

Vliv orientace a skladby materiálů na výsledné vlastnosti kompozitního systému

Martin Musil

Bakalářská práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Musil**
Osobní číslo: **T16540**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv orientace a skladby materiálů na výsledné vlastnosti kompozitního systému**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice vláknových kompozitů:
2. Základní definice kompozitů, rozdělení, vlastnosti a aplikace
3. Popis a vlastnosti používaných výtuzných materiálů se zaměřením na moderní typy
4. Používané skladby materiálů dle aplikací, vliv na vlastnosti výsledného kompozitu
5. Experimentální část
6. Výběr vhodných materiálů a návrh skladeb kompozitů
7. Výroba a příprava zkušebních těles
8. Mechanické testy připravených zkušebních těles
9. Vyhodnocení naměřených dat, závěry

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ladislav Fojtl, PhD.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2017

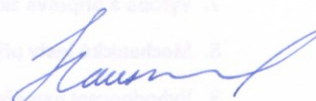
Termín odevzdání bakalářské práce:

19. května 2017

Ve Zlíně dne 31. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ 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 19. 5. 2017



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 nevydávalečně 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).

³¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit 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 jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.



Ve Zlíně 19. 1. 2017

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce se zabývá vlivem orientace a skladby výztužných materiálů na mechanické vlastnosti vláknových kompozitů. V teoretické části jsou popsány druhy kompozitních materiálů, jejich rozdělení, vlastnosti a aplikace, používané výztužné materiály a jejich vlastnosti. Charakterizuje skladbu materiálů dle aplikací a jejich vliv na výsledné vlastnosti kompozitů. V praktické části je provedena volba vhodných materiálů a jsou navrženy skladby materiálů s ohledem na specifickou aplikaci. Připravené kompozity jsou podrobeny vybraným mechanickým testům. V závěru jsou výsledky shrnuty a porovnány s teoretickými předpoklady z odborné literatury.

Klíčová slova: kompozitní materiály, výztužné materiály, orientace vláken, skelná vlákna, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This thesis describes the effect of orientation and composition of reinforcing materials on the mechanical properties of fiber composites. The theoretical part is focused on the types of composite materials, their division, properties and applications, used reinforcing materials and their properties. This thesis defines the material composition according to their applications and their impact on resulting properties of final composite. In the practical, the selection of suitable materials is conducted and the material composition with respect to the specific application is designed. Prepared composites are tested in mechanical tests. In conclusion, the results are summarized and compared with theoretical assumptions from the literature.

Keywords: composite materials, reinforcing materials, fiber orientation, glass fiber, mechanical properties

Rád bych poděkoval Ing. Ladislavu Fojtlovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při vypracovávání mé bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 DEFINICE	12
1.2 ROZDĚLENÍ	13
1.2.1 Rozdělení podle povahy matrice	13
1.2.2 Rozdělení podle struktury	14
1.2.3 Rozdělení podle geometrického tvaru a orientace výztuže.....	14
1.3 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	15
1.3.1 Synergismus	16
1.3.2 První paradox pevného materiálu	17
1.3.3 Druhý paradox vláknité struktury.....	17
1.3.4 Třetí paradox délky zatížení.....	18
1.3.5 Čtvrtý paradox kompozitního materiálu	18
1.4 TECHNOLOGIE VÝROBY VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ	19
1.4.1 Ruční kladení.....	19
1.4.2 Metoda pružného vaku.....	20
1.4.3 Vytvrzování v autoklávu	21
1.4.4 Navíjení.....	21
1.4.5 RTM- metoda lisování se vstřikem matrice	22
1.4.6 SMC- metoda lisování polotovarů s dlouhými vlákny	23
1.4.7 Pultruze	24
1.5 APLIKACE	25
1.5.1 Automobilový průmysl	25
1.5.2 Letecký průmysl	26
1.5.3 Sportovní potřeby	26
2 VÝSTUŽNÉ MATERIÁLY	27
2.1 DRUHY VÝZTUŽÍ	27
2.2 DRUHY VAZEB POUŽÍVANÝCH U TKANIN	31
2.3 ROZDĚLENÍ VÝZTUŽÍ PODLE MATERIÁLU	33
2.3.1 Skleněná vlákna.....	33
2.3.2 Aramidová vlákna	34
2.3.3 Uhlíková vlákna	35
2.3.4 Přírodní vlákna	36
3 SKLADBY MATERIÁLŮ.....	38
3.1 IZOTROPNÍ, ANIZOTROPNÍ A ORTOTROPNÍ MATERIÁLY.....	38
3.2 VRSTVENÍ	41
3.3 NÁZVOSLOVÍ.....	42
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
4 ZKUŠEBNÍ VZORKY	45

4.1	POUŽITÉ MATERIÁLY	45
4.1.1	Výztuž.....	45
4.1.2	Pryskyřice LH 385.....	45
4.1.3	Tužidlo	45
4.1.4	Použité pomocné materiály	45
4.1.4.1	Odtrhová tkanina	45
4.1.4.2	Sací tkanina	45
4.1.4.3	Vakuová fólie	46
4.1.4.4	Těsnicí páska	46
4.1.4.5	Hadice	46
4.1.4.6	Separální vosk.....	46
4.1.4.7	Vakuová vývěva	46
4.1.4.8	Přepadová nádoba (rezervoár).....	46
4.2	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	47
5	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	50
5.1	ZKOUŠKA TAHEM	50
5.2	ZKOUŠKA OHYBEM.....	52
5.3	PRŮRAZOVÁ ZKOUŠKA	54
6	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	56
6.1	ZKOUŠKA TAHEM	56
6.2	ZKOUŠKA OHYBEM.....	59
6.3	PRŮRAZOVÁ ZKOUŠKA	62
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	70
	SEZNAM TABULEK	73

ÚVOD

V dnešní době můžeme sledovat prudký nárůst výroby a použití kompozitních materiálů v konstrukčních prvcích a to v mnoha odvětvích průmyslu.

Díky poměrně krátkodobé zkušenosti s používáním kompozitů je nutné, aby konstruktéři měli pokročilé znalosti o jejich odlišných reakcích na možná zatížení a zpracovatelských technologiích výroby vláknových kompozitů, které významně ovlivňují jejich výsledné vlastnosti.

Velkou výhodou kompozitních materiálu s polymerními matricemi je možnost změnit jejich pevnost a elastické vlastnosti změnou prostorového uspořádání výztuže (orientací), jejího druhu (roving, rohož, tkanina, atd.), poměr mezi obsahem výztuže, pojiva a technologie výroby.

Použitím stejných prvků můžeme tedy vyrobit velké množství odlišných skladeb a následně výrobků s různými vlastnostmi. Tato možnost u tradičních materiálů jako ocel prakticky neexistuje nebo je velmi omezená.

Pokud mají být v projektu tradiční materiály nahrazeny kompozitními, musí konstruktér znát alespoň základní vztahy, které umožňují určit závislost modulu pružnosti kompozitních materiálu na obsahu výztuže, její prostorové orientaci a typu. Tyto znalosti zajišťují maximální efektivitu při používání kompozitů.

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá druhy kompozitních materiálů, jejich rozdělením, vlastnostmi a aplikacemi. Dále se věnuje výztužným materiálům a jejich vlastnostem. Charakterizuje skladby materiálů dle aplikací a jejich vliv na výsledné vlastnosti kompozitu.

V praktické části se bakalářská práce zaměřuje na výběr vhodné skladby materiálu, výběr technologie, výrobu kompozitních panelů a následných zkušebních těles a jejich Mechanické testování.

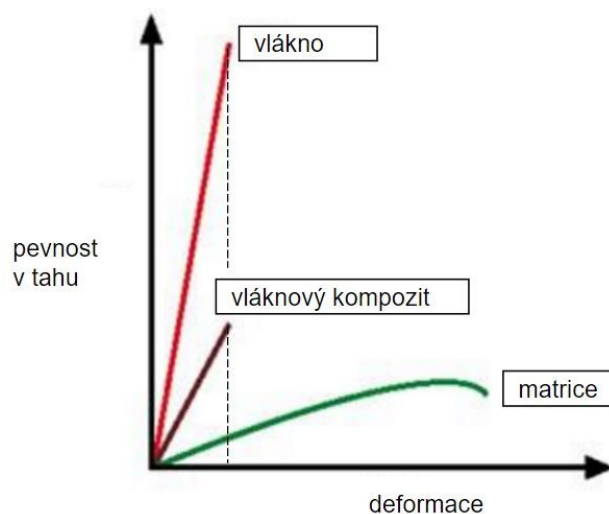
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

1.1 Definice

Slovo „kompozitní“ znamená „vytvořený či skládající se ze dvou nebo více odlišných částí“. Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek neboli fází je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností jeho složek, označujeme takový materiál jako kompozit.[1]

Obecně by se tak za kompozit daly chybně považovat i obyčejné kovy, které vždy obsahují nežádoucí slitinové prvky a nečistoty nebo plasty, které vždy obsahují malá množství různých plniv, pohlcovačů UV záření, či jiných dodatečných materiálů. V kovech jsou sice jednotlivé složky s téměř stejnými vlastnostmi (např. modul pružnosti), ale nemají většinou vláknový charakter a jedna z fází bývá zastoupena v malém objemovém podílu. Modul pružnosti je tak jen málo ovlivnitelný těmito fázemi a proto se obzvláště z hlediska analýzy nepovažuje kovová slitina za kompozit. Plasty sice obsahují různá plniva a malá množství příměsí, které jsou sice složenými materiály, ale výrazně neovlivňují fyzikální vlastnosti materiálu. Z tohoto důvodu nesmí být označovány za kompozit. Označení některých materiálů jako kompozitů se často zdůvodňuje tak, že změny charakteristických vlastností jsou zapříčiněny kombinací složek. Tyto změny vlastností budou zvláště patrné, bude-li jedna z fází v destičkové nebo vlákněné formě a objemový podíl jedné ze složek větší než 10% a její vlastnosti mnohem výraznější (tj. ≥ 5 krát) než druhé [1]



Obr. 1 Tahový diagram [2]

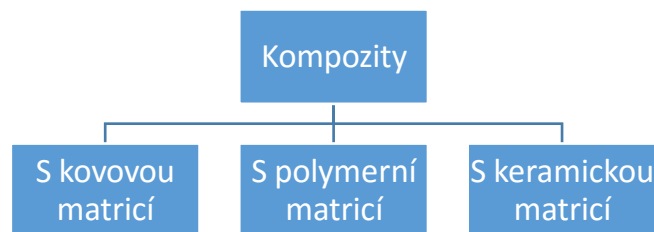
1.2 Rozdělení

Kompozitové materiály můžeme dělit podle mnoha kritérií. Mezi nejpoužívanější dělení patří:

- podle povahy výztuže
- podle povahy matrice
- podle struktury [2]

1.2.1 Rozdělení podle povahy matrice

Kompozitní materiály můžeme dle typu matrice dělit dle následujícího schématu (Obr. 2).



