

Kompozitní materiály na bázi polypropylenové matrice

Goňa Lukáš

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš GOŇA**
Osobní číslo: **T090004**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Kompozitní materiály na bázi polypropylenové matrice**

Zásady pro vypracování:

1. Přehled matric používaných v průmyslu polymerních kompozitních materiálů
2. Přehled výztužných materiálů a uplatnění polypropylenových kompozitů
3. Testování kompozitních materiálů, normy a podmínky zkoušky
4. Příprava vzorku kompozitních materiálů a jejich testování dle vybraných norem
5. Závěr a diskuze dosažených výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitu, Brno, 1999
- [2] Ptáček, L.: Náuka o materiálu II. CERM, s.r.o., Brno, 2002
- [3] Kořínek, Z.: Kompozity. dostupné na: www.volny.cz/korinek
- [4] Ehrenstein, G. W.: Polymérní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009
- [5] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 1988
- [6] Reinhart, T. J.: Engineered materials handbook. Composites. Vol. 1., ASM INTERNATIONAL, 1987

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Ve Zlíně dne 9. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: GONĀ LUKÁŠ.....

Obor: Technologické zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 28.5.2012.....


.....

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

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

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

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat a porovnat mechanické vlastnosti vzorků polypropylenové matrice vyztužené dlouhými skelnými vlákny, skelnou rohoží a speciální výztužný typ materiálu Twintexu. První část této práce se zabývá obecnou charakteristikou kompozitních materiálů. Dále jsou rozebrány metody testování kompozitů.

Experimentální část se zabývá výrobou vzorků a poté popisem jejich zkoušení. Výsledné mechanické vlastnosti jsou zaznamenány do grafů a tabulek a následně porovnány.

Klíčová slova: Kompozitní materiál, vlákna, výztuž, mechanické vlastnosti, výrobní technologie, mez pevnosti, modul pružnosti.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to determine and compare the mechanical properties of polypropylene fabric samples reinforced with long glass fibers and special reinforced type of material Twintex. The first part of this work deals with general characteristics of composite materials. Are also discussed methods for testing of composites.

The experimental part deals with the production of samples and then a description of their testing. The resulting mechanical properties are reported in graphs and tables and then compared.

Keywords: Composite materials, fibers, matrix, mechanical properties, proces engineering, yield strength, modulus of elasticity.

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Soni Rusnákové, PhDr. za odborné vedení při tvorbě této práce. Dále děkuji firmě FORM s.r.o., která mi pomohla s výrobou vzorků.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.1.1 Rozdělení dle druhu výztuže	13
1.1.2 Rozdělení dle druhu matrice	14
1.2 APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
2 PŘEHLED MATRIC POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	15
2.1 HLAVNÍ ÚLOHA MATRICE	16
2.2 TERMOSETY	17
2.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)	17
2.2.1.1 Vlastnosti nenasycených polyesterových pryskyřic	17
2.2.1.2 Základní druhy UP-R.....	17
2.2.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)	17
2.2.2.1 Vlastnosti vinylesterových pryskyřic.....	18
2.2.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R)	18
2.2.3.1 Vlastnosti epoxidových pryskyřic	19
2.2.4 Fenolické pryskyřice (PF-R)	19
2.2.4.1 Vlastnosti fenolických pryskyřic	19
2.3 TERMOPLASTY	20
2.3.1 Polypropylen	20
2.3.2 Polypropylenové kompozity	20
2.3.2.1 Termoplasty vyztužené krátkými vlákny.....	21
2.3.2.2 Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny.....	22
3 PŘEHLED VÝZTUŽNÝCH MATERIÁLŮ	24
3.1 FORMY VÝZTUŽE.....	24
3.2 SKELNÁ VLÁKNA.....	25
3.2.1 Vlastnosti skelných vláken.....	25
3.2.2 Druhy vazeb vyztužujících tkanin.....	25
3.3 ARAMIDOVÁ VLÁKNA	26
3.3.1 Vlastnosti aramidových vláken	26
3.4 UHLÍKOVÁ VLÁKNA	26
3.4.1 Vlastnosti uhlíkových vláken	27
3.5 ČEDIČOVÉ VLÁKNA	27
3.5.1 Výroba čedičových vláken	28
3.6 TWINTEX	29
3.6.1 Vlastnosti Twintexu	30
3.6.2 Formování	31
3.6.3 Aplikace twintexu	31
3.7 POLYPROPYLENOVÁ VLÁKNA.....	32
3.7.1 Vlastnosti PP vláken	32

3.8	TECHNOLOGIE VÝROBY TERMOPLASTŮ	33
3.8.1	Vytlačování	33
3.8.2	Lisování.....	34
3.8.3	Vstřikování.....	34
3.8.4	Válcování	35
3.8.5	Vyfukování.....	35
3.8.6	Tvarování	36
4	TESTOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	37
4.1	ZKOUŠKA TAHEM	38
4.2	ZKOUŠKA JEDNOOSÝM OHYBEM.....	39
4.3	VÍCEOSÉ RÁZOVÉ NAMÁHÁNÍ – METODA PADAJÍCÍHO TLOUKU.....	40
4.4	PROVEDENÍ ZKOUŠEK	41
4.4.1	Výroba a příprava zkušebního tělesa	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST	42
5	VÝROBA VZORKŮ	43
5.1	MATERIÁL A POMŮCKY	43
5.2	POSTUP VÝROBY VZORKŮ	45
5.3	ZKOUŠKA JEDNOOSÝM TAHEM	47
5.3.1	Postup zkoušky.....	47
5.3.1.1	Mez pevnosti v tahu.....	49
5.3.1.2	Modul pružnosti v tahu	49
5.3.2	Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky.....	50
5.4	TŘÍBODOVÁ ZKOUŠKA OHYBEM	54
5.4.1	Postup zkoušky.....	54
5.4.2	Vyhodnocení výsledků ohybové zkoušky.....	56
5.5	RÁZOVÁ ZKOUŠKA	60
5.5.1	Postup zkoušky.....	60
5.5.2	Vyhodnocení rázové zkoušky	61
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK.....	68
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Kompozitní materiály získávají neustále větší uplatnění v průmyslu. Využívají se všude tam, kde je třeba docílit mechanických a jiných vlastností, které jsou pro dané odvětví žádané. Velkou výhodou kompozitních materiálů je jejich nízká hmotnost při uchování jejich velmi dobrých mechanických vlastností. Průmysl kompozitních materiálů je stále mladé odvětví, o kterém je nutné získávat nové poznatky a tím tento obor rozvíjet.

Tato bakalářská práce je rozdělena na dvě části. V teoretické části se zabývá základním popisem a rozdělením kompozitních materiálů, jejich vlastnostmi a použitím v praxi. Dále se věnuje polymerním matricím a kompozitním výztužím, jejich charakteristikou, mechanickými i fyzikálními vlastnostmi a využitím v praxi. Další část se zabývá termoplasty, zejména polypropylenem, termoplastovými kompozity a zpracovatelskými technologiemi těchto materiálů. Obecně srovnává výhody a nevýhody termoplastů a termosetů. V poslední části se věnuje testování kompozitních materiálů, vývojem technických norem pro jejich testování a zevrubnému popisu tahové, ohybové a rázové zkoušky.

Cílem praktické části bylo navrhnout a prozkoumat kompozitní vzorky z polypropylenové matrice vyztužené skelnou rohoží, skelnou tkaninou a speciálního vyztuženého materiálu Twintex a následné určování jejich mechanických vlastností. V této části je popsán výrobní postup kompozitních vzorků. Popis použitých přístrojů k provádění jednoosé tahové zkoušky, tříbodového ohybu a padostroje u rázové zkoušky. Dále je zde popsán postup měření zkoušek na strojích a naměřené hodnoty jsou zpracované do grafů a tabulek. V závěru porovnává výsledné hodnoty mechanických vlastností kompozitních vzorků a diskutuje o výsledcích a využití těchto vzorků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

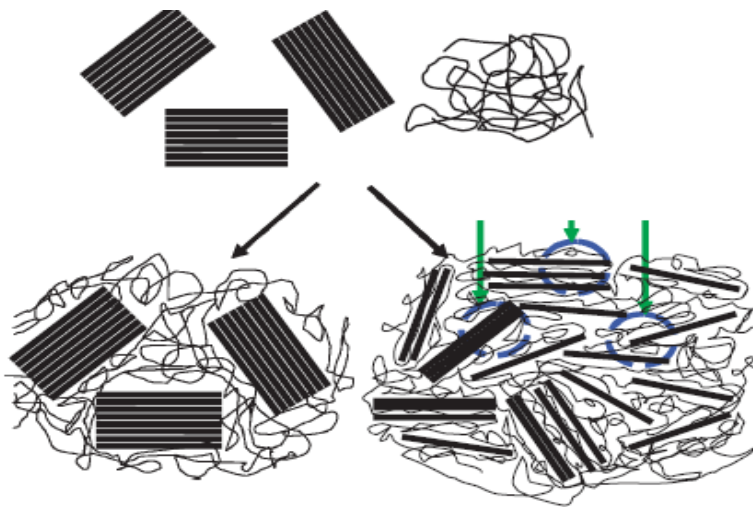
Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou a více složek. Tyto složky se odlišují mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Kompozity tvoří matrice a výztuž. Výztuž je tvrdší a pevnější nespojitá složka, zatímco matrice je obvykle poddajnější složka plnící funkci pojiva.

Materiál lze chápat jako kompozit pouze pokud splňuje tyto podmínky:

- Vlastnosti daných složek se musí lišit
- Podíl výztuže musí být minimálně 5% a víc
- Kompozity musí vznikat smícháním složek
- Výztuž musí být výrazně pevnější než matrice
- Smícháním složek vzniknou lepší vlastnosti než u původních složek

Těmito podmínkami se kompozitní materiály vymezují, proto za kompozity nelze považovat například plast obsahující přísady barviv nebo oxidů.

V průmyslu mají největší využití mikrokompozity jejichž příčné rozměry jsou 1-100 μm . Ve srovnání s kovy mají menší hustotu a dosahují velké měrné pevnosti a měrného modulu. Makrokompozity mají rozměry výztuže 1-100 mm a jsou používány hlavně ve stavebnictví. Za makrokompozity můžeme považovat plátované kovy, konstrukce nebo vícevrstvé materiály (např. silnice, chodníky). Rozměry vláken u Nanokompozitů se udávají v jednotkách nm. [1, 2]



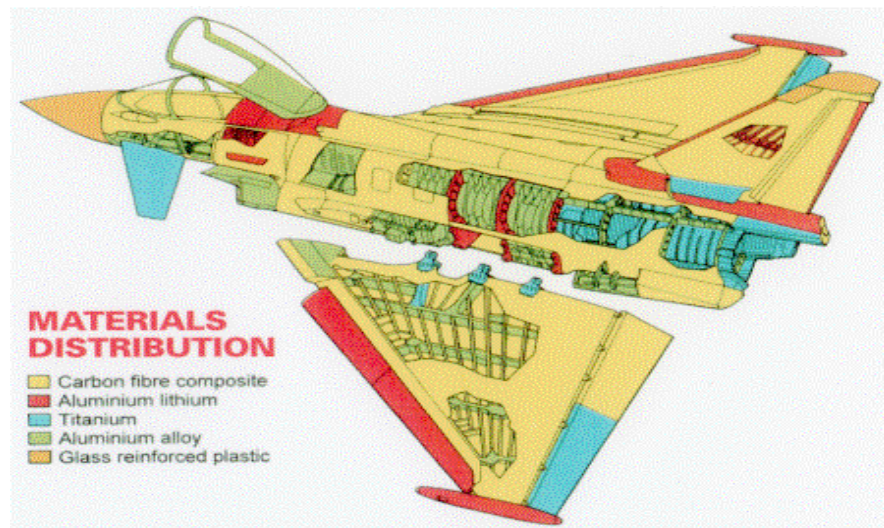
Obrázek 1. Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem na bázi jílu [1]

1.1.2 Rozdělení dle druhu matrice

- Polymerní
- Skleněná
- Borová
- Uhlíková
- Keramická
- Přírodní
- Proteinová [1]

1.2 Aplikace kompozitních materiálů

- Letecký průmysl
- Automobilový průmysl
- Stavebnictví
- Lodní průmysl
- Elektrotechnika
- Chemický průmysl [1]



Obrázek 3. Materiálové složení letadla Eurofighter Typhoon [1]

2 PŘEHLED MATRIC POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU POLYMERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Jedná se o spojitou složku kompozitních materiálů, která zastává funkci pojiva a chrání vlákna. Polymerní matrice jsou ve srovnání s vlákny velmi poddajná. Pevnost v tahu je u matric menší než u výztuže. U polymerních matric se jedná až o dva řády.

V současné době se v technologii vláknových kompozitních materiálů nejvíce využívají matrice termosetů a v menší míře matrice termoplastické, poskytující určité výhody ve srovnání s termosety. Mezi nejpoužívanější matrice termosetů řadíme nenasyčené polyestery (UP-R), vinylestery (VE-R), epoxidy (EP-R), fenolické pryskyřice (PR) a z termoplastů polypropylen (PP) a polyamidy. Reaktoplasty a aromatické termoplasty, které se vyznačují vysokou teplotou tvarové stálosti, se vzhledem k vysoké ceně používají především ve vojenském nebo kosmickém průmyslu (družice, raketoplány, balistické střely).

Z celkového objemu světově zpracovávaných matric při výrobě kompozitů připadá 75% na nenasyčené polyestery, 20% na vinylestery a 5% připadá na pryskyřice epoxidové, fenolické, atd.

