

Vliv orientace výztuže na mechanické vlastnosti vybraných kompozitních materiálů

Jakub Vymazal

Bakalářská práce
2011

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub VYMAZAL**
Osobní číslo: **T080144**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv orientace výtzuže na mechanické vlastnosti
vybraných druhů kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Kompozitní materiály – vlastnosti, výtzuže, pojivové systémy.
2. Popis experimentálních metod vyšetřování mechanických vlastností kompozitních materiálů.
3. Experimentální část. Navrhnete skladbu kompozitních materiálů. Samostatná výroba vzorků pro stanovení mechanických vlastností technologii ručního laminování pod vakuovací folii.
4. Experimentálně určete mechanické vlastnosti vybraných kompozitních materiálů.
5. Závěr vliv orientace výtzužných materiálů na mechanické vlastnosti, doporučení pro praxi.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitů, 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

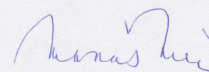
Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**

Ve Zlíně dne 12. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 7.6.2011

.....

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

Předložená bakalářská práce se zabývá vlivem orientace výztuže na mechanické charakteristiky sklo/polyesterového laminátového kompozitu. V teoretické části popisuje druhy kompozitních materiálů a jejich rozdělení, metody výroby kompozitních materiálů, druhy vyztužujících vláken a mechanické vlastnosti kompozitních materiálů.

V praktické části je bakalářská práce zaměřena na experimentální studium tahových a ohybových vlastností sklem vyztuženého laminátu pod různým úhlem vzhledem k orientaci výztuže.

V závěru jsou výsledky shrnuty a porovnány s teoretickými předpoklady z odborné literatury.

Klíčová slova: kompozitní materiály, vlákna, pryskyřice, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

Presented Bachelor graduate thesis is consider on influence orientation mechanical characteristics of glass/polyester laminate composite. In the theoretical part describes types of composite materials and their classification, production methods of composite materials, types of reinforcement fibers and mechanical properties of composite materials.

In the practical section is concerred with experimental research of tensile and flexural characteristics of glass reinforcement laminate under different angle of glass fibers.

At the close, the results are summary and compared with theoretical possibilites from literature.

Keywords: composite materials, fibers, resin, mechanical properties

Rád bych poděkoval doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při vypracovávání mé bakalářské práce, panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za ochotu při provádění měření. Poděkování patří také panu Ing. Vladimíru Rusnákově a vedení firmy Form s.r.o. za bezplatné poskytnutí materiálu a prostor k výrobě zkušebních 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 DEFINICE.....	12
1.2 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA KOMPOZITU	13
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	14
1.3.1 Rozdělení vláknových kompozitů.....	16
1.4 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITU	17
1.4.1 Ruční kladení (Hand lay-up).....	17
1.4.2 Metoda nanášení kompozitu do formy sprayem (Spray lay-up).....	18
1.4.3 Metoda vakuového vaku (Vacuum bagging)	19
1.4.4 Vytvrzování v autoklávu (Autoclave).....	19
1.4.5 Navíjení (Filament winding).....	20
1.4.6 Metoda lisování se vstřikem matrice (RTM)	21
1.4.7 Tažení kompozitních materiálů – pultruze (Pultrusion).....	21
2 PROBLEMATIKA KOMPOZITŮ	23
2.1 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA.....	23
2.1.1 Druhy výztužných materiálů	23
2.1.2 Druhy vazeb	25
2.1.3 Skleněná vlákna	25
2.1.4 Aramidová vlákna	27
2.1.5 Uhlíková vlákna	29
2.1.6 Přírodní vlákna	30
2.2 POROVNÁNÍ VLÁKEN	31
2.3 ÚLOHA VLÁKNA V KOMPOZITNÍM MATERIÁLU	32
2.3.1 Namáhání ve směru vláken	33
2.3.2 Tuhost (E-modul)	35
2.3.3 Pevnost	36
3 MATRICE	37
3.1 ÚLOHA MATRICE A JEJÍ DRUHY	37
3.2 REAKTIVNÍ PRYSKYŘICE.....	38
4 ÚVOD DO MECHANIKY KOMPOZITŮ	40
4.1 DRUHY ZATÍŽENÍ.....	40
4.1.1 Tah.....	40
4.1.2 Tlak	40
4.1.3 Smyk	40
4.1.4 Ohyb	41
4.2 MECHANISMUS PORUŠOVÁNÍ.....	41
4.3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	44
4.3.1 Zkouška tahem	44
4.3.2 Zkouška ohybem	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	49
5 ZKUŠEBNÍ TĚLESA	50

5.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	50
6	STATICKE ZKOUSKY	51
6.1	PARAMETRY ZKUŠEBNÍHO STROJE ZWICK.....	51
6.2	ZKOUSKA TAHEM	51
6.3	ZKOUSKA OHYBEM.....	55
7	VYHODNOCENÍ A ZPRACOVÁNÍ HODNOT	59
7.1	ZKOUSKA TAHEM	59
7.2	ZKOUSKA OHYBEM.....	61
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

V současné době můžeme sledovat prudký rozmach výroby kompozitních materiálů a jejich aplikací v konstrukčních prvcích, automobilovém, chemické a leteckém průmyslu.

Díky netradičnosti kompozitních materiálů a poměrně krátkodobé zkušenosti s jejich používáním je nezbytné, aby konstruktéři a designéři zohlednili jejich odlišné chování při zatížení a zároveň zpracovatelskou technologii výroby těchto materiálů, která významným způsobem ovlivňuje jejich výslední vlastnosti. Nejznámější odlišností kompozitních materiálů s polymerními matricemi je skutečnost, že výslední vlastnosti těchto materiálů se ovlivňují zejména zpracovatelskou technologií výroby.

Obrovskou výhodou kompozitních materiálů s polymerními matricemi je možnost měnit jejich elastické vlastnosti a pevnost změnou prostorového uspořádání výztuže, jejího druhu (roving, rohož, tkanina, atd.), poměr mezi obsahem výztuže, pojiva a technologie výroby. Použitím stejných komponent (sklo, pryskyřice) můžeme tedy efektivně vyrobit velkou škálu odlišných materiálů. Tato možnost u tradičních materiálů jako ocel prakticky neexistuje nebo je velmi omezená.

Jestliže má konstruktér ve svém návrhu použít kompozitní materiály místo tradičního materiálu, musí z výše uvedených důvodů znát alespoň základní vztahy dovolující kvantifikovat závislost modulu pružnosti kompozitních materiálů na obsahu výztuže, její prostorové orientaci a typu. To mu umožní kvalifikovaně se orientovat v nabídce kompozitů a snížit na minimum pravděpodobnost neúspěchu.

Bakalářská práce se v úvodu věnuje problematice kompozitních materiálů, jejich významným odlišnostem od tradičních materiálů a také základními zpracovatelskými technologiemi výroby, typy vláken a pryskyřic jako nejvýznamnějších složek těchto materiálů.

V experimentální části je popsán postup výroby zkušebních vzorků pro následné studium vlivu orientace výztuže na pevnostní charakteristiky sklo/polyesterového laminátu vyrobeného technologií ručního kladení s následným zavákuováním pro zabezpečení dokonalého stlačení jednotlivých vrstev laminátu a zamezení vzniku nedokonalostí, které vznikají při klasickém ručním laminování.

V závěru je zhodnocení námi naměřených výsledků při namáhání v tahu a tlaku v třech směrech: ve směru vláken (L), napříč směru vláken (T) a pod úhlem 45° ke směru vláken.

I. TEORETICKÁ ČÁST

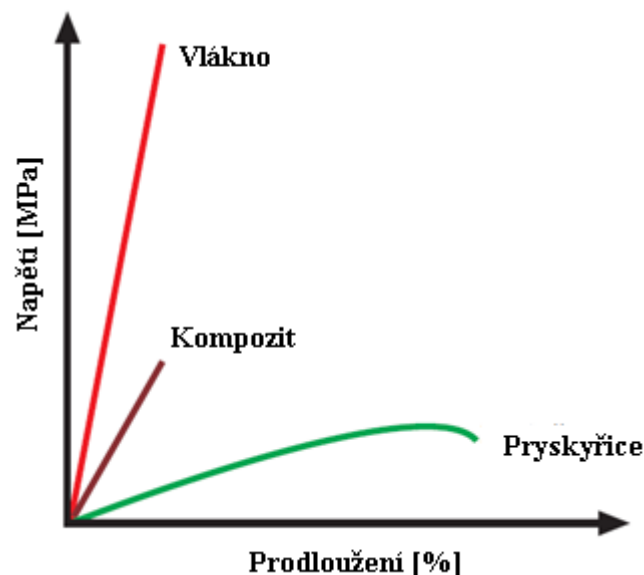
1 Kompozitní materiály

1.1 Definice

Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Pro kompozitní materiály je dále charakteristické, že se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Tím se liší např. od slitin, které jsou rovněž heterogenní.

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností.

Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice vyztužené keramickými vlákny. I když jsou jak matrice, tak vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolností proti náhlému křehkému porušení. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [11]



Obrázek 1 Tahový diagram [7]

1.2 *Obecná charakteristika kompozitu*

Pevnost a tuhost kompozitního materiálu závisí v rozhodující míře na pevnosti a tuhosti vláken. Vlákná a jejich orientace výrazným způsobem ovlivňují také další mechanické vlastnosti kompozitu.

Plasty vyztužené vlákny obsahují konečná nebo nekonečná 3,5 až 24 μm silná vyztužující vlákna ze skla, uhlíku nebo aramidu a matrici z termosetu nebo termoplastu. Jednotlivé složky jsou vybírány individuálně. U vyztužených plastů se v mnoha případech požaduje cílené vyztužení ve směru namáhání, takže výsledkem je – na rozdíl od kovů nebo nevyztužených plastů – anizotropní materiál, tj. materiál vykazující v různých směrech rozdílné vlastnosti.

Vstříkované plasty vyztužené krátkými vlákny se často řadí mezi vyztužené plasty, protože technologie zpracování, která je obdobná jako u nevyztužených plastů, pouze omezeně ovlivňuje požadovanou anizotropii. Avšak 90% všech vyztužených plastů se skládá ze směsi dlouhých skleněných vláken a polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic. Z aplikačního hlediska je většina vyztužených plastů uspořádána vrstevnatě a je nazývána lamináty. Tento materiál má řadu výhod, ale i nevýhod, které ovlivňují jeho uplatnění na trhu.

Mechanické vlastnosti jednotlivých vrstev se mohou výrazně lišit, zejména v závislosti na druhu, orientaci, obsahu a tloušťce vláken vyztuže. Protože složení a pořadí jednotlivých vrstev je libovolně volitelné, je možno v projekční fázi předem zvolit vhodné složení, a tím i vlastnosti laminátu. Výhodou tohoto postupu je, že se vlastnosti takového laminátu mohou relativně dobře vyzkoušet.[2]

Výhody laminátů:

- 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)[1]

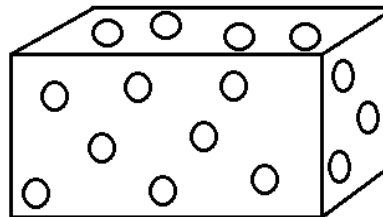


Obrázek 2 Konstrukce letadla [8]

1.3 Rozdělení kompozitů

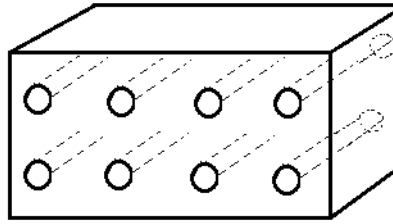
Kompozity lze rozdělit podle:

- **Typu matrice**
 - s kovovou maticí (MMC – Metal matrix composites)
 - s keramickou maticí (CMC – Ceramic matrix composites)
 - s polymerní maticí (PMC – Polymer matrix composites)
- **druhu dispersní (zpevňující) fáze** (kovová, skleněná, keramická, polymerní, monokrystalická vlákna aj.)
- **tvaru dispersní fáze**
 - částicové (s částicemi malými, nebo velkými)

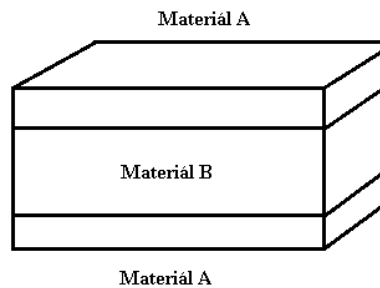


Obrázek 3 Částicová disperzní fáze

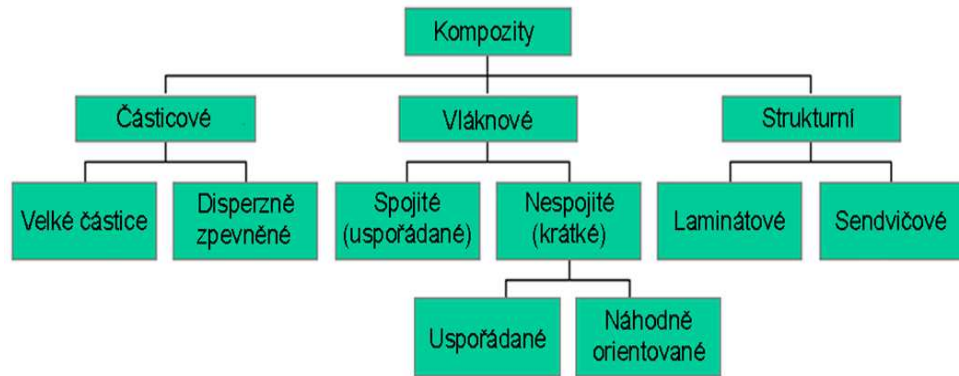
- vláknové (s dlouhými nebo krátkými vlákny)

Obrázek 4 *Vláknová disperzní fáze*

- strukturní (vrstvené)

Obrázek 5 *Strukturní disperzní fáze*

- **podle struktury matrice a dispersní fáze**
 - nanokompozity
 - mikrokompozity
 - makrokompozity
- **použití**
 - vysoké pevnosti (při běžných teplotách)
 - žárovevné materiály
- **speciální kompozitní materiály** (např. elektromagnetické, elektrody pro odpor svařování, vysokozatěžované elektrické kontakty) [1]



Obrázek 6 Rozdělení kompozitů [9]

1.3.1 Rozdělení vláknových kompozitů

Z důvodů jasného vymezení pojmů je rozumné rozdělit vláknové kompozitní materiály do tříd. K tomu je možno využít celé řady kritérií. Jedním z nejčastěji používaných dělicích kritérií je orientace a délka vyztuzujících vláken. Z tohoto hlediska je možno dělit vláknové kompozity na:

- jednosměrné (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru):
 - krátkovláknové (poměr délka/průměr $L/D < 100$)
 - dlouhovláknové ($L/D > 100$ či kontinuální vlákna, tj. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce)
- mnohoseměrné (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry)
 - krátkovláknové ($L/D < 100$)
 - dlouhovláknové ($L/D > 100$)

Dalším kritériem může být způsob 3D prostorového uspořádání výztuže. Podle tohoto kritéria rozdělujeme kompozity na:

- lamina (jedna vrstva kompozitu s tloušťkou zanedbatelnou ve srovnání se zbývajícími dvěma rozměry)
- lamináty (střídání vrstev – lamin s různými vzájemnými orientacemi výztuže)