Obr. 2 Rozdělení kompozitů podle matrice

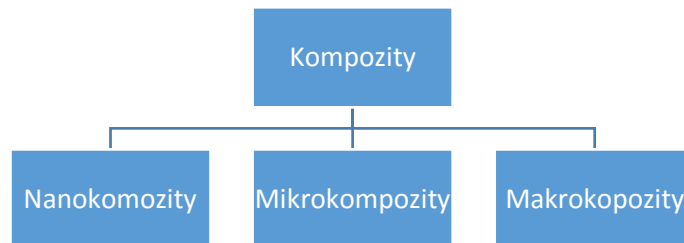
Kompozity **s kovovou matricí** (z angl. metal matrix composites – MMCs) – jsou známé především tvárností a houževnatostí. Nejvýznamnějšími zástupci jsou lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Pro velmi vysoké teploty jsou vyráběny kompozity s maticemi z niklových slitin a pro elektrotechnické účely kompozity s měďnými případně se stříbrnými maticemi. [2]

Kompozity **s polymerní matricí** (polymer matrix composites – PMCs) – mají nízkou hustotu, a proto je jednou z hlavních oblastí jejich využití konstrukce letadel. Částečnou nevýhodou je nízká tepelná stabilita polymerů. Tyto nejvýznamnější kompozity mají matrice z reaktoplastů (polyesterové, epoxidové pryskyřice). [2]

Kompozity **s keramickou matricí** (ceramic matrix composites – CMCs) - jsou materiály lehké a většinou velmi tvrdé, avšak poměrně křehké. Kompozity s keramickými maticemi patří mezi vysokoteplotní materiály. Keramické matrice mohou být oxidické povahy (Al_2O_3 , ZrO_2 , oxidická skla atd.) i neoxidické povahy (SiC , Si_3N_4 , C atd.). [2]

1.2.2 Rozdělení podle struktury

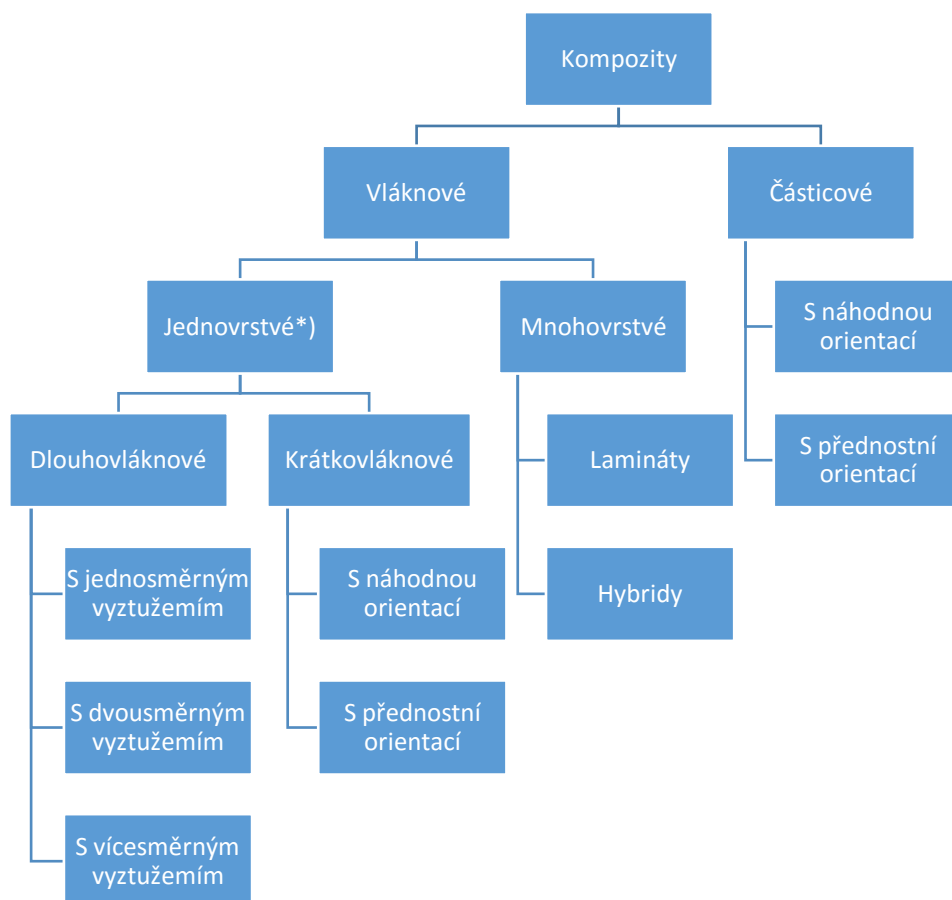
Kompozitní materiály můžeme dle struktury dělit dle následujícího schématu (Obr. 3).



Obr. 3 Rozdělení podle struktury

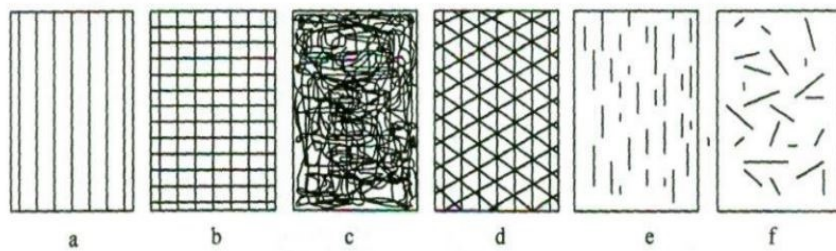
1.2.3 Rozdělení podle geometrického tvaru a orientace výztuže

Kompozitní materiály můžeme dle geometrického tvaru a orientace výztuže dělit dle následujícího schématu (Obr. 4).



*) Včetně kompozitů se stejnou orientací a vlastnostmi v každé vrstvě

Obr. 4 Rozdělení podle výztuže



Obr. 5 Příkladů uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) vícená výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou [1]

1.3 Vlastnosti kompozitních materiálů

Na rozdíl od kovů nebo nevyztužených materiálů můžeme říci, že se jedná o **anizotropní materiál**, tj. materiál, který má v různých směrech odlišné vlastnosti. [3]

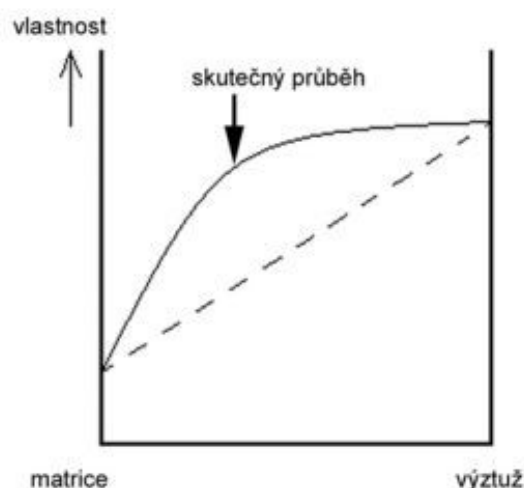
Obecné vlastnosti kompozitů:

- + velká pružnost při deformaci
 - + vysoká pevnost a tuhost, kterou lze přizpůsobit danému směru a druhu zatížení
 - + tvarovatelnost
 - + nízká hmotnost
 - + vysoké mechanické tlumení
 - + odolnost proti dynamickému namáhání
 - + nízký součinitel teplotní délkové roztažnosti
 - + vysoká odolnost proti stárnutí a korozi
 - + velké množství kombinací matrice a vláken, které umožňuje konfiguraci dle požadavků na vlastnosti
 - + široká škála použitelných materiálů
 - + menší požadavek na investice při malém počtu výrobků i u velkoplošných
 - + možnost oprav při použití termosetické matrice
 - + vysoká tvarová stálost [3]
- velké množství variant složení, neexistuje vlastně standardní kompozit
 - neobvyklé chování materiálu (vlastnosti nejdou snadno odvodit z použitých fází)

- specifické vlastnosti a způsoby zpracování
- obtížné nedestruktivní testování materiálů
- nízká mez pevnosti v tahu kolmo ke směru uložení vláken
- možné katastrofální následky při havárii
- vysoké náklady při návrhu náročných konstrukcí
- nízká odolnost proti působení vlhkosti za tepla
- obtížné rozeznání a opravení místního poškození např. nárazem [3]

1.3.1 Synergismus

Obrovský potenciál kompozitních materiálů ve všech odvětvích má na svědomí jejich charakteristická vlastnost, tzv. synergismus. To znamená, že výsledné vlastnosti kompozitu jsou lepší než poměrný součet jednotlivých fází. Sloučením dvou fází s odlišnými vlastnostmi vznikne materiál s jednou úplně novou strukturou. Typickým příkladem tohoto chování je kompozit složený z keramické matrice (Al_2O_3) vyztužený keramickými vlákny (SiC). I když jsou matrice i vlákna samostatně křehká, tak tento kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatostí tzn. odolnosti proti náhlému křehkému porušení. Uvedené chování kompozitu je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlinka je brzděna na rozhraní matrice a vláken. Dochází zde jednak k odklánění směru šíření trhliny a také k intenzivnímu vzájemnému tření mezi matricí a vytahujícími se vlákny. Kvalita rozhraní mezi matricí a vyztuží má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. [2]



Obr. 6 Synergické chování kompozitu [2]

1.3.2 První paradox pevného materiálu

Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky.