Velkou překážkou pro větší rozšíření termoplastických matric je v současné době jejich velká viskozita, která je mnohem větší než u běžných termosetů (o 2-4 řády). V důsledku toho vznikají defekty (bubliny, nesmočené prameny vláken, problematické smáčení tkanin, atd.). Pro odstranění těchto problémů, je nutné jako vstupní materiál používat termoplastem pre-impregnovaná vlákna což vede k vyšším nákladům na výrobu. [1, 2, 3]

Tabulka 1. Užité a technologické vlastnosti matric [3]

Užité vlastnosti	Technologické vlastnosti
Pevnost	Viskozita pryskyřice
Modul pružnosti	Smáčivost vláken
Prodloužení při přetržení	Doba želatinace
Houževnatost	Skladovatelnost
Odolnost proti tečení	Reakční rychlost
Tepelná odolnost	Doba želatinace
Hořlavost	Obsah těkavých složek
Navlhavost	Smrštění při reakci
Dielektrické vlastnosti	Citlivost na poměr složek
Chemická odolnost	Adheze k povrchu formy

Tabulka 2. Přehled vlastností nejpoužívanějších matric [3]

Matrice	Hustota [g/cm]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [GPa]	Deformace do lomu [%]
Termosety	1,1-1,67	1,3-6,0	20-180	1,0-30,0
Epoxy	1,1-1,4	2,1-6,0	35-90	1,0-10,0
Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1,0-5,0
Fenolické pr.	1,3	4,4	50-60	1,0-3,0
Polyimidy	1,2-1,9	3,1	80-190	2,0-40,0
Termoplasty	0,9-1,45	1,0-4,0	20-250	5,0-150,0
PP	0,9	1,1-1,5	28-41	10,0-700,0
PA	1,42	2,8-3,4	76-83	60,0-300,0
PC	1,21	2,1-2,8	62-76	110,0-130,0
PEEK	1,31	3,8	70	50,0-150,0

2.1 Hlavní úloha matrice

- Přenos namáhání na výztuž
- Přenos namáhání mezi jednotlivými vlákny
- Zajištění správné geometrické polohy vláken a tvarové stálosti kompozitu
- Ochrana před okolními vlivy

Hlavním hlediskem pro dobrou kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pro vznik lepších fyzikálních nebo chemických vazeb mezi vlákny a maticí se nanese na vlákna vhodná apretace. Matrice musí mít náležitou viskozitu a povrchové napětí jinak hrozí vznik bublin nebo špatné smočení vláken. [4]

2.2 Termosety

2.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Jsou to reaktivní pryskyřice bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které je možné vytvrzovat za běžné nebo zvýšené teploty, aniž by vznikaly těkavé vedlejší produkty. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo, což vede k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Molekuly nenasycené polyesterové pryskyřice obsahují dvojnásobné reaktivní vazby. Vysokoviskozní pryskyřice se zpravidla rozpouštějí ve styrenu, který zároveň slouží při vytvrzování jako kopolymerační monomer. Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou nejčastěji používaným materiálem pro kompozitní aplikace hlavně z důvodu nízké viskozity, dobrého smáčení vláken, nízké ceny a rychlosti vytvrzování. [3, 4]

2.2.1.1 Vlastnosti nenasycených polyesterových pryskyřic

- levné a mnohostranně použitelné licí pryskyřice,
- vyznačují se velkou variabilitou při zpracování,
- negativní vliv na životní prostředí z důvodu působení styrenu
- dobrá odolnost proti povětrnosti
- výrazné smrštění při zpracování

2.2.1.2 Základní druhy UP-R

- Orthoftalová - nízká cena, maximální pracovní teplota 80 °C
- Izoftalová - kvalitnější a dražší než orthoftalová, maximální pracovní teplota 90 °C, dobrá chemická a tepelná odolnost
- Fumarová – maximální pracovní teplota 130 °C
- Tereftalová – velmi dobrá chemická a tepelná odolnost [3, 4]

2.2.2 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Ve srovnání s UP-R jsou podstatně reaktivnější a vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají nižší viskozitu a vyšší stupeň zesítnění. Jsou proto relativně křehké ale odolné vůči vysokým teplotám, čímž se podobají materiálům z UP-R na bázi propoxylovaného bisfenolu A. Nemají tak vysokou odolnost proti alkáliím, ale jsou odolné proti aromatic-

kým uhlovodíkům. Vinylesterové pryskyřice se používají především v oblastech s vysokým korozním namáháním, např. pračky, chladicí věže, stavbu lodí, tepelné regenerátory a chemicky odolné rošty. Vysoká pevnost těchto pryskyřic se využívá u nosných konstrukcí jako jsou mosty. Vinylesterová pryskyřice s vysokým obsahem plniv slouží jako materiál pro ukotvovací hmoždinky. [3, 4]

2.2.2.1 *Vlastnosti vinylesterových pryskyřic*

- Velká variabilita při zpracování
- Ve srovnání s UP-R jsou dražší a houževnatější
- Dobrá odolnost vůči korozi
- Styren má negativní vliv na životní prostředí
- Vyšší teplota skelného přechodu než u UP-R [3, 4]

2.2.3 **Epoxidové pryskyřice (EP-R)**

Epoxidové pryskyřice za běžné teploty kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat přidané látky, např. rozpouštědla. Obsahují jednu až dvě epoxidové skupiny, nutné jako funkční skupiny pro stavbu makromolekuly. Přidávané tvrdidlo obsahuje v molekule aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami pryskyřice. Epoxidové pryskyřice se řadí mezi termosety s dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Pouze 8% z celkového objemu se zpracovává ve formě vyztužených kompozitů. Nejčastěji jsou využívány v oblastech zalévacích hmot pro elektroniku, výrobu forem, výrobu nástrojů a povlaky pro práškové nanášení.

Epoxidové soustavy se skládají ze vzájemně reagujících molekul tvrdidla a pryskyřice. Proto se EP-R mísí s tvrdidlem v přesném stechiometrickém poměru. Tvrdidla i pryskyřice jsou nejrůznější chemické sloučeniny, proto tvoří epoxidové systémy velkou skupinu materiálů. [3, 4]

2.2.3.1 *Vlastnosti epoxidových pryskyřic*

- Ekonomicky velmi náročné
- Vhodné pro vysoko pevnostní vlákna
- Dobrá adheze k různým povrchům
- Z důvodu vysoké viskozity jsou hůře zpracovatelné než UP-R nebo VE-R
- Dobré mechanické vlastnosti
- Při mísení musí být dodržen stechiometrický poměr [3, 4]

2.2.4 **Fenolické pryskyřice (PF-R)**

Jsou to reaktivní pryskyřice, které vznikají kondenzací fenolů a 30 až 50% vodných roztoků aldehydů. Jednotlivé modifikace vycházejí z různých druhů fenolických surovin, různých molárních poměrů a z jiných chemických nebo fyzikálních modifikací.

Podíl fenolických pryskyřic v průmyslu kompozitních materiálů je poměrně nízký. I když mohou být zpracovávány mnoha běžnými technologickými postupy, je jejich využívání omezeno tím, že jsou příliš křehké pro velkorozměrové výrobky a při vytvrzování tvoří těkavé látky. Nejčastěji se využívají pro výrobu vnitřních vybavení vlaků, letadel a vozidel z důvodu jejich dobré chemické a tepelné odolnosti. [3, 4]

2.2.4.1 *Vlastnosti fenolických pryskyřic*

- Zaujímají nízký celkový podíl při výrobě kompozitů
- Vysoká teplotní a chemická odolnost
- Tvarově stálé
- Při jejich zpracování vznikají zplodiny
- Příznivé chování při požáru[3, 4]

2.3 Termoplasty

2.3.1 Polypropylen

Polypropylen je termoplastický polymer, který řadíme do skupiny polyolefinů. Jedná se o velmi běžný plast používající se v mnoha odvětvích průmyslu. Speciálně v potravinářském a textilním odvětví. Vyniká velmi dobrou chemickou a mechanickou odolností. Jedná se o částečně zkrystalizované plasty, které se získávají polymerizací propenu. K výrobě se nejčastěji používají izotaktické polymery, které mají stejnosměrnou molekulární strukturu. Hlavní suroviny potřebné k výrobě jsou odpady vzniklé při zpracování ropy, proto je polypropylen levnější než jiné syntetické látky. Má přibližně stejné fyzikálně – chemické vlastnosti jako polyetylen. Je odolný vůči alkoholům, olejům a organickým rozpouštědlům. Je dobře rozpustný v xylanech. [5]

Tabulka 3. Vlastnosti polypropylenu [5]

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Hustota	g/cm^3	0,95
Teplota tání	$^{\circ}\text{C}$	173
Koeficient tření	-	0,1-0,3
Tepelná roztažnost	K^{-1}	$(100-180) \cdot 10^{-6}$
Teplota roztavení	$^{\circ}\text{C}$	286

2.3.2 Polypropylenové kompozity

K vyztužení termoplastů jsou používána krátká vlákna (kolem 0,2 mm), především pro zesílení matrice při vstřikování. Dlouhá vlákna (až do 25 mm) a nekonečně dlouhá vlákna. Termoplasty se liší od termosetů uživatelskými i zpracovatelskými vlastnostmi. Jejich porovnání vzhledem k velkému množství různých materiálů je obtížné. Vyztužené termoplasty se dají tvarovat a zpracovávat pouze po zahřátí na teplotu roztaven u termosetů převládá proces chemického vytvrzování. Vlastnosti matrice musí vyhovovat kritériím chemického vytvrzování a zpracovatelnosti. [4]

Tabulka 4. Rozdíly mezi vyztuženými termosety a termoplasty [4]

	Termosety	Termoplasty
Cena matrice	Nízká	Nízká i vysoká
Matrice	Nevytvrzená, nízkoviskózní, dobře se spojuje lepením	Polymerovaná, špatně se slepuje
Skladovatelnost	Omezená skladovatelnost	Neomezeně skladovatelná
Předimpregnace	Snadné	Obtížné smáčení
Cena předimpregnace	Nízká	Vysoká
Polotovar	Prepregy	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží
Stárnutí	Velmi odolné proti stárnutí	Málo odolné
Ruční kladení	Velkoplošné díly	Nevhodné

2.3.2.1 Termoplasty vyztužené krátkými vlákny

Nejdůležitějším kritériem pro vyztužování termoplastů je cena. Vyztužení je účelné pouze v případě, že dojde k zlepšení mechanických vlastností nebo nelze-li dosáhnout lepších mechanických vlastností jiným způsobem. Obsah výztuže se obvykle pohybuje mezi 15-50 hm. %. Obsah výztuže nižší než 15 % nemá téměř žádný vyztužující vliv. Při obsahu výztuže nad 50 % hrozí, že nedojde k rovnoměrnému smočení vláken. V poslední době se velmi často pro vyztužení používá polypropylen, který se snadno plní a vykazuje speciální, zejména, tepelné vlastnosti. Dobrou pomůckou pro porovnání vyztužených a nevyztužených termoplastů je poměr ceny a jednotky materiálové vlastnosti – meze pevnosti v tahu nebo meze pevnosti v ohybu. Srovnávací veličinou jsou poměry: [4]

$$- \text{ pro mez pevnosti v tahu } \frac{\rho \cdot M}{\sigma_{Pt}} \quad (1)$$

$$- \text{ pro mez pevnosti v ohybu } \frac{\rho \cdot M}{\sigma_{Po}} \quad (2)$$

kde je

ρ – hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]

M – cena za 1 kg

σ_t – mez pevnosti v tahu [MPa]

σ_o – mez pevnosti v ohybu [MPa] [4]

2.3.2.2 Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny

Při použití těchto materiálů očekáváme:

- nižší surovinové náklady
- houževnatější materiál
- odolnost proti poškození

Obsahují až 80 % vyztužujících vláken. Použití termoplastické matrice nemá příliš velký vliv na snížení celkových nákladů, protože finančně náročný je proces výroby polotovaru.

Kompozitní materiály mohou být zpracovávány z plošných polotovarů vyztužených špatně tvarovatelnou tkaninou, nebo lépe z rohože s dobrou zatékavostí. Obecně vzato je lepší použít granulát s dlouhými vlákny, u nichž je možné dosáhnout velmi dobrých vyztužujícího účinku. [4]

Nejdůležitější výrobky jsou termoplasty vyztužené prošívány skleněnými rohožemi (GMT), které se skládají ze dvou vrstev skleněných rohoží a polypropylenové matrice. Dále termoplasty vyztužené dlouhými vlákny (LFT). Prošitím rohože se udrží její tloušťka, na druhé straně dojde k lámání vláken, takže dojde ke snadnějšímu vyplnění formy materiálem. GMT je jako polotovar zahříván nad tavnou teplotu matrice, u polypropylenu nad 200 °C, a lisuje se v ocelových formách při tlaku 200 bar a teplotě 50 až 80 °C. U LFT je nezbytné rozlišovat tyčinkový granulát (G-LFT) s délkou vláken 12,5 nebo 25 mm a taveninu obsahující skleněné vlákno (D-LFT). D-LFT se vtlačuje rovnou do otevřené formy vertikálně se uzavírajícího lisu. Délka vláken se vlivem namáhání mění na 2 až 6 mm u G-LFT a na 8 až 10 u D-LFT. Při přípravě D-LFT, zabraňuje zjednodušený výrobní postup dosažení lepšího rozdělení výztuže v rohoži. Tento výrobní postup vynechává stadium polotovaru a extrudovaná propojená rohož se v polotekutém stavu zpracovává lisováním při tlaku 15 bar. Přímé zpracování materiálu z extruderu nám umožňuje při nízkém tlaku sli-

sovat společně fólie a jiné plošné dekorační materiály, ale zároveň způsobuje silné kolísání vlastností.

Smáčení skleněných vláken termoplastickou matricí je vzhledem k vyšší viskozitě velmi obtížné ve srovnání s nízkoviskozními reaktivními pryskyřicemi. Vysoká viskozita taveniny termoplastů může být snížena zvýšením teploty, přitom však může dojít k tepelnému rozkladu. Při prosycování vláken pomocí rozpouštědel lze dosáhnout nízkých viskozit, ale pro velké množství termoplastů nejsou k dispozici vhodná rozpouštědla. Dobrá rozpustnost způsobuje nízkou odolnost výrobku vůči těmto rozpouštědlům. Bezpečnostní a ochranná opatření při recyklaci a výrobě rozpouštědel má za následek velké zvýšení nákladů. [4]

3 PŘEHLED VÝZTUŽNÝCH MATERIÁLŮ

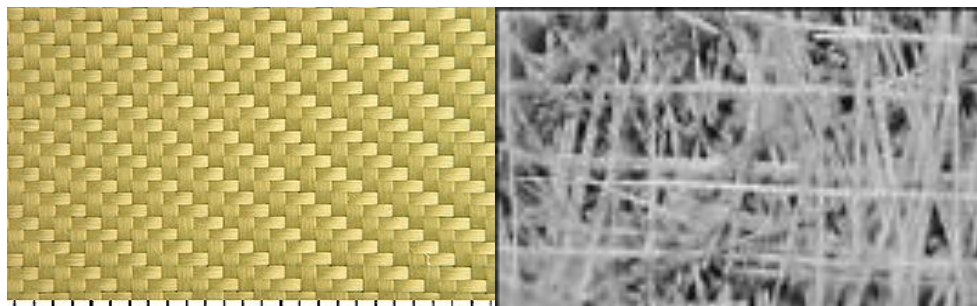
Materiály ve formě vláken se jako konstrukční prvky využívají málokdy. Užitečnou skupinou materiálů stávají se teprve v kompaktní formě jako tomu je u kompozitních materiálů. Ty mají dvě základní složky. Vláknina s vysokou měrnou pevností a rozmanitě přizpůsobivý materiál neboli matrice. [4]

3.1 Formy výztuže

Formy vláknových výztuží jsou pro většinu typů vláken stejné a odpovídají potřebám výrobců. Individuální vlákna se po skončení výrobního procesu namotávají na bubny. Pramenec je obvykle tvořen 200-400 vlákny, záleží na textuře výsledného povrchu. Jsou-li kompozity namáhány ve více než jednom směru jsou z technologického důvodu jako výztuže používány rovina, tkanina nebo rohož. Umožňují rychlejší růst tloušťky stěny výrobku, snadnější manipulace a zvyšují odolnost vůči lomu.

- Roving – Výztuž je ve formě nekonečných vláken bez krutu. Pramenec jsou tvořeny jednotlivými vlákny navinutými na cívku. Nejčastěji se používají pro výrobu pultrudovaných výrobků.
- Vyztužující rohož – Netkaná výztuž vyráběná z nasekaných rovingů. Vláknina se slabě naimpregnuje pryskyřicí nebo termoplastem a poté se tepelně slisuje do formy ploché kontinuální rohože. Vyrábí se v rozličných plošných hmotnostech.
- Tkanina – Vyrábí se z rovingů stejným způsobem jako běžné textilie. Mají různou plošnou hmotnost a jsou tkány různými druhy vazeb (viz. 3.2.2). Ve srovnání s rohožemi mají větší obsah vláken a tím i vyšší tuhost a pevnost výsledného výrobku.
- Povrchová rohož – Nemá téměř žádný vliv na mechanické vlastnosti kompozitu. Používá se především pro estetické účely, protože jsme schopni ji dezénovat.