- lamináty s tkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi)
- lamináty s netkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do roun, 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)
- navíjené profily (kruhové nebo oválné tvary průřezu, tlakové nádoby či trubky) [3]

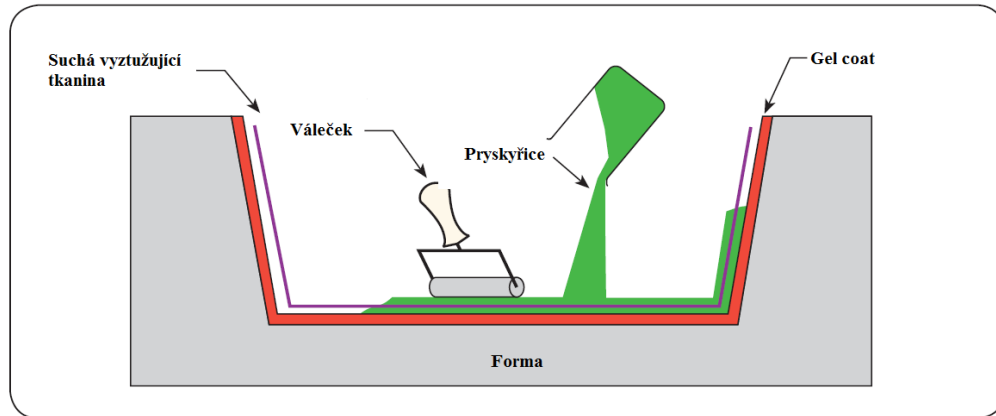
1.4 Technologie výroby kompozitu

Výroba kompozitních materiálů zpevněných vlákny je v porovnání s výrobou běžných konstrukčních materiálů složitější a technologicky náročnější. Při výrobě složených materiálů je třeba zaručit zejména tyto podmínky:

- rovnoměrné uložení zpevňujících vláken ve vrstvě,
- možnost uložení jednotlivé vrstvy s libovolnou orientací vláken,
- dobré spojení vláken s matricí,
- možnost změny objemového množství vláken,
- možnost dodatečného tepelného zpracování složeného materiálu,
- jednoduchost a hospodárnost výroby [9]

1.4.1 Ruční kladení (Hand lay-up)

Ruční kladení se někdy nazývá i kontaktní lisování a jedná se o proces, ve kterém je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy. Podle toho, na který povrch jsou komponenty nanášeny, je dosaženo kvality povrchu vytvrzeného kompozitního dílce. Jedná se o jednu z omezujících zvláštností tohoto výrobního procesu, totiž že pouze jedna strana výrobku má kvalitní povrch. Po položení výztuže a provlhčení pryskyřicí je připravený ruční kompozit ponechán k vytvrzení.

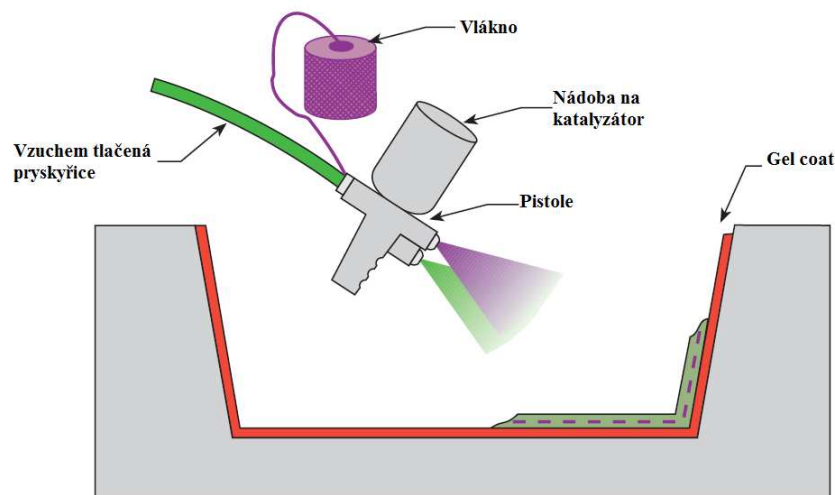


Obrázek 7 Metoda ručního kladení [7]

Výhodami ručního kladení jsou především jednoduchost technologie, minimální náklady na nástroje a prakticky neomezená variabilita tvarů a velikostí. Nevýhodou je nereprodukovatelnost odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat, relativně velký objem odpadu, náročnost na lidskou práci, pouze jeden kvalitní povrch, malá produktivita a kvalita výrobku silně závislá na zkušenosti a schopnostech pracovníka. [1]

1.4.2 Metoda nanášení kompozitu do formy sprayem (Spray lay-up)

Tato metoda spočívá v tom, že se na povrch formy nastříká katalyzovaná směs krátkých skleněných vláken a matrice, je slisována a vytvrzena.



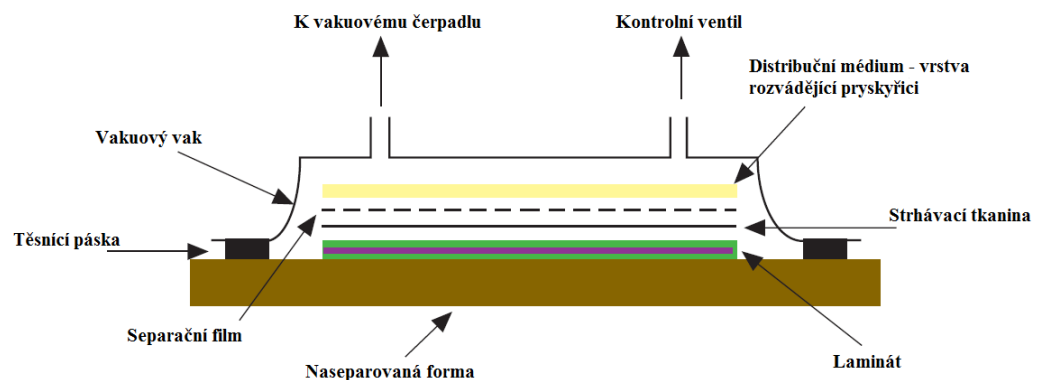
Obrázek 8 Obrázek 9 Metoda nanášení kompozitu do formy sprayem [7]

Výhodou tohoto výrobního postupu je jeho přesnost, nízká cena zařízení (cca 5-8 tisíc USD), pokud je proces automatizován je produktivita poměrně dobrá a reprodukova-

telnost výrobku rovněž. Nevýhodami jsou především nesnadné dosažení přesných tolerancí a vlastnosti horší než u předchozích technologií. [1]

1.4.3 Metoda vakuového vaku (Vacuum bagging)

Tato metoda je pouze zlepšením metody ručního kladení v poslední fázi vytvrzování. Tenký vzduch nepropouštějící film je položen na volný povrch ručně kladeného kompozitu, forma je evakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin.

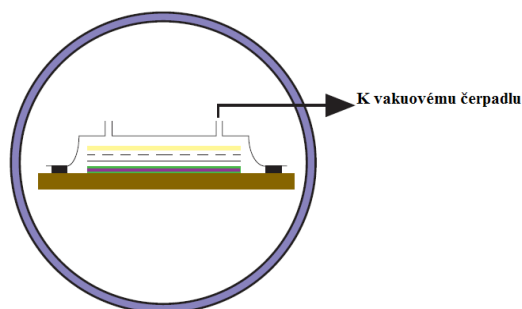


Obrázek 10 Metoda vakuového vaku [7]

Výhodami tohoto výrobního postupu je možnost připravit materiály s minimálním obsahem vzduchových bublin, umožňuje dosáhnout vyššího obsahu výztuží, všechny výhody ručního kladení jsou zachovány, je vynikající pro sendvičové struktury. Nevýhodami jsou velký obsah odpadu, vyžaduje velmi zručnou pracovní sílu a celý proces je velmi pomalý. [1]

1.4.4 Vytvrzování v autoklávu (Autoclave)

Toto je pouze tlakového pytle. Jedná se o vytvrzení kompozitu pomocí tepla a tlaku v uzavřené nádobě (autoklávu) s přesně říditelnými parametry vytvrzování.

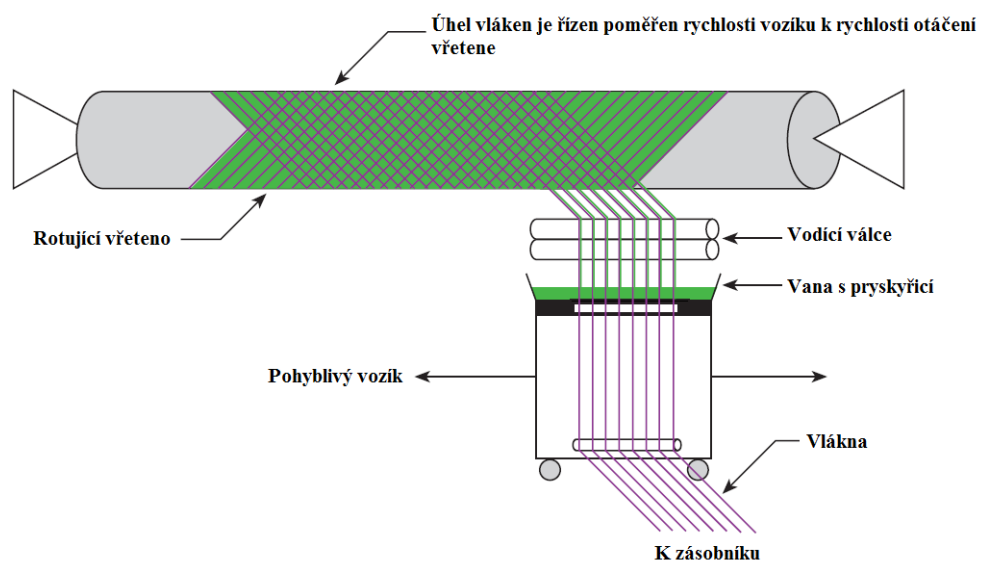


Obrázek 11 Metoda vytvrzování v autoklávu [7]

Výhodami je další zvýšení obsahu výztuží, mohou být použita jádra na odlehčení kompozitů, mohou být v jednom kroku zabudovány další součásti, najednou může být vytvrzeno mnoho částí v jednom autoklávu. Nevýhodami je vysoká cena autoklávů, metoda je velmi pracná a velikost vyráběných dílů je diktována velikostí autoklávu. [1]

1.4.5 Navíjení (Filament winding)

Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou, smrštitelnou formu. Vlákna jsou navíjena buď již navlhčená pryskyřicí, nebo se provlhčují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců vláken a výztuží. Vytvrzení se provádí na jádře, které je potom z vytvrzeného výrobku vyňato.

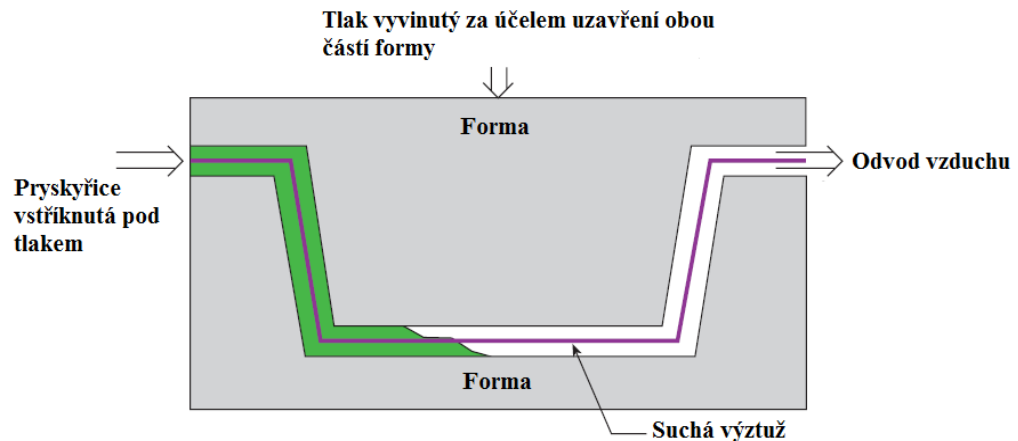


Obrázek 12 Metoda navíjení [7]

Výhodou je použití nejlevnější formy výztuže – rovingu. Proces má poměrně velmi dobrou produktivitu a může být vysoce automatizovaný. Hodí se především pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv, velkých součástí s konkávním povrchem. Nevýhodami je vysoká cena navíjecích strojů, nesnadné odstraňování vnitřních forem a poměrně nízká produktivita u výroby tlakových nádraží, kde je nutno používat některé speciální postupy. [1]

1.4.6 Metoda lisování se vstřikem matrice (RTM)

Tato metoda patří do skupiny metod pracujících s uzavřenou formou. Do této formy je vložena suchá výztuž (preform), forma je uzavřena a je do ní pod tlakem vstříknuta katalyzovaná pryskyřice. Vytvrzování se děje většinou při pokojové teplotě.

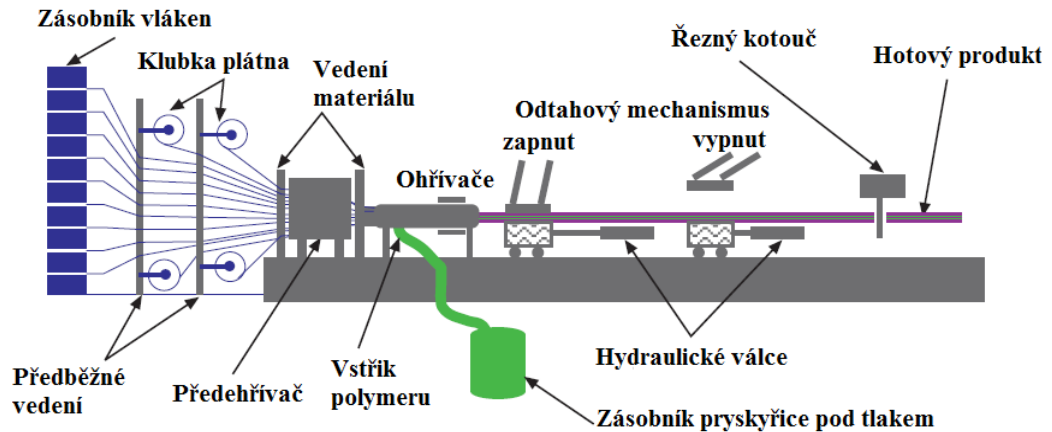


Obrázek 13 *Metoda lisování se vstřikem matrice* [7]

Výhodou RTM metody je to, že je možno vyrobit kompozitní díly, které mají po obou stranách dobrý povrch, přičemž například barva může být na každé straně jiná. Velmi přesně je také možno řídit tloušťkové tolerance. Vyrábí se i poměrně velké plošné výrobky. Mezi nevýhody patří nutnost velmi těžkých a drahých kovových forem, není možno dosáhnout vysokého obsahu skla, a proto jsou fyzikální vlastnosti těchto materiálů nižší než u jiných procesů a většinou se FRC díly vyrobené touto metodou nepoužívají v konstrukčních aplikacích jako nosné prvky. [1]

1.4.7 Tažení kompozitních materiálů – pultruze (Pultrusion)

Tato technologie je založena na tažení svazků vláken, rohoží a tkanin pryskyřičnou lázní, kde dochází k prosycení výztuže. V následném kroku je prosycená výztuž tvarována do požadovaného průřezu a zároveň je celý kompozit vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě.