(F. Zwicky)

Při porovnávání možných teoretických pevností a s pevnostmi experimentálními, je nutno rozlišovat hodnoty u vláken a u kompaktního tělesa. V tabulce (Tab. 1) je jednoznačně vidět, jak pevnosti materiálů v kompaktní formě jsou mnohem nižší než pevnosti teoreticky možné. U klasických materiálů např. ocel a hliník jsou hodnoty příznivější než u plastů. Nejsou u nich ani rozdíly mezi teoretickou a naměřenou hodnotou modulu pružnosti v tahu jako u plastu kde obzvláště u kompaktní hmoty jsou rozdíly markantní. [3]

Tab. 1 Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot E -modulu a meze pevnosti v tahu u některých konstrukčních materiálů [3]

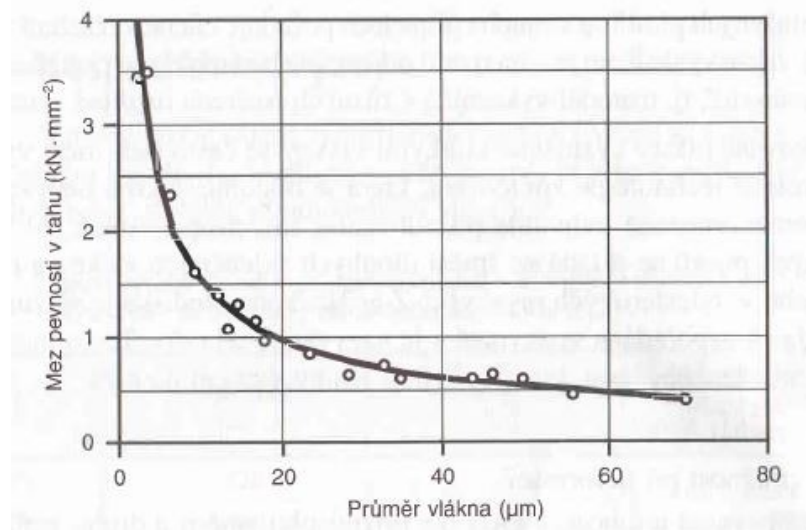
Materiál	E-modul ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)			Mez pevnosti v tahu ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)		
	teoretický	naměřený		teoretická	naměřená	
		Vlákno	Kompaktní hmota		Vlákno	Kompaktní hmota
Polyetylen	300 000	100 000 (33%)	1 000 (0,33%)	27 000	1 500 (5,5%)	30 (0,1%)
Polypropylen	50 000	20 000 (40%)	1 600 (3,2%)	16 000	1 300 (8,1%)	38 (0,24%)
Polyamid	160 000	5 000 (3%)	2 000 (1,3%)	27 000	1 700 (6,3%)	50 (0,18%)
Sklo	80 000	80 000 (100%)	70 000 (87,5%)	11 000	4 000 (36%)	55 (0,5%)
Ocel	210 000	210 000 (100%)	210 000 (100%)	21 000	4 000 (19%)	1 400 (6,67%)
Hliník	76 000	76 000 (100%)	76 000 (100%)	7 600	800 (10,5%)	600 (7,89%)

1.3.3 Druhý paradox vláknité struktury

Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší.

(A. A. Griffith)

Rozdíl v pevnosti plastů ve formě vlákna je řádově vyšší než ve formě kompaktní hmoty.



Obr. 7 Vliv průměru skelného vlákna na jeho pevnost [3]

Závislost pevnosti skelného vlákna na jeho průměru je naprosto zřejmá (Obr. 7). Proto se většina vláken vyrábí o průměru cca 14 μ m. Vlákná o menším průměru se nevyrábí, protože pronikají do plic (jsou karcinogenní). Silnější vlákna mají výhodu ve své tuhosti při vzpěru. [3]

1.3.4 Třetí paradox délky zatížení

Čím kratší je zatěžovací část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost. S rostoucí délkou vlákna prokazatelně klesá jeho pevnost. Nárůst pevnosti s menším průměrem vlákna a kratší zatěžovanou délkou vlákna můžeme odůvodnit tak, že výskyt poruch a jejich vliv je menší s klesajícím průměrem a zatěžovanou délkou vlákna. U kompozitů se využívá rovnoměrného uložení vláken, což způsobuje, že se zatěžovaná délka vlákna blíží k nule. Dochází tak k rozložení napětí, místní poruchy se nemohou tolik projevit a pevnost je tak využita co nejlépe. [3]

1.3.5 Čtvrtý paradox kompozitního materiálu

Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhaná samostatně.

(G. Slayter)

Paradox kompozitů platí při působení zatížení jednotlivých složek, resp. celého kompozitu, tahem. Při zatížení tlakem, ohybem, nebo smykem nemohou často jednotlivé složky kompozitu samy o sobě převzít svůj podíl na přenosu porušujících sil, zejména pokud nemohou zachovat při zatížení své geometrické uspořádání, jako např. vlákna svoji vzpřímenost. [3]

1.4 Technologie výroby vláknových kompozitů

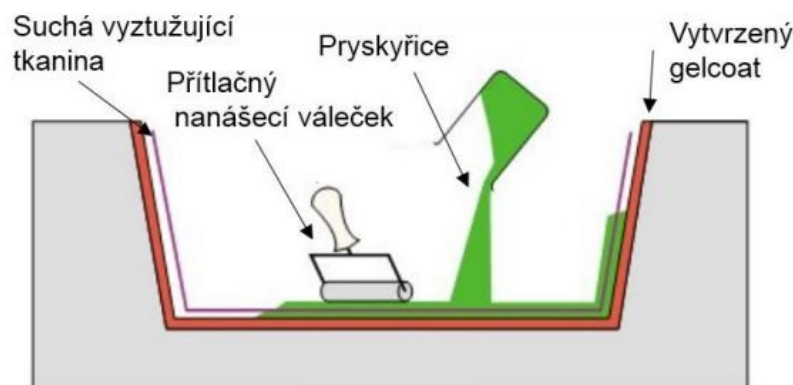
Existuje velké množství výrobních technologií. V podkapitolách níže jsou popsány nejrozšířenější metody.

1.4.1 Ruční kladení

Ruční kladení patří k nejstarším metodám výroby kompozitních materiálů. Nanášení pryskyřice i výztuže je prováděno ručně. Kvalita povrchu vyrobeného dílce je pohledová pouze z jedné strany. Tento fakt je omezující při návrhu výrobků metodou ručního kladení. Po položení výztuže a následném nasycení pryskyřicí je výrobek připravený k volnému vytvrzení. [4]

Fáze výroby:

- povrchová úprava formy separačním činidlem,
- katalyzovaná pryskyřice,
- výztuž,
- další vrstva pryskyřice, ta je válečkem vtlačena do výztuže a přitom vytlačeny vzduchové bubliny,
- vytvrzení v klidu. [4]



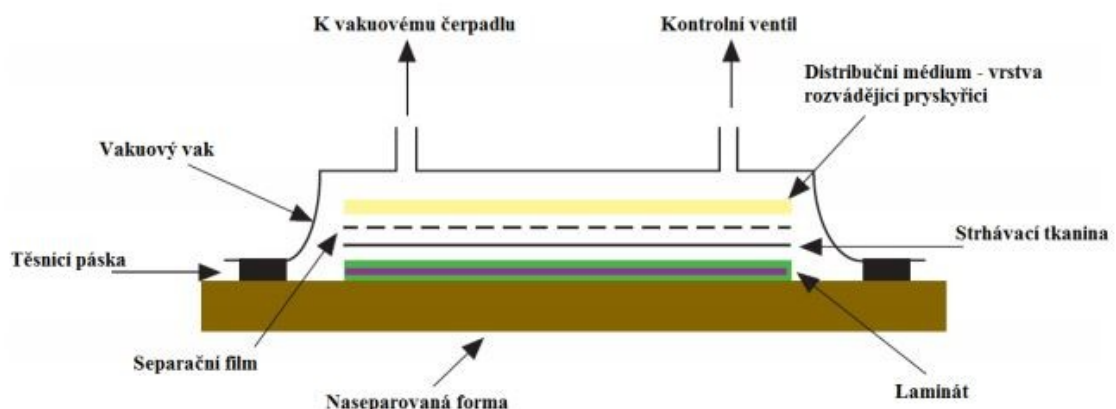
Obr. 8 Schéma ručního kladení [5]

Benefity ručního kladení jsou jednoduchost výroby, minimální náklady na nástroje, neomezená variabilita tvarů a velikostí. Jedna z hlavních nevýhod je velké množství nerecyklovatelného odpadu. Jen velmi těžko jej můžeme znovu zpracovat. Další nevýhodou je dlouhý výrobní čas. Kvalita výrobku do velké míry závisí na zkušenostech pracovníků. Nejčastější využití této metody je v lodním průmyslu. [4]

1.4.2 Metoda pružného vaku

Tato metoda je vylepšením metody ručního kladení. V poslední fázi vytvrzení je na povrch položený tenký film (fólie) nepropouštějící vzduch. Forma je vakuována a tlakem filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin vzduchu a k dokonalejšímu stlačení jednotlivých vrstev. [4] Kroky při výrobě metodou pružného vaku jsou:

- ruční kladení,
- film je položen přes volný povrch kompozitního dílce,
- prostor formy je vakuován,
- film je podtlakem dotlačen na kompozit, přebytečný vzduch vytlačen,
- vytvrzení.
- film je stržen a výrobek dokončen [4]



Obr. 9 Schéma vakuového prosycování [5]

