, kde jsou požadovány dobré kluzné a vysoká odolnost proti opotřebení.

Pro zvýšení mezifázové adheze je nutné chemické zpracování aramidových vláken, použití vazebných prostředků nebo povrchová úprava plazmatem. Při hydrolyze vláken v určitých kyselinách nebo zásadách se na jejich povrchu tvoří aminové skupiny, které mohou vázat vlákno k matrici. Například reakcí butandiolového diglycidyletheru s povrchem vlákna se tvoří na povrchu vláken epoxidové postranní skupiny. Chemickým zpracováním vláken se však povrch vláken může natolik poškodit, že při testu mezifázové adheze není zjištěno zlepšení soudržnosti. Jiný postup spočívá v brominaci povrchu, po které následuje amonolyza. Nebo v nitridaci povrchu následované redukcí. V obou případech se na povrchu vláken vytvoří aminové funkční skupiny. K povrchové úpravě aramidových vláken je možno použít i vysokofrekvenční studený plazmat. Povrchová úprava jednotlivých vláken slabým povlakem epoxidových oligomerů zajišťuje i lepší smáčivost vláken epoxidovou pryskyřicí. Dokonalejšímu prosycení tkanin pomůže i určité procento skleněných vláken nebo přímo použití hybridní tkaniny, v níž osnova je aramidová a útek ze skleněných vláken. [5]

Tab. 6. Mechanické vlastnosti některých typů aramidových vláken v porovnání s klasickým polyamidovým vláknem PA66. [5]

	Pevnost v tahu, [MPa]	Modul E, [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm ³]
HM/50	3100	80	4,2	1,39
Kevlar 29	3600	80	4,0	1,44
Kevlar 49	3600	130	2,5	1,44
Kevlar 149	3400	146	2	1,47
Twaron 900	2800	65	4,3	1,44
Twaron 930	3000	125	2	1,45
Nomex	700	17,3	22,6	1,4
PA 66	900	5	13,5	1,14

1.1.4 Matrice

Polymerní matrice

Pro kompozity s kontinuálními vlákny jsou nejpoužívanější matrice polymerní, buď reaktoplastické nebo termoplastické. Nejpoužívanější matrice jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP) a z termoplastů polypropylen (PP) a polyamidy (PA). Re-

aktoplasty a aromatické termoplasty s vysokou teplotou tvarové stálosti se vzhledem k své ceně používají především ve vojenském průmyslu (například spodní kompozitní díly tryskových letadel s kolmým startem musí mít matrici s vysokou tepelnou odolností), případně pro výrobu špičkových zařízení (družice, raketoplány, střely s plochou dráhou letu a pod).

- Nenasycené polyestery (UP)

Patří k nejpoužívanějším pryskyřicím (reaktoplast). Lineární nenasycený polyester je připraven reakcí dvou funkčních složek (polypropylenglykolu a kyseliny ftalové, kumaronové, maleinové nebo anhydridu (ftalanhydridu, maleianhydridu)). Vzniklý předpolymer je poté rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle (obvykle styrenu), ale existují i nestyrenové nenasycené polyesterové pryskyřice, kde reaktivním rozpouštědlem je například některý typ metakrylátu. Katalyzátorem (iniciátorem) síťovací reakce jsou organické peroxidy (nejčastěji metyletylketonperoxid, MEKP), aktivátorem (urychlovačem) obvykle naftenan kobaltnatý. Volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout širokého rozmezí doby gelace a doby vytvrzení. Polyesterové pryskyřice lze proto použít pro všechny technologie. Viskozitu pryskyřice určuje podíl reaktivního rozpouštědla. Pro technologie vyžadující nízkou viskozitu pryskyřice (0,2 až 0,4 Pa·s) je obsah rozpouštědla volen větší, ovšem za cenu menší pevnosti a tepelné odolnosti matrice kompozitu. [14]

Základní druhy nenasycených polyesterových pryskyřic jsou:

- orthoftalová – nejnižší cena, maximální pracovní teplota 80 °C
- izoftalová - dražší a kvalitnější než orthoftalová, lepší chemická a tepelná odolnost, maximální pracovní teplota 90 °C
- fumarová - dobrá chemická i tepelná odolnost, maximální pracovní teplota 130 °C
- chlorftalová - je nehořlavá, mechanické vlastnosti jsou horší, maximální pracovní teplota 140 °C
- tereftalová - velmi dobrá chemická i tepelná odolnost, pryskyřice pro pultruzi je levnější než izoftalová UP.

- Epoxidové pryskyřice (EP)

Jsou to nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční použití. V závislosti na chemické struktuře pryskyřice a použitém tvrdidlu a případných modifikujících složkách mají nejširší

rozsah vlastností. Mají dobrou houževnatost (v porovnání s ostatními reaktoplasty), odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, uspokojivou teplotní odolnost, výtečnou chemickou odolnost, dobré elektrické vlastnosti a malé smrštění při vytvrzování. Jsou navlhavé, takže za přítomnosti vody je nutné počítat se značným zhoršením teplotní odolnosti

Základními druhy epoxidových pryskyřic pro kompozity jsou:

- *glycidily bisfenolu A*, např. diglycidylether BPA - zkratka DGEBA
- *novolakové pryskyřice*, např. glycidylether fenolického novolaku
- *třífunkční epoxidy*, např. triglycidylether trifenylmethan (TGETPM) nebo triglycidylaminofenol (TGAF)
- *tetrafunkční epoxidy*, např. tetraglycidylmethyldianilin (TGMDA) [14]

Kovové a keramické matrice

Keramické matrice mají dobrou pevnost v tahu i při teplotách, kterým některé kovové matrice neodolávají. Kompozity s kontinuálními keramickými vlákny vzniklé přípravou v keramické matici disponují větší lomovou houževnatostí v porovnání s monolitickou keramikou. Vysokou pevnost v tahu (okolo 800 MPa) při vysoké pracovní teplotě (přes 1000 °C) má zvláště keramika SiC, Si₃N₄ a Al₂O₃. Kompozity s kovovou a keramickou maticí je vhodné uvádět spolu s technologií přípravy jako je např. lití, lisování za tepla ve vakuu nebo práškovou metalurgií, plazmové nástřiky - vyztužující vlákna uložená v tenké vrstvě jsou pokryta kovovou nebo keramickou maticí pomocí plazmového nástřiku. Získané vrstvy se dále spojují žárovým lisováním (keramické matrice) nebo tvářením za tepla ve vakuu (kovové matrice).

2 VYUŽITÍ KOMPOZITŮ

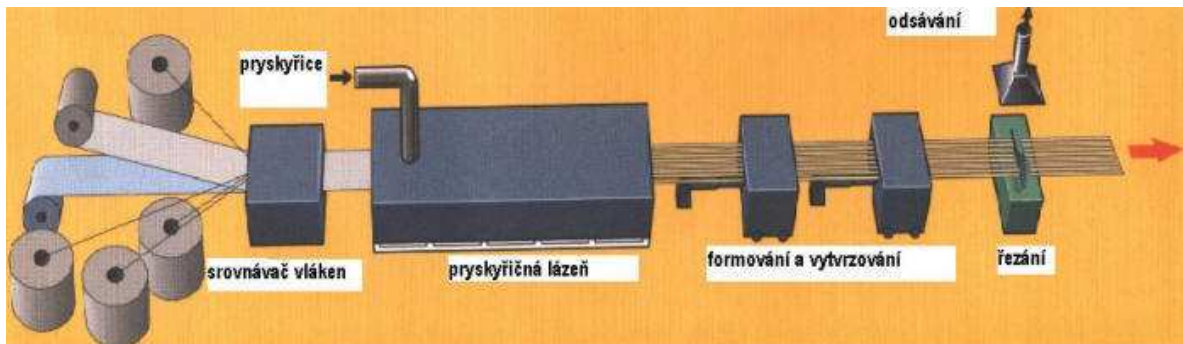
V ČR je odhadována spotřeba nejrůznějších typů kompozitů na 2-3 tisíce tun ročně většinou ve formě ručně kladených laminátových polotovarů. V přepočtu na jednoho obyvatele je to tedy zhruba 15 krát méně než v USA a 10 krát méně než v Japonsku a zemích EU. Většina vláknových kompozitů produkovaných v ČR je ve formě ručně kladených laminátů na bázi tkaných skleněných výztuží s polyesterovými pojivy, i když i zde se začínají objevovat modernější technologie i suroviny. Výrobní základna je v ČR podobně jako v celé Evropě značně roztržštěná. Právě roztržštěnost výrobních kapacit, malá informovanost technické veřejnosti, její větší konzervativnost a nedostatek technických norem pro konstruování s kompozity jsou hlavními důvody zaostávání Evropy za Japonskem a USA v této oblasti. [2]

Kvantifikace vztahů mezi strukturou kompozitů a jejich výslednými vlastnostmi bylo dosaženo v posledních 30 letech. [2] Tak jako příroda mění vlastnosti vyztužujících vláken (celulóza-Celulózové vlákno se používá v papírenském a textilním průmyslu) a pojiv (lignin-je důležitou stavební složkou dřeva zabezpečující dřevnatění jeho buněčných stěn) u nejnámějšího vláknového kompozitu tj. dřeva - vedoucí k výrazným rozdílům mezi vlastnostmi dřeva smrkového, borového či bukového, může člověk měnit prostorové uspořádání vláken, jejich typ, stupeň adheze mezi vlákny a pryskyřicí i vlastnosti pryskyřice ve velmi širokém měřítku. Napodobení přírody umožnilo velmi rychlý rozvoj aplikací kompozitů v technické praxi.

Předtím, než konstruktéři a projektanti přijmou vláknové kompozity jako plnohodnotný materiál schopný použití jako prvek nosných konstrukcí, je nutno shromáždit velké množství experimentálních a empirických dat, navrhnout spolehlivé konstrukční postupy a rozvinout výrobní technologie produkující kompozity s reprodukovatelnými vlastnostmi. Shrnutí relevantních hodnot mechanických vlastností GRP ve formě akceptovatelné konstruktéřskou veřejností je nezbytné pro další úspěšný rozvoj aplikací těchto moderních materiálů. Tyto informace, shromážděné do značné míry v předkládaných skriptech, by měly pomoci konstruktérům a projektantům v jejich rozhodování o smysluplné náhradě klasických materiálů kompozity, při výběru vhodných kompozitů či při formulaci dalších dotazů u expertů v daném oboru. [2]

Jelikož jsou FRC obvykle vyráběna zároveň s konečným dílcem nebo jiným výrobkem, a tím odlišuje kompozity od tradičních materiálů, zapříčinilo v posledních 40 letech obrov-

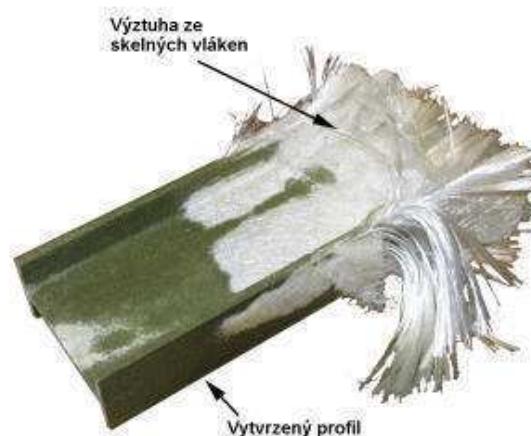
ský rozvoj kompozitů. To znamená, že kompozitní materiály jsou do značné míry šity na míru konečné aplikaci, a to nejen svou strukturou a vlastnostmi, ale i výrobní technologií. Nejtradičnějším způsobem výroby je ruční kladení, kdy je skleněná výztuž kladena na kopyto či do formy, kde je následně prosycena pojivem obsahujícím všechna aditiva nutná k vytvrzení. Požadovaná tloušťka je budována postupně z vrstev (laminace), poté je pojivo vytvrzeno a dílec je vyjmut z formy či sejmuto z kopyta. Tato technologie je kapitálově nejméně náročná (pokud nejsou používány ke tvrzení autoklávy). Zavedení automatizovaných výrob kompozitních profilů, jakými je např. pultruze (vzniklo z *anglického názvu „pultrusion“ a v této české podobě se již mezi odbornou veřejností zažilo*), kde pultruzí (např. u výroby tažených profilů PREFEN - PREFA KOMPOZITY, a.s.) rozumíme proces kontinuální výroby vyztužených pryskyřic různých tvarů a délky tažením.



Obr. 12. Ilustrace technologie výroby tažených profilů PREFEN.[3]

Vstupní materiál je směs tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Proces zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. Vyztužující materiál, převážně skelné vlákno, je ve formě rovingu (roving - jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů - méně než 40 zákrutů/m s tloušťkou větší než 68 tex) a plošných rohoží. Tato vlákna navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, jehož funkcí je rovnoměrné rozmístění rovingu v průřezu a správné umístění rohoží. Všechny profily PREFEN kromě plných tyčí mají na povrchu tenkou netkanou povrchovou polyesterovou roušku. Tato rouška obaluje skleněnou výztuž a navíc, nasycena pryskyřicí, tvoří obal, který zvyšuje jednak odolnost proti vniknutí chemikálií, UV záření a vylepšuje i estetický vzhled kompozitu. Povrchová rouška zabraňuje tomu, aby po poškození povrchu vyčnívala skleněná vlákna ven. V dalším zařízení se vlákna, rohože a rouška smáčí ve směsi pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátoru, popř. dalších přísad pro zlepšení materiálových vlastností výsledného profilu. Po výstupu z lázně má polotovar už podobný tvar jako výsledný profil. V předtvarovací formě se vytlačuje přebytečné pojivo, profil se postupně tvaruje a

vstupuje do vytvrzovací formy. V této vyhřívané formě probíhá termosetická reakce a profil se vytvrzuje. Na výstupu z formy je hotový profil tažen podávacím zařízením a dělen na požadované délky, většinou šestimetrové. [3]



Obr. 13. Vytvrzený profil. [3]

Další automatizovanou výrobou kompozitních výrobků je dále např. navíjení, atd., .Toto zavedení automatizované výroby si vynucuje změny formy vstupních surovin a jejich ekonomika je tedy silně závislá na objemu výroby. Výsledné kompozity mají však reprodukovatelné vlastnosti, velmi dobré tolerance a existuje o nich relativně značné množství informací použitelných pro konstrukční výpočty. Pro informaci jsou uvedeny některé parametry různých technologií výroby FRC:

Tab. 7. Porovnání nákladů a efektivnosti různých technologií výroby kompozitů.[2]

Technologie	Produkční cyklus	Hodnota zboží v Kč vyrobená za 1hod.
Lisování	3 minuty	800-4000
Autokláv	8 hodin	40-500
Navíjení	4 hodiny	100-600
Membránové lis.	1 hodina	40-200
Ruční kladení	5 hodin	60
Pultruze	0,5-3 m/min	2000-10000

Při navrhování konstrukcí a zařízení z kompozitů je výběr materiálů komplikován nejen neizotropií vlastností kompozitů (závislost vlastností na směru působení vnějšího napětí), ale i velkým množstvím možných kombinací pojivo/výztuž a technologií výroby. Pro výběr

vhodného materiálu je vedle fyzikálních vlastností důležitá také jejich cena. V roce 2006 stál např. 1 kg skleněných vláken 2-3 €, aramidy 20-30 €, borová vlákna 30 € a nejdražší uhlíková 1000 €. Tato komplikace a zvýšená obtížnost výběru jsou však více než kompenzovány možnostmi navrhovat s konečným výrobkem i kompozitní materiál podle toho, jaké typy namáhání budou na výrobek působit. Tvarová variabilita nabízená kompozity není v mnoha případech za použití tradičních materiálů (ocel, hliník, atd.) vůbec možná. Tyto nové konstrukční „stupně volnosti“ však mohou být využity pouze v případě, že se konstruktér seznámí s obrovským intervalem vlastností, které mohou kompozity nabídnout a s jejich praktickou použitelností z hlediska ceny, pracnosti montáže a užitných vlastností. Do značné míry zde platí pravidlo, že pouhá záměna ocelového dílce kompozitním nevede ve většině případů k žádoucímu efektu ani z hlediska užitných vlastností ani z ekonomického hlediska. Výjimkou jsou aplikace, kdy FRC poskytují soubor vlastností jediným tradičním materiálem nedostupné:

- vynikající odolnost proti korozi v širokém spektru agresivních prostředí
- nízká měrná hmotnost (4x lehčí než ocel)
- snadná údržba
- vysoká tvarová komplexnost relativně snadno dosažitelná
- vynikající tepelné a elektrické izolační vlastnosti
- zanedbatelné ztráty elektromagnetického záření (kryty telekomunikačních a radarových antén)
- snadné probarvení v objemu, možná průsvitnost, snadné úpravy povrchu
- malý odpor proudění tekutin (při aplikacích v trubkách).

Přestože počátečními parametry, které rozhodují o výběru kompozitů pro danou aplikaci, jsou mnohdy nemechanické vlastnosti FRC, úspěšnost konečné aplikace nebo výrobku je mechanickými vlastnostmi FRC podstatně ovlivněn. Z hlediska konstruktérských požadavků je možno tyto vlastnosti rozdělit do dvou kategorií - okamžité (modul pružnosti, pevnost, rázová houževnatost, atd.) a dlouhodobé (creep, relaxace, stárnutí pod napětím, atd.).