Všechny typy výztuží lze kombinovat s vlákny a tím vyrábět hybridní kompozity. [2]



Obrázek 4. Formy výztuže a) Aramidová tkanina, b) Skelná rohož [6]

3.2 Skelná vlákna

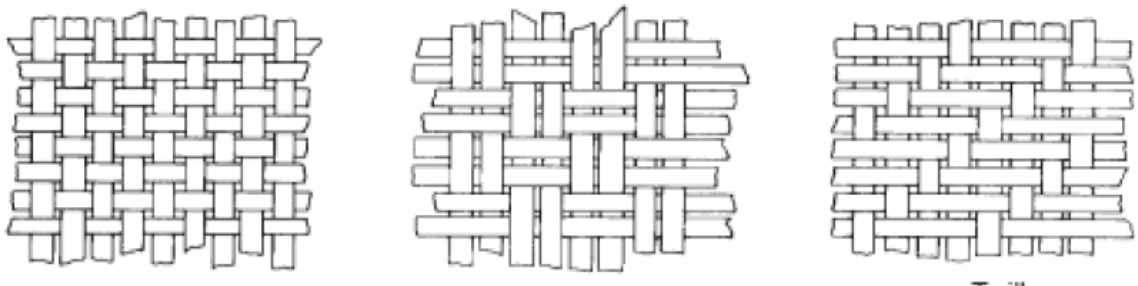
Vlákna s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používaná pro textilní účely. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou dobrým elektrickým izolantem s vysokou prostupností záření, proto se nazývají E-vlákna (elektrická) a jejich sklovina jako E-sklovina. Je to nejvíc používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který tvoří 90% z celkového trhu. Dále je hojně využívána C-sklovina s vysokou odolností proti kyselinám a proti chemicky agresivním látkám. [4]

3.2.1 Vlastnosti skelných vláken

- Jsou nehořlavé, ohnivzdorné.
- Bod měknutí E – skloviny je vyšší jak 625 °C
- Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je zhruba stejně velký jako hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli. Pevnost v tahu je vyšší než u jiných vláken a oceli.
- Tepelné vlastnosti skelných vláken jsou lepší než tepelné vlastnosti jiných materiálů. Ani teplotní namáhání při 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností.

3.2.2 Druhy vazeb vyztužujících tkanin

- Plátňová vazba – jednoduché zpracování tkaniny, jednoduchá základní vazba, dobrá tvarová stálost a malé otřepení při řezání
- Keprová vazba – vyšší tuhost a pevnost laminátu způsobená menším zvlněním vláken. Tkaniny jsou velmi ohebné, a proto vhodné pro tvarované prvky než tkaniny s plátňovou vazbou.
- Atlasová vazba – má menší vychýlení vláken než keprová vazba, vhodná pro prostorově složité výrobky, umožňují dosáhnout velmi hladkého povrchu. [4]



Obrázek 5. Druhy vazeb vyztužujících materiálů

a) Plátňová vazba, b) Keprová vazba, c) Atlasová vazba [2]

3.3 Aramidová vlákna

Jsou to vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Hlavní předností těchto vláken je jejich vysoká tuhost.

Pravidelné uspořádání fenylových jader a amidových skupin s vazbami vodíkových můstků dává řetězcům vysokou tuhost a zároveň vysokou hustotu struktury uspořádání. Orientace krystalických nadstruktur a z nich složených fibril závisí na modelových představách více nebo méně kolem osy vláken.

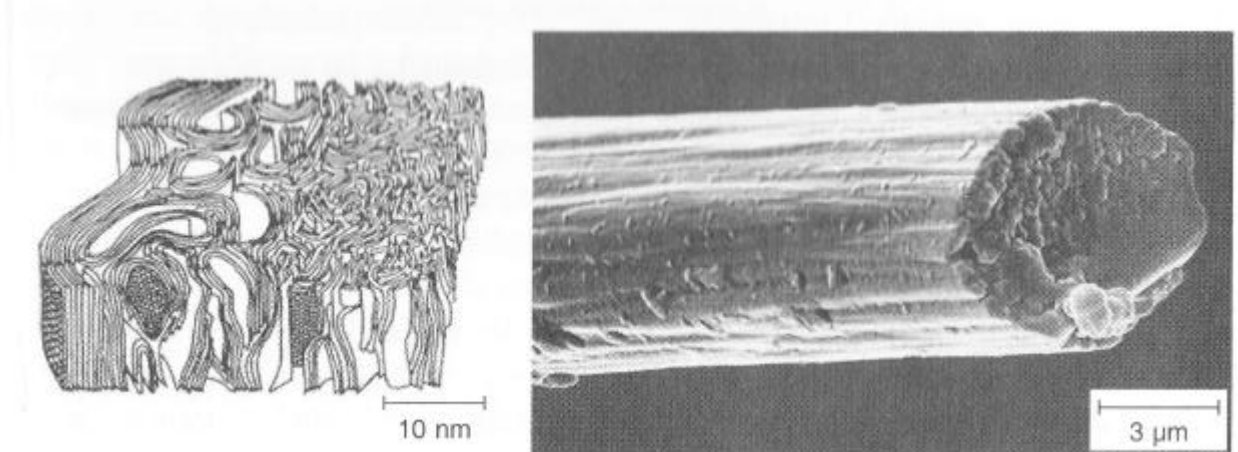
3.3.1 Vlastnosti aramidových vláken

- Nejlehčí vyztužující vlákno, hustota $\rho = 1,45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- Vlastnosti měřené ve směru vlákna se liší od vlastností měřených v příčném směru.
- Aramidová vlákna jsou hydrofilní, proto se vlákna před použitím musí vysušit. Absorbovaná vlhkost může jinak negativně ovlivnit pevnost spoje vlákna s matricí.
- Adheze vláken k matrici je nižší než u jiných vláken
- Vytvrzené konstrukční prvky z aramidových vláken se těžce obrábějí
- Při expozici zářením s vysokou energií dochází k poklesu pevnosti. [4]
-

3.4 Uhlíková vlákna

Jsou to vlákna s velmi vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Použité výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru se nejprve karbonizují. Přitom jsou odštěpeny téměř všechny prvky až na uhlík. Se vzrůstající teplotou, a tím zvyšující grafitizací, se zlepšují mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800 °C je tvorba grafitové struktury skončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v grafitu. Výchozí surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou tyto materiály. [4]

- Celulóza – vlákna nemají úplně dobrou strukturu, používají se pro výrobu izolačních materiálů.
- Polyakrylonitril – hojně využívané, tento druh vláken označujeme jako standardní.
- Smola – mají dobré tepelné a elektrické vlastnosti. [4]



Obrázek 6. Detail uhlíkového vlákna [4]

3.4.1 Vlastnosti uhlíkových vláken

- Mimořádně odolné vůči korozi
- Dobrá elektrická a tepelná vodivost
- Lze je použít jako implantáty, z důvodu jejich dobré snášenlivosti s tělesnými tkáňmi
- Při delším skladování ztrácejí vlákna ohebnost
- Vysoká odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. [4]

3.5 Čedičové vlákna

Čedič je přírodní materiál pocházející z výlevné magmatické horniny. Tuto horninu lze nalézt ve většině zemí po celém světě, liší se chemickým složením v závislosti na umístění horniny. Charakteristickým znakem čediče je tvorba pětihranných až šestihranných pravidelných sloupců. Čedičové horniny tají přibližně v rozmezí 1500 - 1700 °C. Pokud se čedič dostatečně rychle ochladí, vzniká amorfni sklovitá struktura. Krystalická struktura směsi minerálů vzniká při pomalém chladnutí. Čedičové horniny jsou vhodné pro výrobu vláken, pokud obsahují minerály olivín a nefelin.

Čedičová vlákna se řadí do skupiny horninových vláken. Výroba těchto vláken se rozšířila teprve nedávno, jedná se o nový typ technického vlákna. Vlastnosti čedičových vláken jsou velice podobná vlastnostem skleněných vláken typu S. Pro své vlastnosti, jsou čedičové vlákna vhodná k výrobě produktů, na které jsou kladeny zvýšené užitné vlastnosti, tepelně izolační vlastnosti a také zvýšená chemická odolnost. Další výhodou je cena čedičových vláken, která je nižší než cena skleněných vláken. [2]

Tabulka 5. Vlastnosti čedičových vláken [2]

Vlastnosti fyzikální	Jednotka	Čedič
Hustota	Kg.m^{-3}	2900
Navlhavost	%	0,5
Modul pružnosti v tahu	MPa	100000
Pevnost v tahu	MPa	1850-2150
Pevnost v tlaku	MPa	300
Vlastnosti tepelné	Jednotka	Čedič
Pracovní teplota	$^{\circ}\text{C}$	-200 až 800
Měrná tepelná vodivost	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	0,027

3.5.1 Výroba čedičových vláken

U čedičových vláken je nutné rozlišovat čedičová vlákna krátká a kontinuální. Při výrobě kontinuálních vláken je nutné zvolit pracovní teplotu, která se pohybuje v rozmezí od 1500 $^{\circ}\text{C}$ do 1700 $^{\circ}\text{C}$. Čedič je roztaven na požadovanou teplotu a následně protlačován tryskami a dlužen při teplotě 1300 $^{\circ}\text{C}$. Poté dochází k rychlému zchlazení. Výroba krátkovlákných čedičových vláken spočívá v roztavení čedičové horniny v peci při teplotě 1350 - 1450 $^{\circ}\text{C}$. Tavenina vytékající na rotující válce se vlivem odstředivé síly změní v kapky. Tyto kapky se pomocí proudu ofukovacího vzduchu změní v jemné vlákno. Kapky, které jsou chladnější nelze protáhnout a odletují ve formě drobných zrněk, do spodní části rozvláknujícího stroje, odkud jsou opět vráceny zpět do pece. Rozvlákněná hmota s malým počtem zrněk je unášena vzduchem do usazovací komory. V usazovací komoře jsou vlákna ještě zkrápěna vodním roztokem pojiva, protiplísňovými a dalšími přísadami. V usazovací komoře se smočená vlákna rovnoměrně usadí do vrstvy, která následně pokračuje do vytvrzovací komory. Tam se za pomoci pojiva a přísad působením tepla vytvrzuje. Dochází k odparu vody a polykondenzaci pojiva. Teplota v komoře je 180 až 220 $^{\circ}\text{C}$. Z vytvrzovací pece vychází pás kamenné vlny, který zformuje a rozřeže na daný rozměr diamantová pila. Ořezané okraje se vrací do tavící pece.

Čedičová vlákna se nejvíce používají ve stavebnictví jako tepelně-izolační směsi pro žáruvzdorné hmoty, jako výztužné tkaniny v kompozitech. Nebo tepelné, zvukové a chemické izolace. [2]



Obrázek 7. Detail zvukově a tepelně izolační desky z čedičových vláken [2]

3.6 Twintex

Je to speciálně výztužený materiál vyrobený jako směs vláken skládající se z polypropylenového a skleněného vlákna. Promícháním skelného a termoplastického vlákna se ekonomicky vyřešil problém impregnace skelného vlákna s termoplastickými pryskyřicemi. To nám dovoluje dosáhnout 60 % úspory váhy ve složených částech. Zpracovává se při teplotě nad tavnou teplotou polypropylenové matrice (180 až 230 °C) a následnou konsolidací použitím nízkého formujícího tlaku. [7]

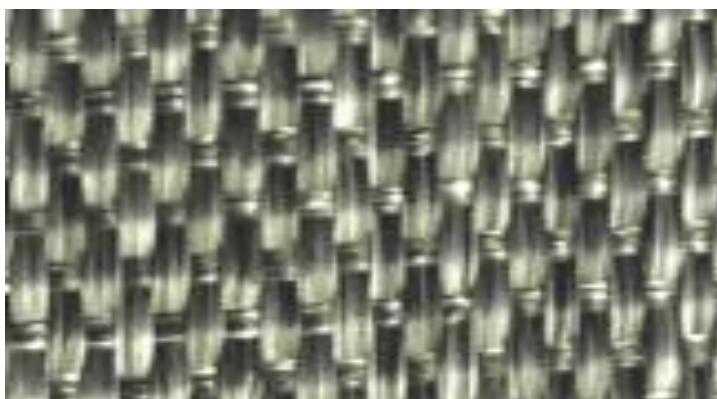
Nejčastěji používané tkaniny Twintex:

Základní tkaniny jsou plátňové vazby (1/1), u kterých se vlákna vzájemně proplétají pod úhlem 90°. Získaná látka je velmi stabilní, ale ne příliš vhodná pro složitější výrobky.



Obrázek 8. Detail materiálu Twintex, vazba 1/1 [7]

Dalším typem je (4/1) vazba tvořená z 80 % podélnými vlákny a z 20 % příčnými. To znamená, že v podélném směru je 4x pevnější.



Obrázek 9. Detail materiálu Twintex, vazba 4/1 [7]

3.6.1 Vlastnosti Twintexu

Polyolefin, termoplastickou maticí řadíme mezi nejvíce chemicky inertní plasty a je nejméně ovlivněna absorpcí vodou. Mechanické vlastnosti závisí na vzoru tkaniny. V případě rovnoměrného rozložení tkaniny budou příčné a podélné mechanické vlastnosti stejné. V případě jednosměrné tkaniny budou mechanické vlastnosti vyšší v daném směru orientace vláken. [7]

Tabulka 6. Mechanické a fyzikální vlastnosti textilie Twintex [8]

Mechanické vlastnosti	Jednotky	Vazba 1/1	Vazba 4/1
Pevnost v tahu	MPa	350	400/130
Modul pružnosti v tahu	GPa	15	28/6
Pevnost v ohybu	MPa	280	380/160
Modul pružnosti v ohybu	GPa	13	18/6
Hmotnost skleněných vláken	%	60	60
Objem skleněných vláken	%	35	35
Fyzikální vlastnosti	Jednotky	Polypropylen	Sklo
Hustota	g/cm ³	0,9	2,6

3.6.2 Formování

Je nezbytné si napřed vyčistit formu, aby na povrchu výrobku nevznikly vady. Tento výrobní proces spočívá v položení Twintexové textilie na ošetřenou formu. Na textilii je nanesen polyolefinový sprej, který zajistí, aby se vlákna nehýbali. Tváření probíhá pouze v jedné části formy. Výsledný výrobek má tedy jen jednu pohledovou stranu. Jakost povrchu se dá dále upravit gelem, ale to způsobí redukcí efektivity výroby vzhledem k prodloužení doby přípravy. [7]

3.6.3 Aplikace Twintexu

Vzhledem k jeho fyzikálním vlastnostem a chemické odolnosti uplatňuje se v různých oblastech průmyslu.

- Automobilový průmysl – části karosérie.
- Domácnosti – žaluzie, umyvadla, okna.
- Sportovní vybavení – lyže, lodě.