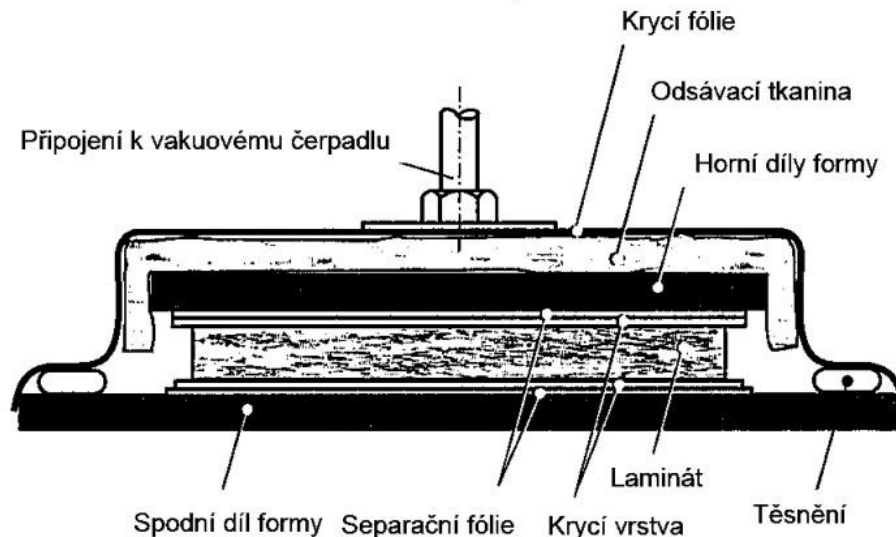
Benefitem této metody je možnost připravit materiál s minimálními bublinami vzduchu. Většina výhod ručního kladení zůstává, metoda je vynikající pro sendvičové struktury. Kvalita výroby záleží na zručnosti a zkušenostech pracovníků. Výrobky zhotovené touto

metodou jsou dražší, a proto se používají převážně v případech, jež vyžadují kvalitu vlastností a kde cena hraje vedlejší roli. Například to může být hromadná kolejová doprava. [4]

1.4.3 Vytvrzování v autoklávu

Metoda autokláv je vylepšená technologie využívající pružného vaku. Vytvrzování probíhá v uzavřené nádobě pod tlakem a účinkem zvýšené teploty. [4] Proces:

- příprava materiálů na formu,
- přesnost takto připraveného výrobku do autoklávu,
- díky teplu a tlaku je v autoklávu kompozit vytvrzen,
- výrobek je vyndán, vakuový pytel stržen a výrobek dokončen.



Obr. 10 Schéma vytvrzování v autoklávu [5]

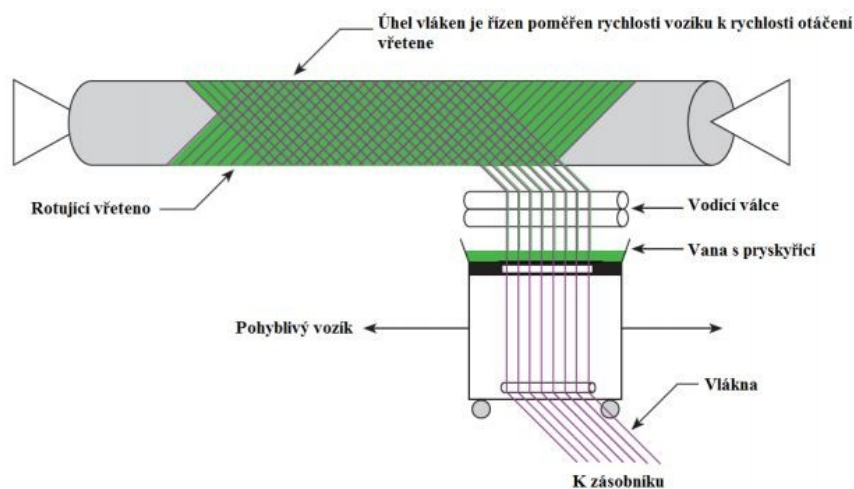
Existuje možnost, kdy v jednom kroku může být vytvrzeno více součástí. Mezi nevýhody lze počítat vysoké pořizovací náklady, metoda je velmi pracná a velikost dílů je omezena velikostí autoklávu. Metoda produkuje velké množství odpadu, formy jsou relativně drahé. Typické uplatnění této metody je v leteckém průmyslu.[4]

1.4.4 Navíjení

Technologie navíjení je založena na navíjení nepřetržitého pramene výztužných vláken impregnovaných pryskyřicí na otáčející se vřeteno. Díky této metodě je možné přesně uspořádat a orientovat vlákna a tím dosáhnout přesných požadovaných parametrů.[4]

Postup technologie:

- do rotačního zařízení je upnuto jádro, které je buď vyjímatelné, nebo se po skončení procesu stane součástí výrobku,
- jsou navinuty výztuže za předem naprogramovaného předpětí, složení, orientace atd.,
- kompozit se vytvrzuje i s jádrem, kde dochází k neustálé rotaci obou částí (výrobku i jádra). [4]



Obr. 11 Schéma výroby navíjením [5]

Výhodou je možnost použití nejlépejší formy výztuže, rovingu. Tento proces může být velmi snadno automatizován. Technologie se používá pro výrobu trubek, kolen a dalších velkých dutých součástí. Často se využívá pro lyžařské hůlky, rybářské pruty atd. Mezi nevýhody lze zařadit velkou pořizovací cenu strojů. [4]

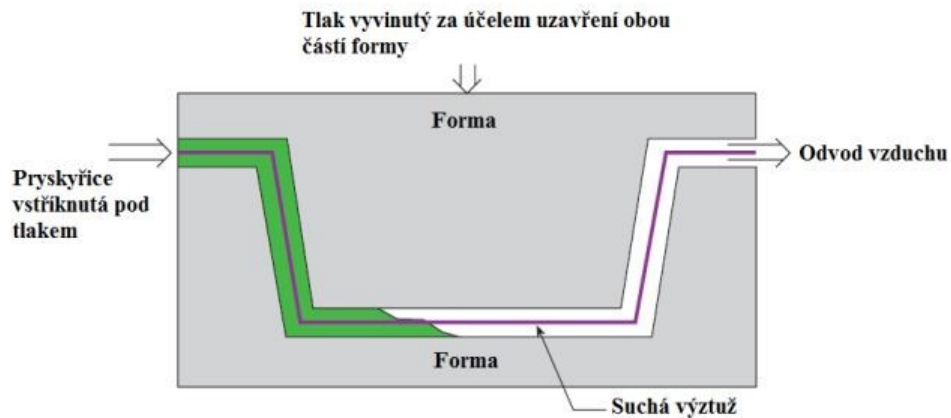
1.4.5 RTM- metoda lisování se vstříkem matrice

Metoda pracuje s uzavřenou formou. Do dutiny formy je umístěna tkanina a následně vpuštěna pryskyřice pod tlakem. Forma má pokojovou teplotu. Dutina je případně vyhřívána na 40- 60°C.[4]

Postup výroby:

- obě strany formy jsou navoskovány (naseparovány),
- do formy je vložena suchá výztuž,

- do uzavřené formy je vstříknuta pryskyřice pod tlakem, poté pryskyřice po naplnění formy začne vytékat odtokovými otvory ven,
- forma je uzavřena po dobu vytvrzení,
- forma je otevřena a díl vytažen. [4]



Obr. 12 Schéma výrobní metody RTM [5]

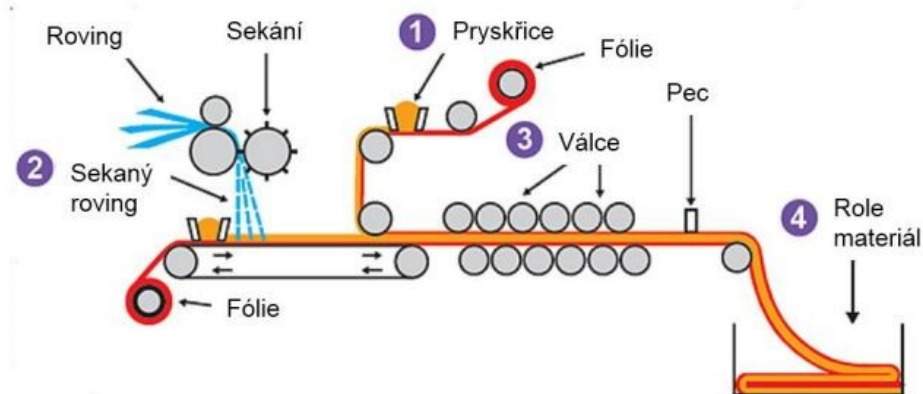
Tato metoda umožňuje výrobu dílu, který má obě strany pohledové. Povrch lze barevně upravit. Protože výroba probíhá za pokojových teplot, lze použít nástroje z plastů či kompozitů. Těžké kovové formy jsou považovány za značnou nevýhodu této metody. [4]

1.4.6 SMC- metoda lisování polotovarů s dlouhými vlákny

SMC- z angl. Sheet molding compound využívá vlastností dlouhých vláken (2 až 50mm), které jsou v deskových polotovarech spolu s nevytvrzenou pryskyřicí. Tyto polotovary se převádí do tvaru finálního výrobku například lisováním. Tato metoda je vhodná pro velké série. [4]

Kroky výrobního postupu:

- pryskyřice, modifikátory a plniva jsou smíchány a naneseny na rohož z výztuže,
- je nanesena další vrstva a poté z obou stran jsou přiloženy fólie,
- sendvič projde válci a pryskyřice je vtlačena do rohože,
- pás je protažen pecí, případně se nechá uležet, tím se zahájí reakce (hutnění materiálu),
- transport probíhá v rolích k uživateli,
- lisování polotovarů do tvaru kompozitního výrobku. [4]



Obr. 13 Schéma výrobní metody SMC [5]