Ve srovnání s klasickou měkkou ocelí mají jednoduché GRP polyester/sklo vyšší pevnost a nižší modul pružnosti. [2]

Tab. 8. Srovnání fyzikálních vlastností různých konstrukčních materiálů. Vlastnosti jsou vztaženy na vlastnosti tažených profilů firmy Prefa, a.s. Brno obsahujících 50% skleněných vláken v polyesterové pryskyřici.[2]

Vlastnost	FRC	Hliník	Ocel	Dřevo (borovice)
Hustota	1.0	1.3	4.0	0.3
Lineární roztažnost	1.0	3.0	2.0	0.5
Tepelná vodivost	1.0	300	80	0.2
Tuhost	1.0	1.2	1.7	0.6
Pevnost – tah	1.0	0.4	1.0	0.1
Pevnost – ohyb	1.0	0.7	1.1	0.3

Jak je již z tabulky zřejmé, namáhání, které jsou stejné jak v kompozitu, tak v oceli, můžou v kompozitech plněnými vlákny vyvolat větší deformace, než je tomu u oceli. Konstrukční postupy jsou proto více ovlivněny tuhostí FRC a limitujícími faktory jsou předeepsaná maximální dovolená deformace konstrukce spíše než její pevnost (tu mají kompozity většinou vyšší než konstrukční oceli). V současné době dosahují kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny modulu pružnosti stejné nebo vyšší než ocel, takže i tato hranice postupně mizí.

3 BIMODULARITA

Bimodulární materiály vykazují výrazně odlišné hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku.

3.1 Úvod

Bimodulární chování různých materiálů bylo známo a zdokumentováno již v minulosti. Již v 1963 Clark ukázal, že několik směsí - kompozitů složených z pryže a následujících materiálů - umělého hedvábí, ocelového drátu nebo nylonového vlákna - vykazovaly významně odlišné moduly v tlaku a tahu. Podobně Patel (1976) shledal v kompozitech složených z pryže s polyesterovými či aramidovými vlákny významné bimodulární chování (poměr $E_t/E_c = 59$ pro kompozit vlákna polyesteru a pryže a poměr $E_t/E_c = 294$ pro kompozit vlákna aramidu a pryže; kompozit ocelových vláken a pryže nevykazoval účinek bimodularity ve významném rozsahu. I u další materiálů byla prokázána bimodularita. Patří sem: kompozity z aramidu (Zweben, 1978; Piggott and Harris, 1980), uhlíkové kompozity (Jones and Nelson, 1976), porézní nerezová ocel (Ducheyne et al., 1978), skleněná vlákna v epoxidové pryskyřici – matrici (Davis and Zurkowski), bórová vlákna v epoxidové pryskyřici - matrici (Air Force Materials Lab, 1971), uhlíková vlákna v uhlíkové matrici (Kratsch et al., 1972), granulovaný ZTA uhlík (Seldin, 1966) a granulovaný ATJ-S uhlík (Starrett a Pears, 1973). Poměr E_t/E_d pro tyto materiály je v rozsahu od 1,2 do téměř 300 - viz tabulka 9.

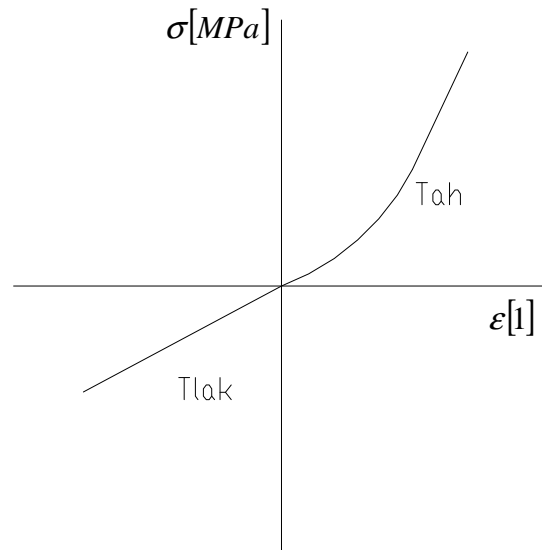
[15]

Tab. 9. Poměr E_t/E_c pro různé materiály.

Materiál	Poměr E_t/E_c
aramid/polyester	1,15
sklo/epoxid	1,25
bór/epoxid	0,8
uhlík/epoxid	1,4
tkanina/pryž	2,6
různé tkaniny/pryž	2 - 14
vlákna polyesteru/pryž	59
vlákna aramid/pryž	294
vlákna umělého hedvábí/pryž	278

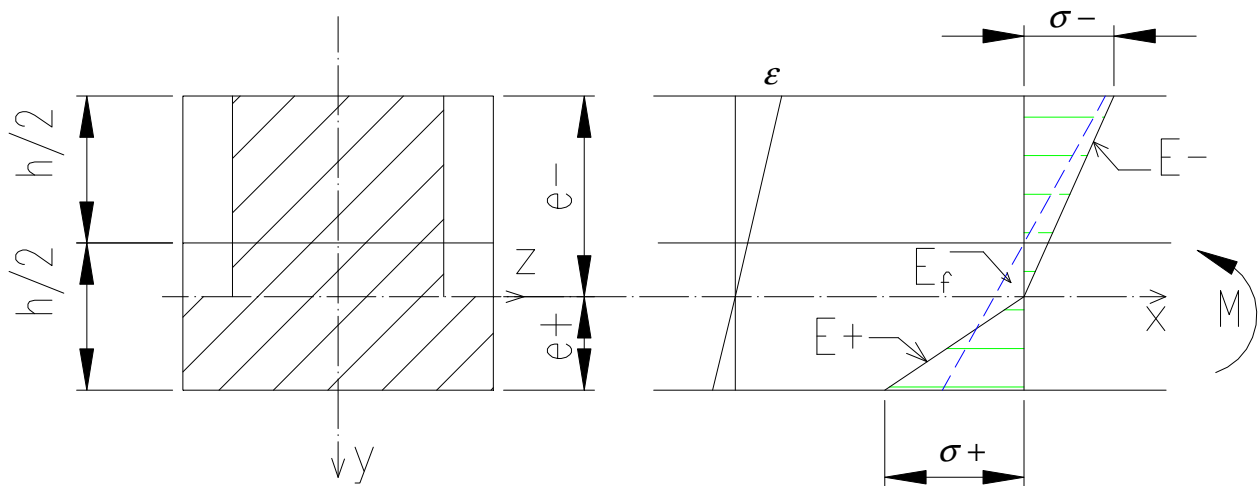
3.2 Mechanismy pro bimodulární chování

Ačkoli jev bimodularity byl pozorovaný pro řadu materiálů (většinou vláknité), existuje jen málo teorií jak vysvětlit proč nějaké materiály jsou bimodulární. Zdá se, že mechanismy zodpovědné za bimodularitu nejsou dobře vysvětleny. Bert (1979) uvádí, že všechny mechanické modely pro vláknité kompozity mohou být rozděleny do dvou tříd: "*mean fiber angle*" model a "*tie-bar/column on elastic foundation*" model. Tyto modely vysvětlují bimodulární chování předpokladem, že vláknitá vyztuž má již nějaké počáteční zakřivení. Toto zakřivení mizí v tahu, ale pod napětím v tlaku vrůstá. Následkem toho tahové moduly vykazují větší hodnoty než moduly v tlaku. Bylo prokázáno, že i malý stupeň zakřivení má za následek významné rozdíly mezi tahovými a tlakovými moduly (Herrmann et al., 1967). Modely předpokládají, že materiál matrice je relativně flexibilnější ve srovnání s materiálem vláknem. Některé materiály, jako aramidová vlákna, mohou být bimodulární kvůli jejich chemické struktuře (molecular conformation) [15]



Obr. 14. Typická bimodulární odezva pro jednosměrně vyztuženou laminu.

3.3 Modul pružnosti v ohybu bimodulárního materiálu



Obr. 15. Princip bimodulárního ohybu.

Vzorek pro ohybovou zkoušku má průřez obdélníkového tvaru - Obr. 15. Z podmínky nulového součtu osových sil v průřezu je poloha neutrální osy

$$\frac{e^+}{e^-} = \eta \tag{1}$$

S označením

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \tag{2}$$

Poněvadž $e_+ + e_- = h$, je

$$e_- = \frac{h}{1+\eta} \quad e_+ = \frac{\eta \cdot h}{1+\eta} \quad (3)$$

Pak tuhost v ohybu je

$$K_f = \frac{b}{3} \cdot (E_+ \cdot e_+^3 + E_- \cdot e_-^3) = E_- \cdot b \cdot e_-^3 \cdot (1+\eta)/3 \quad (4)$$

Vztah pro *modul pružnosti v ohybu* vyplývá z porovnání výrazů pro ohybovou tuhost homogenního průřezu s výrazem

$$E_f \cdot b \cdot h^2 = E_- \cdot b \cdot e_-^3 \cdot (1+\eta)/3 \quad (5)$$

Odtud je po úpravě

$$\frac{E_f}{E_+} = \left(\frac{2 \cdot \eta}{1+\eta} \right)^2 \quad (6)$$

[15]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

4.1 Tahová zkouška

Statická zkouška jednosměrným (osovým) tahem je pravděpodobně nejjednodušší a nejobvyklejší mechanická zkouška. Tato zkouška se používá k určení *modulu pružnosti* E_t (poměr rozdílu napětí σ_2 mínus σ_1 a odpovídajícího rozdílu poměrného prodloužení $\varepsilon_2 = 0,0025$ mínus $\varepsilon_1 = 0,0005$), *pevnosti v tahu* (max. napětí v tahu, působící na zkušební těleso během zkoušky) a *Poissonovův poměr* μ (poměrné zúžení ε_n v jednom ze dvou normálových rozměrů – kolmých k ose protažení, v počáteční pracovní části zkušební tělesa k odpovídajícímu poměrnému prodloužení ε - ve směru protahování). V případě kompozitních materiálů je tahová zkouška

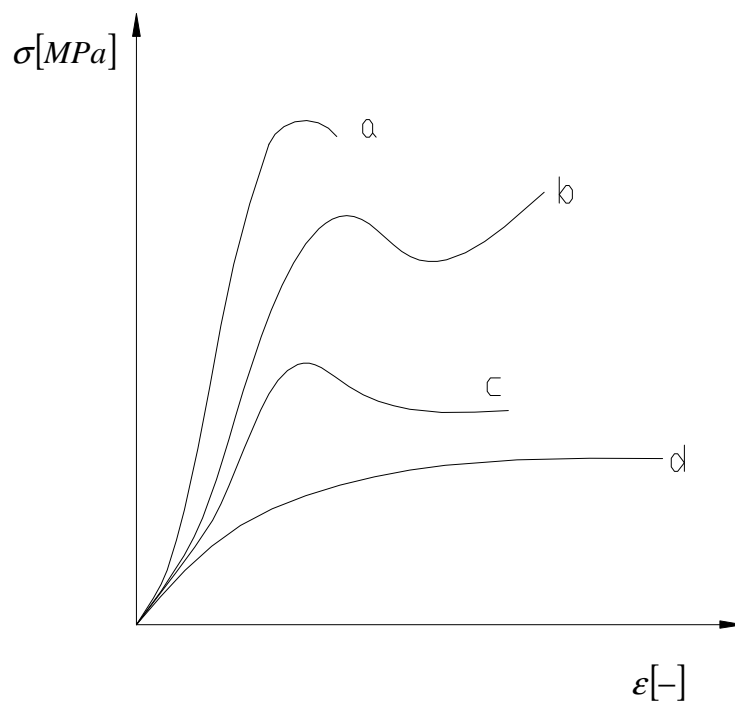
obvykle prováděna na plochých vzorcích. Údaje zaznamenávané při tahové zkoušce se skládají z měření působícího zatížení a z měření přetvoření jak ve směru, tak kolmo k zatížení. Z těchto údajů, snímaných až do porušení, může být lehce vynesena křivka napětí – přetvoření, tzv. pracovní diagram materiálu a určeny žádané materiálové vlastnosti. [15]

Elektronické trhací stroje umožňují automatický průběžný přepočítání zátěžné síly F na napětí σ (podle vztahu $\sigma = \frac{F}{S_0}$) a prodloužení zkušební tyče ΔL na deformaci ε (podle vztahu

$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$). Tahové diagramy potom mohou být vynášeny v souřadnicích napětí σ [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]

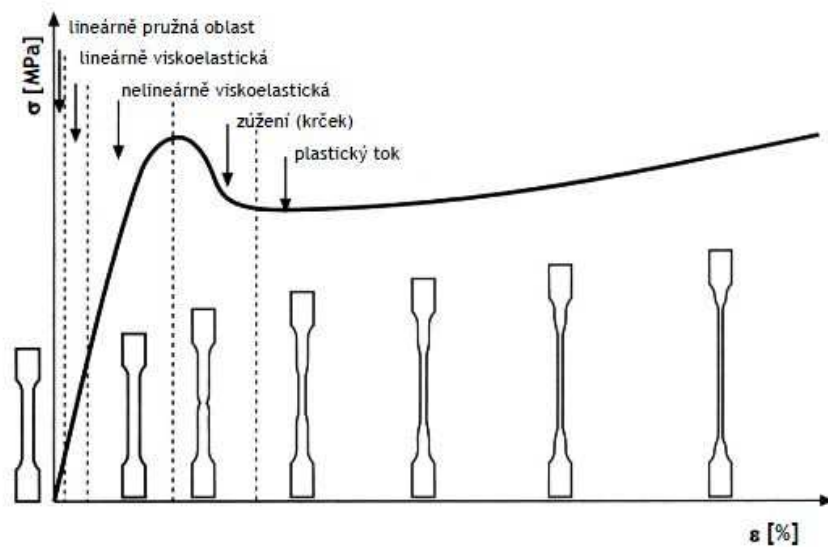
– deformace ε [-]. Počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče S_0 [mm^2] i počáteční měřená délka L_0 [mm] jsou konstanty a proto tahové diagramy vynášené v souřadnicích $\sigma - \varepsilon$ jsou tvarově shodné s diagramy vynášenými v souřadném systému $F - \Delta L$; na osách jsou však jiné charakteristiky s odpovídajícími měřítky a jednotkami.

Mechanické vlastnosti polymerů jsou velmi rozdílné a silně závislé na teplotě. V praxi jsou vlastnosti ovlivněny tvarem výrobku, stavem materiálu po zpracování (orientace makromolekul, vnitřní pnutí, krystalizace, stupeň vytvrzení).

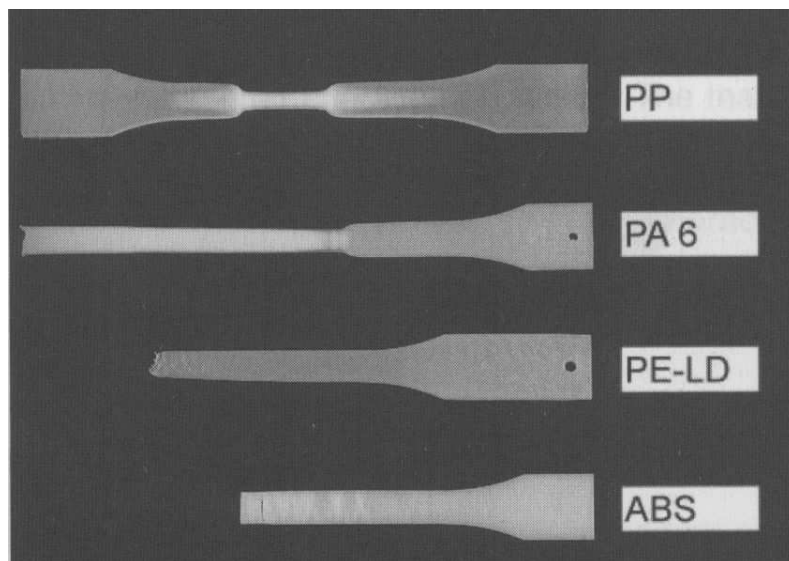


Obr. 16. Deformační křivky.

a – Křehké materiály, *b, c* – Houževnaté materiály s mezí kluzu, *d* – Houževnaté materiály bez meze kluzu.



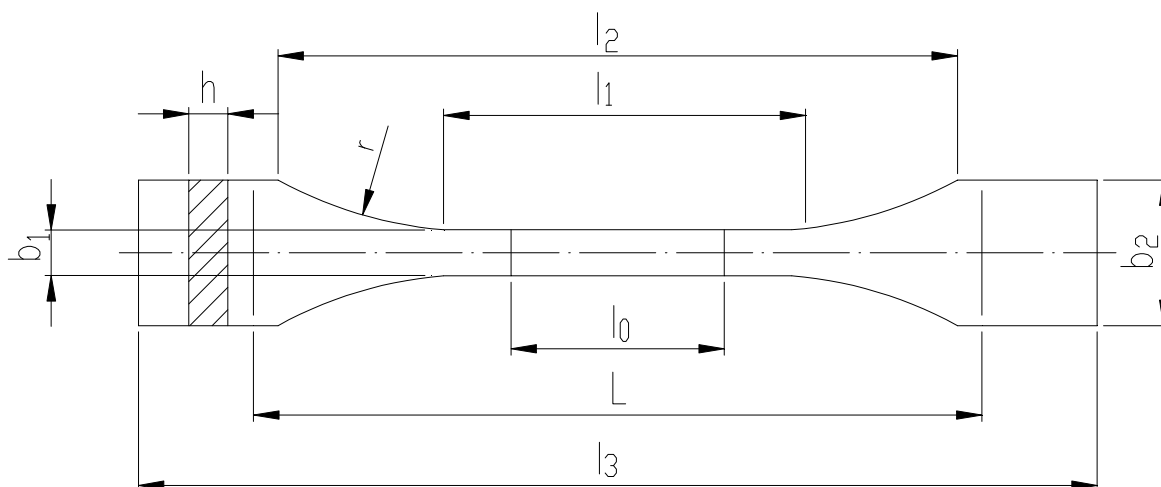
Obr. 17. Deformační křivka semikrystalického termoplastu. [16]



Obr. 18. Porušení materiálů při tahové zkoušce. [16]

4.1.1 Tvar a rozměry

Pokud možno, používají se zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1A a 1B, která jsou uvedena na obrázku 18. Typ 1A je preferován pro přímo tvářená víceúčelová zkušební tělesa, typ 1B pro mechanicky obráběná zkušební tělesa. [25]



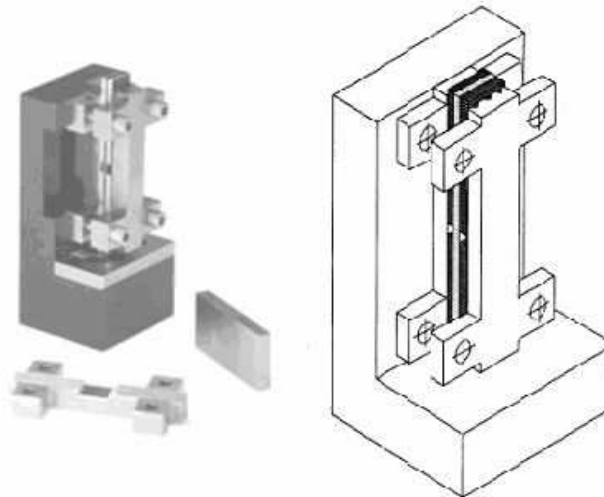
Obr. 19. Zkušební těleso typu 1A a 1B.