A v mnoha dalších odvětvích lidské činnosti. [7]



Obrázek 10. Lod' vyrobená z Twintexu [8]

3.7 Polypropylenová vlákna

Asi 20 procent polypropylenu se produkuje ve formě textilních vláken. Vlákna se dají barvit pouze během výrobního procesu a to jen v omezeném sortimentu barev. Ve srovnání s jinými textilními vlákny mají nízkou nasáklivost, tepelnou vodivost a také nízkou hmotnost. Hlavní nevýhoda je nízká odolnost vůči vysokým teplotám. Používají se k výrobě sportovních oděvů, ponožek nebo kobereců. Výrobce PP vláken v ČR používaných je většinou firma Fibrocel a.s. [9]



Obrázek 11. Detail polypropylenového vlákna [9]

3.7.1 Vlastnosti PP vláken

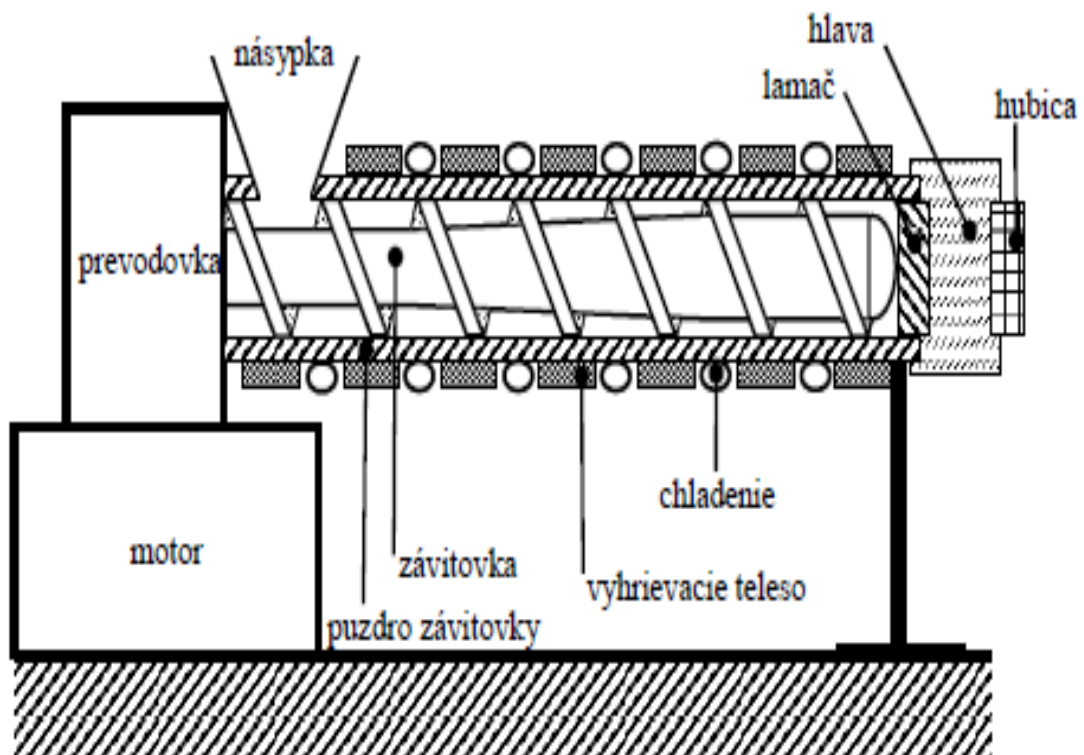
- Jsou odolné vůči chemikáliím
- Trvanlivé a dobře tvarovatelné
- Odolné vůči oděru
- Mají nízkou tuhost a nasáklivost
- Jsou voskovité [9]

3.8 Technologie výroby termoplastů

Termoplasty se za běžných teplot chovají jako tuhá tělesa, ale při zvýšených teplotách přecházejí do formy vysoko viskózní kapaliny, kterou je možné tvarovat a opětovným ochlazením fixovat její tvar. Tento proces je opakovatelný to znamená, že polymer můžeme opětovným zahřáním do taveniny a znovu tvarovat. Typickými představiteli této skupiny polypropylen, PVC nebo polyetylen. [10]

3.8.1 Vytlačování

Vytlačování je jednou z nejvýznamnějších technologií zpracování termoplastů na konečné výrobky (např. hadice, roury, desky, atd.) ale i na přípravu polotovarů složitějších výrobků. Základem technologie je vytlačovací stroj, který zabezpečuje plastifikaci polymeru a její dopravu na hlavu zařízení, která je zakončená hubicí. Vytlačovací stroje máme šnekové, pístové nebo diskové. Tento proces je založen na postupné přeměně tuhého materiálu na plastickou hmotu. [10]



Obrázek 12. Schéma vytlačovacího stroje [10]

3.8.2 Lisování

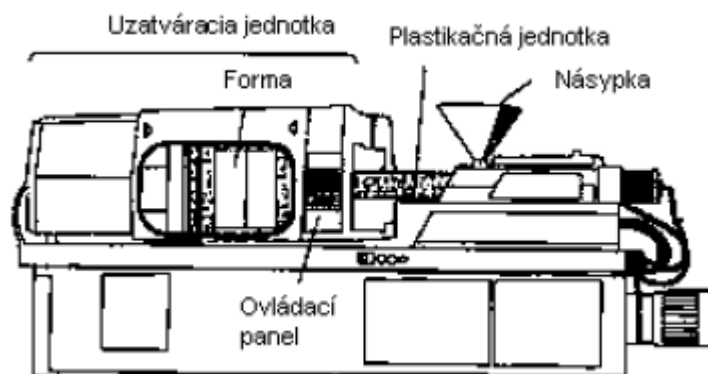
Z technologického hlediska jde o nejjednodušší a ekonomicky nejméně náročnou technologii zpracování. Princip spočívá ve formování roztaveného termoplastu v dutině lisovací formy s následným zafixováním tvaru výrobku. Tvarová fixace závisí na druhu polymeru. Termoplasty se před odebráním z formy musí ochladit, aby nedošlo k porušení tvaru. Lisování probíhá v lisech, které zabezpečují temperaci formy a materiálu uvnitř a zároveň vyvíjejí tlak potřebný na vynucení toku materiálu, aby došlo k úplnému vyplnění dutiny formy. [10]



Obrázek 13. Schéma lisovací formy [10]

3.8.3 Vstřikování

Vstřikovací technologie byla vyvinutá pro vstřikování termoplastů, dnes se tímto způsobem vyrábí i celá řada jiných plastů. Vstřikovací stroj se skládá ze tří základních částí plastikační jednotka, uzavírací jednotka a forma. Princip vstřikování spočívá v uvedení polymeru do stavu taveniny a následné vstříknutí do chlazené dutiny formy. [10]



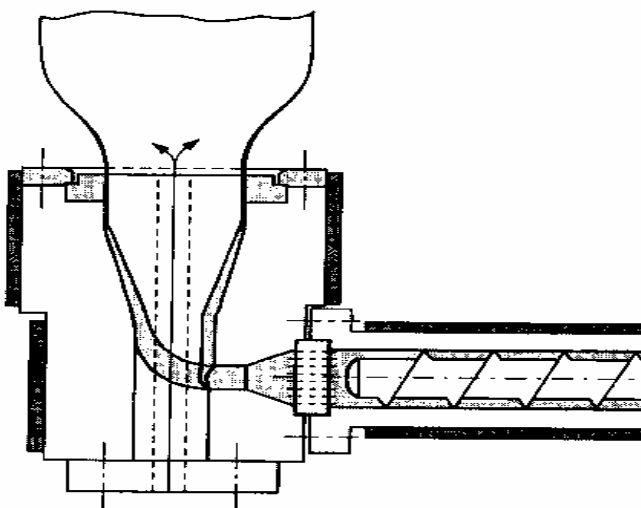
Obrázek 14. Schéma vstřikovacího stroje [10]

3.8.4 Válcování

Technologie, při které dochází k formování hmoty polymeru do tvaru fólií nebo pásů ve štěrbině mezi otáčejícími válci. Z termoplastů se válcováním zpracovává zejména měkčené PVC. Princip válcování spočívá v přehřání směsi v míchačce a následné vytvoření profilu ve štěrbině mezi válci. Vzhledem k viskoelastickému charakteru polymerů se používají tři nebo čtyřválcové mezi, kterými daný materiál projde. Pro každou štěrbinu se vytváří návallek, v kterých dochází k dodatečnému hnětení. Každým přechodem fólie štěrbinou s návalkem se zlepšuje kvalita povrchu vytvářené fólie. [10]

3.8.5 Vyfukování

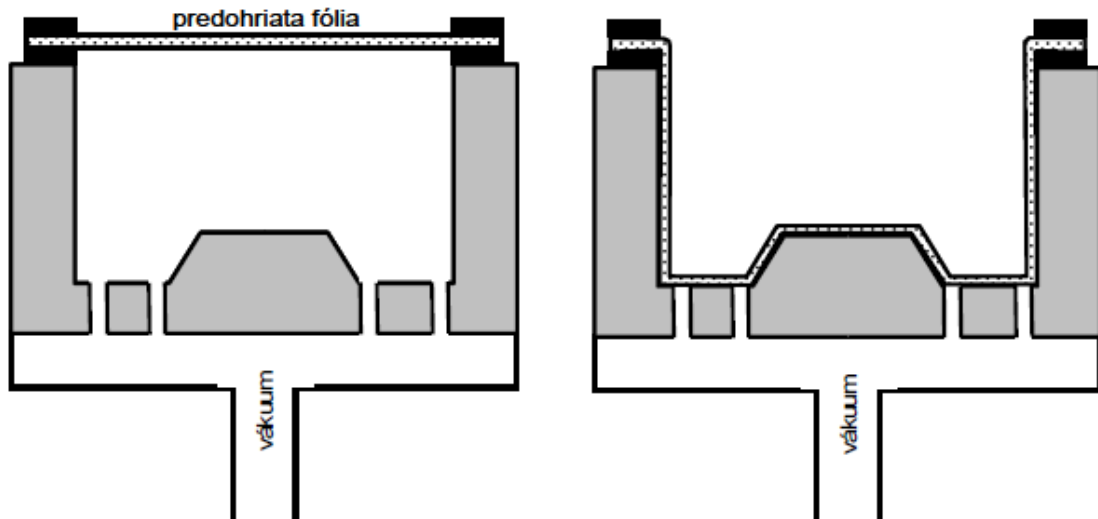
Výroba fólií vyfukováním je založena na vytlačování taveniny polymeru přes hlavu s hubicí tvaru mezikruží, která je orientovaná horizontálně. Vytlačovaná tavenina se přetlakem rozfoukne a chladí vzduchem, přiváděným chladícím prstencem. Chladící prstenec zaručuje rovnoměrné ofukování fólie po celém obvodu. Vzduch se do hadice přivádí trnem přímo nebo přes žebro rozdělovače. Délka chladicí dráhy závisí na druhu materiálu, tloušťce fólie a rychlosti vytlačování. Fólie se navíjí na navíjecí zařízení, které bývá obvykle dvojitě. V případě potřeby je možno složení fólie jednostranně nebo oboustranně ořezávat. [10]



Obrázek 15. Schéma vyfukovacího zařízení [10]

3.8.6 Tvarování

Technologií tvarování se zpracovávají polotovary ve formě fólií nebo desek. Fólie z amorfního termoplastu se zahřeje nad teplotu tání. Poté se fólie stane tvarovatelnou, přičemž tvarování může probíhat přetlakem, pod tlakem nebo tvárníkem. Tvar výrobku se fixuje ochlazením. [10]



Obrázek 16. Schéma vakuového tvarování [10]

4 TESTOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Prudký rozmach výroby kompozitních materiálů a jejich aplikací v různém odvětví průmyslu vedl ke vzniku velkého množství zkušebních metod. Vzhledem k netradičnosti kompozitních materiálů a poměrně krátkodobé zkušenosti s jejich aplikací jsou mnohé metody nové a u kovů nebo jiných tradičních materiálů se vůbec nepoužívají. Jelikož je rozvoj kompozitních materiálů i geograficky velmi nerovnoměrný, dochází ke vzniku víceméně stejných norem a standardů pod hlavičkou různých standardizačních institucí. V Evropě dochází k unifikaci pod dohledem organizace ISO. Jako základ mezinárodních norem se potom berou ty podnikové nebo národní normy, které se nejvíc osvědčily, nebo ty které lze nejlépe interpretovat na vědeckých základech.

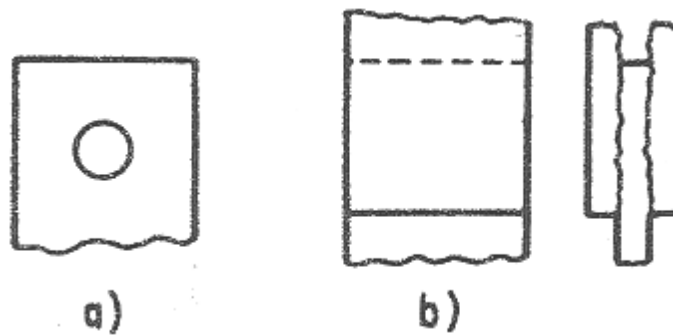
Z hlediska výztuže se testovací metody dělí do skupin zabývajících se zkouškami kompozitů s jednosměrně orientovanými vlákny (lamina, tyčovina, atd.) nebo do skupiny kompozitů s tkanými a netkanými vyztužujícími rohožemi. Z tohoto hlediska existují tyto nejdůležitější standardy. American society for testing materials (ASTM, USA) zabývající se metodami pro jednosměrně orientované a tkané výztuže. I přesto, že se jedná o národní společnost tak vzhledem k předstihu USA před ostatním světem, je tento zdroj velmi široce používán. Dalšími zdroji jsou ISO nebo BS (british standart institution).

V porovnání s nevyztuženými plasty není závislost vlastností kompozitních materiálů na době zatížení, teplotě a podmínkách okolního prostředí tak výrazná. Nejvýraznější vliv na jejich chování během mechanického namáhání má především orientace vláken, rozložení vláken a plniv, stupeň vytvrzení matrice a obsah vláken. Při statických nebo i dynamických zkouškách pevnosti kompozitů jsou to lokální deformace různého druhu, způsobující porušení nosných vláken, která předcházejí celkové rozlomení materiálu. Obzvláště ve vrstvách, kde existuje možnost vzniku mezivláknové poruchy. Např. při zatížení smykem pod úhlem 45° nebo zatížení tahem kolmo ke směru vláken, mohou vzniknout trhliny, které se negativně projeví i u vrstev zatížených ve směru vláken.

Okrajové podmínky samotné techniky provedení zkoušek, jsou důležitým faktorem ovlivňující výsledek měření. V oblasti zavedení síly dochází k bránění v příčné kontrakci a ke vzniku počátečních deformací. To u tuhých kompozitů s anizotropními vlastnostmi vyvolá zvýšení trojrozměrné napjatosti v okolí upnutí zkušebních těles a může to výrazně ovlivnit výsledky zkoušky. [3,4]

4.1 Zkouška tahem

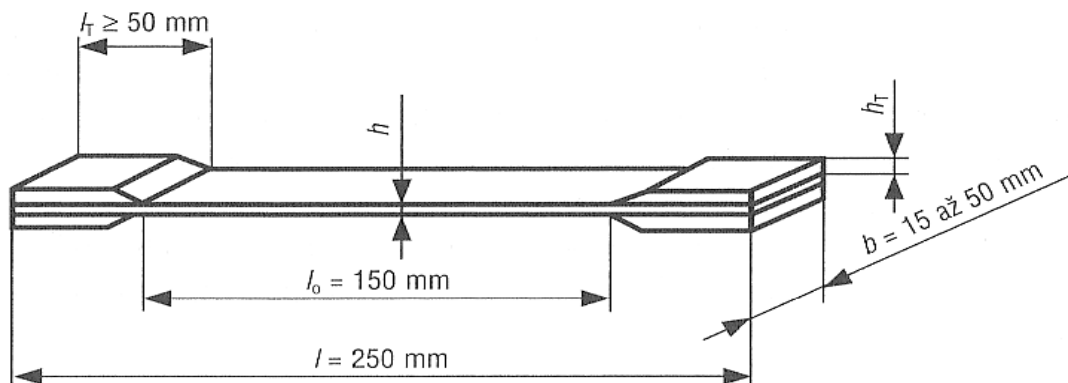
Statická zkouška jednoosým tahem je nejběžnější a nejpoužívanější mechanická zkouška. Cílem zkoušky je určit pevnost v tahu, modul pružnosti a poissonovo číslo materiálu. U kompozitních materiálů se tahová zkouška provádí nejčastěji na plochých vzorcích ve tvaru kosti nebo vzorek s rovnými stranami a koncovým zesílením. Osově zatížení je přenášeno na vzorek buď čepem, nebo čelistmi. [11]



Obrázek 17. Uchycení vzorků během tahové zkoušky

a) čepem b) čelistmi [11]

Pro kompozity je navrženo mnoho tvarů a geometrií zkušebních těles v daných normách (např. ČSN EN ISO 527 – 1 až 5), zohledňující stavbu kompozitu. Pro lamináty s výztuží ve formě tkaniny a jednosměrně vyztužených laminátů se pro zkoušky v tahu osvědčila prizmatická tělesa se zesílením v místě upnutí.



Obrázek 18. Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku tahem [4]

Pevnost v tahu ve směru kolmo k vláknům se dá měřit na vinutých plochách zkušebních těles. Při měření elastických charakteristik (modulů a poissonova čísla) musí být tělesa vyřezána ze zkušební desky ve směru os ortotropie. Rychlost zatěžování je 1 % délky zkušebního tělesa za minutu, přičemž maximální deformace by neměla překročit 0,5 %, aby nedošlo k ovlivnění oblastmi, kde se již tvoří poškození. Při dostatečně malé deformaci je modul pružnosti ve směru osy x [4]

$$E_x = \frac{F\Delta l_0}{S_0 l_0} = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

S_0 – původní průřez zkušebního tělesa [mm^2],

F – zatěžovací síla [N],

l_0 – původní měrná délka [mm],

ε_x – deformace ve směru x ,

σ_x – napětí ve směru osy x [MPa].