Obrázek 14 *Metoda tažení kompozitních materiálů – pultruze* [7]

Největšími výhodami pultruze jsou FRC velmi dobrých vlastností, prakticky neomezená variabilita tvaru průřezů, nekonečná délka vyrobeného profilu, vysoká produktivita, minimální nároky na lidskou práci, vysoký stupeň automatizace, vysoká reprodukovatelnost fyzikálních vlastností. Mezi nevýhody patří poměrně velké investiční náklady na pořízení technologie, relativně drahý provoz, nutnost velmi kvalitního řídicího systému. [1]

2 PROBLEMATIKA KOMPOZITŮ

2.1 Vyztužující vlákna

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají zřídka. Zajímavou skupinou materiálů se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. Kompozitní – vlákny vyztužené – plasty se skládají jednak z vláken s vysokou měrnou pevností, příp. tuhostí, jednak z rozmanitě přizpůsobivého úložného materiálu – matrice. [2]

Kontinuální vlákna mohou být:

- skleněná
- uhlíková
- polymerní
- proteinová
- čedičová
- borová

2.1.1 Druhy vyztužných materiálů

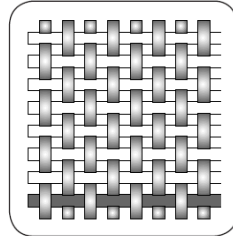
Následující pojmy platí pro většinu typů vláken:

- **Příze** – vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky
- **Nitě (skaná příze)** – vyrábějí se jedno- nebo vícestupňově, skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny. Zpracovávají se dále podobně jako příze (ČSN EN ISO 2078)
- **Roving (pramenec)** – skládá se z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken nebo tažených přímo z taveniny (6 až 12000 elementárních vláken). Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.
- **Spředený roving** – vyrábí se z vláken stočených kolem podélné osy.

- **Rohože ze sekaných pramenců** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900 $g \cdot m^{-2}$. Vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákna jsou uložena do vrstev, postříkána pojivem a po vysušení v pásové sušárně spojena tak, že je možno vzniklo rohož, podobnou plsti, navíjet do rolí, které jsou připraveny pro okamžité další použití.
- **Rohože z kontinuálních vláken** – skládají se z nekonečných skleněných vláken, která jsou uložena nepravidelně bez jakékoliv orientace ve smyčkách v několika vrstvách a jsou vzájemně spojena pojivem. Tvarují se lépe než rohože ze sekaných pramenců.
- **Povrchové (závojové) rohože** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 20 až 50 $g \cdot m^{-2}$ ze skleněných vláken nebo termoplastových vláken, které se pokládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice, aby se zamezilo vzniku trhlin. Zabraňují prorážení struktury hrubší výztuže na povrch a zesilují tenké vrstvy. Termoplastové povrchové rohože z polyetylentereftalátu (PET) nebo polyakrylonitrilu (PAN) se zvyšují odolnosti proti obrusu, jsou však při teplotě nad 40 °C citlivé na hydrolýzu a mají nízkou odolnost proti rozpouštědlům. Rohože z C- a ECR-skloviny dobře odolávají kyselým a alkalickým roztokům. Stejnou nebo lepší odolnost vykazují dobře provedené tenké vrstvy – gelcoaty – o tloušťce 0,3 až 0,6 mm.
- **Krátká vlákna** – mletá a na jednotlivá elementární vlákna rozptýlená vlákna o různé délce (0,1 až 5 mm), používaná pro vyztužení termoplastů.
- **Tkaniny** – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravouhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. [4]

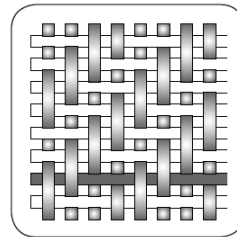
2.1.2 Druhy vazeb

- Plátňová vazba – jednoduchá základní vazba, jednoduché zpracování tkaniny vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému ořepu při řezání;



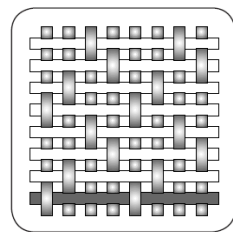
Obrázek 15 *Plátňová vazba* [7]

- Keprová vazba – vyšší pevnost a tuhost laminátu způsobená menším zvlněním vláken. Tkaniny jsou ohebnější, a jsou vhodnější pro tvarované prvky než tkaniny s plátňovou vazbou;



Obrázek 16 *Keprová vazba* [7]

- Atlasová (saténová) vazba – má menší vychýlení vláken než keprová vazba, velmi dobrou rušitelnost a z toho vyplývající vhodnost pro prostorově složitě prvky. Atlasové tkaniny umožňují dosáhnout velmi hladký povrch; [4]



Obrázek 17 *Atlasová vazba* [7]

2.1.3 Skleněná vlákna

Textilní skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) je společný název pro tenká vlákna ($\text{Ø}3,5$ až $24 \mu\text{m}$) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny a používa-

ná pro textilní účely. Skleněná vlákna jsou na základě své amorfní struktury izotropní, na rozdíl od uhlíkových a aramidových vláken. Dodací formou textilního skla jsou příze, skaná příze, pramenec, rohož, sekanyý pramenec a krátké vlákno.



Obrázek 18 Sklená vlákna ve formě rovingu a tkací stroj používaný na výrobu kompozitů [10]

- Modul pružnosti v tahu (E-modul) skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli, pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken a je většinou podstatně vyšší než u oceli (v kompaktní formě). Vzhledem k porovnatelně nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken zvláště vysoká.
- Mez průtažnosti skleněného vlákna má hodnotu kolem 3 %. Deformace je přitom téměř elastická, tj. skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna.
- Teplé vlastnosti skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti jiných materiálů. Ani dlouhodobé trvalé namáhání při 250°C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je naproti tomu vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovů.
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá, tudíž ohnivzdorná. Hodí se proto pro kompozity a závěsy.
- Bod měknutí E-skloviny je vyšší než 625°C.
- Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.

Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se většinou aplikují upravené produkty. Skleněná vlákna se používají pro textilní zpracování, pro vyztužování termosetů, termoplastů a lehčených plastů, pro výrobu povrchových rohoží a papíru, příp. pro další aplikace. [4]

2.1.4 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna; předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků. Pravidelné uspořádání fenolenových jader a amidových skupin s vazbami vodíkových můstků propůjčuje řetězcům vysokou tuhost a způsobuje současně vysokou hustotu struktury uspořádání. Orientace krystalických nadstruktur a z nich složených fibril kolísá podle modelových představ více nebo méně kolem osy vláken. To odůvodňuje rozdíl hodnot skutečného a teoretického E-modulu. Aramidová vlákna jsou na trhu ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží.



Obrázek 19 Aramidové vlákno [10]

- Je to nejlehčí vyztužující vlákno z čehož plyne vysoká pevnost v tahu.
- Je silně anizotropní, tj. jeho vlastnosti měřené ve směru vlákna se liší od vlastností měřených v příčném směru – např. hodnota E-modulu měřená kolmo k vláknu je daleko nižší než hodnota měřená ve směru vlákna, podobně je tomu i u pevnosti.

- Mez pevnosti v tlaku ke směru vláken je výrazně nižší než mez pevnosti v tahu. Při projektování konstrukcí z aramidových vláken je proto nutno počítat s jejich citlivostí na zatížení tlakem, působícím v podélném směru.
- Aramidová vlákna jsou hydrofilní, tzn. absorbují vlhkost (až do 7%). Vlhkost ovlivňuje pevnost spoje mezi vláknem a matricí, proto vlákna musí být před použitím vysušena. Absorbovaná vlhkost neovlivňuje pouze pevnost spoje vlákna s matricí, ale i pevnost vlastního vlákna.
- U aramidových vláken dochází při expozici zářením s vysokou energií (např. UV záření) k výraznému poklesu pevnosti.
- Aramidová vlákna – jako každé organické vlákno – nejsou příliš odolná, proti vysokým teplotám. Ve formě kompozitu odolávají teplotě až 300°C, neroztaví se však, a jsou proto vhodná pro protipožární obleky.
- Adheze aramidových vláken k matrici je často nižší než u ostatních vláken.
- Lubrikace vláken má na některé pojivové systémy změkčující účinek. V problematických případech je nutno vlákno nelubrikovat v organických rozpouštědlech.
- Vytvrzené konstrukční prvky z aramidových kompozitů se obtížně obrábějí.

Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. V laminátu lze využít až 70% jejich skutečné pevnosti, při zvláště tažné matrici dokonce ještě více. Hlavními oblastmi použití je náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, výztuž pro pneumatiky, balistické aplikace a světlovodné kabely. Aramidová vlákna mají vzhledem k vysoké orientaci molekul záporný součinitel teplotní délkové roztažnosti ve směru vláken, podobně jako vlákna uhlíková. Čím je teplota vyšší, tím větší je příčná oscilace a smrštění vláken (účinek entropie). Aramidová vlákna se vyrábějí v různých druzích, které se liší navzájem hodnotami modulu pružnosti v tahu a tažností. Typy s nízkým E-modulem a vyšším protažením jsou schopny pojmout podstatně vyšší deformační práci než vlákna s vyšším E-modulem a nižší tažností. [4]

2.1.5 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující grafitizací, zlepšují se mechanické vlastnosti. Při teplotě nad 1800°C je tvorba grafitové struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech zůstává vždy větší než u vrstev v čistém grafitu.



Obrázek 20 Uhlíkové vlákna a) řez uhlíkovým vláknem, b) uhlíkové vlákno ve formě rovingu, c) tkanina z uhlíkových vláken [10]

- Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn. se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota E-modulu;
- Vysoká pevnost i hodnoty E-modulu až do teploty 500°C
- Nízká hustota
- Mimořádně vysoká korozní odolnost (neodolávají pouze silně oxidačnímu prostředí)
- Dobrá elektrická a tepelná vodivost
- Snášelivost s tělesnými tkáněmi, lze je použít jako implantáty (umělé kyčelní klouby)
- Uhlíková vlákna jsou ve srovnání se skleněnými vlákny silně anizotropní
- Anizotropie ovlivňuje také součinitele teplotní roztažnosti, hodnoty měřené ve směru vláken a kolmo na vlákna jsou velmi rozdílné
- Uhlíková vlákna jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. Proto se při zpracování povrchově upravují apretací směsí na

bázi epoxidové pryskyřice. Ta slouží jako ochrana při zpracování a současně jako prostředek pro zlepšení vazby mezi vláknem a matricí

- Při delším skladování dochází k vytvrzení apretační povrchové vrstvy a vlákna ztrácejí ohebnost
- Dobrý průchod pro záření, neodráží radarový paprsek
- Uhlíková vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. Dynamické vlastnosti laminátu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u všech ostatních materiálů (např. hliníku, oceli)
- I když jsou uhlíková vlákna hořlavá, je rychlost hoření kompozitu obsahujícího 90 % uhlíkových vláken velmi pomalá

Uhlíková vlákna se skládají z více než 90 % z uhlíku. Mají průměr mezi 5 a 10 μm . E-modul a pevnost se mohou měnit v širokém rozsahu. Jsou závislé na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst, která vznikla ve vláknech během výroby. Silná anizotropie se projevuje i na tepelné roztažnosti, která dosahuje ve směru rovnoběžném s vrstvami uhlíku, tj. u vláken ve směru osy vlákna, dokonce mírně záporných hodnot. [4]

2.1.6 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Jejich výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Pozoruhodné jsou i pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou lehké konstrukce. [4]

Jako přednosti je nutno uvést:

- Nízkou hustotu
- Malou abrazivitu při mechanickém opracování
- Výhodnou likvidaci spalováním

Problémy působí:

- Závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu

- Citlivost na působení vlhkosti,
- Omezená možnost volby matrice vzhledem k nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování (odolnost do 200°C),
- Nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s matricí,
- Omezená délka vláken,
- Možnost změn vyvolaných biologickým napadením.

Tabulka 1 Porovnání mechanických vlastností přírodních a skelných vláken [4]

Vlastnosti	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
E-modul(N.mm ⁻²)	75000	70000	30000	55000	20000
Mez pevnosti v tahu (N.mm ⁻²)	3500	600	750	550	600
Tažnost (%)	4	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota (g.cm ⁻³)	2,54	1,45	1,48	~ 1,4	1,45

2.2 Porovnání vláken

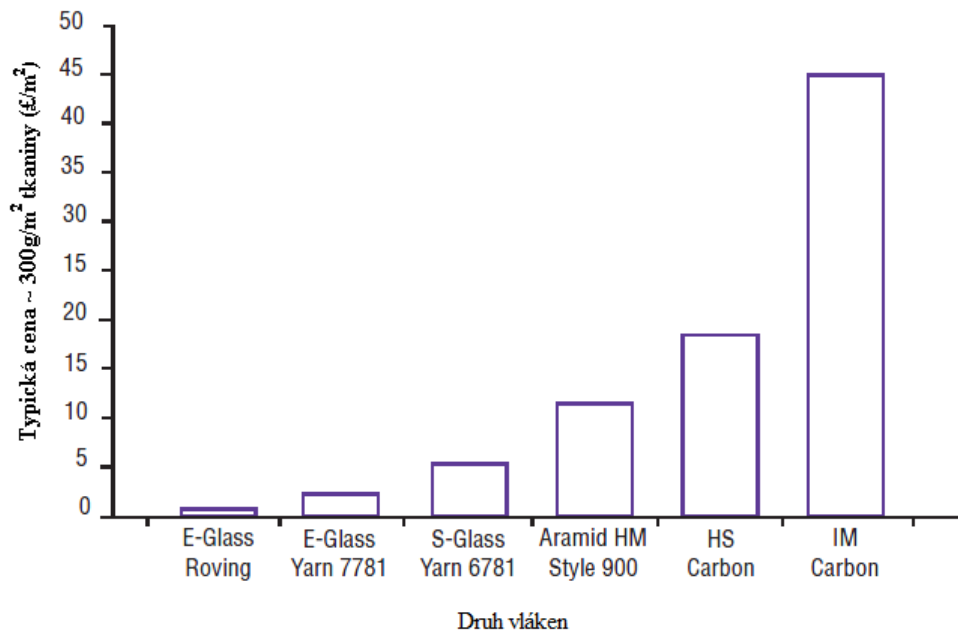
Vlastnosti vláken lze porovnat z deformačního chování jednosměrně vyztužených laminátů (při stejném obsahu vláken), namáhaných rostoucím tahovým namáháním ve směru vyztuže. Uhlíková vlákna vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti a tuhosti. [4]

Tabulka 2 Základní charakteristiky skelných, uhlíkových a aramidových vláken [4]

Typ vlákna	Hustota g.cm ⁻³	Pevnost (MPa)	Modul (GPa)	Prodloužení (%)	Relativní cena ^(b)
Skelné	2,54	3500	75	3-4	1
Uhlíkové ^(a)	1,78-1,81	3800-6530	230-400	1,78-1,81	19-40
Aramidové	1,44	3600-4100	131	-	18-25

^(a)Hodnoty závisí na typu vláken (standardní, střední a vysokomodulové)

^(b)Relativní cena uhlíkových a aramidových vláken představuje příslušný násobek relativní ceny skelných vláken



Obrázek 21 Porovnání ceny vláken [7]