Tab. 10. Rozměry zkušebního tělesa.[25]

Rozměry zkušebního tělesa		
Typ tělesa:	1A [mm]	1B [mm]
Celková délka – l_3		$\geq 150^{1)}$
Délka zúžené rovnoběžné části – l_1	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
Poloměr – r	20 až 25	$\geq 60^{2)}$
Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi – l_2	104 až $113^{3)}$	106 až $120^{3)}$
Šířka konců – b_2		$20,0 \pm 0,2$
Šířka zúžené rovnoběžné části – b_1		$10,0 \pm 0,2$
Doporučná tloušťka – h		$4 \pm 0,2$
Počáteční měřená délka – L_0		$50 \pm 0,5$
Počáteční vzdálenost čelistí – L	115 ± 1	$l_2 \begin{smallmatrix} +5 \\ 0 \end{smallmatrix}$
¹⁾ Pro některé materiály může být délka lopatek prodloužena (např. $l_3=200\text{mm}$) pro omezení lámání nebo vyklouzávání v upínacích čelistech.		
²⁾ $r = [(l_2-l_1)^2 + (b_2-b_1)^2] / 4(b_2-b_1)$		
³⁾ Tato délka závisí na l_1 , r , b_1 a b_2 , musí však ležet v uvedeném rozmezí		

4.2 Tlaková zkouška

Statické zkoušky jednosměrným (osovým) tlakem jsou podobné tahovým zkouškám, avšak vzniká při nich daleko více problémů. Největší problém je nezbytnost zabránit geometrickému vybočení vzorků. Tento požadavek je zvlášť důležitý u tenkých plochých vzorků a jeho splnění je obvykle zajištěno provedením řady bočních podpěr, které zabraňují vzorku vybočit ze své roviny. Použití bočních podpěr lze vyloučit užitím vzorků ve tvaru bloku ty lze připravit mnohem obtížněji. Při působení tlaku na jednosměrně vyztuženou vrstvu ve směru os vláken dochází k poruše ztrátou stability vláken (vzpěr). Hodnota pevnosti je značně citlivá na zvlnění vláken a na úroveň mezifázové soudržnosti. Při malé soudržnosti vláken a matrice dochází k rozvrstvení vzorku a je dosahována nízká pevnost v tlaku, zatímco při dobré soudržnosti dojde k ztrátě stability koordinovaným vybočením vláken, umožněným smykovou deformací matrice. Největší pevnost v tlaku mají kompozity s vysoce tuhými vlákny o velkých průměrech, tj. vlákny bóru nebo SiC vyrobených depozicí par na vláknový substrát (CVD metoda). Přípravek pro tlakovou zkoušku dle ASTM (American Society for Testing Materials) D- 695 je ukázán na následujícím obr. 20: [15]



Obr. 20. Přípravek pro tlakovou zkoušku. [15]

4.2.1 Tvar a rozměry

Zkušební těleso musí mít tvar přímého pravoúhlého hranolu, přímého válce nebo trubky.

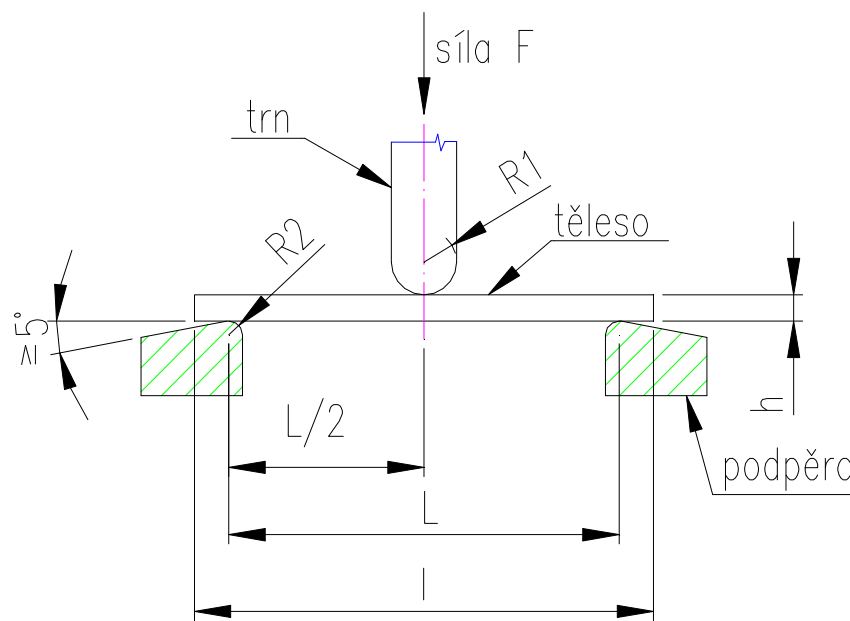
Tab. 11. Přednostně používané rozměry zkušebních těles.[26]

Přednostně používané rozměry zkušebních těles				
Typ zkušebního tělesa	Měřený parametr	Délka, l	Šířka, b	Tloušťka, h
A	Modul pružnosti [mm]	50±2	10±0.2	4±0.2
B	Pevnost [mm]	10±0.2		

4.3 Ohybová zkouška

Nejběžnější ohybové zkoušky jsou tříbodová a čtyřbodová zkouška. Při těchto zkouškách se plochý vzorek podepře na dvou koncích a zatíží buď středovým břemenem (tříbodová zkouška) – Dvě podpěry a zatěžující trn uprostřed jsou uspořádány dle obr. 19. Rovnoběžnost podpěr a trnu musí být v rozmezí $\pm 0,02$ mm. Poloměr R1 trnu a poloměr R2 podpěr musí být následující: R1=5 mm \pm 0,1 mm, R2=2 mm \pm 0,2 mm pro tloušťky tělesa \leq 3 mm, R2=5 mm \pm 0,2 mm pro tloušťky tělesa $>$ 3 mm. Nebo dále dvěma symetricky umístěnými břemeny (čtyřbodová zkouška). Středové břemeno při tříbodovém ohybu vyvolá ohybový moment v nosníku, který se mění lineárně od nuly u podpor k maximální hodnotě uprostřed. Současně je vyvoláno rovnoměrně rozdělené interlaminární smykové napětí po celé délce vzorku. To může způsobit předčasné porušení vlivem nízké interlaminární smy-

kové pevnosti kompozitů. Dvě symetrická břemena při čtyřbodovém ohybu vyvolají ohybové momenty lineárně rostoucí od nuly na podpoře k maximální hodnotě pod břemenem. Ohybový moment mezi břemeny zůstává konstantní. V tomto případě nevzniká žádné smykové napětí mezi břemeny a tato část nosníku je tedy namáhána čistým ohybem. Interlaminární napětí jsou vyvolána pouze ve vnějších částech rozpětí, tj. mezi břemeny a podporami. Z hlediska stavu napětí je proto čtyřbodová ohybová zkouška vhodnější, kdežto tříbodová ohybová zkouška je snáze proveditelná. Určení správné hodnoty pevnosti v ohybu vyžaduje, aby porušení nastalo přetržením vláken, a nikoliv interlaminárním smykem. To je zajištěno při velkém poměru rozpětí k výšce vzorku a lze to určit nalezením interlaminárního smykového namáhání nosníku. Rozpětí nosníku tedy neovlivňuje interlaminární smyk, zatímco větší rozpětí vede k vyššímu ohybovému momentu, a tím k větší tendenci podélného porušení. Větší poměr rozpětí k výšce však vede k větším průhybům, které naopak vyvolávají potřebu uvažovat při výpočtu ohybového momentu horizontální síly vzniklé na podporách. Poměr vzdálenosti podpor ku tloušťce tělesa by měl být minimálně 16:1, aby smykové zatížení bylo malé. Normy ASTM doporučují poměry 16:1, 32:1, 40:1 a 60:1 [15]



Obr. 21. Poloha tělesa na začátku zkoušky.

4.3.1 Tvar a rozměry

Předností rozměry zkušebních těles musí být: Délka $l = 80 \pm 2$ mm, šířka $b = 10 \pm 0,2$ mm, tloušťka $h = 4 \pm 0,2$ mm. U žádného tělesa se tloušťka ve střední třetině délky nesmí odchýlovat od střední hodnoty více jak o 2%. Odpovídající maximální odchylka šířky je 3%. průřez musí být pravoúhlý, bez zaoblených hran. [27]

5 TERMOPLASTY

Termoplasty, ke kterým patří například polystyrén, polypropylén, polyetylén, polykarbonát, polyethyléntereftalát a další, jsou tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty nad jistou charakteristickou teplotu. Touto teplotou může být teplota tání (T_m) u semikrystalických polymerů jako PP, PE, PEEK, PA atd. nebo teplota skelného přechodu (T_g) u amorfních polymerů jako PMMA, PS, PC atd. Po ochlazení pod tuto charakteristickou teplotu tekuté polymery opět přejdou do pevného skupenství. Charakteristickým strukturním znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek (několik tisíc až několik milionů). Z tohoto důvodu bývá tento typ makromolekul označován jako polymer. Jednotlivé makromolekuly nejsou vzájemně vázány chemickými vazbami. Jejich vzájemné interakce, které zaručují kohezní pevnost polymerního tělesa, jsou většinou slabé, vodíkové můstky atd. [1]

Z hlediska struktury sortimentu plastů představují asi 85% celkové výroby termoplasty. Na objemu produkce termoplastů mají největší podíl tři základní skupiny – polyolefinů, polyvinylchloridové plasty a polystyrenové plasty. I když je rozvoj výroby reaktoplastů značně pomalejší, než rozvoj výroby termoplastů, neznamená to, že by reaktoplasty ztrácely na významu. Reaktoplastům jsou zpravidla vyhrazeny zpracovatelské oblasti s vyššími nároky na tvarovou stálost za tepla, tvrdost a odolnost proti rozpouštědlům a s požadavky na menší investiční náročnost při zpracování. Rozšíření aplikace hlavních typů termoplastů umožnil mimo jiné i rozvoj termoplastů ztužovaných různými typy vláknitých plniv a rozvoj zpěňovatelných typů, vhodných pro strukturně lehčené výrobky, tvářené vstřikováním i vytlačováním. [18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

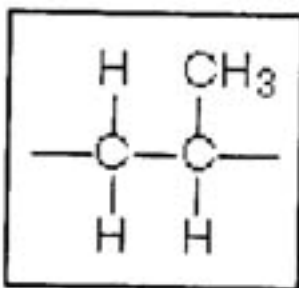
Jako první bod, budou zhotoveny zkušební tělesa technologií vstřikování na vstřikovacím stroji ARBURG 420 C Allrounder Advance . Jako materiál se využijí: Polypropylén (PP, PP+15%GF, PP+30%GF), polyamid (PA6, PA6+30%GF), polystyrén (PS) a polykarbonát (PC). Následně budou na těchto zkušebních tělískách provedeny mechanické zkoušky a to tahová zkouška, tlaková zkouška a zkouška ohybem. Pro zkoušku tahem a ohybem se využijí zkušební tělíska již nikterak upravená (produkt vstřikování – výstřik), kdežto zkušební tělíska pro zkoušku na tlak se výstřiky musí ještě délkově zkrátit, dle příslušné normy ČSN. Po provedení zmíněných mechanických zkouškách proběhne vyhodnocení naměřených výsledků – porovnání zjištěných modulů pružnosti v tahu, tlaku, ohybu u neplněných termoplastů a termoplastů plněných.

7 POUŽITÉ MATERIÁLY

7.1 Polypropylen – DOW PP H777-25R, SCOLEFIN PP 53G10-0

Charakteristika

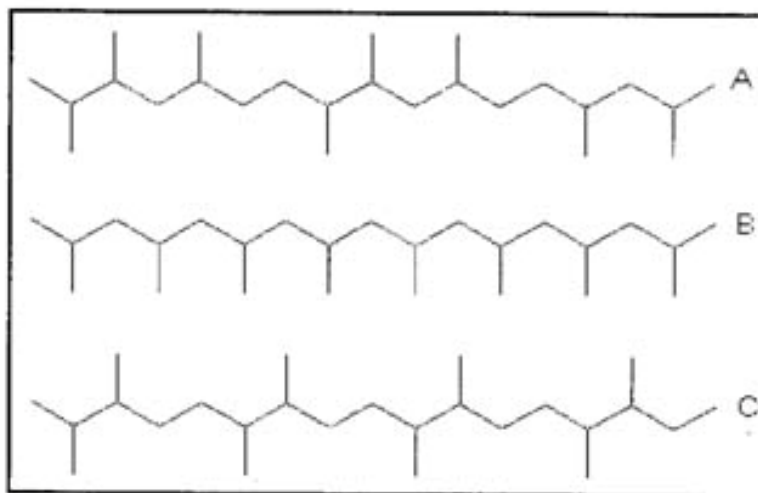
Polypropylen (PP) je jeden z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických materiálů ze skupiny polyolefinů. Polypropylen je používán v extrémně široké škále aplikací, ať už průhledný nebo zbarvený pigmenty, jako jsou obaly na potraviny, tkaniny, automobilové součásti, lékařské přístroje a spotřební zboží. Vlastnosti polypropylenu jsou určeny použitou polymerací a použitými katalyzátory. Jak je vidět na obrázku 20, základní jednotka PP se skládá ze tří uhlíků a šesti vodíkových atomů.



Obr. 22. Základní jednotka polypropylenu.

[17]

PP je lineární polymer. Charakteristická je methylová skupina (CH₃). V závislosti na prostorovém uspořádání (obr. 21) těchto skupin k hlavnímu uhlíkovému -C-C- řetězci rozlišuje se mezi ataktickým PP (aPP ; Na obrázku: A) s nepravidelným uspořádáním skupin -CH₃, izotaktickým PP (i-PP ; Na obrázku: B) s CH₃ skupinami na jedné straně uhlíkového řetězce a syndiotaktickým PP (sPP ; Na obrázku: C) se střídavým uspořádáním skupin -CH₃. Ataktický polypropylen má velmi nízkou teplotu tání a je prakticky nežádoucím produktem. Vzrůstající takticita (pravidelnost CH₃ uspořádání) vede ke vzrůstu stupně krystalinity, teploty tavení, pevnosti a tvrdosti. Má přidělené mezinárodní identifikační číslo pro plasty: 5. [17]



Obr. 23. Molekulární struktura polypropylénu.[17]

Zpracování

Zpracovává se vstřikováním při teplotě 205 až 280 °C vytlačováním na trubky, desky, fólie a profily při teplotě 200 až 270 °C. Desky a bloky lze také lisovat z granulí při teplotě 180 až 250 °C. Desky a trubky se spojují svařováním polypropylenovým drátem. Fólie, podobně jako u PE, lze svařovat sálavým teplem nebo tepelným impulsem. [18]

Vlastnosti

Krátkodobě odolává teplotám až 140 °C. Vyniká výbornými elektroizolačními a dielektrickými vlastnostmi, při zpracování vykazuje nejnižší závislost na kolísání technologických parametrů. PP má značně menší sklon ke korozi pod napětím než ostatní polyolefiny, větší tvrdost a pevnost v ohybu, ale nižší rázovou houževnatost. Má poměrně dobrou odolnost proti opotřebení, vysokou odolnost proti chemickým činidlům s výjimkou silně oxidačních látek.

Tab. 12. Přehled základních vlastností DOW PP H777-25R. [19]

Vlastnosti		Hodnota	Jednotky	Norma
Fyzikální				
Hustota		0,9	g/cm ³	ISO 1183
Index toku taveniny	230 °C/21,6 N	25	g/10 min	ISO 1133
Mechanické				
Prodloužení na mezi kluzu	50 mm/min	10	%	ISO 527
Pevnost v tahu na mezi kluzu	50 mm/min	33	MPa	ISO 527
Modul pružnosti v ohybu		1400	MPa	ISO 178
Vrubová houževnatost Charpy	+23 °C	3	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Tepelné				
Teplota měknutí podle Vicata	10 N	150	°C	ISO 306A
Teplota průhybu při zatížení	0,49 MPa	80	°C	ISO 75B

Tab. 13. Přehled základních vlastností SCOLEFIN PP 53G10-0. [19]

Vlastnosti		Hodnota	Jednotky	Norma
Fyzikální				
Hustota		1,12	g/cm ³	ISO 1183B
Index toku taveniny	230 °C/21,6 N	15	g/10 min	ISO 1133
Popel	625 °C	30	%	DIN EN 60
Mechanické				
Pevnost v tahu	5 mm/min	90	MPa	ISO 527
Modul pružnosti v tahu		6800	MPa	ISO 527
Tvrdost vtlačováním kuličky		115	MPa	DIN ISO 2039/1
Rázová houževnatost Charpy	+23 °C	42	kJ/m ²	ISO 179
Vrubová houževnatost Charpy	+23 °C	10	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Tepelné				
Teplota průhybu při zatížení	1,82 MPa	145	°C	DIN EN ISO 75B
Zpracovatelské				
Teplota taveniny		200-240	°C	
Teplota formy		40-60	°C	
Sušení		Není nutné	°C	

7.2 Polyamid - PA 6 Ravamid B-NC; PA 6 Ravamid B GF30 NC

Charakteristika

Polyamidy patří mezi tzv. konstrukční plasty, používané k výrobě namáhaných technických součástí. Vynikají vysokou mechanickou pevností při statickém a dynamickém namáhání, nízkým tečením i při dlouhodobém zatížení a použitelností v širokém rozsahu teplot. Dnes je využívána řada základních druhů polyamidů, které se liší sice svým chemickým složením a způsobem výroby, ale podobají se základními vlastnostmi. Označují se čísly, charakterizující počet atomů uhlíku výchozích sloučenin. [19]

Podle výrobního způsobu je možno polyamidy dělit do těchto skupin:

- polyamidy na bázi ω -aminokyselin a jejich laktonů
- polyamidy na bázi dikarboxylových kyselin a diaminů
- polyamidy vícesložkové (např. diamin a karboxylová kyselina + ω -aminokyselina)
- polyamidy obsahující v řetězci aromatické jádro

Mezi technicky nejdůležitější a nejvíce užívané patří polyamidy první a druhé skupiny.