Ke stanovení modulu E_y je nezbytné stanovit na zkušebním tělese hodnoty σ_y , ε_y ve směru osy y . Poissonovo číslo ν_{xy} se stanoví z přetvoření ε_x a ε_y vyvolaným napětím σ_x .

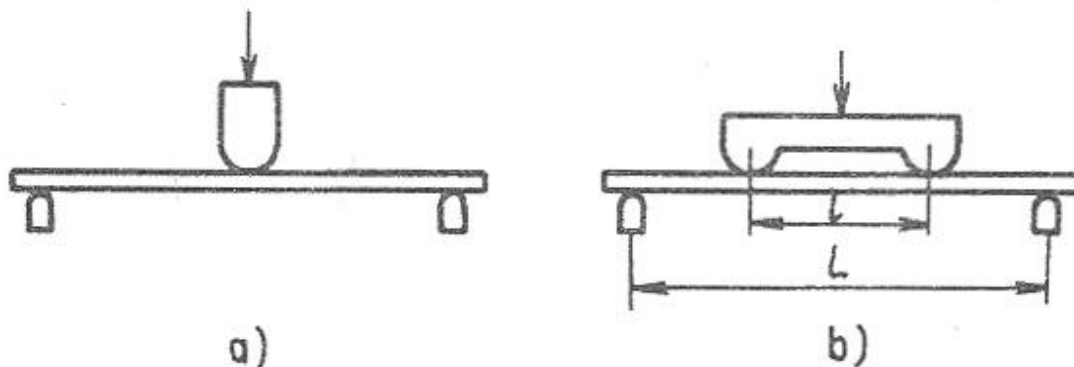
$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Přetvoření se obvykle snímají průtahoměry nebo odporovým tenzometry. Nevýhodná je cena, pracnost přípravy a provedení zkoušky. [4]

4.2 Zkouška jednoosým ohybem

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) nebo dvěma symetricky umístěnými břemeny (čtyřbodová zkouška). Středové břemeno u tříbodové zkoušky vyvolá ohybový moment v nosníku, který se mění lineárně od nuly u podpor po maximální hodnotu ve středu. Současně je vyvoláno rovnoměrně rozdělené smykové napětí po celé délce vzorku. To může způsobit předčasné porušení vzorku vlivem nízké interlaminární smykové pevnosti kompozitních materiálů. Při čtyřbodovém ohybu vyvolají dvě symetrické břemena ohybové momenty lineárně rostoucí od nuly na podpoře k maximální hodnotě pod břemenem. Ohybový moment mezi břemeny je konstantní. Nevzniká žádné smykové napětí a tato část nosníku je namáhána čistým ohybem.

Interlaminární smyková napětí jsou vyvolány pouze ve vnějších částech rozpětí. Z hlediska stavu napětí je tříbodová ohybová zkouška snáze proveditelná. [11]



Obrázek 19. Zkouška jednoosým ohybem [11]

a) tříbodový ohyb b) čtyřbodový ohyb

Pevnost v ohybu je hodnota napětí na povrchu vzorku při porušení. Vypočítá se z maximálního ohybového momentu za předpokladu přímkového pracovního diagramu až do lomu. Pro nosník obdélníkového průřezu je dána výrazem

$$\sigma = \frac{6M_o}{ba^2} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

kde je

M – ohybový moment při porušení [Nmm],

b – šířka vzorku [mm],

a – výška vzorku [mm]. [11]

4.3 Vícesé rázové namáhání – metoda padajícího tlouku

Rázová houževnatost jako odolnost zkušební tělesa daných rozměrů proti porušení se stanoví nárazem tlouku, který padá volným pádem ze známé výšky. Běžné zkušební vzorky mají tvar válce o průměru 60 mm nebo hranolu s podstavou o straně 60mm. Za tloušťku desky se bere výška válce nebo hranolu. Energie tlouku potřebná k porušení 50 % zkušebních těles se vypočítá jako

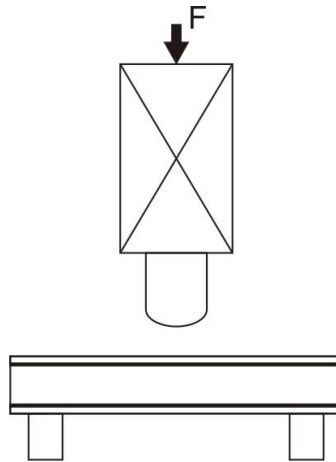
$$E = H \cdot g \cdot m \quad [\text{J}] \quad (7)$$

kde

H – konstantní výška pádu [m],

m – konstantní hmotnost padajícího tlouku [kg],

g – gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]



Obrázek 20. Schéma metody padajícího tlouku [11]

4.4 Provedení zkoušek

Kompozitní materiály se při každém použití nově navrhují a vyrábějí. Výsledky zkoušek na daných vzorcích jsou proto srovnatelné a použitelné na zhotovený výrobek pouze při dodržení shodných výrobních podmínek. Pečlivé promíchání složek, rozprostření matrice a průběh vytvrzované matrice ovlivňují u termosetických matric vytvrzení a jeho stupeň. Je nutné brát zřetel na dotvrzení, zvláště při měření s proměnlivou teplotou. Tlak, čas a teplota se při zpracování musí pečlivě kontrolovat. [4]

4.4.1 Výroba a příprava zkušební tělesa

Pro zkoušky materiálu se používají normalizované zkušební vzorky, které musí být vyrobeny podle předepsaných norem (ČSN EN ISO 293 - Lisování zkušebních těles z termoplastů). Nejčastěji jsou to ploché tělesa vyříznuté z hladkých desek. Musejí se vyřezávat minimálně 20 mm od kraje desek, aby nedocházelo k poškození hran a řezy byly dostatečně hladké. Je nutné používat kotouče osazené diamantem nebo frézy s nástavci z tvrdého kovu za použití chladícího média. [4]

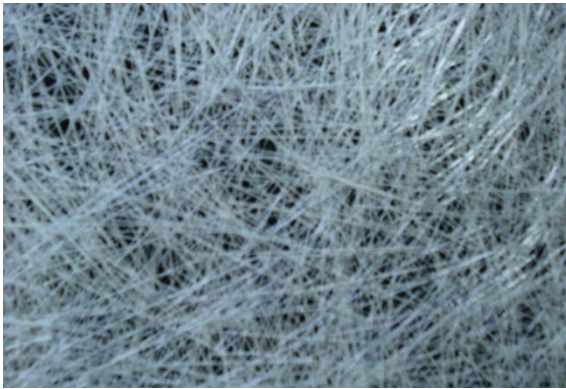
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VÝROBA VZORKŮ

Před samotnou výrobou bylo nezbytné si připravit materiál a pomůcky. Vzorky byly vyrobeny metodou vakuového lisování pod pružnou fólií s následným vytvrzením v peci. Po vytažení a ochlazení byly vzorky nařezány a takto připraveny k provedení zkoušek.

5.1 Materiál a pomůcky

- Polypropylenová netkaná textilie
- Skelná rohož
- Skelná tkanina



Obrázek 21. Skelná rohož

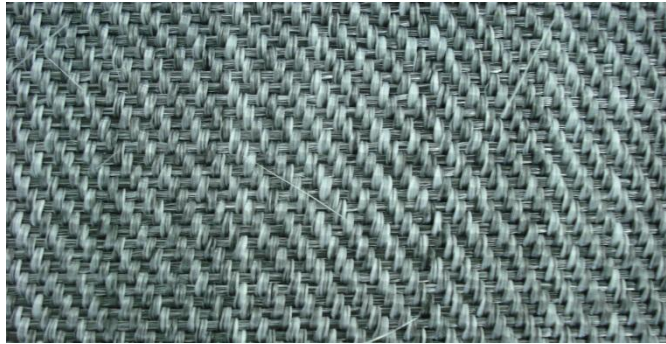


Obrázek 22. Polypropylenová netkaná textilie



Obrázek 23. Skelná tkanina

- Speciálně vyztužený materiál Twintex



Obrázek 24. Materiál Twintex

- Separáční fólie
- Izolační páska
- Odsávací rohoŹ

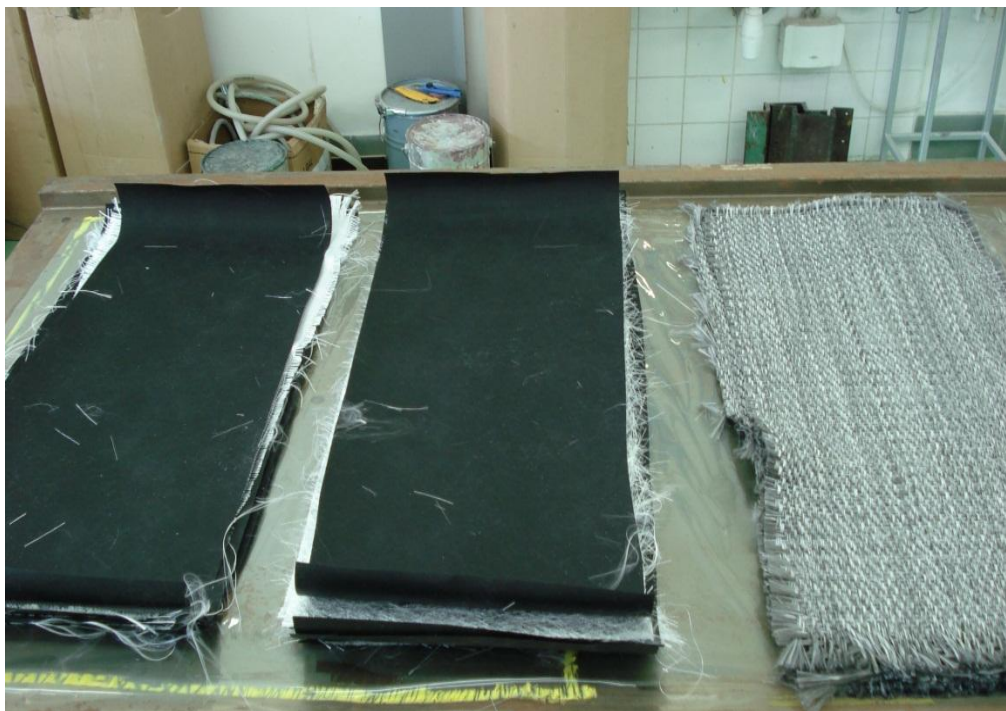


Obrázek 25. Odsávací rohoŹ

- Odtrhov  tkanina
- Odsávací ventil
- Odsávací hadice
- Vývěva
- Metr, n Źky
- Kovov  deska formy
- Pec vytvrzovací

5.2 Postup výroby vzorků

Před samotnou výrobou bylo potřeba si připravit formu. Forma byla tvořena kovovou deskou na podstavci, o tloušťce 5mm. Povrch nebyl impregnován žádnou separační látkou, ale byla použita separační fólie z důvodu ochrany vzorků před přilepením k povrchu formy. Pro separaci je nutné vybrat fólii z vhodného materiálu, aby teplota tání fólie byla vyšší než teplota vytvrzování. Mohlo by dojít k roztavení jak vzorků, tak i fólie. Materiál byl rozstříhán na daný rozměr formy, tzn. 90x35 mm. Poté byl takto připravený materiál vložen na separační fólii v daném pořadí. U prvního vzorku jsem začal s PP textilií a na ni jsem položil tkaninu. Takto jsem na sebe naskládal dalších osm vrstev. U druhého vzorku byl postup stejný, ale místo tkaniny byla použita skelná rohož. Na třetí vzorek byly použity tři vrstvy Twintexu.



Obrázek 26. Materiál naskládáný na formě

Na takto připravený materiál byla dána druhá vrstva separační fólie, aby nedošlo k přilepení horní strany materiálu, a odsávací tkaniny, která zabezpečuje odsátí přebytečné matrice. Poté byla forma neprodyšně zaizolována vakuovou fólií, kterou jsem k formě připevnil izolační páskou.



Obrázek 27. Zaizolovaná forma

Po nainstalování odsávací hubice byl pomocí vývěvy odsán přebytečný vzduch. Ve formě vznikl podtlak 0,7 bar.



Obr. 28. Vzorky před vložením do pece

Připravené vzorky byly umístěny do vytvrzovací pece a vytvrzovány při teplotě 195 °C po dobu 30 minut s náběhem 90 minut. Po ochlazení jsem vytvrzené vzorky vyndal z formy a rozřezal.

Tabulka 7. Množství použitého materiálu k výrobě vzorků

Sk.	Materiál	Kusů	Skladba I	Skladba II
1	PP	10x	PP netkaná textilie 100 g/m ²	PP netkaná textilie 100 g/m ²
		9x	Rohož 225 g/m ²	Tkanina 220 g/m ²
2	Twintex	3x	Tkanina Twintex 980 g/m ²	
Doba vytvrzování			30 minut / náběh pece 90minut	

5.3 Zkouška jednoosým tahem

Pevnost v tahu se stanovuje jako síla potřebná k přetržení daných vzorků. Zkouška se prováděla na přístroji ZWICK 1456 s vyhodnocovacím softwarem ZWICK II v 3.31. Na tomto přístroji lze provádět i zkoušku ohybem, tlakem nebo jiné zkoušky. Testována byla pevnost vždy u deseti vzorků každého druhu polotovaru. Přístroj byl řízen počítačovým programem, který zároveň provádí výpočet základních statistických veličin. Počítačový program vyhodnotil naměřené údaje pro mez pevnosti, tahové napětí při přetržení, modul pružnosti v tahu, protažení při přetržení, protažení při maximálním zatížení, aritmetický průměr, směrodatnou odchylku a variační rozpětí. Zkouška a rozměr vzorků je v souladu s normou ČSN EN ISO 275.

5.3.1 Postup zkoušky

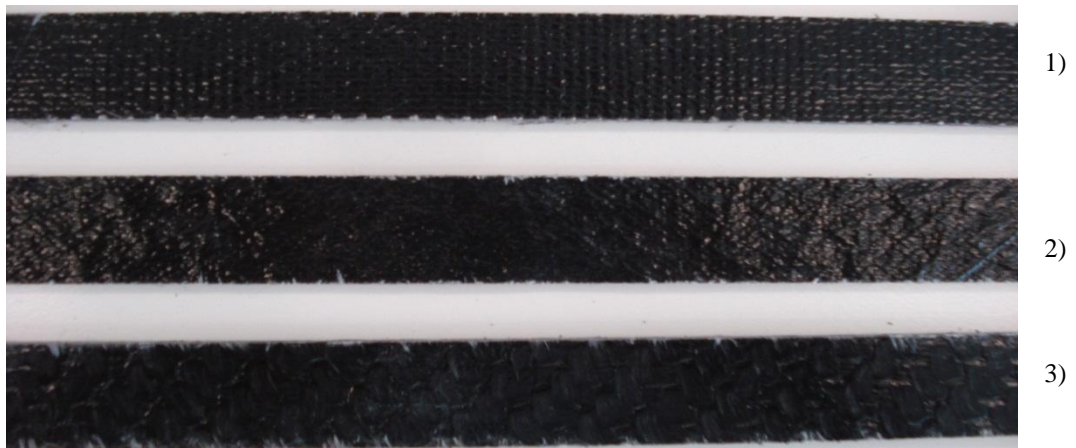
Při tahové zkoušce je těleso vloženo mezi čelisti přístroje a důsledně ukotveno aby nedošlo k posunutí během zkoušky. Poté je konstantní rychlostí namáháno silou v ose, která je přenášena přes čelisti stroje, až do přetržení zkušebního vzorku. Po dosažení této hodnoty se čelisti vrátí do původní pozice.