2.3 Úloha vlákna v kompozitním materiálu

Vyztužením se rozumí zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne uložením výztuže do základního materiálu (matrice), přičemž musí být splněny tyto podmínky:

- vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice: $\sigma_{fP} > \sigma_{mP}$,
- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice: $E_f > E_m$
- matrice se nesmí porušit dříve než vlákno: $\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP}$

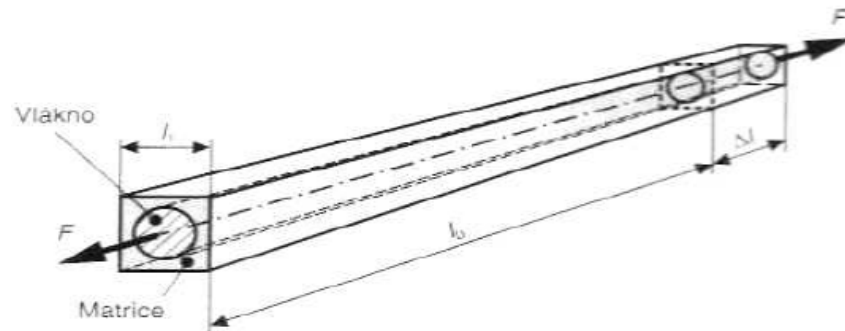
kde je

E_m , příp. E_f – modul pružnosti matrice, příp. vlákna v tahu,

ε_{mP} , příp. ε_{fP} – mezní prodloužení (tažnost) matrice, příp. vlákna,

σ_{mP} , příp. σ_{fP} – pevnost matrice, příp. vlákna [4]

2.3.1 Namáhání ve směru vláken



Obrázek 22 Model elementárního vlákna uloženého v matrici [4]

Z obrázku 22 kde je zobrazen jednoduchý element kompozitu zatížený silou F , lze odvodit vztah pro rovnováhu sil v případě namáhání ve směru vláken

$$F = F_f + F_m, \quad (1)$$

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (2)$$

a kompatibilitu deformací modelu vlákno-matrice (obě složky se ve směru podélném (\parallel) deformují stejně):

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (3)$$

kde je

A - celková plocha průřezu elementu,

A_f, A_m - plochy průřezů složek,

F - působící síla,

l_0 - počáteční délka,

Δl - protažení (změna délky),

$\sigma_1, \sigma_f, \sigma_m$ - napětí v kompozitu a jeho složkách.

Hookeův zákon pro jednoosou napjatost pro vlákno a matrici:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f, \quad (4)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m, \quad (5)$$

Protože musí platit:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (6)$$

tztn. velikost napětí v jednotlivých složkách kompozitu odpovídá poměru jejich tuhostí (to platí pouze při stejných Poissonových číslech – součinitelích příčné kontrakce vlákna a matrice, tj. $\nu_f = \nu_m$).

V případě skleněného vlákna a matrice z plastu odpovídá poměr jejich modulů pružnosti ($(E_{\perp f} \approx 75000 N \cdot mm^{-2}, E_{\perp m} \approx 2000$ až $3000 N \cdot mm^{-2})$) přibližně poměru jejich pevností ($(\sigma_{\perp fP} = 1500 N \cdot mm^{-2}, \sigma_{\perp mP} = 40$ až $60 N \cdot mm^{-2})$). Proto jsou skleněná vlákna z mechanických hledisek pro plasty velice vhodným vyztužujícím materiálem.

S ohledem na uvedený Hookeův zákon má pak rovnice rovnováhy sil tvar

$$\sigma_{\parallel} \cdot A = (E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m) \cdot \varepsilon_{\parallel} \quad (7)$$

Vyjádříme-li – pomocí Hookeova zákona – napětí ve směru vlákna, které působí v elementu kompozitu, bude

$$\sigma_{\parallel} = E_{\parallel} \cdot \varepsilon_{\parallel}, \quad (8)$$

tedy platí

$$E_{\parallel} \cdot \varepsilon_{\parallel} \cdot A = (E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m) \cdot \varepsilon_{\parallel}, \quad (9)$$

kompozit složky

Pro *poměrný objemový obsah vláken (podíl)* platí

$$\varphi_f = \frac{V_f}{V} = \frac{A_f}{A} \quad (10)$$

kde je

V – celkový objem elementu kompozitu,

V_f – objem vlákna.

Modul pružnosti elementu kompozitu ve směru vláken lze pak vyjádřit vztahem

$$E_{\parallel} = E_f \cdot \frac{A_f}{A} + E_m \cdot \left(1 - \frac{A_f}{A}\right) = E_f \cdot \varphi_f + E_m \cdot (1 - \varphi_f) \quad (11)$$

Objemový podíl matrice

$$1 - \varphi_f = \frac{V_m}{V} = \frac{A_m}{A} = \frac{A - A_f}{A} = \varphi_m \quad (12)$$

V praxi se snadněji stanoví *hmotnostní podíl vláken* ψ^*).

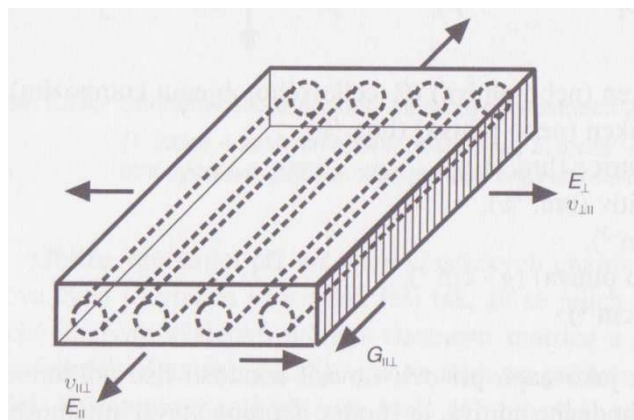
Pro objemový podíl vláken φ_f platí

$$\varphi_f = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (13)$$

kde ρ_f – hustota; podle použitých vláken, např. $\rho_{\text{sklo}} = 2,60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\rho_{\text{aramid}} = 1,45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\rho_{\text{uhlík}} = 1,80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. [4]

2.3.2 Tuhost (E-modul)

Zásadní vliv vlastností vláken na tuhost kompozitu lze ukázat na hodnotách modulů pružnosti jednosměrně vyztužené vrstvy. Spolupůsobení vláken a matrice v kompozitním materiálu je složité, a proto při stanovování vlastností kompozitu na základě vlastností jednotlivých složek (v nejjednodušším případě vláken a matrice) a jejich podílu a geometrického uspořádání je nutné přijmout řady zjednodušujících předpokladů. Prvek jednosměrně vyztuženého kompozitu tvoří základní (nejjednodušší) element při pevnostních a deformačních analýzách konstrukcí z vláken vyztužených plastů. V prvním přiblížení lze předpokládat, že při namáhání tahem ve směru vláken jsou deformace matrice i vláken v tomto směru stejné. Z toho vyplývá vztah pro modul E_{\parallel} , který vlastně představuje pravidlo směsí. Předpokládáme-li, že při namáhání v příčném směru působí v obou složkách stejná napětí, pak lze dospět k vzorci pro modul E_{\perp} . V obou případech se nebere zřetel na rozdílné hodnoty Poissonových čísel vlákna a matrice, což způsobuje značnou chybu zejména v případě modulu E_{\perp} . Jednoduchost těchto vztahů však umožňuje názorně ukázat vliv jednotlivých složek na výsledné hodnoty tuhosti kompozitu.



Obrázek 23 Základní charakteristiky jednosměrně vyztužené vrstvy [4]

Protože hodnoty E-modulu vláken jsou daleko vyšší než hodnoty modulu plastové matrice, závisí konečná hodnota E-modulu kompozitu zásadním způsobem na obsahu vláken a jejich uspořádání ve hmotě. Nejvyšší hodnoty E-modulu se dosáhne v případě, jsou-li všechna vlákna orientována ve směru namáhání. V příčném směru je vliv tuhosti vláken menší. V každém případě však vložení vláken do poddajnější matrice znamená zvýšení její tuhosti. Hodnoty E_{\parallel} a E_{\perp} z obr. 23 tak u kompozitu představují hodnoty mezní. Vztah pro E_{\parallel} je možné použít pro stanovení modulu pružnosti vlákna $E_{\parallel f}$, jsou-li známy obsah vláken φ a moduly pružnosti matrice E_m a kompozitu E_{\parallel} . [4]

2.3.3 Pevnost

Pevnost v tahu vlákna lze výhodně stanovit zatěžováním pramence prosyceného pryskyřicí. Naměřené hodnoty, přepočtené na 100% objemový podíl vláken, jsou pro praktické úvahy plně dostačující. Mez pevnosti kompozitu $\sigma_{Pt\parallel}$ ve směru vláken může být odhadnuta pomocí pravidla směsí:

$$\sigma_{Pt\parallel} = \varphi \cdot \sigma_{Pt\parallel f} + (1 - \varphi) \cdot \sigma_m \quad (14)$$

kde je

φ – objemový podíl,

σ_m - napětí v matrici při lomu.

Protože $\sigma_m \ll \sigma_{Pt\parallel f}$, platí $\sigma_{Pt\parallel} = \varphi \cdot \sigma_{Pt\parallel f}$ [4]

3 Matrice

3.1 Úloha matrice a její druhy

Pod pojmem *matrice* se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje jako *kompozit*.

Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken, tj.:

- Přenos namáhání na vlákna,
- Převedení namáhání z vlákna na vlákno,
- Zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku,
- Ochrana vlákna před vlivy okolí.

Zásadním hlediskem pro kvalitní kompozit je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a příp. i chemické vazby mezi vláknem a maticí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. U polymerních kompozitů se matrice dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty.

Tabulka 3 Porovnání viskozit termoplastických tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách [4]

Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenasyčená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za studena	10 až 40 °C	Stovky MPa . s
Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za tepla (např. SMC pasta)	~140 °C	~1000 MPa . s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice (EP-R) vytvrzovaná za tepla	např. 130 °C	Stovky MPa . s
Polypropylen (PP)	200 až 270 °C	10 ³ Pa . s
Polyéteréterketon (PEEK)	~350 až 400 °C	10 ³ až 10 ⁴ Pa . s

Původně se pro kompozity používaly pouze vyztužené nenasyčené polyesterové (UP-R) nebo epoxidové (EP-R) pryskyřice. Tyto reaktivní pryskyřice tvoří i dnes většinu kompozitních aplikací. Mají tu přednost, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a většinou při normální teplotě v tekutém stavu. I v případě, že jsou zpracovány ve formě taveniny, je jejich viskozita nižší než viskozita taveniny termoplastů. Viskozita reaktivních licích pryskyřic se pohybuje při teplotě zpracování ve stovkách MPa . s, zatímco u termoplastů dosahuje hodnot 10^3 až 10^5 MPa . s [4]

3.2 Reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice tvoří skupinu termosetů nejčastěji používanou při výrobě kompozitů. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které se buď samostatně, nebo za pomoci jiných složek – *tvrdidel*, tj. iniciátorů, katalyzátorů, urychlovačů, aldehydů (fenolů) apod. – vytvrzují polyadici nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek (ČSN 64 2001). Reaktivní pryskyřice nazýváme také *licí, laminační, impregnační, prosycovací* nebo *zalévací (elektro) pryskyřice*.

Mezi nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic patří:

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice** (UP-R) – jednou jejich složkou je nenasyčená karbonová kyselina (většinou vícesytná) a nejméně jednou další složkou je alkohol (nejčastěji vícemocný). Pryskyřice je rozpouštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styrenu), se kterým je kopolymerizovatelná.
- **Vinilesterové** (VE-R) nebo **fenakrylátové** (PFA-R) **pryskyřice** z fenylových nebo fenylenových derivátů – jako koncovou skupinu řetězce mají esterifikovanou kyselinu akrylovou. Pryskyřice je rozpouštěna v monomerním rozpouštědle (často ve styrenu), se kterým je kopolymerizovatelná.
- **Epoxidové pryskyřice** (EP-R) – obsahují dostatečné množství epoxidových skupin potřebných pro vytvrzení.
- **Fenolické pryskyřice** – vyrábějí se kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů.
- **Metakrylátové pryskyřice** (MA-R) – vyrábějí se z polymerizovatelné směsi polymerních a monomerních esterů kyseliny metakrylové.

- ***Izokyanátové pryskyřice*** – obsahují dostatečné množství izokyanátových skupin potřebných pro vytvrzení.

Reaktivní pryskyřice se vytvrzují smícháním s tvrdidly. Mezi nejdůležitější tvrdidla patří iniciátory a urychlovače, ale také aldehydy (fenol).

Tvrdidla jsou sloučeniny, které iniciují katalyticky polymerizaci pryskyřic MA-R, UP-R, VE-R nebo FA-R, příp. ovlivňují vytvrzování v průběhu polyadice epoxidových (EP-R) nebo izokyanátových pryskyřic.

Urychlovače jsou látky, které přidány v malém množství urychlují síťovací reakci. [4]

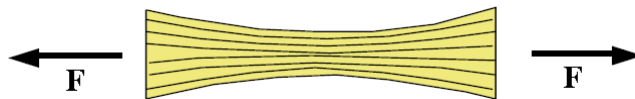
4 Úvod do mechaniky kompozitů

4.1 Druhy zatížení

Existují čtyři základní druhy namáhání, kterým každý kompozit musí odolávat: tah, tlak, střih a ohyb. Obrázek zobrazuje tahové napětí aplikované na kompozitní materiál. [7]

4.1.1 Tah

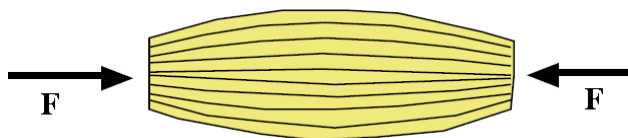
Reakce kompozitu na tahové napětí je velmi závislá na tuhosti a síle vyztužujících vláken než na samotné matrici. [7]



Obrázek 24 Tahové napětí aplikované na kompozitní materiál [7]

4.1.2 Tlak

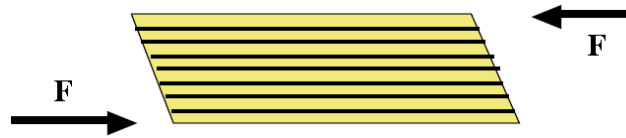
V případě tlaku jsou adhezivní a vyztužující vlastnosti pryskyřice zásadní. Pryskyřice udržuje vlákna pohromadě a brání zborcení. [7]



Obrázek 25 Tlakové napětí aplikované na kompozitní materiál [7]

4.1.3 Smyk

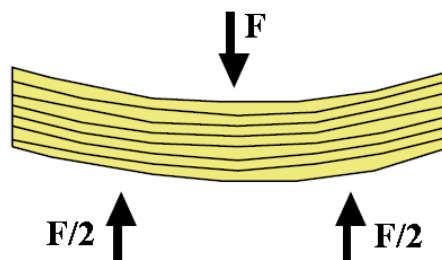
Při tomto druhu namáhání se snaží sousední vrstvy klouzat jedna po druhé. Při tomto druhu namáhání zastává pryskyřice hlavní funkci – přenáší napětí napříč celým kompozitem. Pokud má kompozit dobře odolávat smykovému napětí musí jednotlivé elementy pryskyřice vykazovat dobré mechanické vlastnosti, ale také vysokou adhezi k vyztužujícím vláknům. [7]