Zpracování

Polyamidy se dají dobře mechanicky obrábět různými způsoby, např. soustružením, řezáním, frézováním atd. Polyamidové součásti se také dají navzájem spojovat lepením nebo svařováním teplem (tepelným impulsem). Typické PA jsou v tuhém stavu 30 až 50 % krystalické a neprůhledné a zpracovávají se ze 74 % vstříkáním, 22% vytlačováním, zbytek litím a ostatními postupy. [20]

Vlastnosti:

PA mají úzký rozsah teplot tání a tuhnutí. Všechny PA odolávají účinku pohonných látek, olejů a velké řady technických rozpouštědel. PA mají relativně nízkou tavnou viskozitu ve srovnání s ostatními termoplasty. Mají vysokou houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru a jejich dobré elektroizolační charakteristiky jsou vlastnosti, na nichž spočívá použití PA jako polymerních materiálů. Mechanické vlastnosti jsou závislé na typu, molekulové hmotnosti a obsahu vody. [18]

Tab. 14. Přehled základních vlastností PA 6 Ravamid B-NC. [19]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Norma	
Fyzikální				
Hustota	1,14	g/cm ³	ISO 1183	
Nasákavost	23 °C/24 hod	1,5 – 2,0	%	ASTM D570
Mechanické				
Mez pevnosti v tahu	80	MPa	ISO 527	
Prodloužení při přetržení	>80	%	ISO 527	
Mez pevnosti v ohybu	>100	MPa	ISO 178	
Modul pružnosti v ohybu	2600	MPa	ISO 178	
Vrubová houževnatost IZOD	+23 °C	>6	kJ/m ²	ISO 180/1A
Tepelné				
Teplota měknutí podle Vicata	>200	°C	ISO 306/B50	
Teplota průhybu při zatížení	1,8 MPa	>60	°C	ISO 75B-2A

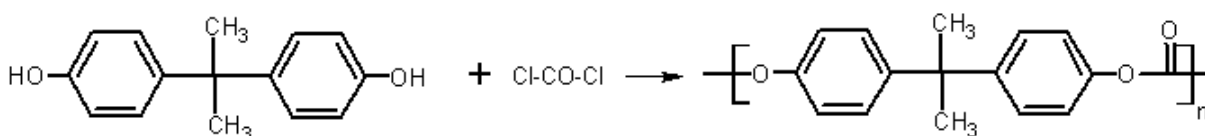
Tab. 15. Přehled základních vlastností PA 6 Ravamid B GF30 NC. [19]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Norma	
Fyzikální				
Hustota	1,34 – 1,36	g/cm ³	ISO 1183	
Nasákavost	23 °C/24 hod	1	%	ASTM D570
Mechanické				
Mez pevnosti v tahu	170	MPa	ISO 527	
Prodloužení při přetržení	3	%	ISO 527	
Mez pevnosti v ohybu	230	MPa	ISO 178	
Modul pružnosti v ohybu	>5500	MPa	ISO 178	
Vrubová houževnatost IZOD	+23 °C	>9	kJ/m ²	ISO 180/1A
Tepelné				
Teplota měknutí podle Vicata	>200	°C	ISO 306/B50	
Teplota průhybu při zatížení	1,8 MPa	>190	°C	ISO 75B-2A

7.3 Polykarbonát - PC Calibre 303 EP 22

Charakteristika

Polykarbonáty patří mezi termoplastické polymery čili termoplasty. Snadno se zpracovávají např. vstřikováním nebo lisováním za tepla. Mají dobrou tepelnou odolnost, odolnost proti nárazu a dobré optické vlastnosti. Patří proto mezi komoditní plasty. Jejich identifikační číselný kód je 7. Název polykarbonátů je odvozený od funkčních karbonátových (uhličitanových) skupin (-O-(C=O)-O-), které v jejich řetězci spojují monomerní jednotky. Nejběžnější typ polykarbonátu se vyrábí polykondenzací 4,4'-dihydroxy-2,2-difenypropanu (Bisfenolu A) s fosgenem podle zjednodušeného schématu:



Obr. 24. Polykarbonát. [21]

Polykarbonát se používá např. jako materiál pro výrobu domácího i laboratorního nádobí, elektronických přístrojů, displejů, osvětlení apod. Je také základním materiálem pro výrobu kompaktních disků. Prodává se např. pod obchodními názvy Lexan, Makrolon nebo Calibre.

Zpracování:

Největší podíl PC se zpracovává vstřikováním při teplotách 280 až 310 °C. Vstřikováním se vyrábějí hlavně technické dílce určené pro použití za vyššího mechanického a tepelného namáhání. Trubky, tyče, profily a tlusté fólie se zhotovují vytlačováním na jednošnekových strojích. PC lze v tavenině mísit s termoplasty (legovat). [20]

Vlastnosti:

PC vynikají vysokou rázovou houževnatostí i za velmi nízkých teplot, dobrou rozměrovou stabilitou až do 140 °C, dobrými elektroizolačními vlastnostmi, vysokou mechanickou pevností (zvláště v tahu), nízkou absorpcí vody, odolností proti UV-záření, značnou stálostí proti oxidaci až do 120 °C i dobrou odolností proti hydrolyze. Odolávají roztokům zředěných kyselin. Nedostatečná je jejich odolnost vůči dlouhodobému působení vroucí vody a páry, amoniaku a aminům. Také dlouhodobé působení methanolu způsobuje jejich degradaci. [20]

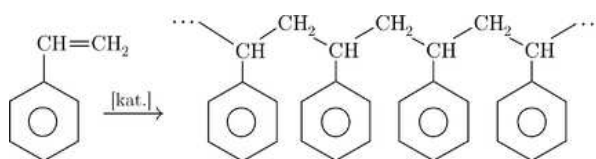
Tab. 16. Přehled základních vlastností PC Calibre 303 EP 22. [19]

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Norma	
Fyzikální				
Hustota	1,2	g/cm ³	ISO 1183B	
Index toku taveniny	300 °C/12,0 N	22	g/10 min	ISO 1133
Mechanické				
Mez pevnosti v tahu	65 - 70	MPa	ISO 527	
Mez kluzu	60	MPa	ISO 527	
Modul pružnosti v tahu	2300	MPa	ISO 527	
Modul pružnosti v ohybu	2400	MPa	ISO 178	
Vrubová houževnatost Charpy	+23 °C	20	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Tepelné				
Teplota měknutí podle Vicata	147	°C	ASTM D1525	

7.4 Polystyrén - KRASTEN 552 M

Charakteristika

Polystyrén patří mezi termoplasty do skupiny polyolefinů a jedná se o částečně amorfní polymer. Je velmi rozšířený pro svoje tepelně-izolační vlastnosti a vlastnosti ochranné, dále je také zdravotně nezávadný a proto se používá na tepelné izolace a obaly pro potraviny. V elektrotechnice se využívá jako izolátor např. u izolací káblů, elektrických vypínačů, cívek apod. Má přidělené mezinárodní identifikační číslo pro plasty: 6. Rozeznáváme dva základní druhy polystyrénu a to standardní termoplastický polystyrén („těžký“) a pěnový polystyrén (lehčený, EPS - expandovaný pěnový polystyrén, XPS – extrudovaný pěnový polystyrén). Prodává se také pod více obchodními názvy, jako je např. Luran, Lustron, Styropor, Styrodur, Styroflex a SageX. Polystyrén se vyrábí polymerací monomeru – styrenu. Reakcí vzniká polymerní uhlíkový řetězec ve kterém je na každém druhém atomu uhlíku vázaný fenyl C₆H₅ -.



Obr. 25. Polystyrén.

Jsou – li všechny fenylové skupiny uspořádané na jedné straně řetězce, jde o tzv. izotaktický polystyrén (nevyrábí se). V případě, že jsou fenylové skupiny rozmístěné nepravidelně po obou stranách řetězce, jde o tzv. ataktický polystyrén. Tato nepravidelnost zabraňuje krystalizaci. Syndiotaktický polystyrén, který vzniká použitím metallocenového katalyzátoru disponuje vysokým stupněm krystalizace.

Zpracování

Zpracování je velmi snadné pro jeho tokové vlastnosti, zvláště při nižší molekulové hmotnosti (oblast elastické deformace prakticky nemá). Zpracovává se všemi známými technologiemi. Vstřikování, vyfukování, obrábění, lepení. Na povrchu jej lze lakovat, pokovovat. [20]

Vlastnosti

Polystyren je průhledný tvrdý a zároveň velmi křehký plast. Je odolný vůči zásadám, minerálním kyselinám a většině vodních roztoků, vůči benzínu, avšak vůči ketonům a aldehydům není (polystyren je obecně málo odolný vůči organickým rozpouštědlům). Navíc je poměrně citlivý na UV záření. Hustota standardního polystyrenu se pohybuje v rozmezí 1,04 až 1,09 g / cm³. Při pěnovém, kde většinu objemu tvoří vzduch, je to jen 0,02 až 0,06 g / cm³. Standardní polystyren je tvrdý, citlivý na náraz a jeho vlastnosti se časem a povětrnostními vlivy rychle zhoršují (křehne, vytváří mnoho trhlin). Odolnost vůči teplotě je také velmi nízká - použitelný je do 70 ° C, pro rychlé stárnutí se však používá pouze do teploty 55 ° C. Tání krystalů nastává již při teplotě 90 ° C, teplota skelného přechodu 95 ° C. Polystyren hoří žlutým, velmi dýmavým plamenem provázeným sladkým zápachem po benzenu. Produkty hoření jsou při vdechování zdraví škodlivé. Pěnový polystyren má oproti klasickému polystyrenu nižší mechanickou pevnost a elasticitu. Je bílý, neprůhledný a vyznačuje se velmi nízkou tepelnou vodivostí a hustotou. [22]

Tab. 17. Přehled základních vlastností PS KRASTEN 552 M. [19]

Vlastnosti		Hodnota	Jednotky	Norma
Fyzikální				
Hustota		1,04 – 1,09	g/cm ³	ISO 1183B
Index toku taveniny	200 °C/50 N	6,5	g/10 min	ISO 1133
Mechanické				
Napětí v tahu při přetržení		22	MPa	ISO 527
Mez kluzu	+23 °C	30	MPa	ISO 527
Prodloužení při přetržení	+23 °C	40	%	ISO 527
Modul pružnosti v tahu		2100	MPa	ISO 527
Mez pevnosti v ohybu		40	MPa	ISO 178
Vrubová houževnatost Charpy	+23 °C	8,5	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Tepelné				
Teplota měknutí podle Vicata		147	°C	ASTM D1525

8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ

8.1 Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advance

Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advance je vybaven 32 bitovým multiprocesorovým řídicím systémem SELOGICA, který umožňuje použití stejného obsluženého rozhraní pro různé konstrukční řady. Intuitivní programování procesů pracovního cyklu stroje prostřednictvím grafických symbolů umožňuje dosažení krátkých časů při seřizování. Přímá kontrola správnosti všech zadávaných dat současně zajišťuje vysoký komfort a bezpečnost obsluhy. V dialogu člověka a stroje lze tak snadno sledovat i komplexní procesy. [23]

Tento vstřikovací stroj je vhodný pro řešení široké škály úkolů v oblasti vstřikování a také jej lze použít pro všechny speciální oblasti zpracování plastů, jako je např. vícekomponentní vstřikování nebo v oblasti zpracování LSR (Liquid silicone rubbers), či PET-materiálů.



Obr. 26. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advance. [24]

Tab. 18. Technické specifikace.

Technické specifikace stroje ARBURG 420 C Allrounder Advance			
Uzavírací síla	1000 kN	Řízení energie vstřík. čerpadla	22 kW
Výška formy (min)	250 mm	Otevírací síla (max)	35/350 kN
Upínací deska	605 x 605 mm	Vzdálenost mezi sloupky	420 x 420 mm
Objem dávky	182 cm ³	Síla vyhazovacích kolíků (max)	40 kN
Účinná délka šneku	20 L/D	Průměr šneku	40 mm
Čas otvíracího cyklu	2,0 – 329 s – mm	Tah šneku (mm)	145 mm
Rychlost toku taveniny (max)	128/168/212 cm ³ /s		

8.2. Zkušební stroj Zwick Roell 1456

Pro realizaci zkoušek a měření příslušných modulů pružnosti se využilo přístroje Zwick Roell 1456 s teplotní komorou (-80 °C/+250 °C). Přístroj je určen pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Pro nastavení jednotlivých parametrů zkoušek, dle norem ČSN, reálné sledování průběhu zkoušek a jejich výsledky je k dispozici počítač se softwarem Test Expert II, který je součástí přístroje. Pro zkoušku tahem bylo pro měření protažení použito makro - extenzometru.

Tab.19. Technické specifikace přístroje Zwick Roell 1456

Technické specifikace přístroje Zwick Roell 1456	
Maximální zkušební síla	20 kN
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg
Max. rychlost posuvu příčnicku	800mm/min
Extenzometry pro měřené protažení	macro
	přídavný



Obr. 27. Univerzální zkušební stroj s teplotní komorou. [28]

9 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Při statistickém vyhodnocení byly použity vztahy:

Aritmetický průměr: „ \bar{x} “ (výběrový) s n jednotlivých výsledku x_i ($i = 1, 2, 3 \dots n$) je suma výsledku dělená jejich počtem n:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Rozptyl: „ s^2 “ Je vhodný pro zjišťování řady n hodnot náhodného výběru se suma čtverců odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru dělí tzv. počtem stupňů volnosti $f = n - 1$.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (8)$$

Směrodatná odchylka: „ s “ Absolutní hodnota druhé mocniny.

$$s = \left| \sqrt{s^2} \right| \quad (9)$$

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru: „ $\bar{\sigma}$ “ Využití pro hodnocení přesnosti měření se vychází ze střední kvadratické chyby „ σ “ podělenou mocninou s „n“ měření.

$$\bar{\sigma} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (10)$$

[20]

10 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikováním na vstřikovacím stroji ARBURG 420 C Allrounder Advance v jednonásobné formě. Dutina formy má rozměry odpovídající rozměrům zkušebních těles (o míru smrštění větší) tzn. lopatky viz. kapitola 4.1.1 a obdélníkové tyčinky: šířka $b=10$ mm, tloušťka $h=4$ mm a výška $l=80$ mm. Obdélníkové tyčinky byly dále pro zkoušku tlakem zkráceny na rozměry dle kapitoly 4.2.1. na dílenské univerzální frézce typu FHV – 50PD. Aby byla zaručena rovnoběžnost a kolmost ploch, byly zkušební tělesa upnuta při krácení kotoučovou frézou ve svěráku a pomocí kostek bylo zaručeno, že zkušební tělesa byly v jedné rovině.



Obr. 28. Ukázka zkušebních těles. Zleva: PP neplněný, PP+15%GF, PP+30%GF, PA neplněný, PP+30%GF, PC, PS.

10.1 Parametry při vstřikování

10.1.1 Polypropylen – DOW PP H777-25R, SCOLEFIN PP 53G10-0, PP+15%GF

Tab. 20. Parametry při vstřikování pro termoplasty DOW PP H777-25R, SCOLEFIN PP 53G10-0, PP+15%GF.

Polypropylen – DOW PP H777-25R, SCOLEFIN PP 53G10-0, PP+15%GF			
Výsledné nastavení stroje – hodnoty odečteny z VS		Jednotlivé teploty plastikační jednotky	
Vstřikovací rychlost [mm/s]	90	Teplota pod násypkou [°C]	40
Dráha dávkování [mm]	48,1	Teplotní pásmo 2. [°C]	200
Bod přepnutí [mm]	27,8	Teplotní pásmo 3. [°C]	210
Tlak hydrauliky [bar]	90,5	Teplotní pásmo 4. [°C]	220
Celkový čas dotlaku [s]	19,52	Teplotní pásmo 5. [°C]	230
Doba chlazení [s]	22,01	Teplota na trysce [°C]	240

10.1.2 Polyamid - PA 6 Ravamid B-NC; PA 6 Ravamid B GF30 NC

Tab. 21. Parametry při vstřikování pro termoplast PA 6 Ravamid B-NC.

Polyamid - PA 6 Ravamid B-NC			
Výsledné nastavení stroje – hodnoty odečteny z VS		Jednotlivé teploty plastikační jednotky	
Vstřikovací rychlost [mm/s]	90	Teplota pod násypkou [°C]	50
Dráha dávkování [mm]	48,1	Teplotní pásmo 2. [°C]	220
Bod přepnutí [mm]	27,8	Teplotní pásmo 3. [°C]	225
Tlak hydrauliky [bar]	90,5	Teplotní pásmo 4. [°C]	230
Celkový čas dotlaku [s]	19,52	Teplotní pásmo 5. [°C]	240
Doba chlazení [s]	22,01	Teplota na trysce [°C]	280

Tab. 22. Parametry při vstřikování pro termoplast PA 6 Ravamid B GF30 NC.