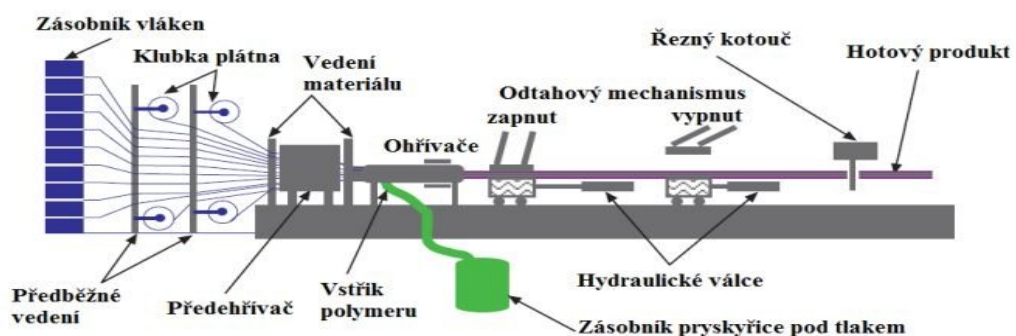
Výhody jsou vysoká produktivita (automobilový, letecký průmysl, atd.) a možnost vyrábět materiály o různých tloušťkách. Není potřeba kvalifikovaný personál. Mezi nevýhody lze zařadit vysoké ceny strojů, nástrojů a forem. Každá úprava výrobku zabere poměrně hodně času a peněz. Tato metoda je výhodná pro velké série od 20 000 kusů.[4]

1.4.7 Pultruze

Tento výrobní postup je založen na tažení svazků vláken pryskyřičnou lázní, kdy dochází k prosycení výztuže. V dalším kroku je výztuž tvarována do požadovaného průřezu. Kompozit je vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě. [4]

Kroky výrobního postupu:

- soustava svitků vláken je tažena s předepsaným napětím
- výztuž je tažena do pryskyřičné lázně
- vstup do prostoru, kde proběhne tvarování a vytvrzování
- za vytvrzovací hlavou je prostor, kde se odkládá a následně řeže profil [4]



Obr 14 Schéma pultruze [5]

Výhodou je rychlost, dobré mechanické vlastnosti, neomezené tvary průřezu profilu a minimální nároky na lidskou práci. Nevýhodou jsou značné investice na pořízení technologie a drahý provoz. [4]

1.5 Aplikace

Kompozitní materiály jsou velice perspektivní a stále více používané díky své variabilitě a tvarovatelnosti. Díky možným kombinacím a nízké hmotnosti je možné použití ve všech odvětvích od leteckého průmyslu přes stavebnictví až po sportovní vybavení. [6]

Výborné mechanické vlastnosti uhlíkových kompozitních materiálů jsou vyvážené cenou. I přes tento fakt si uhlíkové kompozitní materiály najdou zákazníky téměř ve všech průmyslových odvětvích, kde je zapotřebí vysoká pevnost, tuhost a nízká váha. Největší využití lze pozorovat u plachetnic, špičkových jízdních kol, motocyklů či automobilů. Moderní technologie se snaží snižovat váhu. Kompozitní materiály můžeme vidět i na obráběcích nástrojích, přenosných počítačích, strunných nástrojích či golfových holích. [6]

1.5.1 Automobilový průmysl

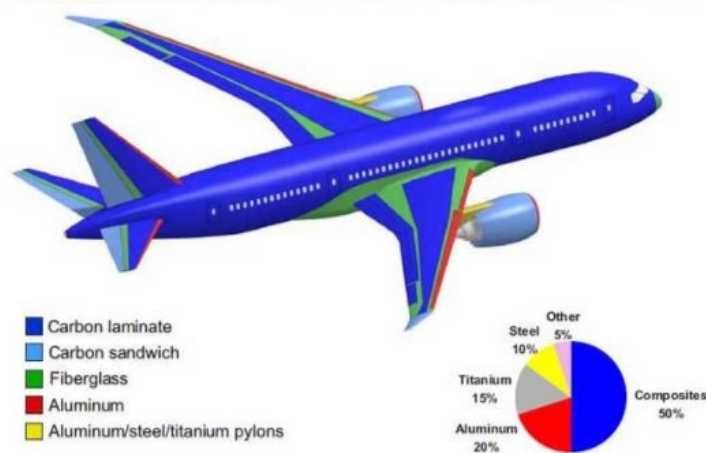
Uhlíkový kompozitní materiál je značně používán u moderních luxusních vozidel, kde jsou vysoké náklady vykompenzovány bezkonkurenčními vlastnostmi materiálu. Největší uplatnění je u závodních vozidel, kde je potřeba vysoká pevnost a nízká váha. Do nedávna materiál nebyl moc obvyklý pro sériovou výrobu z důvodu vysokých cen surovin. V poslední době několik tradičních výrobců začalo používat výrobky v každodenních silničních vozidlech. V roce 2013 se BMW stala první firmou, která přišla na trh s velkosériovou produkcí aut, v nichž jsou používány ve velké míře uhlíková vlákna. [6]



Obr. 15 Konstrukce vozu BMW i3 z uhlíkových vláken [7]

1.5.2 Letecký průmysl

V leteckém průmyslu se využívají uhlíkové kompozity také ve velké míře, protože jsou lehké a mají dobrý poměr maximálního napětí v tahu s vahou. Například letadlo Airbus A350 XWB je z 52 % postaveno z kompozitních materiálů (Obr. 16) [6]



Obr. 16 Skladba materiálu v Airbus A350 [8]

1.5.3 Sportovní potřeby

Nízká váha a vysoká pevnost jsou hlavními parametry popularity využití uhlíkových kompozitních materiálů u sportovních potřeb. Nejvíce lze vidět tyto materiály v cyklistice (Obr. 17), na golfových či hokejových holích nebo tenisových raketách.[6]



Obr. 17 Použití kompozitních materiálů
v cyklistice [9]

2 VÝSTUŽNÉ MATERIÁLY

Materiály ve formě vláken se jako konstrukční prvky používají jen velmi málo. Užitečné a zároveň zajímavé se stávají až v kompaktní formě, jako například v kompozitních materiálech. Kompozitní vlákna vyztužené materiály jsou složeny z vláken s vysokou měrnou pevností, příp. tuhostí a z rozmanitě přizpůsobivého úložného materiálu – matrice. [3]

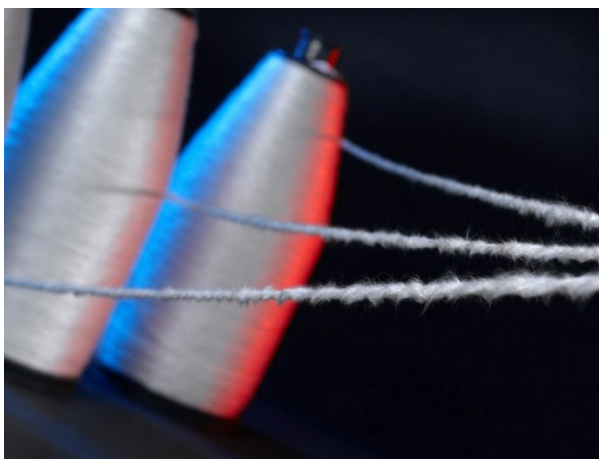
2.1 Druhy výztuží

- **Příze** – vyrábí se spřádáním z vláken (Obr. 18). Ty jsou zpracovávány dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky [3]



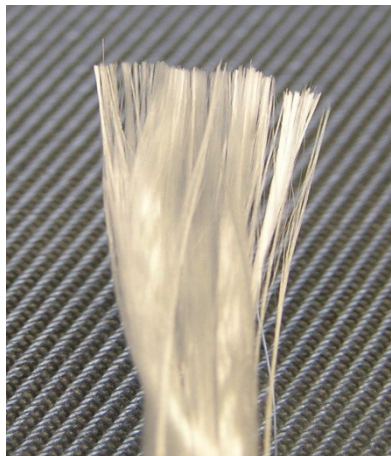
Obr. 18 Příze [10]

- **Nitě (skaná příze)** – vyrábějí se jedno- nebo víceřadově, skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny (Obr. 19). Zpracovávají se dále podobně jako příze. [3]



Obr. 19 Skaná příze [11]

- **Roving (pramenec)** – (Obr. 20) 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. [3]



Obr. 20 Roving [12]

- **Spředený roving** – (Obr. 21) vyrábí se z vláken stočených kolem podélné osy. [3]



Obr. 21 Spředený roving [13]

- **Rohože ze sekaných pramenců** – (Obr. 22) netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900 g·m⁻². Vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákná jsou uložena do vrstev, postříkána pojivem a po vysušení v pásové sušárně spojena tak, že je možné vzniklou rohož, která je podobná plsti, navíjet do rolí, které jsou tak připraveny pro okamžité použití. [3]



Obr. 22 *Rohož ze sekaných vláken* [14]

- **Rohože z kontinuálních vláken** – (Obr. 23) jsou složeny z nekonečných skleněných vláken. Ta jsou uložena nepravidelně bez jakékoliv orientace ve smyčkách v několika vrstvách a jsou vzájemně spojena pojivem. Jejich výhodou je lepší tvarovatelnost, než u rohoží ze sekaných pramenců. [3]



Obr. 23 *Rohož z kontinuálních vláken* [15]

- **Povrchové (závojové) rohože** – jedná se o netkané plošné výrobky s hmotností 20 až 50 g·m⁻² ze skleněných vláken nebo termoplastových vláken, které se pokládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice, aby se zabránilo vzniku trhlin. Zabraňují prorážení struktury hrubší výztuže na povrch a zesilují tenké vrstvy. Termoplastové povrchové rohože z polyetyltereftalátu (PET) nebo polyakrylonitrilu (PAN) se zvyšují odolnosti proti obrusu, jsou však při teplotě nad 40 °C citlivé na hydrolyzu a mají nízkou odolnost proti rozpouštědlům. Rohože z C- a ECR-skloviny dobře odolávají kyselým a alkalickým roztokům.