Obrázek 26 Smykové napětí aplikované na kompozitní materiál [7]

4.1.4 Ohyb

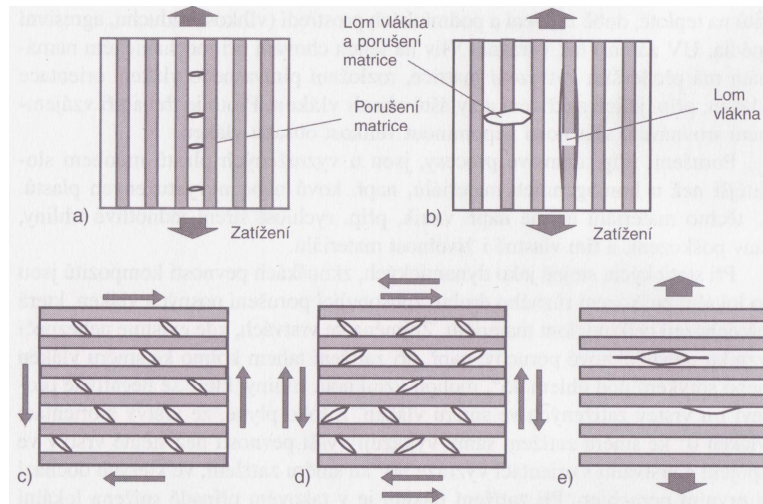
Ohybové namáhání je kombinací tahového, tlakového a smykového namáhání. Při zatížení kompozitu jako na obrázku (Obr. 27) je horní část namáhána tlakem, zatímco spodní část je namáhána tahem. Smykové napětí působí v centrální části. [7]



Obrázek 27 Ohybové napětí aplikované na kompozitní materiál [7]

4.2 Mechanismus porušování

U laminátů zatížených víceosým namáháním existuje větší nebezpečí vzniku *mezi-vláknového poškození* než u jednosměrně vyztužených vrstev při namáhání ve směru vláken. Vznik poškození závisí na druhu zatížení. Nepravidelnosti v uspořádání vláken, vzduchové bubliny, nedostatky v adhezním spojení složek se projevují jako koncentrace protažení a napětí. Podle druhu zatížení lze očekávat vznik tvorby různých typů trhlin, jak je znázorněno na obr. 28



Obrázek 28 Vznik trhlin v matrici v mikrostruktuře jednosměrně vyztužené vrstvy kompozitu [4]

- a) zatížení tahem podél vláken, vrubový násobný lom matrice při $\varepsilon_{mP} < \varepsilon_{fP}$
- b) zatížení tahem podél vláken, lom vláken při $\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP}$
- c) mezivláknové trhliny pod úhlem 45° při smykovém zatížení, zastavené u vláken nebo působící jako příčina mikroodtržení podél vláken
- d) mezivláknové trhliny pod úhlem $\pm 45^\circ$ při střídavém smykovém napětí vedou k rychlejšímu rozvolnění
- e) mezivláknové trhliny a odtržení vlákna od matrice v rozhraní při zatížení tahem ve směru kolmo k vláknům

U jednosměrně vyztužených materiálů může dojít – dle tažnosti jednotlivých složek – k různým mechanismům poškození v závislosti na druhu namáhání. V případě tahu lze rozlišit tyto případy:

- při stejné tažnosti matrice ε_{mP} a vláken ε_{fP} nastává převážně porucha tvořením jednotlivých trhlin;
- při rozdílných tažnostech $\varepsilon_{mP} < \varepsilon_{fP}$ a $\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP}$ mohou v závislosti na objemovém podílu vláken vznikat v jedné z obou komponent jak jednotlivé, tak i vícenásobné trhliny vedoucí k porušení.

Také v případě, že je tažnost samotné matrice vyšší než tažnost vláken, lze její velikost snížit pod velikost tažnosti vláken přidáním plniv.

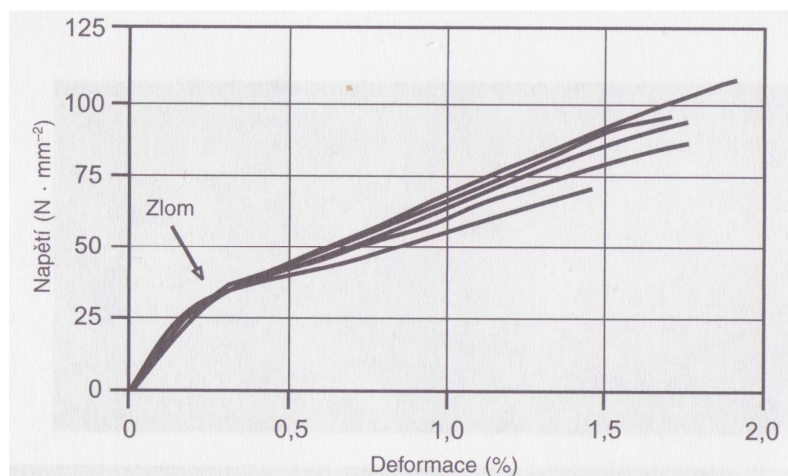
Při rázovém namáhání závisí forma poškození na velikosti namáhání. Při nižší energii rázu vznikají trhliny v jednotlivých vrstvách. Počet příčných trhlín je u křehké matrice vyšší než u tažné. Je-li rázová energie dále zvýšena, vznikají navíc kromě příčných trhlín dobře znatelné velkoplošné *delaminace* podél jednotlivých vrstev vláken.

Delaminace jsou ve spodních vrstvách největší. Od spodní strany vzorku k horní se rozloha delaminací zmenšuje.

Energie potřebná ke vzniku tohoto typu porušení bývá nazývána *energií iniciující delaminaci*. Možnost vzniku značně různorodého poškození ztěžuje spolehlivou předpověď způsobu porušení této skupiny materiálů. Proto existuje mnoho návrhů a postupů, jak lze mechanismy porušení kompozitu popsat, vypočítat a předem stanovit.

Chování při porušení jednosměrně vyztužené vrstvy se odráží také v chování při přetvoření laminátů s rohoží a textilní tkaninou. Opět jde o svazky vláken, které jsou zatíženy ve směru vláken a kolmo ke směru vláken, resp. smykem. Při zatížení tahem vykazují elementy vláknitého kompozitu lineární chování ve směru vláken, ve směru kolmo k vláknům je přetvoření menší a kompozit se poruší vlivem vrubových napětí, koncentrace protažení nebo nedostatečné adheze. Při zatížení tahem se kompozit deformuje zprvu lineárně, na příčně uložených vláknech vznikají první poruchy adheze a nepatrně klesá tuhost kompozitu. Se zvětšujícím se zatížením příčné porušení je častější, zatímco podélná vlákna jsou stále nosná.

Diagram *napětí-deformace* se tak vyznačuje dvěma lineárními úseky (první je strmější, druhý méně strmý) a úsekem s přechodem, označovaným jako *zlom (knee)*. [4]



Obrázek 29 Průběhy napětí-deformace stanovené na pěti vzorcích SMC materiálu

4.3 Mechanické zkoušky

Z hlediska doby a způsobu působení síly se mechanické zkoušky dělí na krátkodobé a dlouhodobé zkoušky a na jednorázové a cyklické zkoušky. Jelikož kompozitní materiály jsou velmi variabilní v chemické i morfologickém složení, není možné určit pro všechny materiály jednotné podmínky, při kterých se mají jednotlivé zkoušky uskutečňovat a příslušné normy obvykle upravují tyto podmínky jen rámcově. Výběr konkrétních podmínek pro konkrétní zkoušku a materiál je obvykle ponechán na odborném uvážení konstruktéra. Největší skupinu zkušebních postupů na testování mechanických vlastností představují metody zkoumající vliv působení vnější síly na deformaci zkušebního tělesa. [10]

4.3.1 Zkouška tahem

Princip tahové zkoušky je velmi jednoduchý – na zkušební těleso se působí silou v tahu až do jeho přetrhnutí, přičemž se snímá síla a deformace (v případě tahu prodloužení) v různých stádiích zkoušky. Základní parametry, které se při zkoušce tahem stanovují, jsou pevnost, prodloužení při přetrhnutí a moduly, avšak ne pro všechny polymery mají tyto parametry stejný význam. Značné rozdíly je možno při tahových zkouškách pozorovat v závislosti na charakteru polymeru (plasty, kaučuky, kompozity apod.).

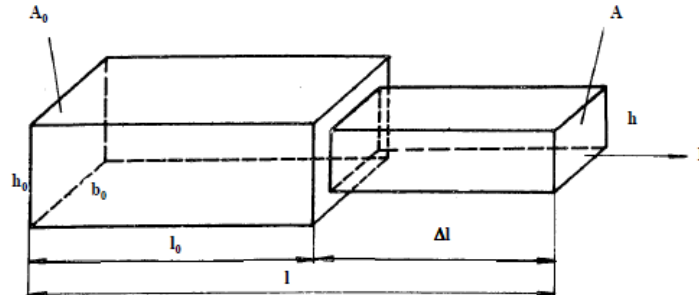
Při tahové zkoušce je zkušební těleso upnuté do čelistí trhačického stroje, postupně se konstantní rychlostí natahuje, přičemž s rostoucí deformací roste síla, která je potřebná na udržení konstantní rychlosti posunu čelistí. S rostoucí silou roste ve vzorku napětí (tj. síla vztáhnutá na jednotku průřezu vzorku) podle rovnice 15:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (15)$$

Závislost napětí na velikosti deformace se nazývá tahová křivka a její tvar závisí od typu namáhaného (zkoušeného) materiálu. Pokud kaučuky obvykle poskytují vysoké hodnoty deformace při malých napětích, naopak plasty, zvláště vysokokrystalické, nebo pod teplotou T_g vykazují už při malých prodlouženích vysoké napětí.

Při sestavování tahových křivek a výpočtu napětí v okamžiku deformace nastává problém, protože vlivem deformačních změn dochází ke změně průřezu zkušebního tělesa. Při určitém zjednodušení je možné znázornit změny v geometrii vzorku

podle obrázku 30 (l_0 je původní délka zkoušeného tělesa; b_0 je původní šířka zkoušeného tělesa; h_0 je původní výška zkoušeného zkušební tělesa; l , b , h jsou tyto veličiny po deformaci).



Obrázek 30 Změna geometrie vzorku při tahové zkoušce [10]

Působením síly dochází k deformaci tělesa, přičemž se těleso prodlouží na délku l , výška se sníží na hodnotu h a šířka na hodnotu b . V důsledku změny výšky a šířky vzorku se původní průřez vzorku $A_0 = b_0 \cdot h_0$ změní na průřez $A = b \cdot h$, čímž se při stejné síle zvyšuje napětí oproti napětí, které bylo ve vzorku při původním průřezu A_0 .

Relativní změna délky zkoušeného tělesa se nazývá relativní prodloužení ε_l (rovnice 16):

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (16)$$

a relativní změna průřezu se obdobně vyjadřuje relativním zkrácením šířky ε_a a nebo výšky vzorku ε_h podle rovnic 17:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta b}{b_0}, \quad \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (17)$$

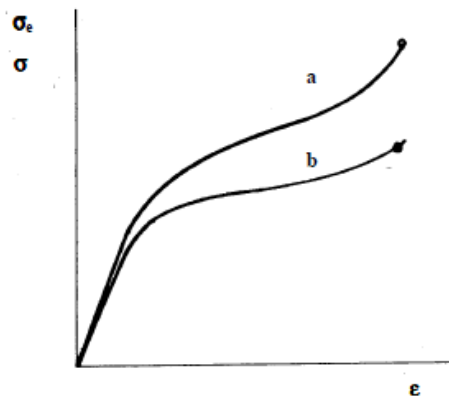
Vztah mezi relativním prodloužením a relativním zkrácením se nazývá Poissonův poměr ν (rovnice 18):

$$\nu = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_l} = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_l} \quad (18)$$

Z hlediska deformačního chování se při tahové zkoušce nejčastěji vyhodnocuje relativní prodloužení, vyjadřované v procentech původní délky pracovní části tělesa.

Při malých deformacích vzorku (malých hodnotách relativního prodloužení) je možno změny v průřezu vzorku zanedbat, avšak při vyšším stupni deformace dochází k odchylkám efektivního napětí (σ_e) od smluvního napětí σ . Smluvní napětí

je definované jako poměr působící síly na původní průřez vzorku před zkouškou (A_0) a efektivní napětí jako poměr působící na skutečný průřez vzorku odpovídající danému stupni deformace. Rozdíl v tvaru tahové křivky vypočítané pro smluvní a skutečný průřez vzorku je znázorněn na obrázku 32.



Obrázek 31 Průběh tahových křivek: a – pro efektivní napětí, b – pro smluvní napětí [10]

Nejčastější parametry, které se z tahových křivek stanovují jsou napětí při přetrhnutí, které se nazývá pevnost v tahu a relativní prodloužení při přetrhnutí, nazývané v běžné praxi jako tažnost. Kromě toho je možné z počáteční části tahové křivky, kterou je možno považovat za lineární, nebo ji lineárně aproximovat, vyhodnotit konstantu úměrnosti mezi napětím a deformací, která se nazývá Youngův modul pružnosti E , definovaný Hookovým zákonem (rovnice 19):

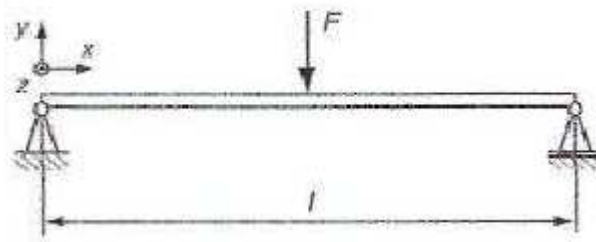
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (19)$$

Z Hookova zákona se dá odvodit jednotka modulu pružnosti, která je totožná s jednotkou napětí – MPa. Hodnota modulu pružnosti vyjadřuje tuhost materiálu. Čím je hodnota Youngova modulu vyšší, tím je materiál tužší, to znamená, že na malé změny v prodloužení je potřebné vyvinout vysoké napětí. [10]

4.3.2 Zkouška ohybem

Při ohybové zkoušce je ve zkušebním tělese napětí rozloženo kontinuálně, přičemž na vnějším ohybu je maximální hodnota napětí v tahu, které postupně v průřezu vzorku klesá, přechází přes neutrální osu, za kterou postupně narůstá napětí v tlaku, které dosahuje maximum na povrchu vnitřní strany ohybu zkušebního tělesa. Kvůli geometrickým rozdílům při zkoušce ohybem a kvůli uvedenému rozložení napětí ve

zkušební tělese při zkoušce, hodnoty napětí a modulu nemohou být jednoduše porovnatelné s hodnotami z tahové zkoušky.



Obrázek 32 Schéma tříbodového ohybu [10]

Zkouška ohybem pro plasty je předmětem normy STN ISO 178 (64 0607) (Plasty, Stanovení ohybových vlastností). STN ISO 178 je určená pro širokou škálu plastů, avšak pěnové a sendvičové materiály jsou z této normy vyňaty. Podle této normy je přípustné jen tříbodové uspořádání. Z důvodů změny charakteru napětí v průřezu vzorku z tahu na tlak, napětí a deformace je definovaná jen pro vnější povrch ve středním bodě rozpětí tělesa daného dvěma vnějšími opěrnými body.