Polyamid - PA 6 Ravamid B GF30 NC			
Výsledné nastavení stroje – hodnoty odečteny z VS		Jednotlivé teploty plastikační jednotky	
Vstřikovací rychlost [mm/s]	45	Teplota pod násypkou [°C]	50
Dráha dávkování [mm]	38,5	Teplotní pásmo 2. [°C]	210
Bod přepnutí [mm]	25,1	Teplotní pásmo 3. [°C]	240
Tlak hydrauliky [bar]	90,5	Teplotní pásmo 4. [°C]	255
Celkový čas dotlaku [s]	11,66	Teplotní pásmo 5. [°C]	270
Doba chlazení [s]	17,23	Teplota na trysce [°C]	280

10.1.3 Polykarbonát - PC Calibre 303 EP 22

Tab. 23. Parametry při vstřikování pro termoplast PC Calibre 303 EP 22.

Polykarbonát - PC Calibre 303 EP 22			
Výsledné nastavení stroje – hodnoty odečteny z VS		Jednotlivé teploty plastikační jednotky	
Vstřikovací rychlost [mm/s]	47,6	Teplota pod násypkou [°C]	40
Dráha dávkování [mm]	41,2	Teplotní pásmo 2. [°C]	220
Bod přepnutí [mm]	12,8	Teplotní pásmo 3. [°C]	240
Tlak hydrauliky [bar]	90	Teplotní pásmo 4. [°C]	250
Celkový čas dotlaku [s]	9,2	Teplotní pásmo 5. [°C]	260
Doba chlazení [s]	19,2	Teplota na trysce [°C]	270

10.1.4 Polystyrén - KRASTEN 552 M

Tab. 24. Parametry při vstřikování pro termoplast Polystyrén - KRASTEN 552 M.

Polystyrén - KRASTEN 552 M			
Výsledné nastavení stroje – hodnoty odečteny z VS		Jednotlivé teploty plastikační jednotky	
Vstřikovací rychlost [mm/s]	112,2	Teplota pod násypkou [°C]	50
Dráha dávkování [mm]	41,2	Teplotní pásmo 2. [°C]	180
Bod přepnutí [mm]	25,8	Teplotní pásmo 3. [°C]	210
Tlak hydrauliky [bar]	90,5	Teplotní pásmo 4. [°C]	230
Celkový čas dotlaku [s]	14,08	Teplotní pásmo 5. [°C]	245
Doba chlazení [s]	28,411	Teplota na trysce [°C]	255

11 MĚŘENÍ A ANALYTICKÝ VÝPOČET EXPERIMENTU

11.1 Měření

11.1.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem proběhla na měřicím zařízení Zwick Roell 1456, kdy zkušební tělesa byla zatěžována jednoosým tahem. K měření hodnot začalo až po dosažení předzátížení a to síly 3 N. Tento průběh zkoušky probíhal rychlostí 5 mm/min. Po dosažení této hodnoty síly, zkušební rychlost klesla na hodnotu 1 mm/min a to do té doby, než se změřil modul pružnosti v tahu. Poté opět zkušební rychlost narostla a to konkrétně na hodnotu 10 mm/min u plněných termoplastů a hodnotu 50 mm/min u neplněných termoplastů. Tato zkušební rychlost po změření modulu pružnosti již setrvala na své hodnotě, až do konce daného měření.

V programu TextXpert II byly získány grafy závislosti napětí σ [MPa] na poměrném prodloužení ε [%]. Dále program vyhodnotil průměrnou hodnotu \bar{x} , směrodatnou odchylku s a byla vypočítána střední kvadratická chyba aritmetického průměru $\bar{\sigma}$. Měření proběhlo za pokojové teploty 23 °C.

Průměrné naměřené hodnoty zobrazuje tabulka 24. Jednotlivé hodnoty měření a souhrn grafů pro jednotlivé série měření uvádí příloha P1.

Pozn.: Vyhodnocení modulu pružnosti v tahu standardně probíhalo v oblasti 0,05% až 0,25% protažení a touto oblastí se proložila příslušná přímka. Jelikož u některých termoplastů byl lineární průběh grafu mimo tento interval, bylo zapotřebí korekce intervalu tak, aby modul pružnosti v tahu byl vyhodnocen v lineární části grafu. Korekce byla individuální.



Obr. 29. Uchopení v čelistech při tahové zkoušce.

Tab. 25. Tabulka naměřených hodnot tahové zkoušky.

Tahová zkouška												
	E_t [MPa]			σ_M [MPa]			ε_M [%]			ε_B [%]		
	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$
PP neplněný	1300,00	95,90	30,33	34,60	0,38	0,12	11,4	0,10	0,03	45,90	13,10	4,14
PP+15%GF	3420,00	69,30	17,55	55,50	0,89	0,28	5,50	0,10	0,03	6,30	0,20	0,06
PP+30%GF	6110,00	337,00	106,57	80,00	0,88	0,28	3,20	1,00	0,32	3,40	1,10	0,35
PA6 neplněný	1320,00	110,00	49,19	48,50	0,61	0,27	21,20	0,30	0,13	-	-	-
PA6+30%GF	7210,00	642,00	287,11	102,00	0,51	0,23	4,50	0,20	0,09	7,70	0,80	0,36
PC	2740,00	369,00	165,02	61,70	0,18	0,08	7,40	0,30	0,13	-	-	-
PS	3090,00	859,00	384,16	21,30	0,29	0,13	8,40	2,50	1,12	15,90	2,10	0,94

Kde: E_t [MPa] - Modul pružnosti v tahu

σ_M [MPa] - Mez pevnosti v tahu

ε_M [%] - Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu

ε_B [%] - Poměrné prodloužení při přetržení

11.1.2 Zkouška tlakem

Zkouška tlakem proběhla na měřícím zařízení Zwick Roell 1456. Jak je již uvedeno v kapitole 4.1.2, rozměry zkušební tělesa pro změření modulu pružnosti v tlaku a meze pevnosti v tlaku se liší. Pro změření modulu pružnosti byly tedy použity zkušební tělesa délky $50 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ a pro změření meze pevnosti v tlaku byly použity zkušební tělesa o délce $10 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. K měření hodnot začalo až po dosažení předzatížení a to síly 3 N. Tento průběh zkoušky probíhal rychlostí 5 mm/min. Po dosažení této hodnoty síly, zkušební rychlost klesla na hodnotu 1 mm/min a setrvala na své hodnotě, až do konce daného měření.

V programu TextXpert II byly získány grafy závislosti napětí σ [MPa] na poměrném stlačení ε [%]. Dále program vyhodnotil průměrnou hodnotu \bar{x} , směrodatnou odchylku s a byla vypočítána střední kvadratická chyba aritmetického průměru $\bar{\sigma}$. Měření proběhlo za pokojové teploty 23 °C.

Průměrné naměřené hodnoty zobrazuje tabulka 25 a 26. Jednotlivé hodnoty měření a souhrn grafů pro jednotlivé série měření uvádí příloha P2.

Pozn.: Vyhodnocení modulu pružnosti v tlaku standardně probíhalo v oblasti 0,05% až 0,25% deformace a touto oblastí se proložila příslušná přímka. Jelikož u některých termoplastů byl lineární průběh grafu mimo tento interval, bylo zapotřebí korekce intervalu tak, aby modul pružnosti v tlaku byl vyhodnocen v lineární části grafu. Korekce byla individuální. Z měření meze pevnosti v tlaku byl vyřazen materiál polypropylén, jelikož kvůli velké tvárnosti - stálého narůstání napětí, nešla určit zcela jednoznačně tato mez pevnosti.



Obr. 30. Zkouška tlakem – měření meze pevnosti v tlaku.



Obr. 31. Přípravek pro měření modulu pružnosti v tlaku.

Tab. 26. Tabulka naměřených hodnot tlakové zkoušky.
Měření modulu pružnosti v tlaku.

Tlaková zkouška – Měření modulu pružnosti v tlaku			
	E_c [MPa]		
	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$
PP neplněný	1200,00	51,6	18,24
PP+15%GF	2350,00	54,60	17,27
PP+30%GF	3290,00	57,90	18,31
PA6 neplněný	906,00	42,60	19,05
PA6+30%GF	3060,00	169,00	75,58
PC	2040,00	51,10	22,85
PS	2280,00	10,60	4,74

Kde: E_c [MPa] - Modul pružnosti v tlaku

Tab. 27. Tabulka naměřených hodnot tlakové zkoušky. Měření meze pevnosti v tlaku.

Tlaková zkouška – Měření meze pevnosti v tlaku									
	σ_M [MPa]			ϵ_{cM} [%]			ϵ_{cB} [%]		
	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$
PP neplněný	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP+15%GF	73,90	2,56	0,81	8,80	0,30	0,09	-	-	-
PP+30%GF	94,20	2,76	0,87	7,90	0,30	0,09	-	-	-
PA6 neplněný	59,30	8,98	4,02	24,90	4,30	1,92	31,30	5,40	2,41
PA6+30%GF	123,00	3,57	1,60	10,20	0,40	0,18	22,40	2,30	1,03
PC	68,90	1,59	0,71	9,90	0,40	0,18	34,20	0,90	0,40
PS	72,40	26,61	11,90	6,70	0,30	0,13	-	-	-

Kde: σ_M [MPa] - Mez pevnosti v tlaku

ε_{cM} [%] - Jmenovité poměrné stlačení na mezi pevnosti v tlaku

ε_{cB} [%] - Jmenovité poměrné stlačení při porušení

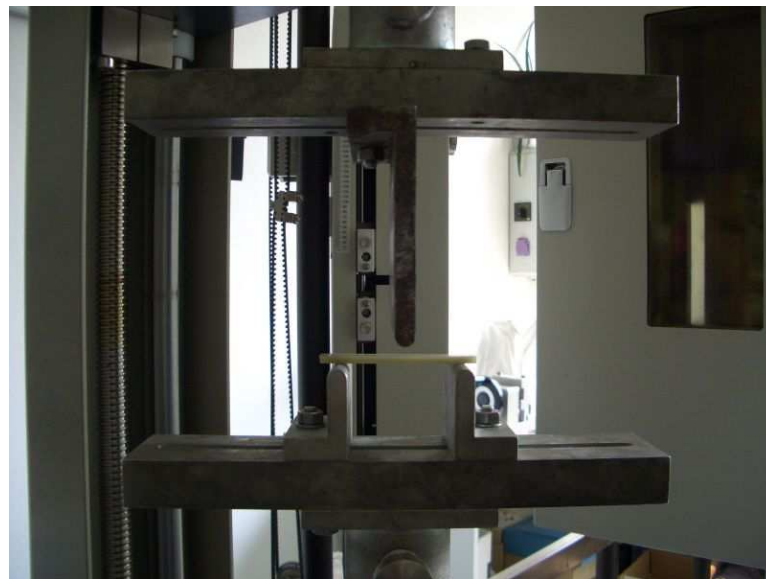
11.1.3 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem proběhla na měřícím zařízení Zwick Roell 1456. K měření hodnot začalo až po dosažení předzatížení a to síly 3 N. Tento průběh zkoušky probíhal rychlostí 5 mm/min. Po dosažení této hodnoty síly, zkušební rychlost klesla na hodnotu 1 mm/min a setrvala na své hodnotě doté doby, než se změřil modul pružnosti v ohybu. Poté opět zkušební rychlost narostla a to konkrétně na hodnotu 10 mm/min a setrvala na této hodnotě až do konce daného měření.

V programu TextXpert II byly získány grafy závislosti napětí σ [MPa] na poměrném stlačení ε [%]. Dále program vyhodnotil průměrnou hodnotu \bar{x} , směrodatnou odchylku s a byla vypočítána střední kvadratická chyba aritmetického průměru $\bar{\sigma}$. Měření proběhlo za pokojové teploty 23 °C.

Průměrné naměřené hodnoty zobrazuje tabulka 27. Jednotlivé hodnoty měření a souhrn grafů pro jednotlivé série měření uvádí příloha P3.

Pozn.: Vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu standardně probíhalo v oblasti 0,05% až 0,25% deformace a touto oblastí se proložila příslušná přímka. Jelikož u některých termoplastů byl lineární průběh grafu mimo tento interval, bylo zapotřebí korekce intervalu tak, aby modul pružnosti v tlaku byl vyhodnocen v lineární části grafu. Korekce byla individuální.



Obr. 31. Zkouška ohybem.

Tab. 28. Tabulka naměřených hodnot ohybové zkoušky.

Ohybová zkouška												
	E_f [MPa]			σ_{fM} [MPa]			ε_{fM} [%]			ε_{fB} [%]		
	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$	\bar{x}	s	$\bar{\sigma}$
PP neplněný	1270,00	43,10	13,63	45,90	0,38	0,12	7,00	0,20	0,06	-	-	-
PP+15%GF	2480,00	102,00	32,26	80,20	1,88	0,59	6,00	0,20	0,06	8,00	0,60	0,19
PP+30%GF	4860,00	167,00	52,81	128,00	1,14	0,36	4,30	0,10	0,03	4,80	0,20	0,06
PA6 neplněný	1090,00	22,70	10,15	47,00	0,74	0,33	8,30	0,20	0,09	-	-	-
PA6+30%GF	5710,00	189,00	84,52	170,00	1,85	0,83	5,60	0,10	0,04	6,70	0,20	0,09
PC	2370,00	66,30	29,65	95,90	1,28	0,57	6,50	0,10	0,04	-	-	-
PS	2600,00	54,60	24,42	48,40	0,78	0,35	5,50	0,20	0,09	8,50	0,50	0,22

Kde: E_f [MPa] - Modul pružnosti v ohybu

σ_{fM} [MPa] - Mez pevnosti v ohybu

ε_{fM} [%] - Deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu

ε_{fB} [%] - Deformace ohybem v okamžiku lomu

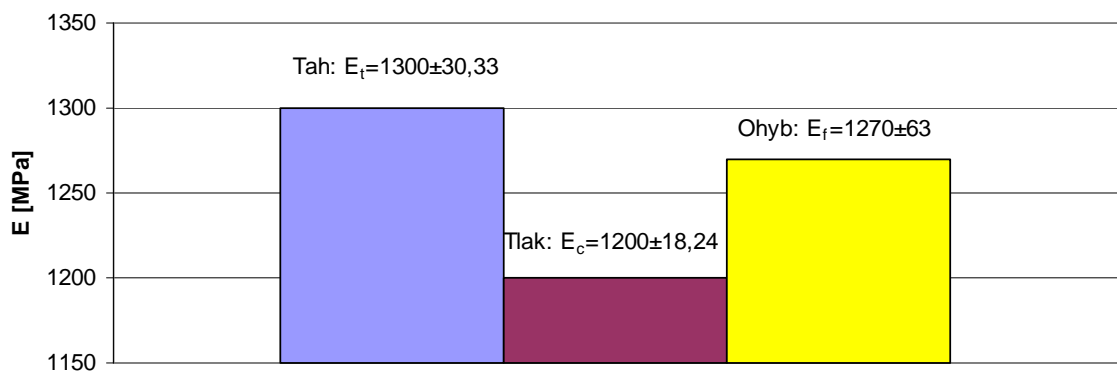
11.1.4 Přehled naměřených hodnot

Tab. 29. Přehled naměřených modulů pro neplněné materiály.

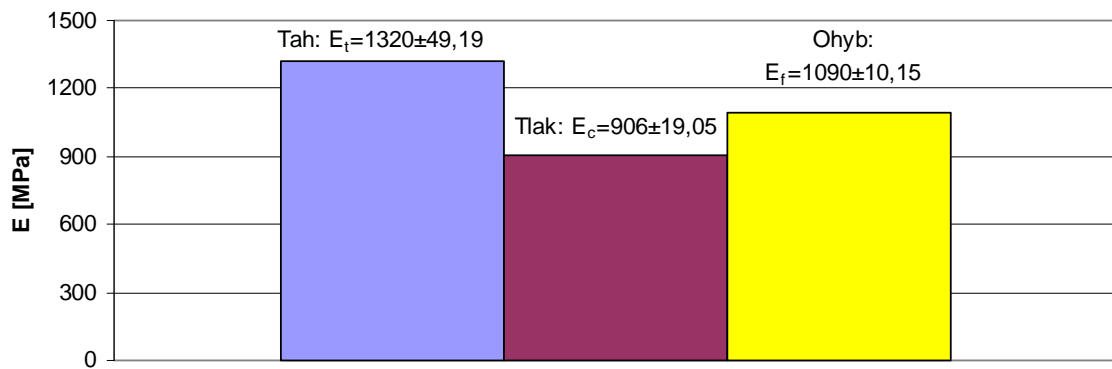
Moduly pružnosti - Neplněné materiály				
	Polypropylén (PP)	Polyamid 6 (PA6)	Polykarbonát (PC)	Polystyren (PS)
Tah E_t [MPa]	1300 ± 30,33	1320 ± 49,19	2740 ± 165,02	3090 ± 384,16
Tlak E_c [MPa]	1200 ± 18,24	906 ± 19,05	2040 ± 22,85	2280 ± 4,74
Ohyb E_f [MPa]	1270 ± 13,63	1090 ± 10,15	2370 ± 29,65	2600 ± 24,42

Tab. 30. Přehled naměřených modulů pro plněné materiály.