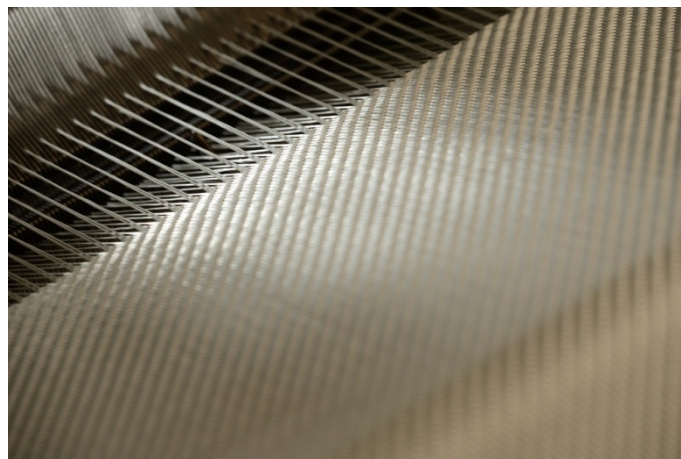
Stejnou nebo lepší odolnost vykazují dobře provedené tenké vrstvy (gelcoaty) o tloušťce 0,3 až 0,6 mm. [3]

- **Krátká vlákna** - (Obr. 24) mletá a na jednotlivá elementární části rozptýlená vlákna o různé délce (0,1 až 5 mm). Používají se pro vyztužení termoplastů. [3]



Obr. 24 *Krátká vlákna* [16]

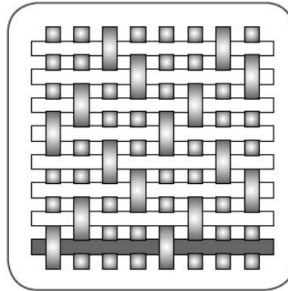
- **Tkaniny** – (Obr. 25) plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravouhle v útku a osnově, které působí vyztužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. [3]



Obr. 25 *Tkaniny* [17]

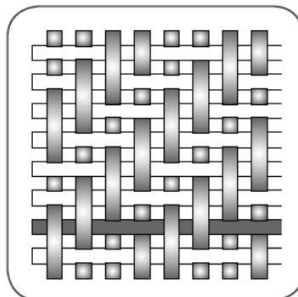
2.2 Druhy vazeb používaných u tkanin

- **Plátňová vazba** – (Obr. 26) jednoduchá základní vazba, jednoduché zpracování tkaniny vzhledem k dobré rozměrové stálosti a malému otřepu při řezání. [3]



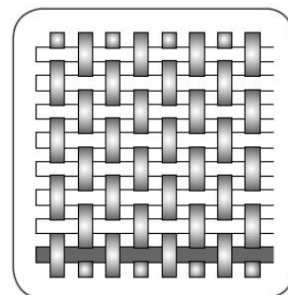
Obr. 26 Plátňová vazba [5]

- **Keprová vazba** – (Obr. 27) vyšší pevnost a tuhost laminátu způsobená menším zvlněním vláken. Tkaniny jsou ohebnější, a jsou vhodnější pro tvarované prvky než tkaniny s plátňovou vazbou. [3]



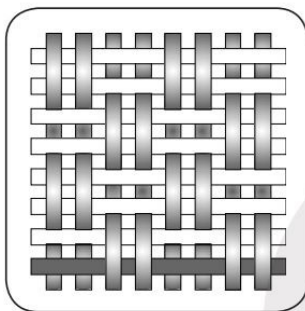
Obr. 27 Keprová vazba [5]

- **Atlasová (saténová) vazba** – (Obr. 28) 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. [3]



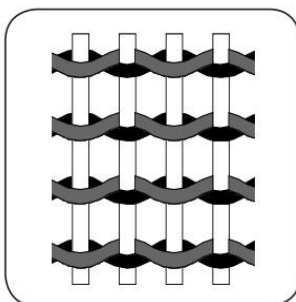
Obr. 28 Atlasová vazba [5]

- **Košíková vazba** – (Obr. 29) je v podstatě stejná jako vazba, s tím rozdílem, že košíková vazba je plošší, silnější ale méně stabilní. Vhodné pro těžká a tlustá vlákna.



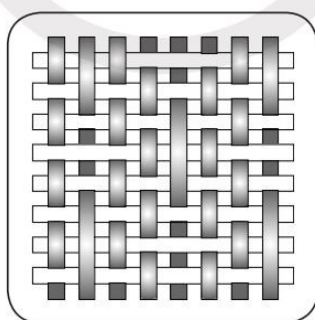
Obr. 29 Košíková vazba [5]

- **Perlinková vazba** – (Obr. 30) forma plátnové vazby, která zlepšuje stabilitu „otevřené“ tkaniny s nízkým počet vláken. Obvykle se používají ve spojení s jinou vazbou, protože by její otevřenost mohla způsobit neúčinnost vazby.



Obr. 30 Perlinková vazba [5]

- **Falešná perlinková vazba** – (Obr. 30) jedná se o další typ plátnové vazby, jejíž efekt je textile se zvýšenou tloušťkou, hrubším povrchem a vyšší pórovitostí.

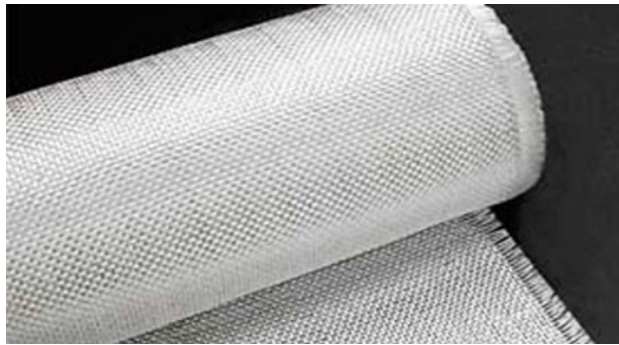


Obr. 31 Falešná perlinková vazba [5]

2.3 Rozdělení výztuží podle materiálu

2.3.1 Skleněná vlákna

Jako textilní skleněná vlákna (z angl. Glass Fiber - GF) jsou společně nazývána tenká vlákna ($\varnothing 3,5$ až $24 \mu\text{m}$) s pravidelným kruhovým průřezem, které jsou tažená z roztavené skloviny a používají se pro textilní účely (Obr. 32). Tyto vlákna jsou na základě své amorfní struktury izotropní. Tím se liší od uhlíkových a aramidových vláken. Skleněná vlákna se dodávají formou příze, sekané příze, pramence, rohože, sekaného pramence a krátkého vlákna. Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Ze zpracovatelských důvodů se většinou aplikují upravené produkty. [3]



Obr. 32 Skleněné vlákno – rovinová tkanina [14]

Skleněná vlákna se používají pro textilní zpracování, pro vyztužování termosetů, termoplastů a lehčených plastů, pro výrobu povrchových rohoží a papíru, příp. pro další aplikace. Jsou nehořlavá, tudíž ohnivzdorná. Hodí se proto pro kompozity a závěsy. [3]

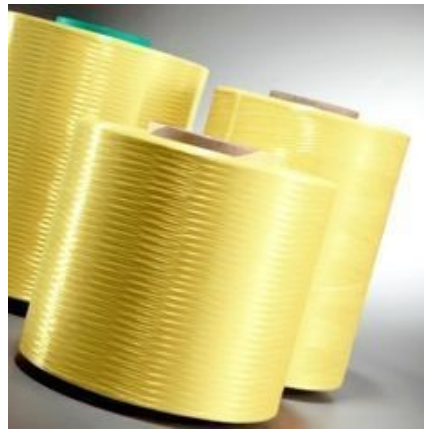
Hodnota modul pružnosti v tahu (E-modul) skleněných vláken je přibližně stejná jako u hliníku a zároveň třetinová oproti hodnotě oceli. Pevnost v tahu je naopak podstatně vyšší než u oceli (v kompaktní formě) i u většiny organických i anorganických vláken. Měrná pevnost skleněných vláken je díky nižší hustotě skla obzvláště vysoká. Vyznačují se při téměř elastické deformaci průtažností okolo 3%. To znamená, že skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna. [3]

Teplené vlastnosti skleněných vláken překonávají vlastnosti jiných materiálů. Ani dlouhodobé trvalé namáhání při 250°C nedegraduje hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovů.

Bod měknutí E-skloviny je vyšší než 625°C . Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. [3]

2.3.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna (Obr. 33). Předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků. Pravidelné uspořádání fenylenových 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.[3]



Obr. 33 Aramidové vlákno [14]

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.[3]

Aramidové vlákno 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 měře-

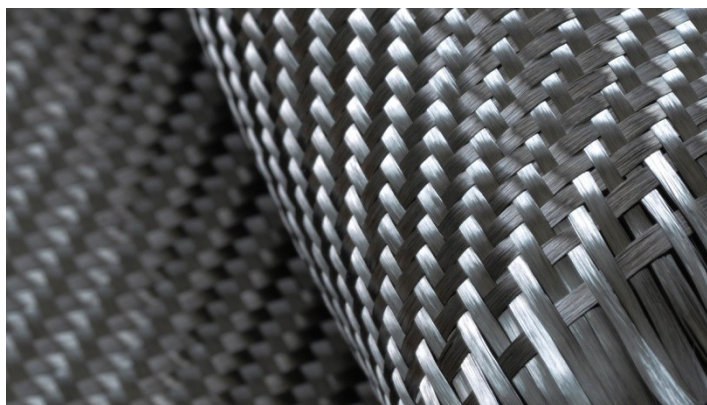
ných v příčném směru – např. hodnota E-modulu měřená kolmo k vláknu je daleko nižší než hodnota měřená ve směru vlákna, podobně je tomu i u pevnosti. [3]

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. [3]

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. Také u nich dochází při expozici zářením s vysokou energií (např. UV záření) k výraznému poklesu pevnosti. Jako každá organická vlákna 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. [3]

2.3.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností (Obr. 34). 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 grafítizací, 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. [3]



Obr. 34 Hybridní tkanina - Uhlíkové vlákno spolu se skelným [5]

Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn., že se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota E-modulu. Vysoká pevnost i hodnoty E-modulu až do teploty 500 °C o Nízká hustota o Mimořádně vysoká korozní odolnost (neodolávají pouze silně oxidačnímu prostředí). Dobrá elektrická a tepelná vodivost o Snášenlivost 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 o Při delším skladování dochází k vytvrzení apretační povrchové vrstvy a vlákna ztrácejí ohebnost. Dobrý průchod pro záření, neodráží radarový paprsek. [3]

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 teplotné roztažnosti, která dosahuje ve směru rovnoběžném s vrstvami uhlíku, tj. u vláken ve směru osy vlákna, dokonce mírně záporných hodnot. [3]

2.3.4 Přírodní vlákna

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi hlavní zástupce patří len, konopí (Obr. 35), 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. [3]



Obr. 35 *Konopné vlákno* [14]

Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou lehké konstrukce.