Zkušební těleso norma předepisuje ve tvaru pravoúhlého hranolu o rozměrech 80x10x4 mm. Pokud je nutné použít těleso jiných rozměrů, musí být dodržen poměr délky tělesa k výšce $\frac{l}{h} = 20$. Vzájemný poměr výšky a šířky tělesa upravuje norma v závislosti od výšky tělesa a typu testovaného materiálu.

Před zkouškou se změří uprostřed všech těles výška a vypočítá se průměrná výška \bar{h} . Vzdálenost krajních opěrných bodů se potom na přístroji nastaví tak, aby platil vztah 20:

$$L = 16 \cdot h \quad (20)$$

Pro speciální případy, které jsou v normě definované, je možné toto pravidlo porušit. Například pro měkké plasty může být tento poměr vyšší, aby se zabránilo vtlačení opěrných bodů do tělesa. Také pro lamináty vyztužené vlákny může být tento poměr vyšší, aby se zabránilo delaminaci kompozit v průběhu zkoušky, nebo může být tento poměr snížen při velmi tenkých vzorcích.

Po uložení tělesa do čelistí se spustí pohyb stroje předepsanou rychlostí. Preferovaná je rychlost, která poskytuje rychlost deformace 1% za minutu. Zaznamená se křivka napětí – deformace, přičemž pro napětí v ohybu platí vztah 21:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad \varepsilon_F = \frac{6hs}{L^2} \quad (21)$$

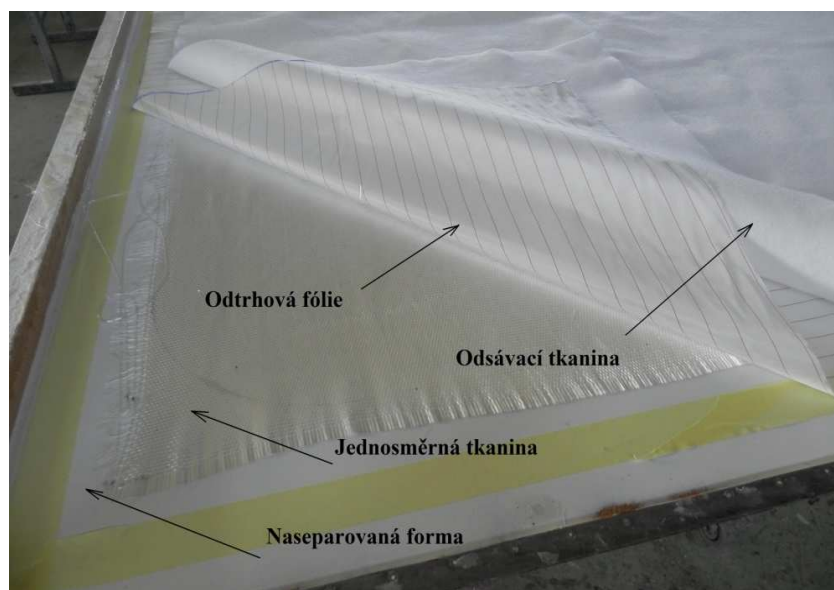
Kde F je síla v N, L je rozpětí vnějších opěrných bodů, b je šířka zkušebního tělesa, h je výška zkušebního tělesa a s průhyb – odchylka povrchu zkušebního tělesa ve středu rozpětí oproti výchozí poloze. [10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 Zkušební tělesa

5.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa jsem připravil technologií ručního laminování s následným stlačením všech vrstev pomocí vakua. Na neseparovanou formu byla položena tkanina z jednodměrně orientovaných vláken. Při výrobě nebyl použit gel-coat. Po jejím prosycení pryskyřicí válečkem byla položena druhá vrstva tak aby byl dodržen směr orientace vláken. Po prosycení druhé vrstvy byla položena třetí vrstva s totožnou orientací vláken. Čtvrtou vrstvu tvořila odtrhová tkanina a pátou vrstvu odsávací tkanina na přebytečnou pryskyřici. Takto připravená forma se po obvodu celá vzduchově zaizolovala a všechny vzduch byl odsán. Po vytvrdnutí byl výrobek odformován a následně rozstříhán na jednotlivé zkušební vzorky.



Obrázek 33 Příprava zkušebních těles

Rozměry zkušebních jsou dle normy ČSN ISO 527-4 délky 150mm, šířky 30mm a tloušťky přibližně 0,5mm pro zkoušku tahem. Pro zkoušku ohybem jsem zvolil tělesa o délce 100mm, šířce 20mm a tloušťky totožné s tělesy pro zkoušku tahem.

6 Statické zkoušky

V praktické části se zabývá tahovou a ohybovou zkouškou. Obě zmíněné zkoušky byly prováděny na přístrojích v laboratoři UTB.

Tahová i ohybová zkouška byly prováděny na přístroji ZWICK 145 665. Přístroj je propojen s osobním počítačem, který je vybaven zkušebním programem TestXpert. Tento program umožňuje snadné měření a vyhodnocení sledovaných veličin. Všechny zkoušky byly provedeny při rychlosti 10 mm/min.

6.1 Parametry zkušebního stroje ZWICK

Celková výška: 2012mm

Celková šířka: 630mm

Strojová výška: 2184mm

Pracovní šířka: 420mm

Rozpětí běžných čelistí: 15mm

Hmotnost: 150kg

Maximální zkušební síla: 100kN

6.2 Zkouška tahem

Pevnost v tahu byla stanovena jako síla potřebná k přetržení vzorku zkoušeného laminátu. Testována byla pevnost ve směru rovnoběžném se směrem vláken (směr L), kolmo na směr vláken (směr T) a při uložení pod 45° úhlem. Každá série měření byla provedena na třiceti vzorcích. Celkový počet vzorků byl tedy devadesát. Program TestXpert vyhodnotil naměřené údaje.

Pro každý vzorek kompozitu je vyhodnocena tabulka obsahující rozměry vzorku (tloušťku a_0 a šířku b_0), maximální dosažené napětí δ_m , poměrné prodloužení ε při působení maximální síly εF_{max} , napětí při přetržení δ_b , prodloužení při přetržení ε_{break} a modul pružnosti v tahu E .

Odečítání prodloužení bylo prováděno pomocí extenzometru, který pracoval se základní délkou $l_0 = 20\text{mm}$

Tabulka 4 Zkouška tahem - směr L

Č. měř.	a_0 [m]	b_0 [mm]	δ_m [MPa]	ϵF_{\max} [%]	δ_b [MPa]	ϵ_{break} [%]	E [MPa]
1	0,51	30,03	483,52	1,39	449,07	1,2	32569,17
2	0,51	29,69	501,99	1,42	487	1,32	33134,69
3	0,49	29,86	515,79	1,38	515,79	1,38	38553,59
4	0,54	30,15	455	1,29	442,76	1,26	36327,19
5	0,52	30,01	496,31	1,29	476,01	1,28	38994,71
6	0,53	30,05	504,14	1,32	504,14	1,32	38252,84
7	0,55	29,88	483,27	1,35	476,92	1,36	37693,84
8	0,52	29,65	505,22	1,25	498,09	1,25	45254,23
9	0,51	29,75	481,38	1,2	481,15	1,2	44357,86
10	0,53	30,21	363,18	1,52	241,9	1,47	32418,06
11	0,53	30,13	449,17	1,24	449,17	1,24	37898,69
12	0,52	30,21	528,03	1,37	528,03	1,37	39799,16
13	0,54	30,15	500	1,36	480,49	1,27	38158,03
14	0,53	30,01	491,74	1,43	490,33	1,42	33391,6
15	0,54	29,87	421,09	1,27	407,61	1,23	36345,91
16	0,51	29,96	448,83	1,3	448,83	1,3	36666,92
17	0,52	29,89	442,85	1,3	442,13	1,29	36073,67
18	0,52	30,01	542,99	1,36	473,12	1,63	41516,27
19	0,51	30,13	477,3	1,27	475,48	1,27	40983,85
20	0,51	30,08	508,03	1,3	477,33	1,31	41486,52
21	0,52	30,03	395,31	1,73	378,57	1,78	35468,77
22	0,53	30,22	332,98	1,33	320,7	1,46	31891,52
23	0,49	30,08	500,97	1,41	484,7	1,46	35271,03
24	0,52	30,31	424,5	1,03	417,53	1,04	45631,77
25	0,52	29,82	538,35	1,41	538,35	1,41	39402,24
26	0,51	29,75	453,71	1,19	453,71	1,19	40582,89
27	0,50	30,13	417,94	1,18	452,01	1,18	42761,64
28	0,53	30,05	386,86	1,49	77,37	0,97	29284,63
29	0,52	29,98	416,91	1,1	155,92	2,74	44674,23
30	0,53	29,97	500,65	1,38	484,78	1,37	38250,46

Tabulka 5 Zkouška tahem - směr T

Č. měř.	a_0 [mm]	b_0 [mm]	δ_m [MPa]	ϵF_{\max} [%]	δ_b [MPa]	ϵ_{break} [%]	E [MPa]
1	0,51	29,93	52,85	0,76	51,88	0,77	11544,83
2	0,52	29,96	47,82	0,57	47,63	0,57	11136,47
3	0,53	30,01	51,43	0,72	50,54	0,73	11241,62
4	0,52	30,15	49,01	0,71	41,6	0,56	9803,42
5	0,53	30,03	50,5	0,67	49,5	0,68	11347,07
6	0,52	30,12	45,43	0,75	42,85	0,7	9458,24
7	0,53	29,89	48,48	0,73	47,76	0,73	10261,6
8	0,53	29,81	49,02	0,77	48,34	0,78	10096,05
9	0,52	29,75	47,6	0,57	42,23	0,55	11325,02
10	0,52	30,03	52,67	0,76	48,74	0,75	10827,97
11	0,53	30,08	21,82	0,78	50,78	0,79	10396,57
12	0,53	30,21	47,12	0,82	46,22	0,83	8835,3
13	0,52	30,22	51,41	0,71	51,41	0,71	10983,87
14	0,53	30,00	46,88	0,68	46,88	0,68	10247,57
15	0,52	29,88	44,96	0,62	44,96	0,62	9233,37
16	0,53	30,09	51,72	0,79	51,72	0,79	10579,4
17	0,52	29,85	50,03	0,78	49,79	0,78	10117,28
18	0,50	30,21	48	0,82	42,41	0,9	10976,73
19	0,51	30,14	47,59	0,72	47,57	0,74	11068,6
20	0,50	30,18	49,17	0,84	47,67	0,85	9759,53
21	0,49	30,02	46,31	0,78	41,09	1,1	9478,05
22	0,52	30,22	53,77	0,83	52,73	0,84	10848,97
23	0,49	29,69	50,81	0,76	40,27	0,66	10115,84
24	0,52	30,12	49,95	0,82	45,36	0,8	9411,1
25	0,54	29,82	46,62	0,63	46,62	0,63	11041,09
26	0,53	29,70	42,39	0,44	41,1	0,42	11406,45
27	0,52	30,04	45,77	0,54	42,67	0,52	11784,72
28	0,48	30,05	44,2	0,47	44,2	0,47	11811,83
29	0,50	29,76	48	0,6	44,23	0,6	10708,75
30	0,51	30,05	45,9	0,62	36,8	0,52	9267,54

Tabulka 6 Zkouška tahem - směr pod úhlem 45°

Č. měř.	a_0 [mm]	b_0 [mm]	δ_m [MPa]	ϵF_{\max} [%]	δ_b [MPa]	ϵ_{break} [%]	E [MPa]
1	0,48	30,11	52,88	0,96	44,04	0,92	8998,61
2	0,50	30,08	85,99	1,49	82,61	1,51	11586,2
3	0,52	30,01	71,56	2,35	69,25	2,52	9309,49
4	0,52	30,10	64,86	0,86	59,78	0,89	10722,64
5	0,48	30,01	61,38	1,35	57,09	1,46	9424,82
6	0,53	29,94	59,31	1,25	51,53	1,22	9093,71
7	0,51	29,94	84,51	1,48	82,97	1,64	12483,46
8	0,54	29,89	53	1,05	46,23	0,97	9663,44
9	0,46	30,12	80,96	1,67	80,31	1,79	11132,07
10	0,49	30,03	78,11	1,56	73,4	1,53	10872,72
11	0,51	30,09	62,97	0,81	58,99	0,82	10968,81
12	0,51	30,15	54,29	1,03	54,08	1,05	9529,4
13	0,50	29,97	55,11	1,68	51,7	1,95	8648,51
14	0,53	29,95	59,68	1,66	11,91	0,99	9134,74
15	0,53	30,02	66,77	1,59	59,85	1,72	10067,17
16	0,53	30,03	60,75	1,49	56,72	1,55	9395,31
17	0,51	29,96	62,43	1,54	57,61	1,63	11081,81
18	0,48	30,14	59,17	2,37	53,2	2,77	8248,08
19	0,47	30,18	59,84	0,8	54,88	0,83	11613,77
20	0,50	30,10	69,89	1,08	62,54	1,01	11370,11
21	0,51	30,03	57,1	1,13	55,44	1,14	9293,1
22	0,53	30,02	64,37	1,49	14,45	0,31	9676,98
23	0,54	29,89	63,02	1,48	12,43	9,75	9371,3
24	0,52	30,13	52,6	1,46	49,02	2,12	7940,31
25	0,51	29,99	55,96	1,78	51,21	1,87	9576,7
26	0,53	29,92	63,82	1,56	60,06	1,62	9755,57
27	0,52	30,01	64,56	1,45	64,56	1,45	10994,87
28	0,49	30,08	61,62	2,3	59,14	2,49	9026,07
29	0,52	29,93	55,33	1,42	47,61	1,47	9382,35
30	0,48	30,13	58,11	1,74	55,3	2,01	9525,37

6.3 Zkouška ohybem

Testována byla pevnost ve směru rovnoběžném se směrem vláken (směr L), kolmo na směr vláken (směr T) a při uložení pod 45° úhlem. Každá série měření byla provedena na třiceti vzorcích. Celkový počet vzorků byl tedy devadesát. Program TestXpert vyhodnotil naměřené údaje.

Parametry zkoumaného vzorku ohybovou zkouškou musí splňovat parametry udané normou ČSN EN 978. Ta udává celkovou délku vzorku a vzdálenost podpor vztahované na tloušťku laminátu. Nastavení podpor při zkoušce je znázorněno na obr. Č. obr).



Obrázek 34 Nastavení podpor při zkoušce ohybem

Vzdálenost podpor je šestnáctinásobek tloušťky vzorku. V našem případě je tedy vzdálenost podpor 8mm.

Pro každý vzorek kompozitu s uložení vláken v podélném směru je vyhodnocena tabulka, která obsahuje rozměry vzorku (tloušťku a_0 a šířku b_0), maximální dosažené napětí δ_m , poměrné prodloužení ε při působení maximální síly εF_{max} , napětí při porušení δ_b , prodloužení při porušení ε_{break} a modul pružnosti E .

Pro vzorky kompozitu s uložení vláken v příčném směru a pod úhlem 45° jsou vyhodnoceny tabulky, které obsahují rozměry vzorku ((tloušťku a_0 a šířku b_0), maximální dosažené napětí δ_m , poměrné prodloužení ε při působení maximální síly εF_{max} a modul pružnosti E .