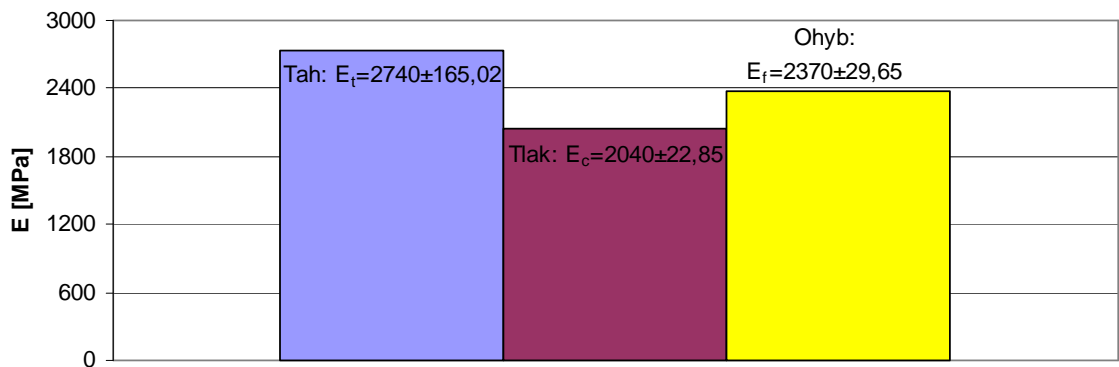
Moduly pružnosti - Plněné materiály			
	PP+15%GF	PP+30%GF	PA6+30%GF
Tah E_t [MPa]	3420 ± 17,55	6110 ± 106,57	7210 ± 287,11
Tlak E_c [MPa]	2350 ± 17,27	3290 ± 18,31	3060 ± 75,58
Ohyb E_f [MPa]	2480 ± 32,26	4860 ± 52,81	5710 ± 84,52



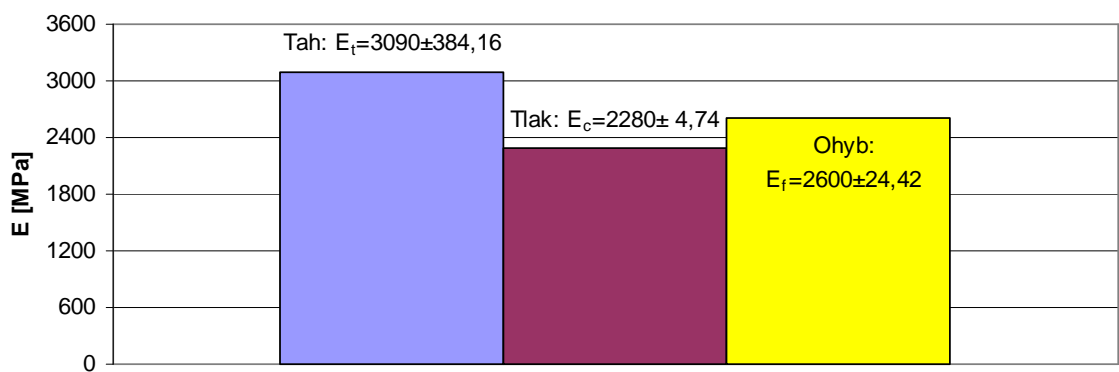
Obr. 32. Přehled modulů pružnosti pro PP.



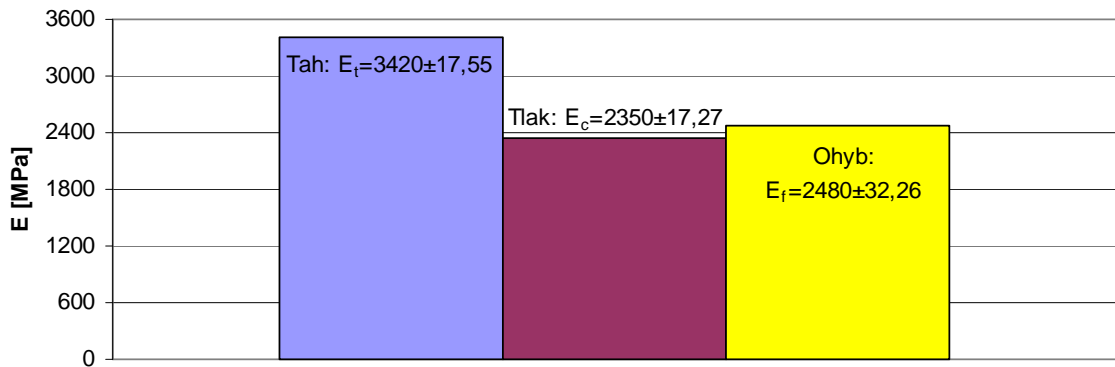
Obr. 33. Přehled modulů pružnosti pro PA6.



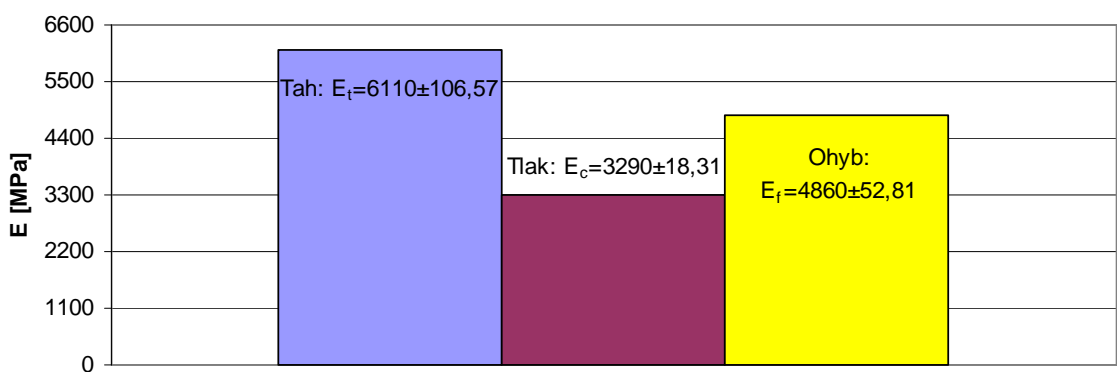
Obr. 34. Přehled modulů pružnosti pro PC.



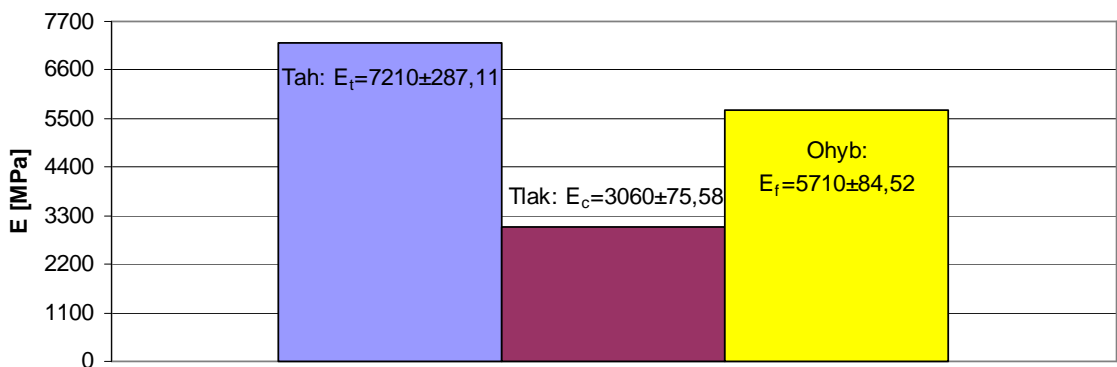
Obr. 35. Přehled modulů pružnosti pro PS.



Obr. 36. Přehled modulů pružnosti pro PP+15%GF.



Obr. 37. Přehled modulů pružnosti pro PP+30%GF.



Obr. 38. Přehled modulů pružnosti pro PA6+30%GF.

Budeme-li vycházet z předpokladu, že se bimodularita nevyskytuje u neplněných termoplastů, ale pouze u termoplastů plněných, čili u kompozitů, tak z naměřených hodnot uvedených v tabulce 28 pro neplněné termoplasty, kdy naměřené hodnoty se nepohybují v rámci střední kvadratické chyby je zřejmé, že jistá bimodularita tady také existuje. Tyto

rozdíly jednotlivých modulů pružnosti jsou větší u plněných termoplastů, jak lze vidět v tabulce 29, což splnilo očekávání bimodularity u kompozitů.

11.2 Analytické výpočty

Budeme-li uvažovat známé (naměřené) hodnoty modulů pružnosti v tahu a ohybu, můžeme aplikovat vztahy pro výpočet modulu pružnosti v tlaku pro termoplasty plněné dlouhými vlákny a verifikovat tak naměřenou hodnotu modulu pružnosti v tlaku.

11.2.1 Neplněný polypropylén (PP)

Tab. 31. Naměřené hodnoty pro neplněný polypropylén.

Neplněný polypropylén	
Modul pružnosti E_c [MPa]	
Tah	$E^+ = 1300$
Tlak	$E^- = 1200$
Ohyb	$E_f = 1270$

$$k^2 = \frac{E_f}{E^+} = \frac{1270}{1300} = 0,977 \quad (11)$$

$$k = 0,988$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,988}{2-0,988} = 0,976 \quad (12)$$

$$\eta^2 = 0,953$$

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (13)$$

$$E^- = 0,953 \cdot 1300 = 1239 \text{ MPa}$$

11.2.2 Neplněný polyamid 6 (PA6)

Tab. 32. Naměřené hodnoty pro neplněný polyamid.

Neplněný polyamid	
Modul pružnosti E_c [MPa]	
Tah	$E^+ = 1320$
Tlak	$E^- = 906$
Ohyb	$E_f = 1090$

$$k^2 = \frac{E_f}{E^+} = \frac{1090}{1320} = 0,826 \quad (14)$$

$$k = 0,909$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,909}{2-0,909} = 0,833 \quad (15)$$

$$\eta^2 = 0,693$$

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (16)$$

$$E^- = 0,694 \cdot 1320 = 915 \text{ MPa}$$

11.2.3 Polykarbonát (PC)

Tab. 33. Naměřené hodnoty pro polykarbonát.

Polykarbonát	
	Modul pružnosti E_c [MPa]
Tah	$E^+ = 2740$
Tlak	$E^- = 2040$
Ohyb	$E_f = 2370$

$$k^2 = \frac{E_f}{E^+} = \frac{2370}{2740} = 0,865 \quad (17)$$

$$k = 0,930$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,930}{2-0,930} = 0,869 \quad (18)$$

$$\eta^2 = 0,755$$

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (19)$$

$$E^- = 0,755 \cdot 2740 = 2069 \text{ MPa}$$

11.2.4 Polystyren (PS)

Tab. 34. Naměřené hodnoty pro neplněný polystyren.

Neplněný polystyren	
	Modul pružnosti E_c [MPa]
Tah	$E^+ = 3090$
Tlak	$E^- = 2280$
Ohyb	$E_f = 2600$

$$k^2 = \frac{E_f}{E^+} = \frac{2600}{3090} = 0,841 \quad (20)$$

$$k = 0,917$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,917}{2-0,917} = 0,847 \quad (21)$$

$$\eta^2 = 0,717$$

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (22)$$

$$E^- = 0,717 \cdot 3090 = 2216 \text{ MPa}$$

11.2.5 PP+15%GF

Tab. 35. Naměřené hodnoty pro polypropylén: PP+15%GF.

PP+15%GF	
	Modul pružnosti E_c [MPa]
Tah	$E^+ = 3420$
Tlak	$E^- = 2350$
Ohyb	$E_f = 2480$

$$k^2 = \frac{E_f}{E^+} = \frac{2480}{3420} = 0,725 \quad (23)$$

$$k = 0,851$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,851}{2-0,851} = 0,741 \quad (24)$$

$$\eta^2 = 0,550$$

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (25)$$

$$E^- = 0,550 \cdot 3420 = 1881 \text{ MPa}$$

11.2.6 PP+30%GF

Tab. 36. Naměřené hodnoty pro polypropylén: PP+30%GF.

PP+30%GF	
	Modul pružnosti E_c [MPa]
Tah	$E^+ = 6110$
Tlak	$E^- = 3290$
Ohyb	$E_f = 4860$

$$k^2 = \frac{E_f}{E^+} = \frac{4860}{6110} = 0,795 \quad (23)$$

$$k = 0,892$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,892}{2-0,892} = 0,805 \quad (24)$$

$$\eta^2 = 0,648$$

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (25)$$

$$E^- = 0,648 \cdot 6110 = 3959 \text{ MPa}$$

11.2.7 PA6+30%GF

Tab. 37. Naměřené hodnoty pro polypropylén: PA6+30%GF.

PA6+30%GF	
	Modul pružnosti E_c [MPa]
Tah	$E^+ = 7210$
Tlak	$E^- = 3060$
Ohyb	$E_f = 5710$

$$k^2 = \frac{E_f}{E^+} = \frac{5710}{7210} = 0,792 \quad (26)$$

$$k = 0,890$$

$$\eta = \frac{k}{2-k} = \frac{0,890}{2-0,890} = 0,802 \quad (27)$$

$$\eta^2 = 0,643$$

$$\eta^2 = \frac{E^-}{E^+} \Rightarrow E^- = \eta^2 \cdot E^+ \quad (28)$$

$$E^- = 0,643 \cdot 7210 = 4636 \text{ MPa}$$

11.2.8 Přehled analytických výpočtů

Tab. 38. Přehled modulů pružnosti v tlaku naměřených a vypočítaných u neplněných termoplastů.

Modul pružnosti v tlaku - Neplněné termoplasty				
	Polypropylén	Polyamid 6	Polykarbonát	Polystyren
	E_c [MPa]	E_c [MPa]	E_c [MPa]	E_c [MPa]
Naměřená hodnota	1200	906	2040	2280
Vypočítaná hodnota	1239	915	2069	2216

Tab. 39. Přehled modulů pružnosti v tlaku naměřených a vypočítaných u plněných termoplastů.

Modul pružnosti v tlaku - Plněné termoplasty			
	PP+15%GF	PP+30%GF	PA6+30%GF
	E_c [MPa]	E_c [MPa]	E_c [MPa]
Naměřená hodnota	2350	3290	3060
Vypočítaná hodnota	1881	3959	4636

Jak je již z tabulek 35 a 36 zřejmé, jsou určité rozdíly mezi hodnotami vypočítanými a naměřenými. Tyto rozdíly můžou být pravděpodobně způsobeny geometrickými odchylkami zkušebních těles, jako je nerovnoběžnost dvou protilehlých ploch, které jsou v kontaktu s čelistmi zkušebního stroje, při probíhající zkoušce. K vytvoření této nerovnoběžnosti mohlo dojít při ručním odstraňování resp. odřezávání otřepů, vzniklé po krácení zkušebních těles na frézce. Dalším faktorem, který mohl ovlivnit rozdíl mezi hodnotami, mohlo být nepřesné vyrovnání přípravku pro měření modulu pružnosti v tlaku.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zkoumání bimodulárního chování plněných a neplněných termoplastů. V první fázi proběhla výroba zkušebních těles technologií vstřikování na ARBURG 420 C Allrounder Advance a poté úprava zkušebních těles (tyčinek) na dílenské univerzální frézce FHV – 50PD pro zkoušku tlakem – měření meze pevnosti v tlaku. V druhé fázi proběhlo samotné měření jednotlivých modulů pružnosti, tedy modulu pružnosti v tahu, tlaku a ohybu a následně v poslední fázi proběhlo jejich vyhodnocení.

Závěrem lze konstatovat, že dle očekávání se vyskytla bimodularita u plněných termoplastů: PP+15%GF, PP+30%GF a PA+30%GF. Bimodularita se ale také potvrdila i u termoplastů neplněných, tedy u PP, PA, PC a PS. Také se potvrdila možnost aplikace vztahu bimodulárního ohybu prutů vyztužených dlouhými vlákny na testované termoplasty plněné, či neplněné.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HOVĚZÁKOVÁ, M. *Stavební konstrukční kompozitní prvky: Diplomová práce.*
- [2] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů.* ÚCHM FCH VUT Brno, 1999.
- [3] Technologie výroby tažených profilů PREFEN. Informace o technologii. <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie/informace-o-technologie/> (accessed Nov 22, 2010).
- [4] Keramika, kompozity, polymery.
<http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm> (accessed Nov 22, 2010).
- [5] KOŘÍNEK, Z. Microsoft Word - vlakna. Kompozity.
<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf> (accessed Nov 25, 2010).
- [6] Roving. http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Glasfaser_Roving.jpg (accessed Nov 25, 2010).
- [7] Způsoby výroby rohoží a jejich použití. Rohož (kompozit).
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Multiaxial.jpg> (accessed Nov 25, 2010).
- [8] Způsoby výroby rohoží a jejich použití. Rohož (kompozit).
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Vliesstoff.jpeg> (accessed Nov 25, 2010).
- [9] Prepreg. http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Prepreg_aus_Carbonfasern.jpg (accessed Nov 25, 2010).
- [10] MINSTER, J. Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví.
<http://www.csm-kompozity.wz.cz/stav.pdf> (accessed Feb 12, 2010).
- [11] FREUDENRICH, C. How Fiber Optics Work.
<http://communication.howstuffworks.com/fiber-optic-communications/fiber-optic.htm> (accessed Feb 12, 2010).
- [12] Uhlíkové vlákno. http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Cfaser_haarrp.jpg (accessed Dec 05, 2010).
- [13] Specifikace materiálu : Kevlar.
http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_kevlar.aspx (accessed Dec 05, 2010).

- [14] KOŘÍNEK, Z. Microsoft Word - matrice. KOMPOZITY.
<http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf> (accessed Feb 22, 2011).
- [15] BRHEL, M. *Studium bimodularity laminátových struktur: Diplomová práce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008.
- [16] Tahová zkouška plastů I. Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů.
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p7/tah1.pdf (accessed Aug 03, 2011).
- [17] Polypropylen. Petroleum.cz. <http://www.petroleum.cz/vyrobky/polypropylen.aspx>
(accessed March 14, 2011).
- [18] MLEZIVA, J. POLYMERY - výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha: SOBOTÁLES, 2000. 537 s. ISBN 80-85920-72-7
- [19] Distribution of plastics and elastomers. <http://resinex.net/> (accessed March 22, 2011).
- [20] HOLÍK, Z. *Vliv elektromagnetického pole na mechanické vlastnosti plastů: Diplomová práce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007.
- [21] Polykarbonát. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polykarbon%C3%A1t> (accessed March 24, 2011).
- [22] Polystyrén. <http://sk.wikipedia.org/wiki/Polystyr%C3%A9n> (accessed March 24, 2011).
- [23] ARBURG. http://www.arburg.com/com/common/zdl/index.jsp?nl=en_gb (accessed March 24, 2011).
- [24] ARBURG.
http://arburg.es/com/COM/en/bild.jsp?bild=/com/common/pictures/636_399/0000005502.jpg&js=no&title=ALLROUNDER+420+C+1000-350+advance (accessed March 24, 2011).
- [25] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 10 p.
- [26] ČSN EN ISO 604. *Plasty - Stanovení tlakových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 20 p.