Obrázek 29. Měřicí přístroj ZWICK 1456

Před zkouškou bylo do počítače nutné zadat tyto hodnoty:

- definice zkoušky: zkouška tahem
- rychlost zkoušky: 5 mm/min
- upravit výstupní hodnoty
- parametry vzorků - tloušťka a - 2 mm rohož
 - 2 mm tkanina
 - 3,5 mm Twintex
- šířka b - 26 mm
- délka l – 250 mm



Obrázek 30. Vzorky před provedením zkoušky

1) Tkanina 2) Rohož 3) Twintex



Obrázek 31. Vzorky po deformaci

5.3.1.1 Mez pevnosti v tahu

Definuje se jako napětí potřebné k přetržení vzorku vztahené na původní průřez, nebo smluvní napětí potřebné k přetržení. Pro výpočet se dosazuje síla maximální.

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

5.3.1.2 Modul pružnosti v tahu

Vyjádřený v MPa, definuje se jako poměr napětí a jím vyvolaného poměrného prodloužení.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

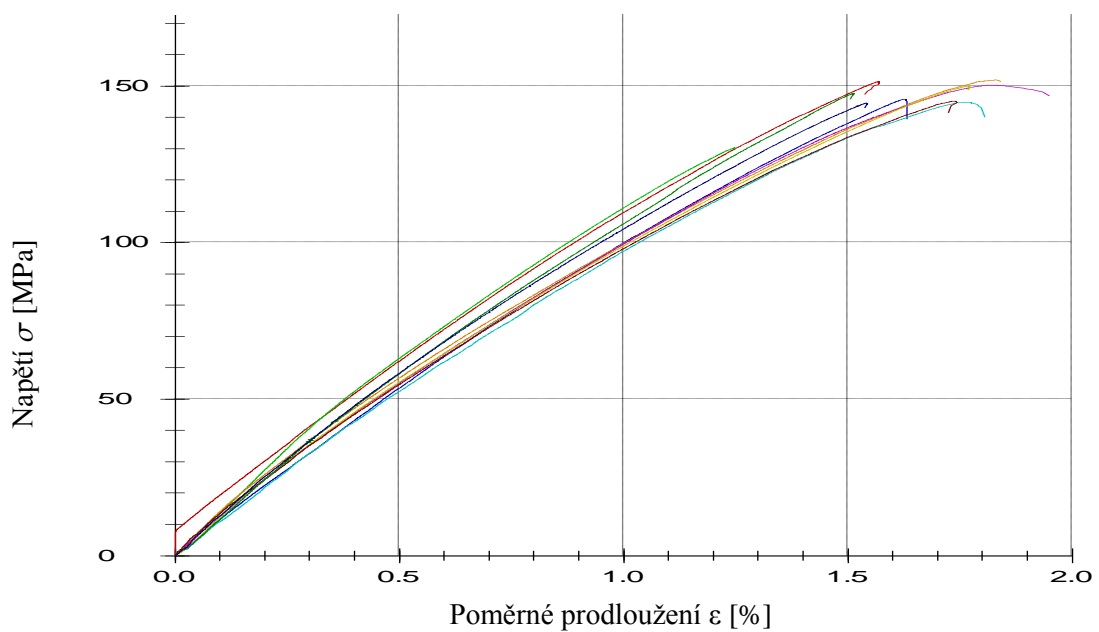
5.3.2 Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky

Tabulka 8. Naměřené hodnoty pro vzorek 1. PP matrice vyztužený rohoží

Měření	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mt} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]
1	1,96	26,3	151	10900	1,5
2	1,96	25,7	130	13500	1,2
3	1,96	25,7	146	11100	1,6
4	1,96	26,2	152	12000	1,8
5	1,96	26,2	150	11700	2
6	1,96	26,1	145	11000	1,8
7	1,96	26,2	150	12300	1,8
8	1,96	26,3	145	11300	1,7
9	1,96	26,4	148	12600	1,5
10	1,96	26,2	145	12100	1,5

Tabulka 9. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami

n=10	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mt} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]
Ar. průměr	1,96	26,13	146	11900	1,7
Směr. Odch.	0	0,241	6,27	827	0,2
Var. rozp.	0	0,92	4,29	6,97	12,42



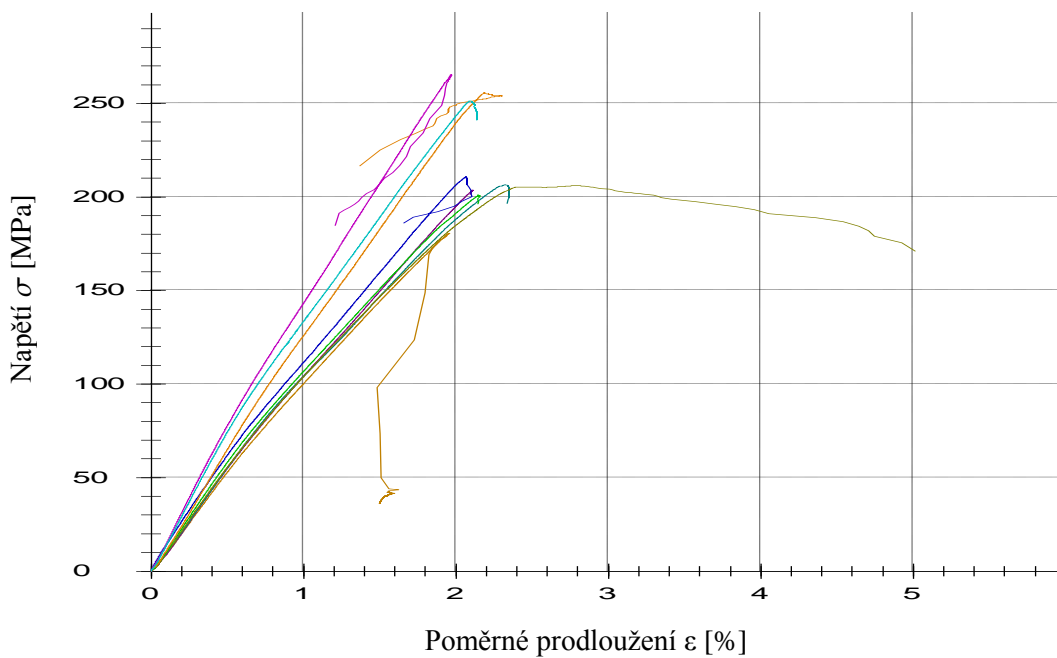
Obrázek 32. Tahová křivka pro 10 vzorků PP matrice vyztužené rohoží

Tabulka 10. Naměřené hodnoty pro vzorek 2. PP matrice vyztužená tkaninou

Měření	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mt} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]
1	1,96	25,7	181	10600	2
2	1,96	25,6	204	11200	2,1
3	1,96	25,6	207	11000	2,3
4	1,96	25,5	206	11700	2,8
5	1,96	25,4	173	10500	2,2
6	1,96	25,6	201	12000	2,2
7	1,96	26,2	211	12400	2,1
8	1,96	26,1	256	13000	2,2
9	1,96	26	266	16200	2
10	1,96	26,3	251	15400	2,1

Tabulka 11. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami

n=10	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mt} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]
Ar. průměr	1,96	25,84	220	12600	2,2
Směr. Odch.	0	0,3046	29,6	1960	1,1
Var. rozp.	0	1,18	13,43	15,55	52,78



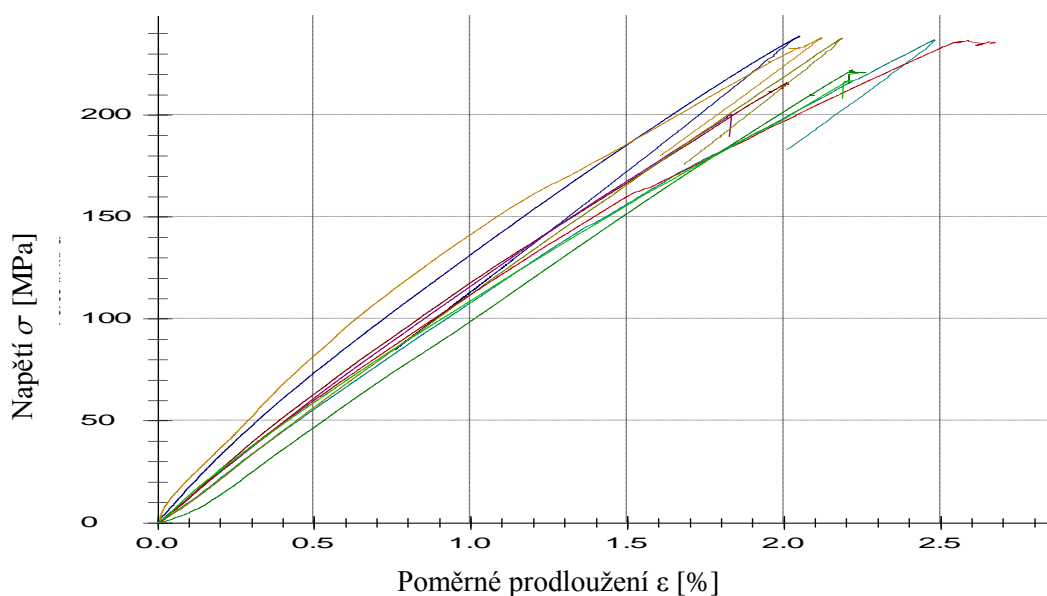
Obrázek 33. Tahová křivka pro 10 vzorků PP matrice vyztužené tkaninou

Tabulka 12. Naměřené hodnoty pro vzorek 3. Twintex

Měření	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mt} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]
1	3,51	26,1	216	13500	2
2	3,51	26,2	222	11100	2,2
3	3,51	26	239	15900	-
4	3,51	26,1	238	15200	-
5	3,51	26	201	12500	1,8
6	3,51	26,2	237	11500	-
7	3,51	26,1	238	11300	-
8	3,51	25,9	237	12800	2,7
9	3,51	26,2	217	12600	2,2

Tabulka 13. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami

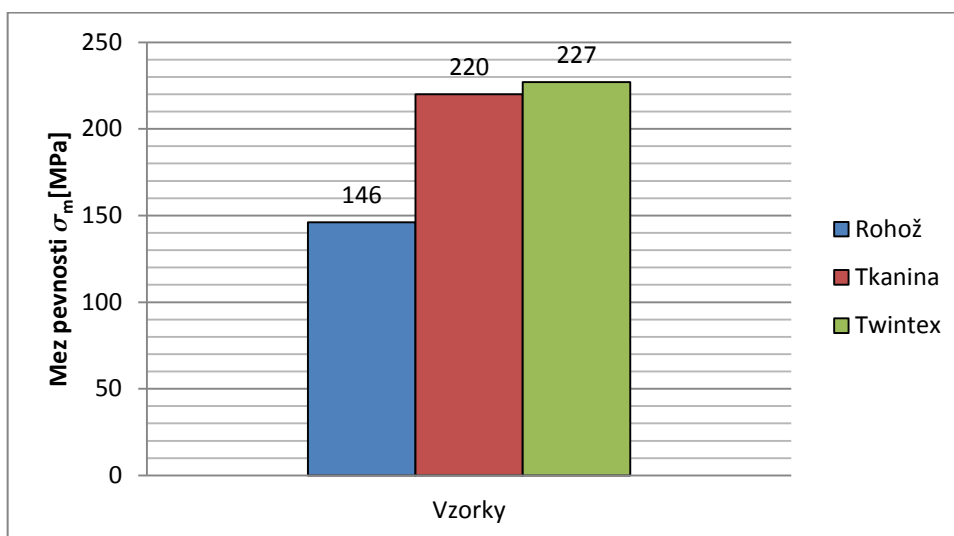
n=10	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mt} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrné prodloužení ε [%]
Ar. průměr	3,51	26,09	227	12900	2,2
Směr. Odch.	0	0,1054	13,7	1670	0,3
Var. rozp.	0	0,4	6,05	12,92	14,36



Obrázek 34. Tahová křivka pro 9 vzorků Twintex

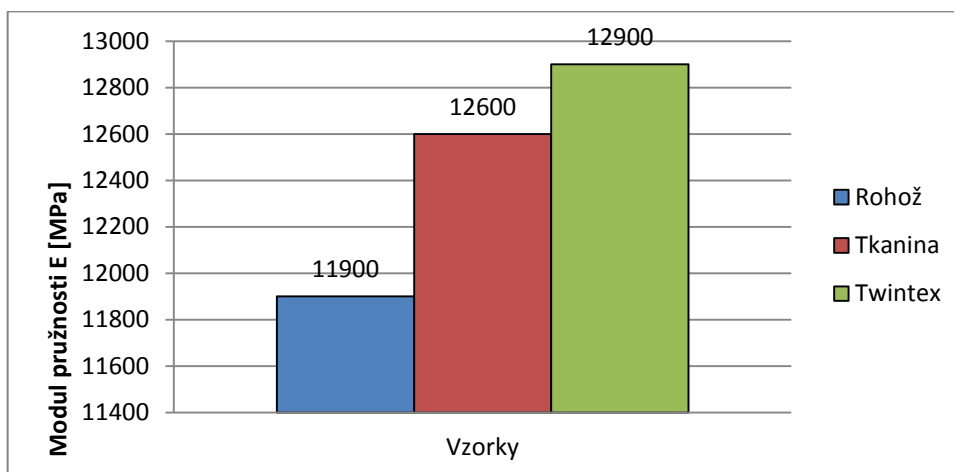
U některých zkoušených vzorků (číslo měření 3,4,6,7) speciálně vyztuženého materiálu twintex byla pevnost v tahu větší než maximální dovolené zatížení stroje ZWICK 1456 (22 kN), proto nedošlo k přetržení vzorků. Vzhledem k tomu, že u většiny vzorků k přetržení došlo, usuzují, že mez pevnosti byla lehce nad dovolené zatížení stroje.

Na grafu 1. a 2. jsou znázorněny naměřené průměrné hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti v tahu pro tři sledované vzorky. Jednotlivé vzorky jsou rozlišeny barevně. Modrá je PP matrice vyztužená skelnou rohoží, červená je PP matrice vyztužená tkaninou a zelenou je označený materiál Twintex.



Graf 1. Porovnání meze pevnosti měřených vzorků

Graf 1. ukazuje, že největší průměrnou hodnotu pevnosti v tahu má vzorek materiálu Twintex a tkaniny. Jejich výsledná hodnota je téměř totožná. Naopak PP matrice vyztužená skelnou rohoží má mez pevnosti o poznání nižší než předchozí vzorky.



Graf 2. Porovnání modulu pružnosti měřených vzorků

Graf 2. porovnává průměrnou hodnotu modulu pružnosti v tahu zkoumaných vzorků. Z grafu můžeme určit, že největší modul pružnosti v tahu má Twintex a nejnižší rohož.

Nejlepší mechanické vlastnosti při zatížení v tahu má Twintex. Pro aplikaci v praxi, kde dochází k tahovému namáhání, bych proto zvolil tento materiál.

5.4 Tříbodová zkouška ohybem

Vlastnosti materiálů, které jsou v praxi namáhány na ohyb nebo se svou vlastní vahou dokážou prohnout, je třeba znát před jejich aplikací. Pro zjištění hodnot a chování výrobku při ohybovém namáhání je vhodné provést zkoušku na tříbodový ohyb. Tato zkouška do jisté míry dokáže simulovat chování materiálu při namáhání a určit její vhodnost pro finální aplikaci. Pomocí ohybové zkoušky lze také určit modul pružnosti E u materiálů, u kterých to není možné udělat pomocí zkoušek tlakových nebo tahových.

5.4.1 Postup zkoušky

Zkouška byla prováděna na stroji ZWICK 1456, dle normy ČSN EN ISO 14125. Vzorek byl položen na podpěry a poté byl konstantní rychlostí namáhán břemenem uprostřed rozpětí podpěr, dokud se nezlomil nebo nebylo dosaženo předem stanovené hodnoty deformace. Po dosažení této hodnoty se břemeno vrátilo do původní polohy.