Tabulka 7 Zkouška ohybem – směr L

Č. měř.	a_0 [mm]	b_0 [mm]	δ_m [MPa]	ϵF_{\max} [%]	δ_b [MPa]	ϵ_{break} [%]	E [MPa]
1	0,5	19,83	1012,71	2,22	202,12	3,56	47990,82
2	0,52	20,03	983,09	2,12	196,24	2,8	46345,06
3	0,47	20,05	1034,35	2,19	206,7	3,24	48636,58
4	0,49	19,94	948,56	2,17	189,71	2,94	44646,31
5	0,50	20,01	946,98	2,21	189,22	2,98	42494,68
6	0,53	20,07	943,12	2,37	188,1	3,12	39882,47
7	0,53	19,89	1003,53	2,43	755,59	2,88	45416,6
8	0,54	19,99	976,15	2,26	195,15	3,34	44337,97
9	0,49	19,83	935,67	2,36	186,89	3,5	40730,67
10	0,49	20,11	930,63	2,3	186,09	3,15	41132,73
11	0,51	20,08	1014,47	2,22	202,31	3,05	46813,74
12	0,53	20,02	126,36	1,48	192,03	3,11	10378,85
13	0,50	20,08	980,78	2,26	195,95	3,41	45997,02
14	0,48	19,97	958,61	2,18	191,01	3,01	43168,65
15	0,51	19,98	1039,86	2,09	207,93	2,67	49130,92
16	0,51	20,03	937,48	2,42	187,5	3,21	44704,32
17	0,53	19,96	996,69	2,31	613,41	2,69	50953,44
18	0,48	20,09	948,36	2,33	189,51	3,37	40794,92
19	0,47	20,13	956,52	2,17	191,22	3,19	44096,5
20	0,49	20,04	1052,69	2,03	210,54	3,38	50410,22
21	0,51	19,98	955,41	2,13	190,92	3,03	43500,25
22	0,55	20,07	1042,47	2,11	208,15	3,06	50144,98
23	0,52	19,89	1048,34	2,1	209,67	3,1	50428,85
24	0,52	20,03	964,87	2,29	192,73	3,09	42507,46
25	0,50	20,09	1003,59	2,38	123,02	4,26	44361,83
26	0,49	20,05	1029,75	2,13	205,66	3,18	47352,39
27	0,50	19,99	955,41	2,39	190,32	3,24	42497,55
28	0,49	20,04	1042,68	2,38	208,36	3,05	47691,92
29	0,51	19,97	948,56	2,36	189,71	3,4	41295,9
30	0,54	20,01	982,15	2,31	199,12	3,49	47135,02

Tabulka 8 Zkouška ohybem – směr T

Č. měř.	a_0	b_0	δ_m	ϵF_{\max}	E
	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
1	0,5	20,12	117,21	1,14	14287,12
2	0,52	20,01	123,23	1,55	9336,44
3	0,51	20,06	117,58	1,09	15631,49
4	0,49	19,97	144,98	1,31	16843,73
5	0,52	19,98	115,07	2,23	11466,29
6	0,53	20,08	134,73	1,36	10606,69
7	0,52	19,94	120,65	1,77	13529,14
8	0,52	19,93	125,38	1,49	12137,92
9	0,47	19,87	112,93	2,02	10382,42
10	0,53	20,09	141,38	1,91	14852,94
11	0,54	20,04	129,41	1,82	13471,03
12	0,52	20,02	138,39	1,11	15230,51
13	0,5	20,01	135,07	1,75	11,586
14	0,52	19,97	115,11	1,61	12358,07
15	0,54	19,89	143,53	2,15	9899,69
16	0,51	20,08	128,74	1,03	10564,8
17	0,47	19,98	119,43	1,49	12007,78
18	0,48	20,07	125,02	1,27	16521,38
19	0,5	20,12	142,98	1,62	12446,92
20	0,51	20,04	114,78	1,57	13446,34
21	0,53	19,98	123,91	1,28	14724,64
22	0,53	20,07	151,65	2,09	14630,25
23	0,49	19,95	127,28	1,86	11248,03
24	0,52	20,06	134,17	1,41	13171,31
25	0,5	20,02	118,52	1,63	12359,69
26	0,51	20,04	125,37	1,59	16413,57
27	0,5	20	131,21	2,2	12228,43
28	0,51	20,07	142,43	1,68	15125,3
29	0,54	19,96	120,5	1,49	13334,72
30	0,49	20,01	137,81	1,66	12912,11

Tabulka 9 Zkouška ohybem – směr pod úhlem 45°

Č. měř.	a ₀	b ₀	δ _m	εF _{max}	E
	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
1	0,48	19,89	289	2,33	17154,45
2	0,53	20,05	417,89	2,16	24685,64
3	0,5	20,01	296,25	1,98	19243,8
4	0,48	19,99	228,88	1,74	15587,66
5	0,49	19,96	125,53	1	14943,04
6	0,51	20,11	352,52	2,07	19741,95
7	0,54	20,01	203,95	1,41	17456,52
8	0,53	19,98	292,06	2,24	14583,53
9	0,49	19,96	328,45	2,82	12458,02
10	0,5	20,07	254,37	1,96	16857,49
11	0,54	20,03	289,63	1,78	15007,36
12	0,52	20,08	358,41	2,45	18682,34
13	0,52	20	329,02	1,23	17724,75
14	0,52	19,88	199,85	1,42	14665,23
15	0,53	19,94	401,21	2,01	18241,9
16	0,49	20,15	382,26	1,85	18517,61
17	0,48	19,98	312,28	1,33	13943,14
18	0,48	20,03	351,94	1,54	18701,05
19	0,53	20,06	291,91	1,86	20121,87
20	0,52	20,02	339,07	2,07	21971,84
21	0,51	19,87	241,63	1,75	19087,91
22	0,51	20,07	279,17	1,61	16878,99
23	0,49	19,95	308,66	1,78	18114,75
24	0,5	20,06	277,25	1,26	19685,24
25	0,53	20,13	290,31	1,05	15273,18
26	0,52	20,05	328,93	1,52	17541,3
27	0,48	20	345,02	1,42	16941,84
28	0,49	19,99	271,43	1,85	19520,65
29	0,52	19,96	288,9	1,98	18008,9
30	0,51	20,02	193,27	2,04	19207,87

7 Vyhodnocení a zpracování hodnot

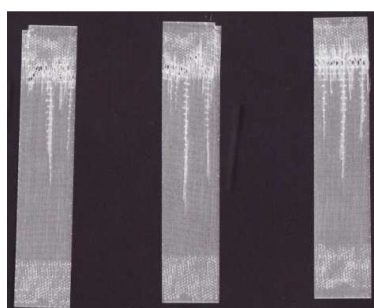
7.1 Zkouška tahem

Z odečtených sil ze zkoušky tahem program testXpert vyhodnotil pro naměřené hodnoty aritmetický průměr, směrodatnou odchylku a medián.

Na základě naměřených hodnot maximálního napětí δ_m a modulu pružnosti E byli sestrojeny grafy porovnávající vlastnosti v závislosti na směru uložení vláken.

Tabulka 10 *Statistika hodnot – směr L*

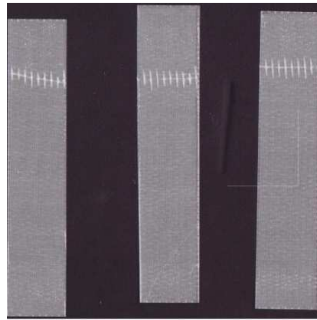
Série 1	a_0	b_0	δ_m	εF_{\max}	δ_b	$\varepsilon_{\text{break}}$	E
n=30	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,52	30,01	467,4	1,33	433,63	1,37	38103,2
s	0,014	0,165	51,43	0,13	104,97	0,3	4188,44
Me	0,52	30,02	482,325	1,325	474,3	1,305	38204,25



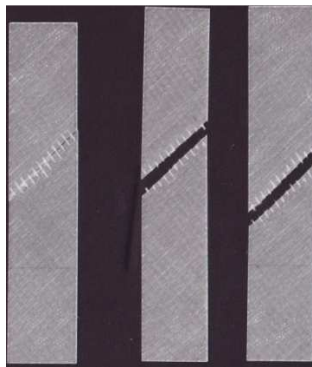
Obrázek 35 *Charakteristické roztržení při zatížení ve směru L*

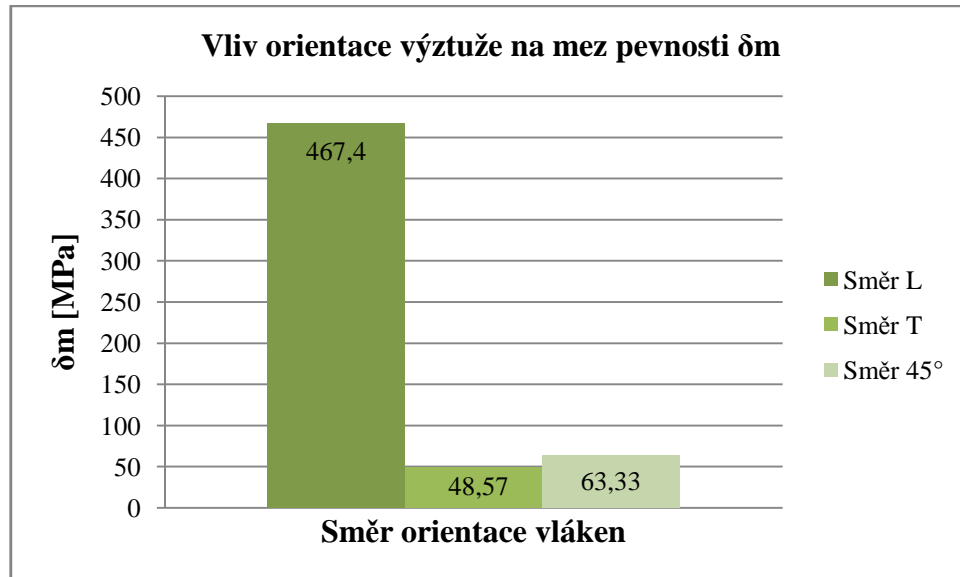
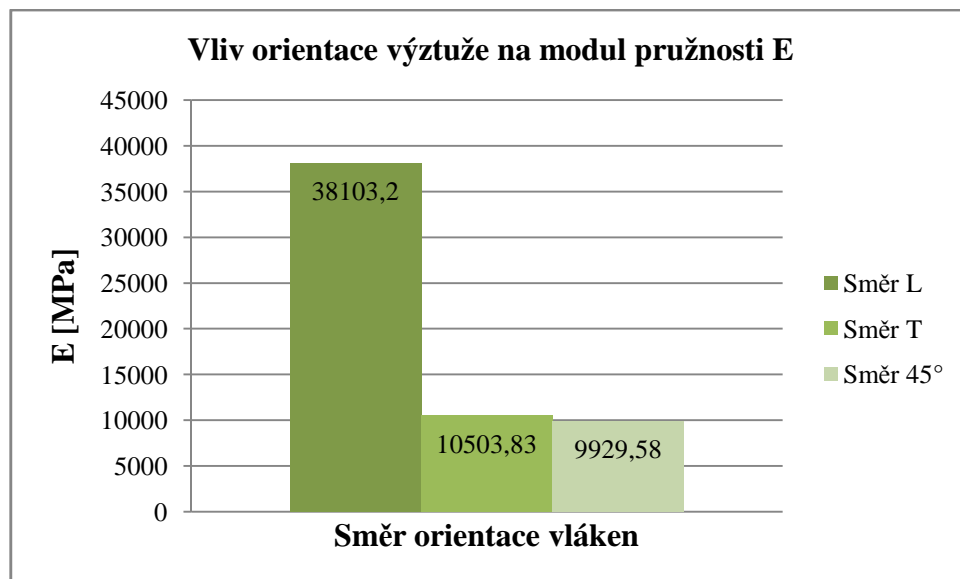
Tabulka 11 *Statistika hodnot – směr T*

Série 2	a_0	b_0	δ_m	εF_{\max}	δ_b	$\varepsilon_{\text{break}}$	E
n=30	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,517	30,02	48,57	0,7	46,18	0,7	10503,83
s	0,014	0,159	2,78	0,11	4,06	0,14	826,84
Me	0,52	30,03	48	0,725	46,75	0,72	10644,08

Obrázek 36 Charakteristické roztržení vzorku při zatížení ve směru T Tabulka 12 Statistika hodnot – směr pod úhlem 45°

Série 3	a_0	b_0	δ_m	εF_{\max}	δ_b	$\varepsilon_{\text{break}}$	E
n=30	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,508	30,032	63,33	1,46	54,6	1,77	9929,58
s	0,022	0,0825	9,02	0,41	17,25	1,61	1093,83
Me	0,51	30,025	61,5	1,485	56,08	1,52	9553,05

Obrázek 37 Charakteristické roztržení vzorku při zatížení ve směru 45°

Obrázek 38 Graf vliv orientace výztuže na mez pevnosti δ_m Obrázek 39 Graf vliv orientace výztuže na modul pružnosti E

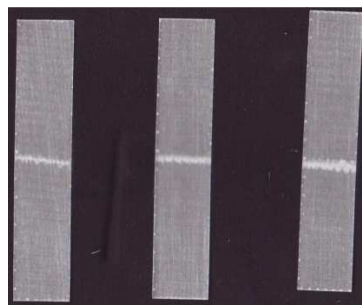
7.2 Zkouška ohybem

Z odečtených sil ze zkoušky ohybem program testXpert vyhodnotil pro naměřené hodnoty aritmetický průměr, směrodatnou odchylku a variační medián.

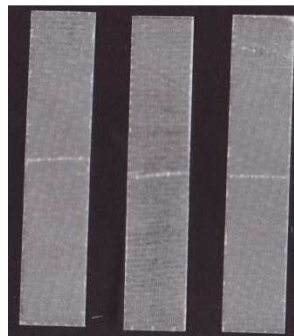
Na základě naměřených hodnot maximálního napětí δ_m a modulu pružnosti E byli sestrojeny grafy porovnávající vlastnosti v závislosti na směru uložení vláken.