[27] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 13 p.

[28] MYNARČÍK, M. *Konstrukce zařízení pro recyklaci PC desek: Bakalářská práce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

tex	Jednotka užívaná v textilním průmyslu pro jemnost příze. Hmotnost vláknového produktu v gramech při délce 1000 m
FRC	Fiber reinforced composites – Vlákny plněné kompozity
GRP	Glass reinforced plastics – Plasty plněné sklem
RTM	Označovaná také jako injekční vstřikování, patří ke strojním technologiím které jsou určeny pro složité a přesné výrobky ve větších sériích. Tato technologie se provádí v uzavřených vyztužených formách za použití směšovacího a plnicího zařízení, přičemž je nutné použít speciální typ sklovýztuže.
PP	Polypropylén
PA	Poylamid
PA6	Polyamid 6
PA66	Polyamid 66
PE	Polyetylén
PET	Polyetylén tereftalát
PS	Polystyren
PC	Polykarbonát
µm	Mikrometr - je odvozená jednotka soustavy SI v délce jedné milióntiny metru (0,000001 metru)
nm	Nanometr - je odvozená jednotka soustavy SI v délce jedné miliardtiny metru (10^{-9} metru)
Si	Křemík
Al	Měď
Ca	Vápník
Mg	Hořčík
B	Bór
UP	Unsaturated polyester – Nenasycené polyestery

VE	Vinylester
EP	Epoxidy
MEKP	Metyletylketonperoxid
E_t	Modul pružnosti v tahu
σ_M	Mez pevnosti v tahu
ε_M	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti
ε_B	Poměrné prodloužení při přetržení
E_c	Modul pružnosti v tlaku
σ_{fM}	Mez pevnosti v ohybu
ε_{cM}	Jmenovité poměrné stlačení na mezi pevnosti v tlaku
ε_{cB}	Jmenovité poměrné stlačení při porušení
E_f	Modul pružnosti v ohybu
σ_M	Poměrná deformace na mezi pevnosti
ε_{fM}	Deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu
ε_{fB}	Deformace ohybem v okamžiku lomu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Slitina AgCu, zpevněná uhlíkovými vlákny.[4]	13
Obr. 2. Trojrozměrný vláknový kompozit.[4]	17
Obr. 3. Roving ze skleněných filamentů (Filament je v textilní terminologii mezinárodní označení pro všechna vlákna neomezené délky). [6]	18
Obr. 4. Rohož z multiaxiálně uložených rovingů a filamentů. [7]	19
Obr. 5. Náhodně uspořádaná kontinuální vlákna. [8]	19
Obr. 6. Prepreg z uhlíkových vláken. [9].....	19
Obr. 7. Výroba skleněných vláken.	21
Obr. 8. Závislost modulu pružnosti ve směru vláken na objemovém podílu vláken jedno - směrně vyztužený kompozit E sklo/polyester.[10]	22
Obr. 9. Princip skleněného optického vlákna. [11]	26
Obr. 10. Uhlíkové vlákno průměru 6 μ m v porovnání s lidským vlasem.[12]	28
Obr. 11. Chemická struktura kevlaru.[13]	32
Obr. 12. Ilustrace technologie výroby tažených profilů PREFEN.[3]	37
Obr. 13. Vytvrzený profil. [3].....	38
Obr. 14. Typická bimodulární odezva pro jednosměrně vyztuženou laminu	43
Obr. 15. Princip bimodulárního ohybu	43
Obr. 16. Deformační křivky.	46
Obr. 17. Deformační křivka semikrystalického termoplastu. [16]	46
Obr. 18. Porušení materiálů při tahové zkoušce. [16].....	47
Obr. 19. Zkušební těleso typu 1A a 1B	47
Obr. 20. Přípravek pro tlakovou zkoušku. [15]	49
Obr. 21. Poloha tělesa na začátku zkoušky	50
Obr. 22. Základní jednotka polypropylenu. [17]	

Obr. 23. Molekulární struktura polypropylénu.[17]	56
Obr. 24. Polykarbonát. [21].....	60
Obr. 25. Polystyrén	61
Obr. 26. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advance. [24].....	64
Obr. 27. Univerzální zkušební stroj s teplotní komorou. [28]	66
Obr. 28. Ukázka zkušebních těles. Zleva: PP neplněný, PP+15%GF, PP+30%GF, PA neplněný, PP+30%GF, PC, PS	68
Obr. 29. Uchopení v čelistech při tahové zkoušce	72
Obr. 30. Zkouška tlakem – měření meze pevnosti v tlaku	74
Obr. 31. Zkouška ohybem.....	77
Obr. 32. Přehled modulů pružnosti pro PP.....	78
Obr. 33. Přehled modulů pružnosti pro PA6.....	79
Obr. 34. Přehled modulů pružnosti pro PC.....	79
Obr. 35. Přehled modulů pružnosti pro PS.....	79
Obr. 36. Přehled modulů pružnosti pro PP+15%GF.....	80
Obr. 37. Přehled modulů pružnosti pro PP+30%GF.....	80
Obr. 38. Přehled modulů pružnosti pro PA6+30%GF.....	80
Obr. 39. Ukázka průběhu zkoušky tahem pro neplněný polypropylén – měření č.4.....	102
Obr. 40. Ukázka průběhu zkoušky tahem pro PA6+30%GF – měření č.2.....	103
Obr. 41. Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření modulu pružnosti pro polystyren – měření č.5.....	104
Obr. 42. Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření modulu pružnosti pro PP+15%GF – měření č.4.....	105
Obr. 43. Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření meze pevnosti pro polykarbonát – měření č.3.....	106

-
- Obr. 44. Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření meze pevnosti pro PP+30%GF – měření č.1..... 107
- Obr. 45. Ukázka průběhu zkoušky ohybem pro polystyren – měření č.1..... 108
- Obr. 46. Ukázka průběhu zkoušky ohybem pro PP+15%GF – měření č.8.....109

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Složení sklovin (hmotnostní procenta)	22
Tab. 2. Vlastnosti skleněných vláken. [5]	24
Tab. 3. Porovnání vlastností uhlíkových vláken. [5].....	27
Tab. 4. Vlastnosti některých uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20 °C (podle prospektu firmy Toray Industries, Inc.)	29
Tab. 5. Podíl použití uhlíkových vláken.[12]	31
Tab. 6. Mechanické vlastnosti některých typů aramidových vláken v porovnání s klasickým polyamidovým vláknem PA66.....	33
Tab. 7. Porovnání nákladů a efektivnosti různých technologií výroby kompozitů.[2] ...	38
Tab. 8. Srovnání fyzikálních vlastností různých konstrukčních materiálů. Vlastnosti jsou vztaženy na vlastnosti tažených profilů firmy Prefa, a.s. Brno obsahujících 50% skleněných vláken v polyesterové pryskyřici.[2].....	40
Tab. 9. Poměr E_t / E_c pro různé materiály	42
Tab. 10. Rozměry zkušebního tělesa.[25]	48
Tab. 11. Přednostně používané rozměry zkušebních těles.[26]	49
Tab. 12. Přehled základních vlastností DOW PP H777-25R. [19].....	57
Tab. 13. Přehled základních vlastností SCOLEFIN PP 53G10-0. [19].....	57
Tab. 14. Přehled základních vlastností PA 6 Ravamid B-NC. [19]	59
Tab. 15. Přehled základních vlastností PA 6 Ravamid B GF30 NC. [19].....	57
Tab. 16. Přehled základních vlastností PC Calibre 303 EP 22. [19]	59
Tab. 17. Přehled základních vlastností PS KRASTEN 552 M. [19].....	63
Tab. 18. Technické specifikace	65
Tab. 19. Technické specifikace přístroje Zwick Roell 1456	65
Tab. 20. Parametry při vstřikování pro termoplasty DOW PP H777-25R, SCOLEFIN PP 53G10-0, PP+15%GF	69

Tab. 21. Parametry při vstřikování pro termoplast PA 6 Ravamid B-NC	69
Tab. 22. Parametry při vstřikování pro termoplast PA 6 Ravamid B GF30 NC	70
Tab. 23. Parametry při vstřikování pro termoplast PC Calibre 303 EP 22.....	70
Tab. 24. Parametry při vstřikování pro termoplast Polystyrén - KRASTEN 552 M	71
Tab. 25. Tabulka naměřených hodnot tahové zkoušky	73
Tab. 26. Tabulka naměřených hodnot tlakové zkoušky. Měření modulu pružnosti v tlaku..	75
Tab. 27. Tabulka naměřených hodnot tlakové zkoušky. Měření meze pevnosti v tlaku.....	75
Tab. 28. Tabulka naměřených hodnot ohybové zkoušky	77
Tab. 29. Přehled naměřených modulů pro neplněné materiály	78
Tab. 30. Přehled naměřených modulů pro plněné materiály	78
Tab. 31. Naměřené hodnoty pro neplněný polypropylén	81
Tab. 32. Srovnání anorganických substrátů	82
Tab. 33. Naměřené hodnoty pro neplněný polyamid	83
Tab. 34. Naměřené hodnoty pro neplněný polystyren	84
Tab. 35. Naměřené hodnoty pro polypropylén: PP+15%GF	85
Tab. 36. Naměřené hodnoty pro polypropylén: PP+30%GF	86
Tab. 37. Naměřené hodnoty pro polypropylén: PA6+30%GF	87
Tab. 38. Přehled modulů pružnosti v tlaku naměřených a vypočítaných u neplněných termoplastů	88
Tab. 39. Přehled modulů pružnosti v tlaku naměřených a vypočítaných u plněných termoplastů	88
Tab. 40. Neplněný polypropylén – tahová zkouška	102
Tab. 41. PA6+30%GF – Tahová zkouška	103
Tab. 42. Polystyren – Zkouška tlakem – měření modulu pružnosti v tlaku	104
Tab. 43. PP+15%GF – Zkouška tlakem – měření modulu pružnosti v tlaku	105

Tab. 44. Polykarbonát – Zkouška tlakem – měření meze pevnosti v tlaku	106
Tab. 45. PP+30%GF - Zkouška tlakem – měření meze pevnosti v tlaku	107
Tab. 46. Polystyren – Zkouška ohybem	108
Tab. 47. PP+15%GF – Zkouška ohybem	109

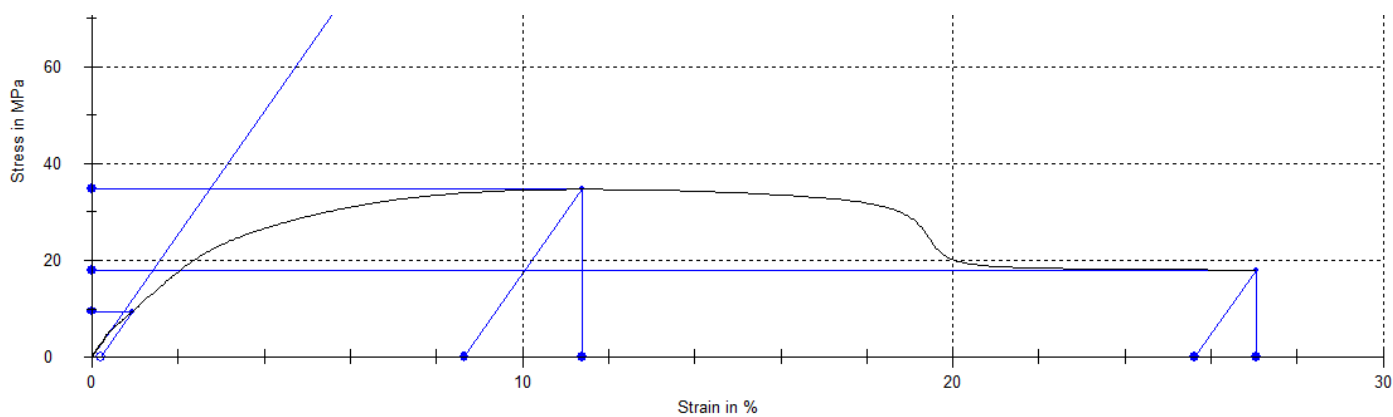
SEZNAM PŘÍLOH

- P I Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vybrané termoplasty.
- P II Naměřené hodnoty tlakové zkoušky pro vybrané termoplasty.
- P III Naměřené hodnoty ohybové zkoušky pro vybrané termoplasty.

PI : Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vybrané termoplasty

Tab. 40. Neplněný polypropylén – tahová zkouška.

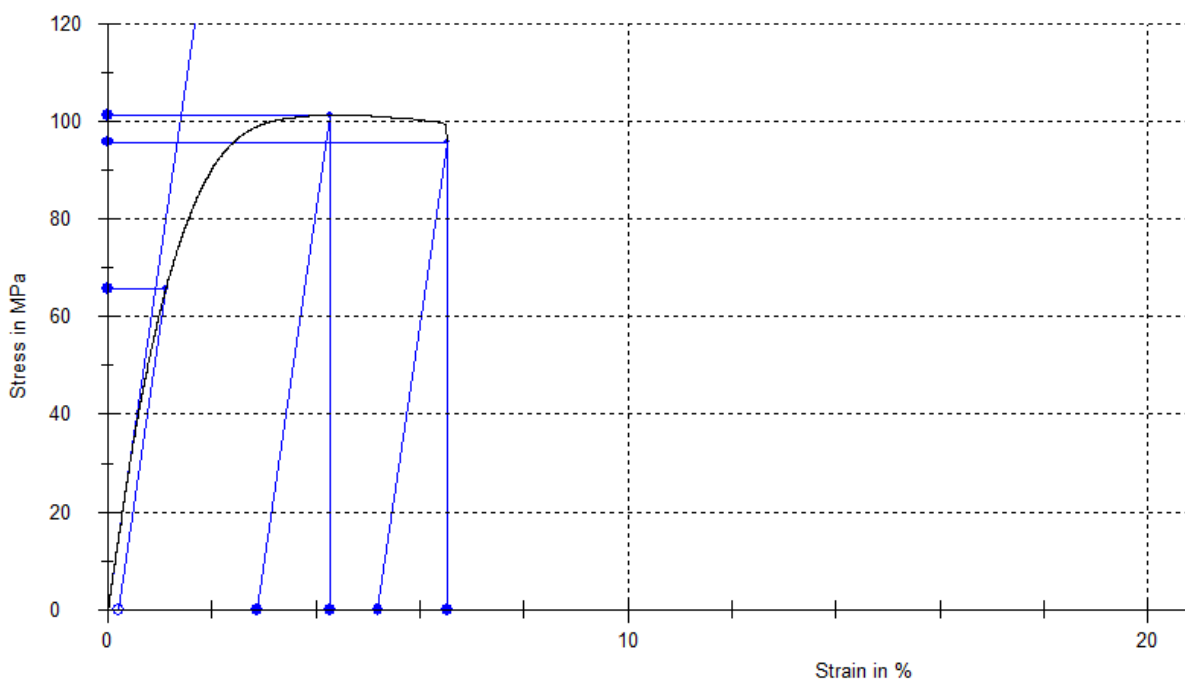
Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro neplněný polypropylén				
Nr.	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]
1	1410,00	35,50	11,40	63,90
2	1410,00	34,20	11,40	43,80
3	1370,00	34,30	11,50	49,40
4	1270,00	34,60	11,40	27,00
5	1110,00	34,20	11,40	19,40
6	1350,00	34,70	11,50	53,40
7	1270,00	34,60	11,50	51,60
8	1220,00	34,60	11,30	51,10
9	1260,00	34,80	11,50	47,40
10	1380,00	34,70	11,40	51,50
Arit. průměr:	1300,00	34,60	11,40	45,90
Sm. odchylka:	95,90	0,38	0,10	13,10
Stř. kvadratická chyba:	30,33	0,12	0,03	4,14



Obr. 39. Ukázka průběhu zkoušky tahem pro neplněný polypropylén – měření č.4.

Tab. 41. PA6+30%GF – Tahová zkouška.

Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6+30%GF				
Nr.	E_t [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]
1	6360,00	102,00	4,70	8,30
2	7220,00	101,00	4,30	6,50
3	6950,00	102,00	4,50	7,70
4	8120,00	102,00	4,30	7,40
5	7400,00	101,00	4,70	8,70
Arit. průměr:	7210,00	102,00	4,50	7,70
Sm. odchylka:	642,00	0,51	0,20	0,80
Stř. kvadratická chyba:	287,11	0,23	0,09	0,36

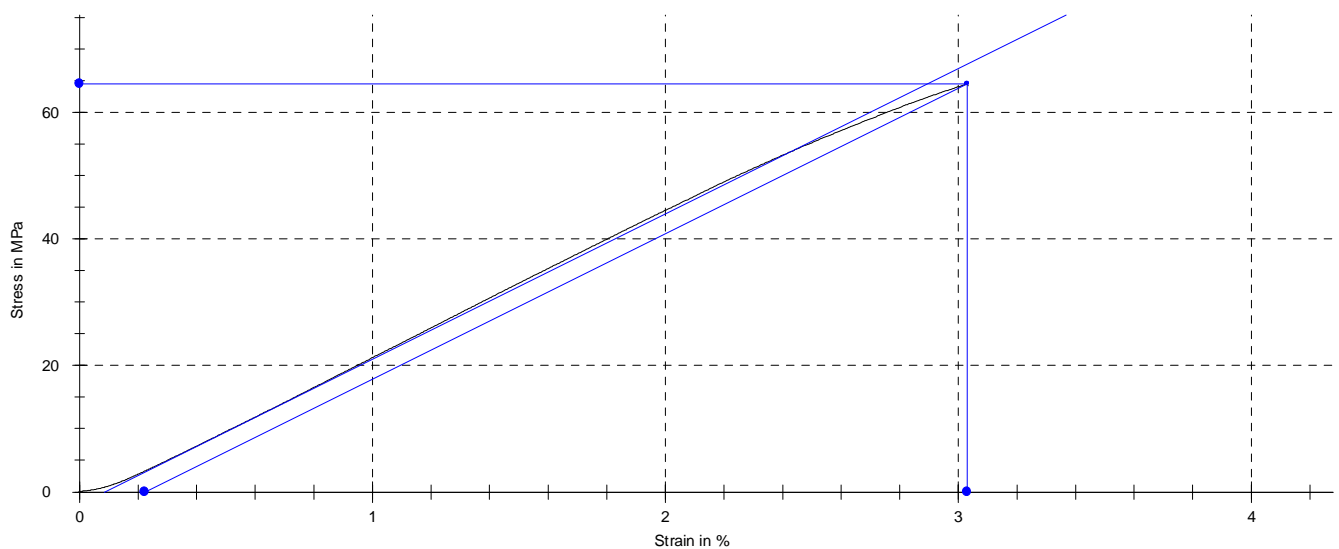


Obr. 40. Ukázka průběhu zkoušky tahem pro PA6+30%GF – měření č.2.