Jako přednosti je nutno uvést:

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

Problémy působí:

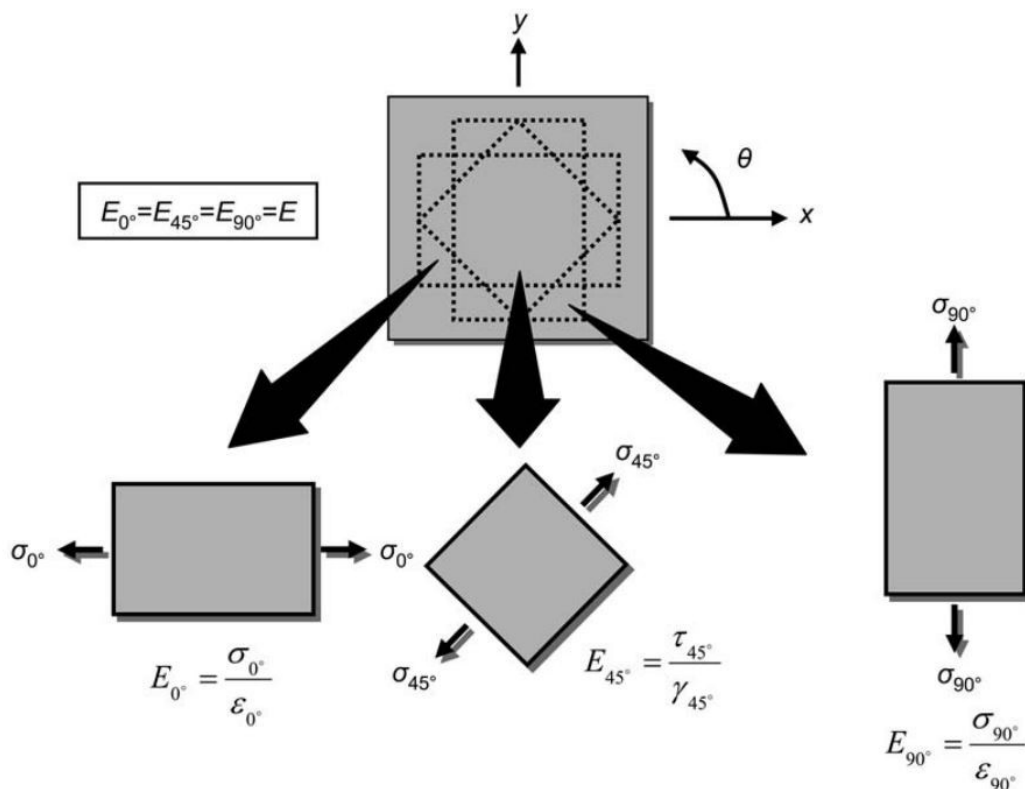
- Závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu
- Citlivost na působení vlhkosti
- Omezená možnost volby matrice vzhledem k nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování (odolnost do 200°C)
- Nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s matricí
- Omezená délka vláken
- Možnost změn vyvolaných biologickým napadením [3]

3 SKLADBY MATERIÁLŮ

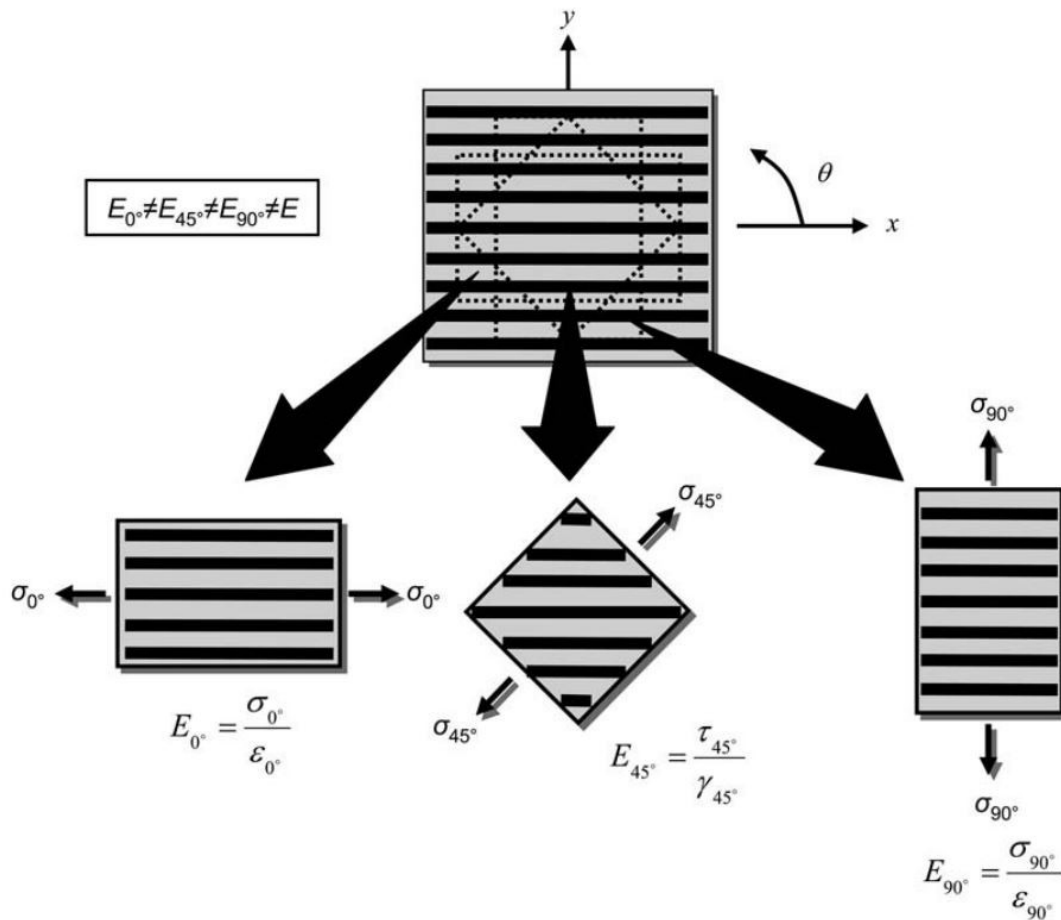
3.1 Izotropní, anizotropní a ortotropní materiály

Materiály se dělí na izotropní nebo anizotropní. Izotropní materiál má stejné materiálové vlastnosti ve všech směrech a normální zatížení vytváří pouze normální napětí. Naopak anizotropní má materiálové vlastnosti ve všech směrech a bodech odlišné. Nemá žádné materiálové roviny symetrie a normální zatížení produkuje jak normální, tak smykové napětí. Materiál se považuje za izotropní v případě, že jeho vlastnosti jsou nezávislé na směru uvnitř materiálu. [18]

Například element izotropního materiálu (Obr. 36) je zatěžován ve směrech pod úhly 0° , 45° a 90° . Jak je vidět, modul pružnosti E je stejný ve všech směrech. Když by byl materiál anizotropní (Obr. 37), měl by modul pružnosti lišící se podle směru v materiálu. To neplatí pouze u modulu pružnosti, ale mění se i další materiálové vlastnosti jako jsou Poissonova konstanta, koeficient tepelné roztažnosti nebo třeba maximální napětí.[18]

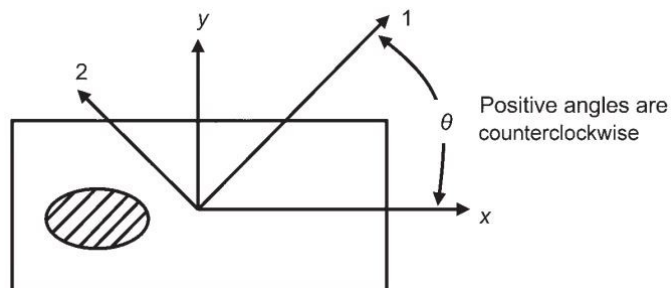


Obr. 36 Zatížený element izotropního materiálu[18]



Obr. 37 Zatížený element anizotropního materiálu [18]

Uvažujme jednosměrně vyztužený vláknový kompozit, známý jako laminát (Obr. 38). Zde je použitý souřadnicový systém označený osami 1-2-3. V tomto případě je osa 1 definována jako rovnoběžná s vlákny (0°), osa 2 tak, aby ležela v rovině desky a byla kolmá na vlákna (90°). Osa 3 je normální k rovině desky. Souřadnicový systém 1-2-3 je označen jako hlavní souřadnicový systém.[18]



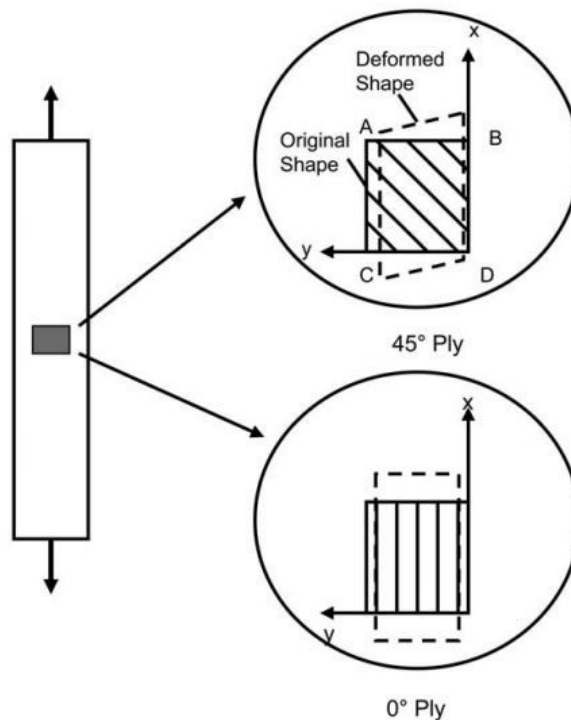
Ply coordinate system:
 1-axis is parallel to the fiber direction.
 2-axis is perpendicular to the fiber direction.
 3-axis is normal to the plane of the ply.