Obrázek 35. Zkouška tříbodovým ohybem



Obrázek 36. Vzorky před deformací

1) Twintex 2) Rohož 3) Tkanina

Před zkouškou bylo do počítače nutné zadat tyto hodnoty:

- definice zkoušky: zkouška ohybem
- rychlost zkoušky: 5 mm/min
- upravit výstupní hodnoty
- parametry vzorků - tloušťka a - 2 mm rohož
- 2 mm tkanina
- 3,5 mm Twintex
- šířka b - 20 mm
- délka l – 150 mm

Rozměry vzorku, rychlost namáhání, rozpětí podpěr jsou uvedeny v daných normách.

Výpočty pro vyjádření hodnot:

- Pevnost v ohybu – maximální napětí v ohybu, které vzorek snese během zkoušky.

$$\sigma = \frac{M_{0max}}{W_0} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

Kde M_{0max} je ohybový moment při maximální zatěžující síle F_{mo} a W_0 je modul průřezu.

- Modul pružnosti v ohybu – získává se z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení.

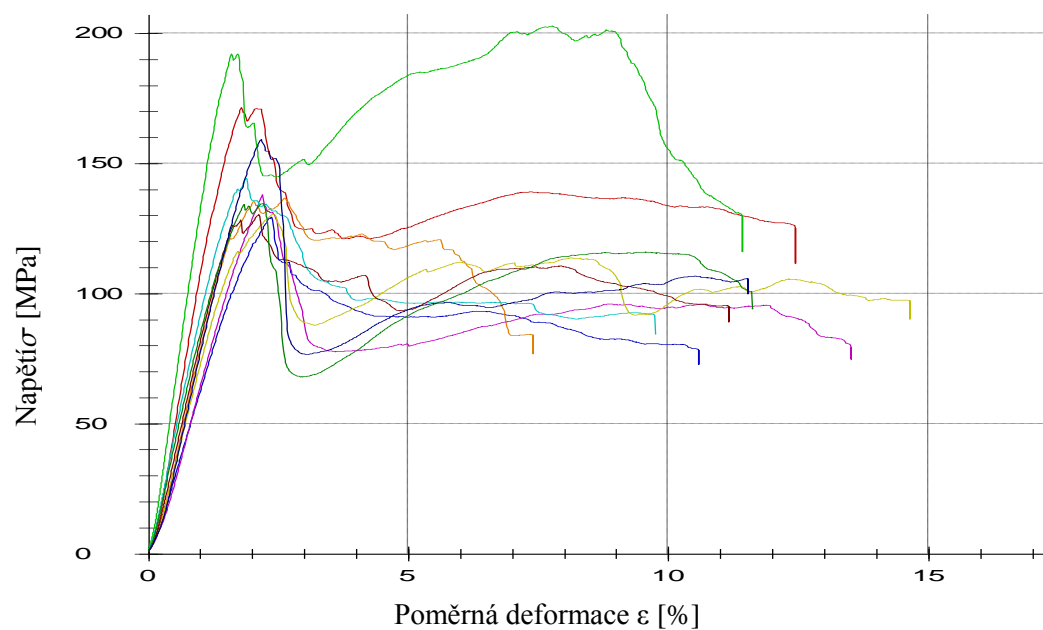
5.4.2 Vyhodnocení výsledků ohybové zkoušky

Tabulka 14. Naměřené hodnoty pro vzorek 1. PP matrice vyztužené rohoží

Měření	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mo} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrná deformace ε [%]
1	2	20,9	172	13000	1,8
2	1,6	20,4	203	14200	7,8
3	2	20,6	130	6700	2,4
4	2	20,3	137	9020	2,6
5	2	20,5	138	6910	2,2
6	2	20,2	144	9720	1,9
7	2	20,2	131	8330	2,4
8	2	20,4	130	9080	2,1
9	2	20,5	135	9120	2,2
10	2	20,6	159	9370	2,2

Tabulka 15. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami

n=10	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mo} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrná deformace ε [%]
Ar. průměr	1,96	20,46	148	9540	2,7
Směr. Odch.	0,1265	0,2119	23,7	2370	1,8
Var. rozp.	6,45	1,04	16,04	24,82	64,65



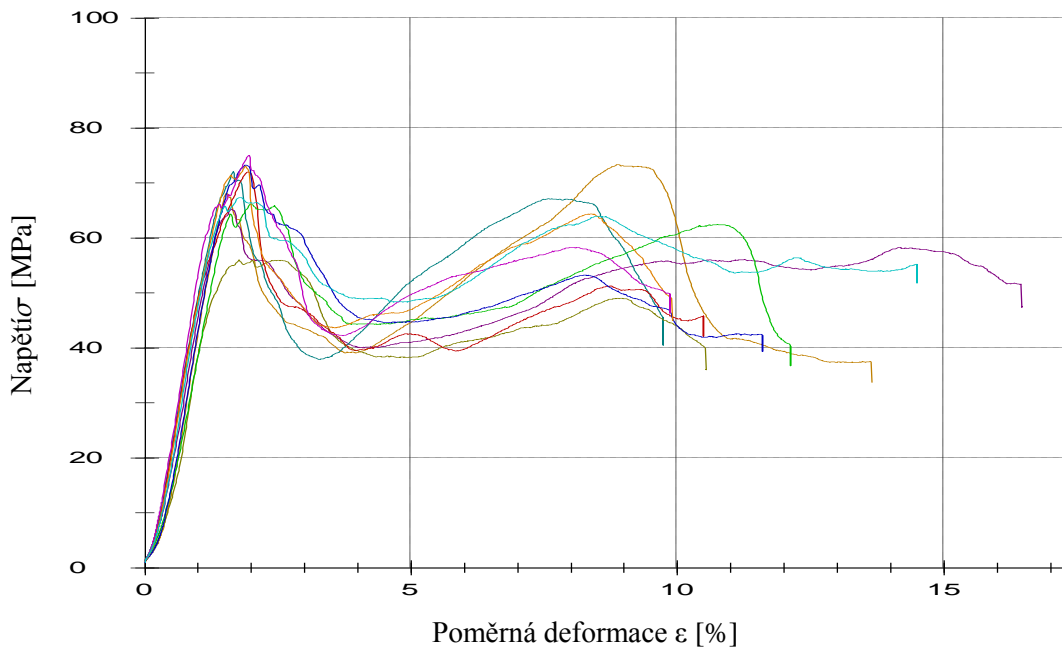
Graf 3. Ohybová křivka pro 10 vzorků PP matrice vyztužené tkaninou

Tabulka 16. Naměřené hodnoty pro vzorek 2. PP matrice vyztužená tkaninou

Měření	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mo} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrná deformace ϵ [%]
1	2	20,5	73,4	5130	8,9
2	2	20,2	65,3	5050	1,6
3	2	20,6	72,1	5930	1,7
4	2	20,4	56	3750	1,8
5	2	20,3	72	5890	1,9
6	2	20,3	66,2	4350	2
7	2	20,5	73,3	5220	1,9
8	2	20,5	73	5940	1,9
9	2	20,6	75,1	5980	2
10	2	20,4	67,3	5780	1,8

Tabulka 17. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami

n=10	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mo} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrná deformace ϵ [%]
Ar. průměr	2	20,43	69,3	5300	2,5
Směr. Odc.	0	0,1337	5,79	765	2,2
Var. rozp.	0	0,65	8,35	14,43	88,09



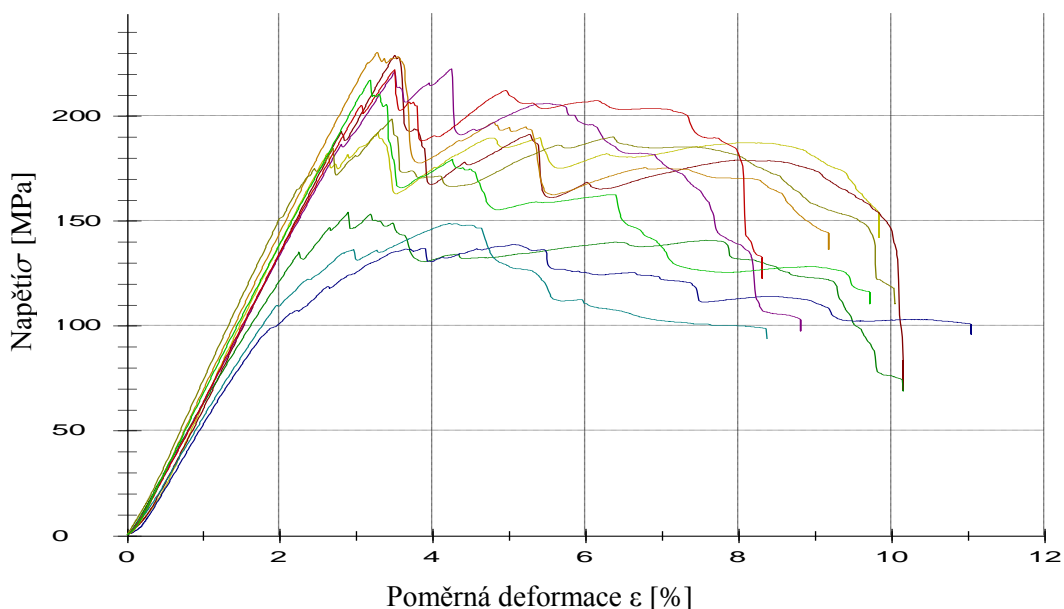
Graf 4. Ohybová křivka pro 10 vzorků PP matrice vyztužené tkaninou

Tabulka 18. Naměřené hodnoty pro vzorek 3. Twintex

Měření	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mo} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrná deformace ε [%]
1	3,5	20,4	192	7520	3,3
2	3,5	20,6	229	6880	3,5
3	3,5	20,6	154	6610	2,9
4	3,5	20,4	139	6250	5,1
5	3,5	20,8	230	7890	3,3
6	3,5	20,6	223	6750	4,2
7	3,5	20,6	149	6500	4,2
8	3,5	20	199	7930	3,5
9	3,5	20,7	222	6600	3,5
10	3,5	20,5	217	7490	3,2

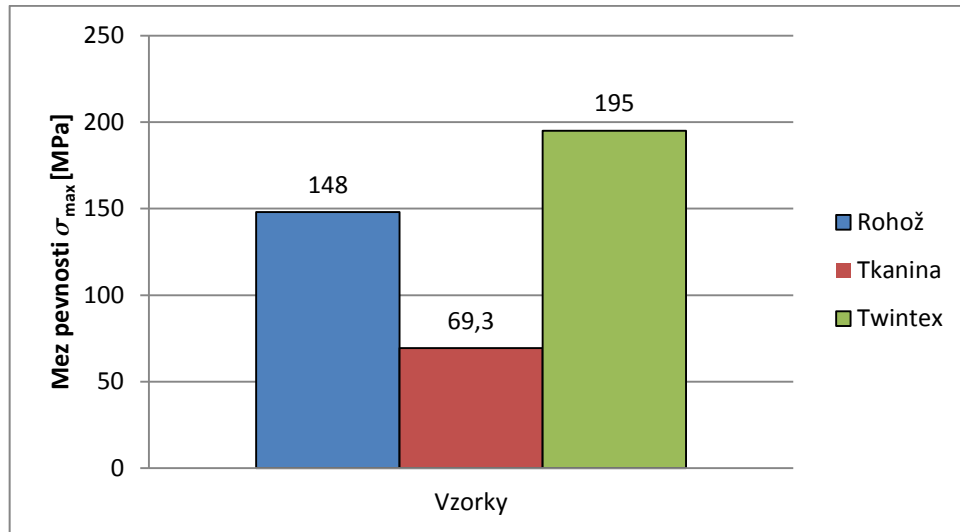
Tabulka 19. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami

n=10	Tloušťka a [mm]	Šířka b [mm]	Mez pevnosti σ_{mo} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poměrná deformace ε [%]
Ar. průměr	3,5	20,52	195	7040	3,7
Směr. Odc.	0	0,2201	35,5	610	0,7
Var. rozp.	0	1,07	18,15	8,66	17,8



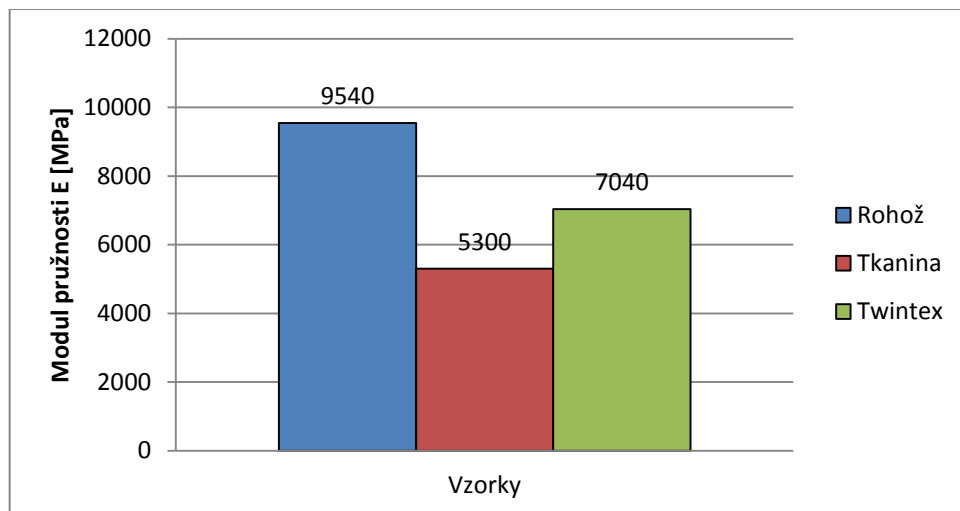
Graf 5. Ohybová křivka, 10 vzorků Twintexu

Na grafu 6. a 7. Jsou znázorněny naměřené průměrné hodnoty mezi pevnosti a modulu pružnosti v ohybu pro tři sledované vzorky. Jednotlivé vzorky jsou rozlišeny barevně. Modrá je polypropylenová matrice vyztužená rohoží, červená je polypropylenová matrice vyztužená tkaninou a zelenou je označený materiál Twintex.



Graf 6. Porovnání meze pevnosti v ohybu

Z grafu 6. je patrné, že největší pevnost v ohybu má vzorek z Twintexu. Druhou největší mez pevnosti má rohož a nejnižší vzorek vyztužený tkaninou.



Graf 7. Porovnání modulu pružnosti v ohybu

Na grafu 7. je znázorněn rozdíl modulu pružnosti v ohybu jednotlivých vzorků. Nejvyšší modul pružnosti v ohybu má rohož a naopak nejnižší tkanina.

Z toho plyne, že nejlepší mechanické vlastnosti v ohybu má vzorek Twintexu a polypropylenová matrice vyztužená rohoží.

5.5 Rázová zkouška

Rázová zkouška se prováděla metodou padajícího tlouku. Rázová houževnatost znamená odolnost zkušební tělesa vhodných rozměrů proti porušení pádem. Tato zkouška je založena na principu volně padajícího tělesa s libovolně volenou kinetickou energií. Ve srovnání s přístrojem s otočným kladívkem má tato metoda velkou výhodu v možnosti téměř libovolně si volit energii a rychlost pádu. Tlouk má polokulovou leštěnou nárazovou plochu z kalené oceli o průměru $10 \pm 0,2$ mm. Tato metoda nachází uplatnění obzvláště při hodnocení plastových nebo kompozitních desek a výlisků vystavených rázovému zatížení působícímu kolmo k rovině desky.