PII : Naměřené hodnoty tlakové zkoušky pro vybrané termoplasty

Tab. 42. Polystyren – Zkouška tlakem – měření modulu pružnosti v tlaku.

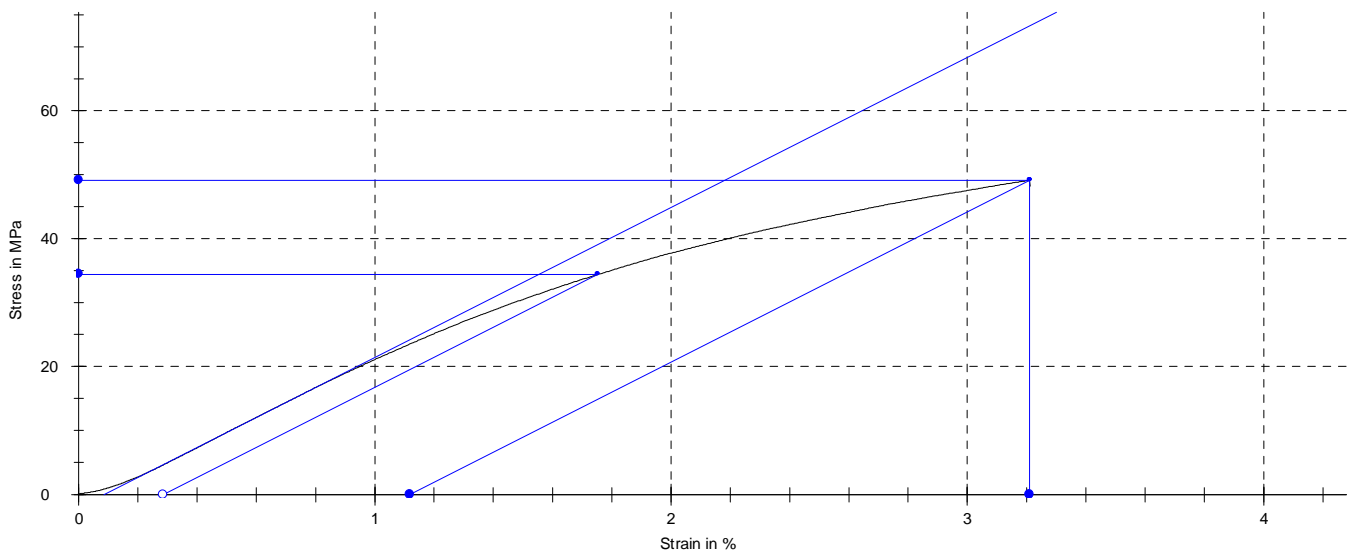
Naměřené hodnoty tlakové zkoušky pro polystyren – měření modulu pružnosti	
Nr.	E_c [MPa]
1	2300,00
2	2280,00
3	2270,00
4	2280,00
5	2300,00
Arit. průměr:	2280,00
Sm. odchylka:	10,60
Stř. kvadratická chyba:	4,74



Obr. 41. Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření modulu pružnosti pro polystyren – měření č.5.

Tab. 43. PP+15%GF – Zkouška tlakem – měření modulu pružnosti v tlaku.

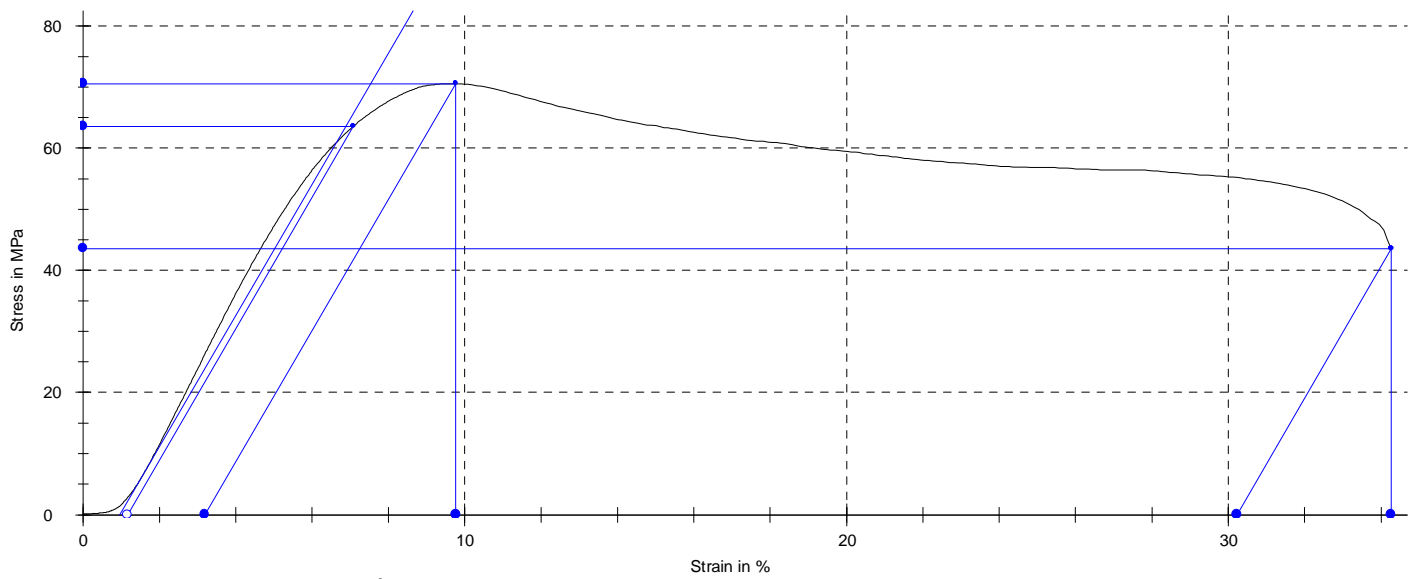
Naměřené hodnoty tlakové zkoušky pro PP+15%GF – měření modulu pružnosti	
Nr.	E_c [MPa]
1	2270,00
2	2420,00
3	2360,00
4	2350,00
5	2370,00
6	2350,00
7	2420,00
8	2390,00
9	2340,00
10	2260,00
Arit. průměr:	2350,00
Sm. odchylka:	54,60
Stř. kvadratická chyba:	17,27



Obr. 42. Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření modulu pružnosti pro PP+15%GF – měření č.4.

Tab. 44. Polykarbonát – Zkouška tlakem – měření meze pevnosti v tlaku.

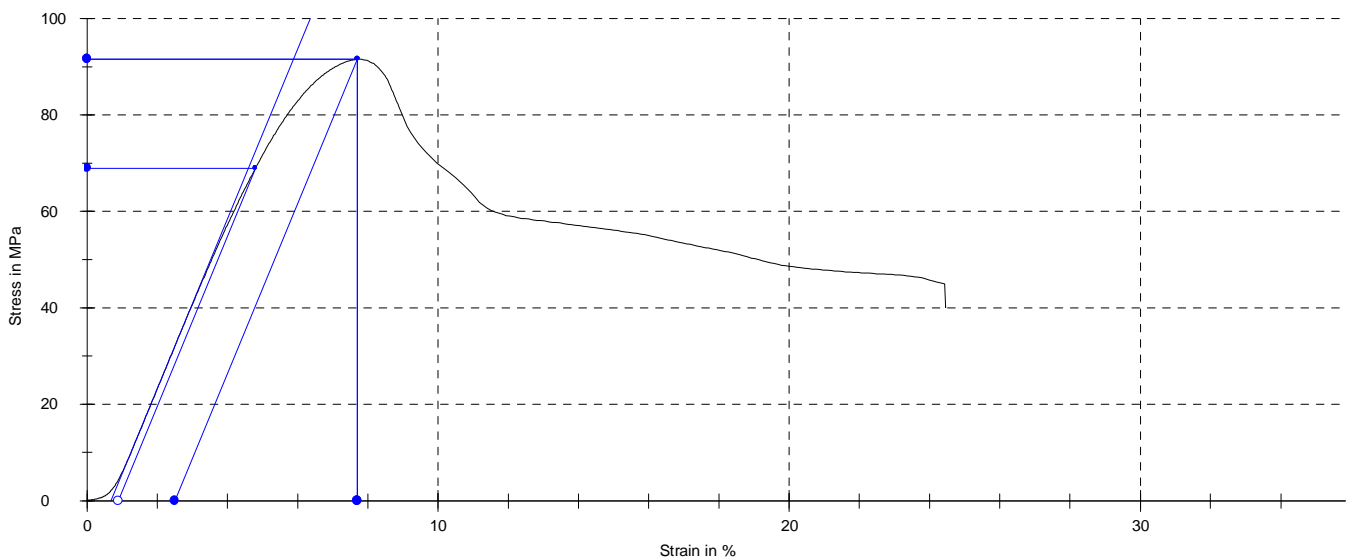
Naměřené hodnoty tlakové zkoušky pro polykarbonát – měření meze pevnosti v tlaku			
Nr.	σ_M [MPa]	ϵ_{cM} [%]	ϵ_{cB} [%]
1	68,90	9,80	34,10
2	67,50	9,70	34,10
3	70,60	9,80	34,30
4	67,20	10,60	33,00
5	70,50	9,70	35,60
Arit. průměr:	68,90	9,90	34,20
Sm. odchylka:	1,59	0,40	0,90
Stř. kvadratická chyba:	0,71	0,18	0,40



Obr. 43. . Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření meze pevnosti pro polykarbonát – měření č.3.

Tab. 45. PP+30%GF - Zkouška tlakem – měření meze pevnosti v tlaku.

Naměřené hodnoty tlakové zkoušky pro PP+30%GF – měření meze pevnosti v tlaku			
Nr.	σ_M [MPa]	ϵ_{cM} [%]	ϵ_{cB} [%]
1	91,50	7,70	-
2	99,00	8,20	-
3	92,10	7,70	-
4	90,60	7,80	-
5	93,90	7,60	-
6	94,00	7,80	-
7	93,40	7,50	-
8	97,60	8,30	-
9	92,90	8,00	-
10	96,80	8,00	-
Arit. průměr:	94,20	7,90	-
Sm. odchylka:	2,76	0,30	-
Stř. kvadratická chyba:	0,87	0,09	-

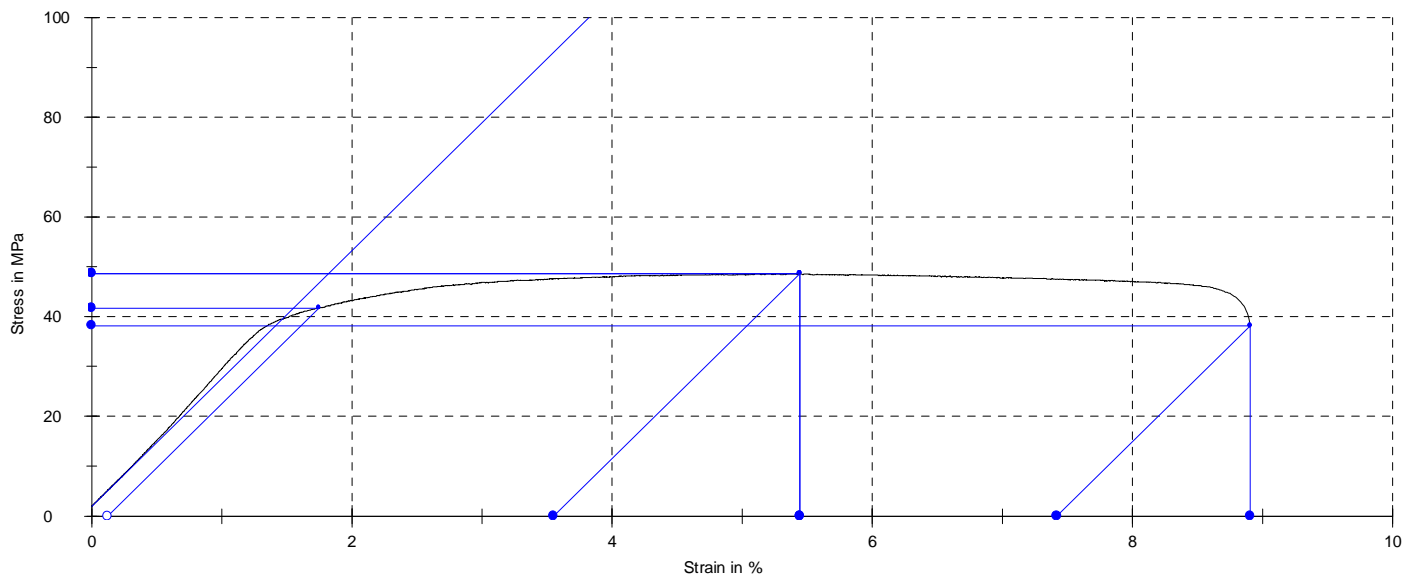


Obr. 44. Ukázka průběhu zkoušky tlakem – měření meze pevnosti pro PP+30%GF – měření č.1.

PIII : Naměřené hodnoty ohybové zkoušky pro vybrané termoplasty

Tab. 46. Polystyren – Zkouška ohybem.

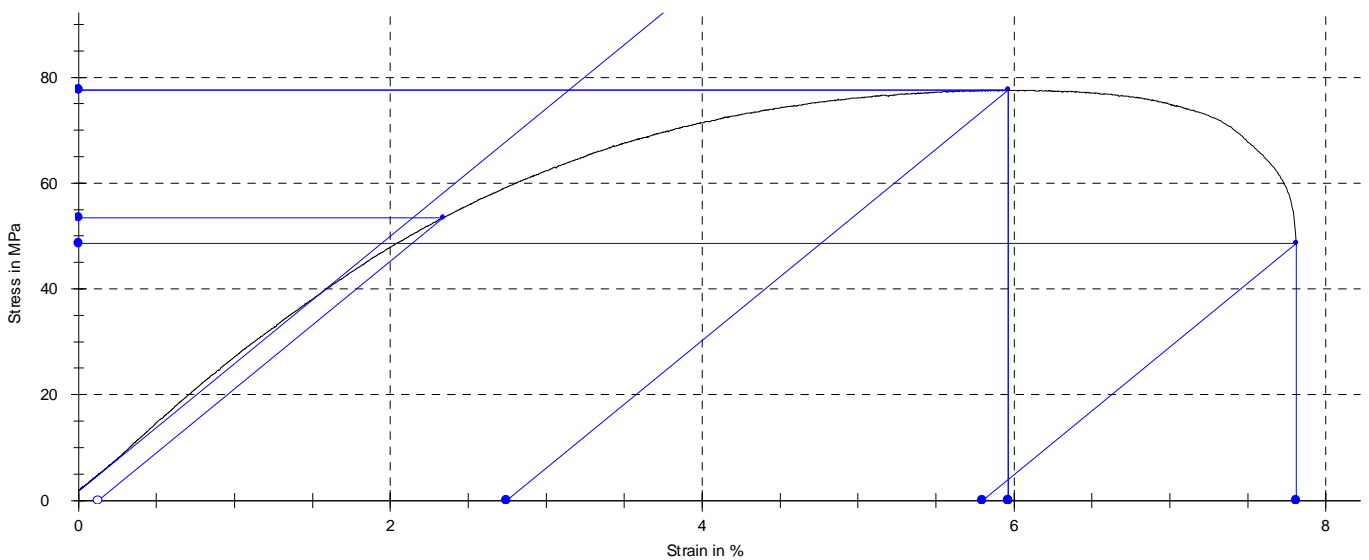
Naměřené hodnoty ohybové zkoušky pro polystyren				
Nr.	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ϵ_{fM} [%]	ϵ_{fB} [%]
1	2560,00	48,60	5,40	8,90
2	2600,00	48,80	5,60	8,20
3	2570,00	48,30	5,10	8,00
4	2560,00	47,10	5,60	8,30
5	2690,00	49,10	5,60	9,20
Arit. průměr:	2600,00	48,40	5,50	8,50
Sm. odchylka:	54,60	0,78	0,20	0,50
Stř. kvadratická chyba:	24,42	0,35	0,09	0,22



Obr. 45. Ukázka průběhu zkoušky ohybem pro polystyren – měření č.1.

Tab. 47. PP+15%GF – Zkouška ohybem.

Naměřené hodnoty ohybové zkoušky pro PP+15%GF				
Nr.	E_f [MPa]	σ_{fM} [MPa]	ϵ_{fM} [%]	ϵ_{fB} [%]
1	2290,00	79,30	6,40	8,90
2	2540,00	83,20	6,10	7,50
3	2560,00	81,60	5,80	7,30
4	2520,00	81,40	5,70	7,60
5	2360,00	77,40	6,10	9,10
6	2610,00	80,80	5,80	7,50
7	2560,00	80,70	6,00	7,90
8	2410,00	77,60	6,00	7,80
9	2520,00	81,00	5,70	7,80
10	2440,00	78,70	6,10	8,20
Arit. průměr:	2480,00	80,20	6,00	8,00
Sm. odchylka:	102,00	1,88	0,20	0,60
Stř. kvadratická chyba:	32,26	0,59	0,06	0,19



Obr. 46. Ukázka průběhu zkoušky ohybem pro PP+15%GF – měření č.8.