Tabulka 13 Statistika hodnot – směr *L*

Série 1	a_0	b_0	δ_m	ϵF_{max}	δ_b	ϵ_{break}	E
n=30	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,51	20,01	955,78	2,22	228,7	3,17	44063,57
s	0,02	0,08	164,34	0,18	131,16	0,31	7243,56
Me	0,505	20,025	978,465	2,24	193,94	3,135	44675,32

Obrázek 40 Charakteristické porušení vzorku při zatížení ve směru *L*Tabulka 14 Statistika hodnot – směr *T*

Série 2	a_0	b_0	δ_m	ϵF_{max}	E
n=30	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,51	20,01	128,62	1,61	12706,01
s	0,02	0,06	10,73	0,33	3125,74
Me	0,51	20,015	126,33	1,6	13041,71

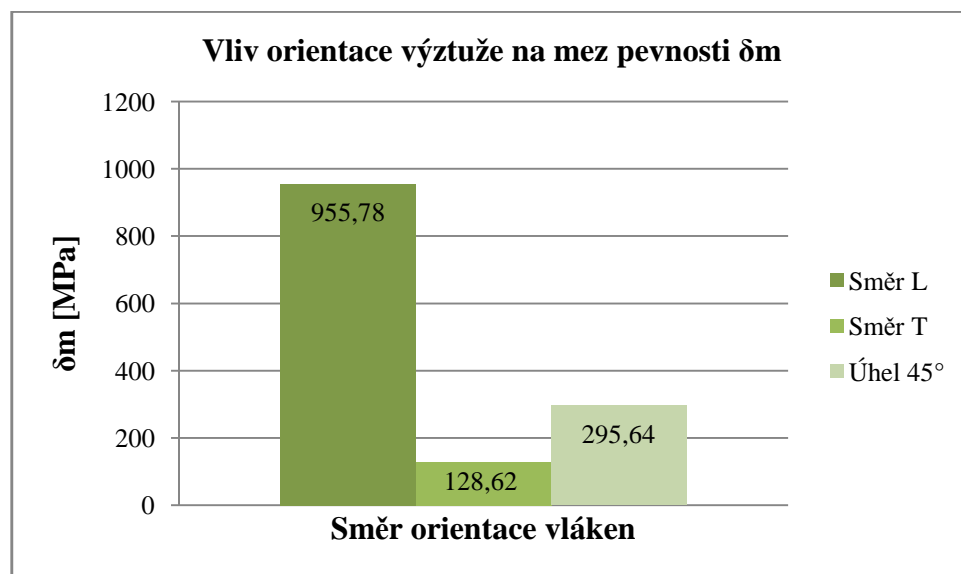
Obrázek 41 Charakteristické porušení vzorku při zatížení ve směru *T*

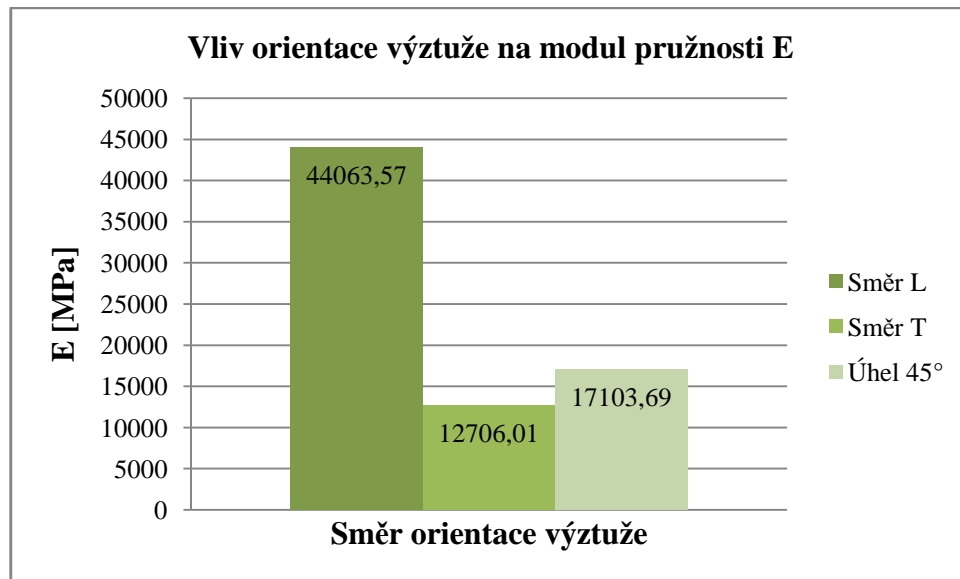
Tabulka 15 Statistika hodnot – směr pod úhlem 45°

Série 3	a_0	b_0	δ_m	εF_{\max}	E
n=30	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
x	0,51	20,01	295,64	1,78	17103,69
s	0,02	0,07	64,18	0,42	4085,81
Me	0,51	20,01	291,985	1,815	17866,83



Obrázek 42 Charakteristické porušení vzorku při zatížení ve směru 45°

Obrázek 43 Graf vliv orientace výztuže na mez pevnosti δ_m



Obrázek 44 Graf vliv orientace výztuže na mez pevnosti E

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá studiem vlivu orientace výztuže na pevnostní charakteristiky kompozitního materiálu složeného z polyesterové pryskyřice (UP) a skelné jednosměrné výztuže (GFR). U jednosměrně orientovaných vyztužujících vláken, ale také tkaných výztuží se vlastnosti pryskyřice po jejich vložení stávají směrově závislé. Je známo, že kompozitní materiál má vždy tuhost a pevnost nejvyšší ve směru orientace vyztužujících vláken. Takový materiál vykazuje anizotropní vlastnosti. Tento anizotropní charakter kompozitních materiálů musí být zahrnut i do výpočtů mechanických vlastností a při návrhu konstrukcí z kompozitních materiálů. Je totiž důležité definovat zatížení a deformaci v závislosti na směru, aby bylo možno použít kompozit se správnou prostorovou orientací vláken. Z odborné literatury jsou známy všeobecné informace popisující vlastnosti vztahující se k jednosměrným skleněným vláknům vyztužených polyesterovými a epoxidovými pryskyřicemi, kde je dosaženo poměrně vysokého obsahu skla (60-85 hmotnostních %), což umožňuje dosáhnout ve směru hlavní materiálové osy vynikající tuhost a pevnost blízké se vlastnostem samotných skelných vláken.

Pevnost těchto materiálů měřená v ohybu jsou v intervalu 1000-1600 MPa, pevnost v tahu dosahuje hodnot 650-1100 MPa a hodnoty pevnosti v tlaku leží obvykle v intervalu 400-700 MPa. Tyto hodnoty σ_x jsou řádově větší jako hodnoty příčné pevnosti σ_y , které leží při namáhání v tahu v intervalu 30-80 MPa, pro tlak v rozpětí 170-220 MPa. Tato pozorovaná skutečnost je důkazem obrovské anizotropie kompozitů s jednosměrně orientovanými výztužemi. Smyková pevnost tohoto typu kompozitů leží v intervalu 50-90 MPa. [1]

Úhlová závislost pevnosti v tahu a tlaku je nejsilnější pro vnější napětí působící pod velmi malým úhlem vzhledem k ose x (kolem 10°). Padesátiprocentní pokles limitní pevnosti nastává už při deviaci o 7° . Tento fakt je důležitý pro výrobce tohoto typu materiálu. Pokud v důsledku nekvalitní technologie dochází k větším změnám orientace vláken, byť jen v malém rozpětí úhlů kolem hlavního směru, projeví se to velmi negativně na výsledných pevnostech. Jen velmi sofistikovaná technologie a dostatečná kontrola kvality může zaručit, že vyrobený jednosměrný kompozit bude dosahovat požadované vlastnosti.

Námi naměřené výsledky potvrzují předpoklady pevnostních charakteristik jednosměrně vyztužených kompozitních materiálů, kde i v našem případě 3-vrstvého skelného/polyesterového laminátu jsme naměřili hodnoty meze pevnosti v tahu ve směru vláken

$\sigma_m = 647,4$ MPa, v příném směru $\sigma_m = 48,57$ MPa a ve směru svírajícím se směrem vláken úhel 45° $\sigma_m = 63,33$ MPa.

V případě namáhání na ohyb jsou naměřené hodnoty $\sigma_m = 955,78$ MPa, v příčném směru $\sigma_m = 128,62$ MPa a ve směru svírajícím se směrem vláken úhel 45° $\sigma_m = 295,64$ MPa.

Pokračováním této bakalářské práce by mohlo být důkladnější prozkoumání směrové závislosti kompozitních materiálů vyrobených zpracovatelskou technologií ručního laminování s vakuovým vakem (vakuum bagging technology), při které je zabezpečené důkladné stlačení jednotlivých vrstev laminátu, čímž zabezpečíme jednak odstranění přebytečné pryskyřice, minimalizujeme množství vzduchových bublin, které při technologii ručního laminování nelze dosáhnout jednak z principu této technologie a s tím, že kvalita výrobků je spjatá se zručností pracovníků a jejich zkušenostmi. Praktickým přínosem je i možnost použití experimentálně stanovených pevnostních charakteristik laminátových kompozitů v posloupnosti od jedné laminy až po n – vrstvený laminát a použít tyto hodnoty při napěťově deformačních analýzách konkrétního typu kompozitního materiálu pro danou aplikaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] JANČÁŘ, J. . Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1.

Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s. Dostupné

z WWW:

<<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=filebrowser/MVD/Jancar++Uvod+do+materialoveho+inzenyrstvi+kompozitu>>. ISBN 8021424435.

[2] Ptáček, L.: Nauka 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, 325 s, 1988.

[6] Reinhart, T. J.: Engineered materials handbook. Composites. Vol.1., ASM INTERNATIONAL, 1987.

[7] Gurit.com [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Guide to composites.

Dostupné z WWW: < <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx> >.

[8] Turkcadcam.net [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Konstrukce letadla.

Dostupné z WWW:

< <http://www.turkcadcam.net/rapor/malzeme-secimi/kompozit-ucak.jpg> >.

[9] Ime.fme.vutbr.cz [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. Kompozitní materiály.

Dostupné z WWW: < <http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/11-BUM.ppt> >

[10] Kmi2.uniza.sk [online]. 2009 [cit. 2011-04-28]. Polymérne technické materiály.

Dostupné z WWW:

<http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/polymerne_konstrukcne_materialy.pdf>

[11] Stefanmichna.com [online]. 2010 [cit. 2010-05-13] Kompozitní materiály.

Dostupné z WWW:

<http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_0	mm	střední tloušťka
b_0	mm	střední šířka
D	mm	průměr
E	MPa	modul pružnosti
	-	rovnoběžně se směrem vláken
⊥	-	kolmo ke směru vláken
F	N	síla
F_{\max}	N	maximální síla při které došlo k porušení materiálu
h	mm	výška
s	-	směrodatná odchylka
v	mm/min	rychlost
x	-	aritmetický průměr
x,y,z	-	označení os souřadného systému
σ	MPa	napětí
Me	-	medián
δ_m	MPa	maximální dosažené napětí
$\varepsilon_{F_{\max}}$	%	prodloužení při působení maximální síly
δ_b	MPa	napětí při přetržení
$\varepsilon_{\text{break}}$	%	prodloužení při přetržení
φ	%	objemový podíl
v	-	poissonovo číslo
L	mm	délka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 <i>Tahový diagram</i> [7].....	12
Obrázek 2 <i>Konstrukce letadla</i> [8].....	14
Obrázek 3 <i>Částicová disperzní fáze</i>	14
Obrázek 4 <i>Vláknová disperzní fáze</i>	15
Obrázek 5 <i>Strukturní disperzní fáze</i>	15
Obrázek 6 <i>Rozdělení kompozitů</i> [9].....	16
Obrázek 7 <i>Metoda ručního kladení</i> [7].....	18
Obrázek 8 <i>Obrázek 9 Metoda nanášení kompozitu do formy sprayem</i> [7].....	18
Obrázek 10 <i>Metoda vakuového vaku</i> [7].....	19
Obrázek 11 <i>Metoda vytvrzování v autoklávu</i> [7].....	19
Obrázek 12 <i>Metoda navíjení</i> [7].....	20
Obrázek 13 <i>Metoda lisování se vstřikem matrice</i> [7].....	21
Obrázek 14 <i>Metoda tažení kompozitních materiálů – pultruze</i> [7].....	22
Obrázek 15 <i>Plátňová vazba</i> [7].....	25
Obrázek 16 <i>Keprová vazba</i> [7].....	25
Obrázek 17 <i>Atlasová vazba</i> [7].....	25
Obrázek 18 <i>Skelná vlákna ve formě rovingu a tkací stroj používaný na výrobu kompozitů</i> [10].....	26
Obrázek 19 <i>Aramidové vlákno</i> [10].....	27
Obrázek 20 <i>Uhlíkové vlákna a) řez uhlíkovým vláknem, b) uhlíkové vlákno ve formě rovingu, c) tkanina z uhlíkových vláken</i> [10].....	29
Obrázek 21 <i>Porovnání ceny vláken</i> [7].....	32
Obrázek 22 <i>Model elementárního vlákna uloženého v matrici</i> [4].....	33
Obrázek 23 <i>Základní charakteristiky jednosměrně vyztužené vrstvy</i> [4].....	35
Obrázek 24 <i>Tahové napětí aplikované na kompozitní materiál</i> [7].....	40
Obrázek 25 <i>Tlakové napětí aplikované na kompozitní materiál</i> [7].....	40
Obrázek 26 <i>Smykové napětí aplikované na kompozitní materiál</i> [7].....	41
Obrázek 27 <i>Ohybové napětí aplikované na kompozitní materiál</i> [7].....	41
Obrázek 28 <i>Vznik trhlin v matrici v mikrostrukturu jednosměrně vyztužené vrstvy kompozitu</i> [4].....	42
Obrázek 29 <i>Průběhy napětí-deformace stanovené na pěti vzorcích SMC materiálu</i> [4].....	43

Obrázek 30 <i>Změna geometrie vzorku při tahové zkoušce</i> [10].....	45
Obrázek 31 <i>Průběh tahových křivek: a – pro efektivní napětí, b – pro smluvní napětí</i> [10]	46
Obrázek 32 <i>Schéma tříbodového ohybu</i> [10].....	47
Obrázek 33 <i>Příprava zkušebních těles</i>	50
Obrázek 34 <i>Nastavení podpor při zkoušce ohybem</i>	55
Obrázek 35 <i>Charakteristické roztržení při zatížení ve směru L</i>	59
Obrázek 36 <i>Charakteristické roztržení vzorku při zatížení ve směru T</i>	60
Obrázek 37 <i>Charakteristické roztržení vzorku při zatížení ve směru 45°</i>	60
Obrázek 38 <i>Graf vliv orientace výztuže na mez pevnosti δ_m</i>	61
Obrázek 39 <i>Graf vliv orientace výztuže na modul pružnosti E</i>	61
Obrázek 40 <i>Charakteristické porušení vzorku při zatížení ve směru L</i>	62
Obrázek 41 <i>Charakteristické porušení vzorku při zatížení ve směru T</i>	62
Obrázek 42 <i>Charakteristické porušení vzorku při zatížení ve směru 45°</i>	63
Obrázek 43 <i>Graf vliv orientace výztuže na mez pevnosti δ_m</i>	63
Obrázek 44 <i>Graf vliv orientace výztuže na mez pevnosti E</i>	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 <i>Porovnání mechanických vlastností přírodních a skelných vláken</i> [4]	31
Tabulka 2 <i>Základní charakteristiky skelných, uhlíkových a aramidových vláken</i> [4]	31
Tabulka 3 <i>Porovnání viskozit termoplastických tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách</i> [4]	37
Tabulka 4 <i>Zkouška tahem - směr L</i>	52
Tabulka 5 <i>Zkouška tahem - směr T</i>	53
Tabulka 6 <i>Zkouška tahem - směr pod úhlem 45°</i>	54
Tabulka 7 <i>Zkouška ohybem – směr L</i>	56
Tabulka 8 <i>Zkouška ohybem – směr T</i>	57
Tabulka 9 <i>Zkouška ohybem – směr pod úhlem 45°</i>	58
Tabulka 10 <i>Statistika hodnot – směr L</i>	59
Tabulka 11 <i>Statistika hodnot – směr T</i>	59
Tabulka 12 <i>Statistika hodnot – směr pod úhlem 45°</i>	60
Tabulka 13 <i>Statistika hodnot – směr L</i>	62
Tabulka 14 <i>Statistika hodnot – směr T</i>	62
Tabulka 15 <i>Statistika hodnot – směr pod úhlem 45°</i>	63