5.5.1 Postup zkoušky

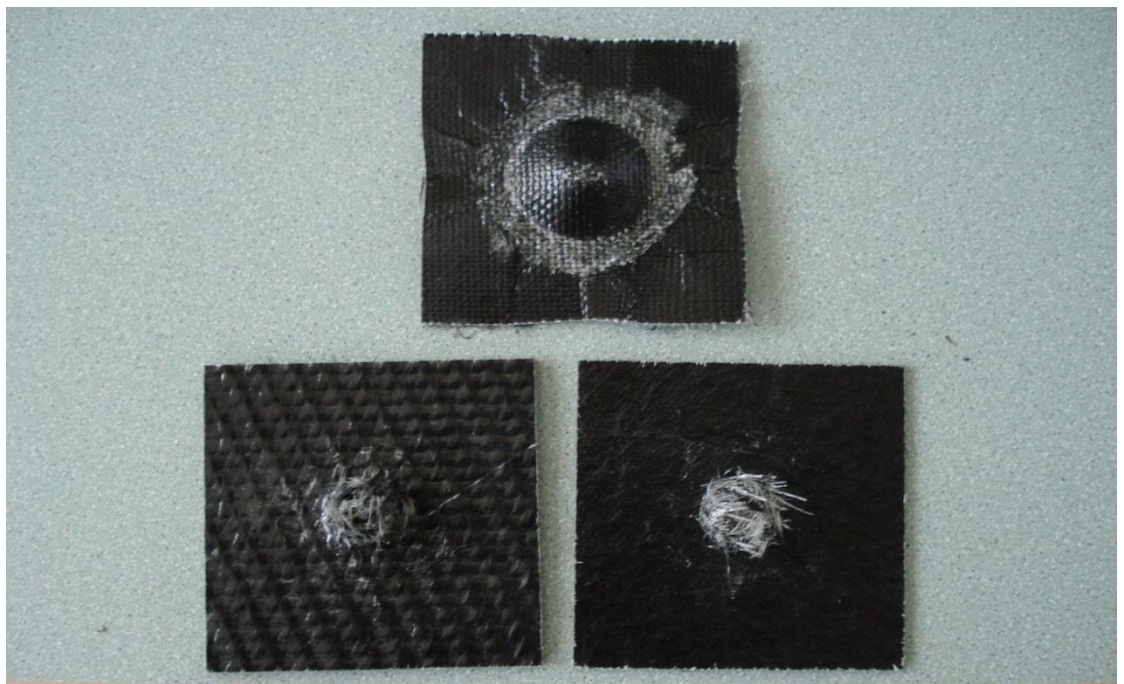
Zkouška byla prováděna pomocí padostroje ZWICK ROELL HIT 230F. Připraveny byly od každého materiálu tři zkušební vzorky, ve formě desek, které měly rozměr 100 x 100 mm. Poté byly vzorky položeny na podpěru a upevněny do upínacího zařízení. Následně byla nastavena výška a hmotnost závaží a provedena zkouška. Došlo k proražení všech zkušebních vzorků. Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN ISO 6603 – 1.



Obrázek 37. Padostroj ZWICK ROELL HIT 230F

Zadané parametry:

- hmotnost závaží – 23,17 kg
- parametry vzorků - tloušťka a - 2 mm rohož
 - 2 mm tkanina
 - 3,5 mm Twintex
- šířka b - 100 mm
- délka l – 100 mm
- výška pádu - 880 mm rohož
 - 660 mm tkanina
 - 880 mm Twintex



Obrázek 38. Vzorky po rázové deformaci

5.5.2 Vyhodnocení rázové zkoušky

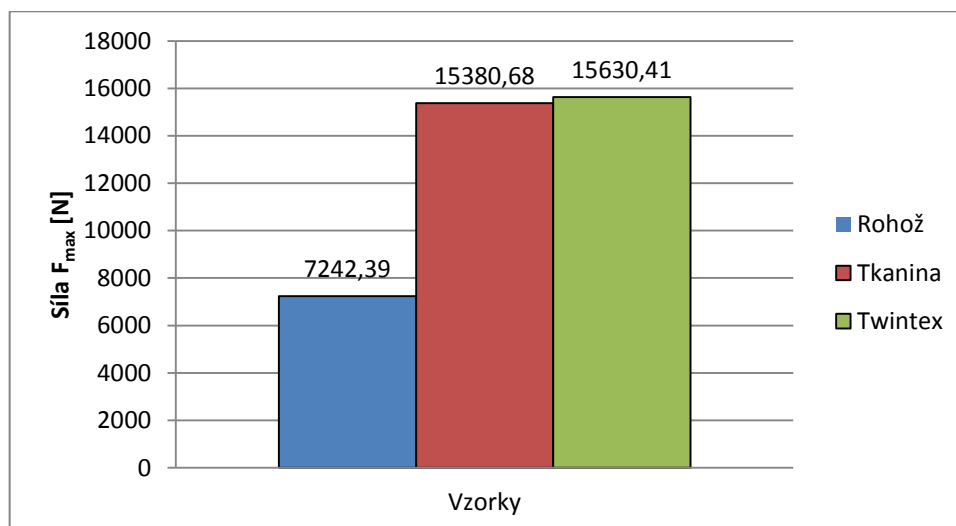
Tabulka 20. Naměřené hodnoty pro všechny vzorky

měření	Tkanina		Rohož		Twintex	
	F_{\max} [N]	W [J]	F_{\max} [N]	W [J]	F_{\max} [N]	W [J]
1	14245,17	100,12	6784,07	12,03	15082	48,01
2	15757,8	131,55	8060,08	15,49	15408,24	53,4
3	16139,06	139,51	6883,02	12,54	16400,98	47,81

Tabulka 21. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami

n = 3	Tkanina		Rohož		Twintex	
	F _{max} [N]	W [J]	F _{max} [N]	W [J]	F _{max} [N]	W [J]
Arit. průměr	15380,68	123,73	7242,39	13,35	15630,41	49,74
Směr. Odch.	1001,69	20,83	709,87	1,87	686,98	3,17
Var. rozp.	6,51	16,84	9,8	13,99	4,4	6,38
Medián	15757,8	131,55	6883,02	12,54	15408,24	48,01

Na grafu 8. je znázorněna naměřená průměrná hodnota pro tři sledované vzorky. Jednotlivé vzorky jsou rozlišeny barevně. Modrá je polypropylenová matrice vyztužená rohoží, červená je polypropylenová matrice vyztužená tkaninou a zelenou je označený materiál Twintex.



Graf 8. Porovnání hodnot maximální rázové síly

Z Grafu 8. Je patrné, že největší hodnotu maximální rázové síly potřebné k proražení polotovaru má vzorek Twintexu a tkaniny. Hodnota maximální síly u rohože je ve srovnání s předešlými vzorky velmi nízká.

Z toho plyne, že nejlepší rázové vlastnosti mají vzorky twintexu a PP matrice vyztužená skelnou tkaninou. Pro aplikaci do prostředí s velkým rázovým namáháním bych proto volil tyto dva vzorky.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo prozkoumat kompozitní materiály s PP matricí vyztužené dlouhými vlákny a speciálně vyztuženého typu materiálu Twintex pro porovnání jejich mechanických vlastností.

Zkušební vzorky byly vytvářeny metodou lisování pod pružnou folii s následným vytvrzením v peci. Tato metoda není příliš běžná pro zpracování termoplastových kompozitů. Mezi ty nejběžnější patří lisování za pomoci lisovacího stroje nebo vstřikování. Velká výhoda této metody spočívá v jednoduchosti a nízké ceně. Naopak nevýhodou je nízká efektivita, velká časová náročnost přípravy, z čehož vyplývá, že tuto metodu nemůžeme aplikovat na velkosériovou výrobu. Vzorky nebo výrobky, které se takto zpracovávají, mají jen jednu pohledovou stranu, takže se hodí k aplikaci například jako kryty motorů u automobilů.

Pro testování mechanických vlastností vyrobených vzorků, byly zvoleny zkoušky jednoosým tahem, tříbodovým ohybem a metoda padajícího tlouku pro rázovou zkoušku. Testovány byly tři druhy vzorků, polypropylenová matrice vyztužená skleněnou rohoží, polypropylenová matrice vyztužená skleněnou tkaninou a speciálně vyztužený typ materiálu Twintex. U tahové zkoušky byly hodnoceny parametry meze pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu. Po porovnání výsledků nejlepší tahové vlastnosti vykazuje Twintex a tkanina. U zkoušky ohybem byly vyhodnocovány mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Nejvyšší hodnotu meze pevnosti v ohybu má Twintex, ale pro modul pružnosti v ohybu rohož. To znamená, že Twintex snese větší namáhání, ale ve srovnání s rohoží snáz podléhá ohybové deformaci. U zkoušky rázovým namáháním byla vyhodnocována maximální síla potřebná k proražení vzorku. Nejvyšší hodnotu maximální rázové síly má tkanina a Twintex.

Po porovnání výsledků zkoušek jsem došel k závěru, že nejlepší mechanické vlastnosti ze zkoušených polotovarů má Twintex. Při všech prováděných zkouškách jeho výsledné hodnoty převyšovaly hodnoty druhých vzorků. Pro aplikaci do praxe bych proto volil tento materiál.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOŘÍNEK, Zdeněk. [online]. [cit. 23.5.2012]. *Kompozity*. Dostupné na: <www.volny.cz/zkorinek>
- [2] PLEŠKOVÁ, Iva. [online]. [cit. 23.5.2012]. *Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s krátkovlákným čedičem*. Dostupné na: <<http://www.kht.tul.cz>>
- [3] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] Kolektiv autorů. *Polypropylen*. [online]. [cit. 23.5.2012]. Dostupné na: <<http://sk.wikipedia.org>>
- [6] Kolektiv autorů. *Havel composites*. [online]. [cit. 23.5.2012]. Dostupné na: <<http://www.havel-composites.com/>>
- [7] OCV reinforcements. [online]. [cit. 23.5.2012]. *Twintex vakuuum moulding manual*. Dostupné na: <<http://fiberglassindustries.com>>
- [8] Kolektiv autorů. [online]. [cit. 23.5.2012]. *Twintex*. Dostupné na: <<http://twintex.com/>>
- [9] Facesport s.r.o. [online]. [cit. 23.5.2012]. *Polypropylenové vlákna*. Dostupné na: <<http://www.facesport.ic.cz/WEBIK2.html>>
- [10] LIPTÁKOVÁ, Tatiana. [online]. [cit. 23.5.2012]. *Polymerní technické materiály*. Dostupné na: <http://kmi2.uniza.sk/?page_id=162>
- [11] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 294 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PP	Polypropylen	
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice	
VE-R	Vinylesterová pryskyřice	
EP-R	Epoxidové pryskyřice	
PF-R	Fenolické pryskyřice	
LFT	Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny	
GMT	Termoplasty vyztužené skleněnými rohožemi	
W	Rázová energie	[J]
n	Počet měření	
ε	Poměrná deformace	[%]
σ	Napětí	[MPa]
ρ	Hustota	[g·cm ⁻³]
E	Modul pružnosti	[MPa]
F _{max}	Síla maximální	[N]
σ_{mo}	Mez pevnosti v ohybu	[MPa]
σ_{mt}	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
a	Tloušťka	[mm]
b	Šířka	[mm]
l	Délka vzorků	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1. Rozdíl mezi mikrokompozitem a nanokompozitem na bázi jílů [1]</i>	12
<i>Obrázek 2. Dělení výztuže podle orientace vláken [2]</i>	13
<i>Obrázek 3. Materiálové složení letadla Eurofighter Typhoon [1]</i>	14
<i>Obrázek 4. Formy výztuže a) Aramidová tkanina, b) Skelná rohož [6]</i>	24
<i>Obrázek 5. Druhy vazeb vyztužujících materiálů</i>	25
<i>Obrázek 6. Detail uhlíkového vlákna [4]</i>	27
<i>Obrázek 7. Detail zvukově a tepelně izolační desky</i>	29
<i>Obrázek 8. Detail materiálu Twintex, vazba 1/1 [7]</i>	29
<i>Obrázek 9. Detail materiálu Twintex, vazba 4/1 [7]</i>	30
<i>Obrázek 10. Lod' vyrobená z Twintexu [8]</i>	31
<i>Obrázek 11. Detail polypropylenového vlákna [9]</i>	32
<i>Obrázek 12. Schéma vytlačovacího stroje [10]</i>	33
<i>Obrázek 13. Schéma lisovací formy [10]</i>	34
<i>Obrázek 14. Schéma vstřikovacího stroje [10]</i>	34
<i>Obrázek 15. Schéma vyfukovacího zařízení [10]</i>	35
<i>Obrázek 16. Schéma vakuového tvarování [10]</i>	36
<i>Obrázek 17. Uchycení vzorků během tahové zkoušky</i>	38
<i>Obrázek 18. Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku tahem [4]</i>	38
<i>Obrázek 19. Zkouška jednoosým ohybem [11]</i>	40
<i>Obrázek 20. Schéma metody padajícího tlouku [11]</i>	41
<i>Obrázek 21. Skelná rohož</i>	43
<i>Obrázek 22. Polypropylenová netkaná textilie</i>	43
<i>Obrázek 23. Skelná tkanina</i>	43
<i>Obrázek 24. Materiál Twintex</i>	44
<i>Obrázek 25. Odsávací rohož</i>	44
<i>Obrázek 26. Materiál naskládáný na formě</i>	45
<i>Obrázek 27. Zaizolovaná forma</i>	46
<i>Obr. 28. Vzorky před vložením do pece</i>	46
<i>Obrázek 29. Měřicí přístroj ZWICK 1456</i>	48
<i>Obrázek 30. Vzorky před provedením zkoušky</i>	49
<i>Obrázek 31. Vzorky po deformaci</i>	49
<i>Obrázek 32. Tahová křivka pro 10 vzorků PP matrice vyztužené rohoží</i>	50

<i>Obrázek 33. Tahová křivka pro 10 vzorků PP matrice vyztužené tkaninou</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 34. Tahová křivka pro 9 vzorků Twintex</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 35. Zkouška třibodovým ohybem</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 36. Vzorky před deformací</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 37. Padostroj ZWICK ROELL HIT 230F</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 38. Vzorky po rázové deformaci</i>	<i>61</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1. Užité a technologické vlastnosti matric [3]</i>	15
<i>Tabulka 2. Přehled vlastností nejpoužívanějších matric [3]</i>	16
<i>Tabulka 3. Vlastnosti polypropylenu [5]</i>	20
<i>Tabulka 4. Rozdíly mezi vyztuženými termosety a termoplasty [4]</i>	21
<i>Tabulka 5. Vlastnosti čedičových vláken [2]</i>	28
<i>Tabulka 6. Mechanické a fyzikální vlastnosti textilie Twintex [8]</i>	30
<i>Tabulka 7. Množství použitého materiálu k výrobě vzorků</i>	47
<i>Tabulka 8. Naměřené hodnoty pro vzorek 1. PP matrice vyztužený rohoží</i>	50
<i>Tabulka 9. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami.....</i>	50
<i>Tabulka 10. Naměřené hodnoty pro vzorek 2. PP matrice vyztužená tkaninou</i>	51
<i>Tabulka 11. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami.....</i>	51
<i>Tabulka 12. Naměřené hodnoty pro vzorek 3. Twintex</i>	52
<i>Tabulka 13. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami.....</i>	52
<i>Tabulka 14. Naměřené hodnoty pro vzorek 1. PP matrice vyztužené rohoží</i>	56
<i>Tabulka 15. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami.....</i>	56
<i>Tabulka 16. Naměřené hodnoty pro vzorek 2. PP matrice vyztužená tkaninou</i>	57
<i>Tabulka 17. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami.....</i>	57
<i>Tabulka 18. Naměřené hodnoty pro vzorek 3. Twintex</i>	58
<i>Tabulka 19. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami.....</i>	58
<i>Tabulka 20. Naměřené hodnoty pro všechny vzorky</i>	61
<i>Tabulka 21. Výsledky měření vyjádřené statistickými veličinami.....</i>	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: CD s technickými parametry materiálu Twintex