Obr. 38 Definice úhlů v desce [18]

Pokud je deska zatížena paralelně k vláknům (0° až 1°) modul pružnosti E_{11} se blíží hodnotě vlákna. Když je deska zatížena kolmo na vlákna (2° až 90°) modul E_{22} je mnohem nižší a blíží se relativně hodnotě matrice. Pokud je $E_{11} \gg E_{22}$ a mění se směrem v materiálu, pak je tento materiál anizotropní. [18]

Kompozity jsou podtřídy anizotropních materiálů, které jsou klasifikovány jako ortotropní. Tyto materiály mají odlišné vlastnosti ve třech vzájemně kolmých směrech. Ortotropní materiály obsahují tři vzájemně kolmé osy symetrie a zatížení aplikované rovnoběžně s těmito osami produkuje pouze normálové napětí. Avšak zatížení aplikovaná jinak než paralelně zapříčiní vznik jak normálního tak smykového napětí. Proto jsou mechanické vlastnosti ortotropních materiálů funkcí orientace. [18]

Uvažujme jednosměrný vláknový kompozit (Obr. 39), kde jsou vlákna orientovaná pod úhlem 45° k ose x . Malý izolovaný čtvercový prvek, kde vlákna jsou rovnoběžná s úhlopříčkou AD prvku a naopak jsou kolmá na úhlopříčku BC prvku. To znamená, že prvek je tužší podél diagonály AD než BC . Když se tento prvek zatíží tahovým napětím, deformuje se do tvaru rovnoběžníku. To je způsobeno rozdílnou tuhostí na diagonálách. Úhlopříčka AD se prodlužuje méně než BC . Vzniká zde smykové napětí γ_{xy} jako důsledek spojení rovinných deformací ϵ_{xx} a ϵ_{yy} . [18]

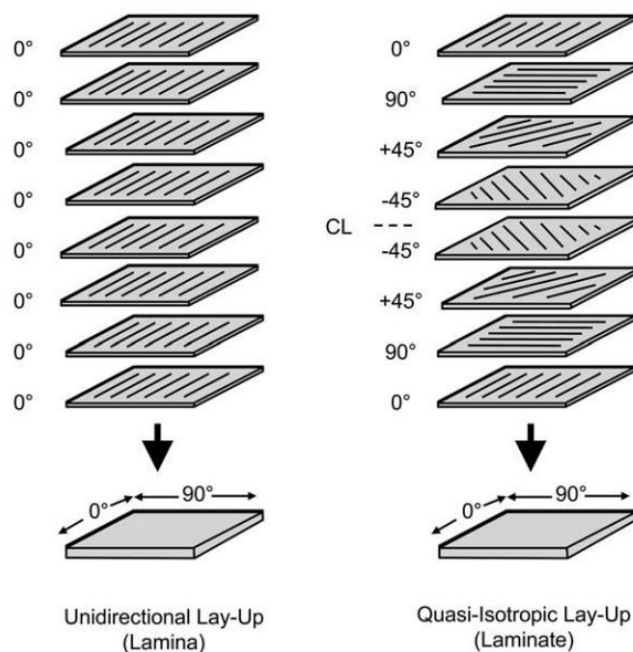


Obr. 39 Zatížení tahem ve směru 45° a 0° [18]

Pokud jsou vlákna rovnoběžně se směrem aplikovaného napětí (0°) ke spojení ϵ_{xx} a ϵ_{yy} nedojde. V tomto případě tah způsobuje prodloužení ve směru x a zúžení ve směru y . Deformovaný prvek zůstává obdélníkový. Proto dochází ke spojovacímu efektu, který vykazují kompozity, pouze v případě, že napětí a deformace jsou vztaženy k vedlejšímu souřadnicovému systému materiálu. V případě že jsou vlákna orientována rovnoběžně (0°) nebo kolmo (90°) ke směru aplikovaného napětí, je tato lamina nazývána jako speciálně ortotropní vrstva ($\theta = 0^\circ$ nebo 90°). Lamina, která není takto zarovnaná, se nazývá obecná ortotropní vrstva ($\theta \neq 0^\circ$ nebo 90°). [18]

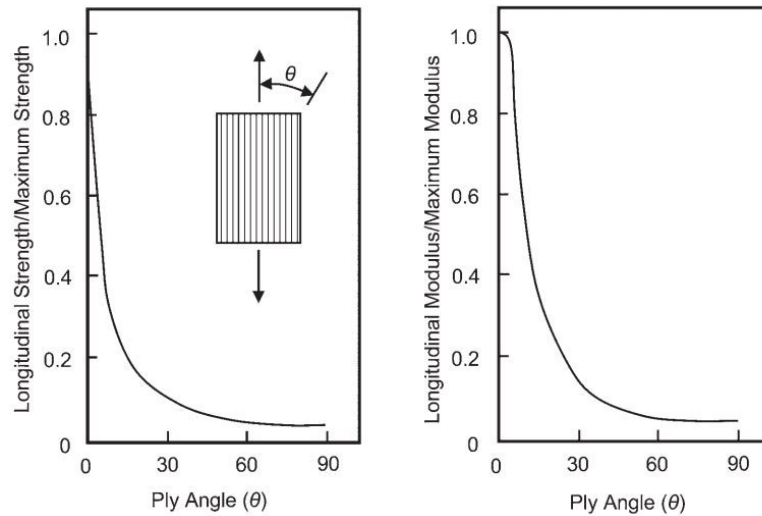
3.2 Vrstvení

Pokud je jedna vrstva nebo deska, v nichž jsou všechny vrstvy uloženy se stejnou orientací, nazývá se tato konfigurace lamina. Pokud se vrstvy skládají pod různými úhly, nazýváme toto seskupení laminát. Kompozity s nepřetržitým vláknem jsou obvykle laminované materiály (Obr. 40) ve kterých jednotlivé vrstvy, tloušťky nebo laminy zlepšují sílu v primárním směru zatížení. Jednosměrné lamina jsou extrémně silné a tuhé ve směru 0° . Jsou však velmi slabé ve směru 90° , jelikož musí být nesené mnohem slabší polymerní matricí. Zatím co vlákno s vysokou pevností může mít pevnost v tahu 3500MPa i více, typická polymerní matrice má normálně pevnost v tahu jen 35 až 70MPa (Obr. 1). [18]



Obr. 40 Lamina a laminát [18]

Na obrázku (Obr. 41) je vidět, jak dominantní úlohu má orientace vláken při určování pevnosti a tuhosti.



Obr. 41 Závislost maximálního napětí a modulu pružnosti na natčení vláken [18]

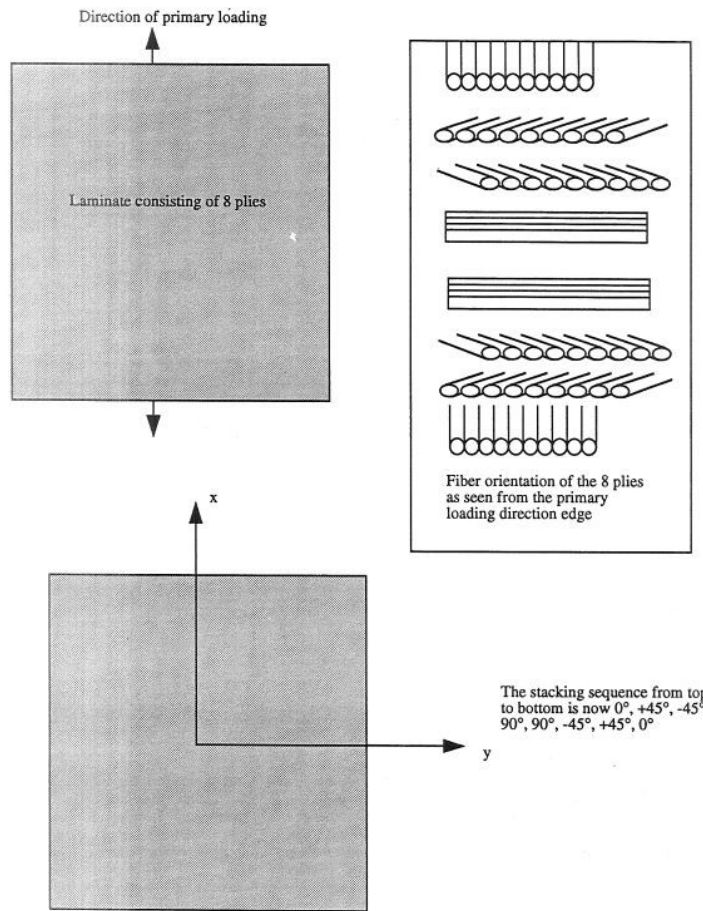
3.3 Názvosloví

Je hned několik možností, jak značit vrstvení laminátu. Jeden model je ovšem naučený, a je ho jednoduché interpretovat, i když uživatel není tolik obeznámen s tématem. [19]

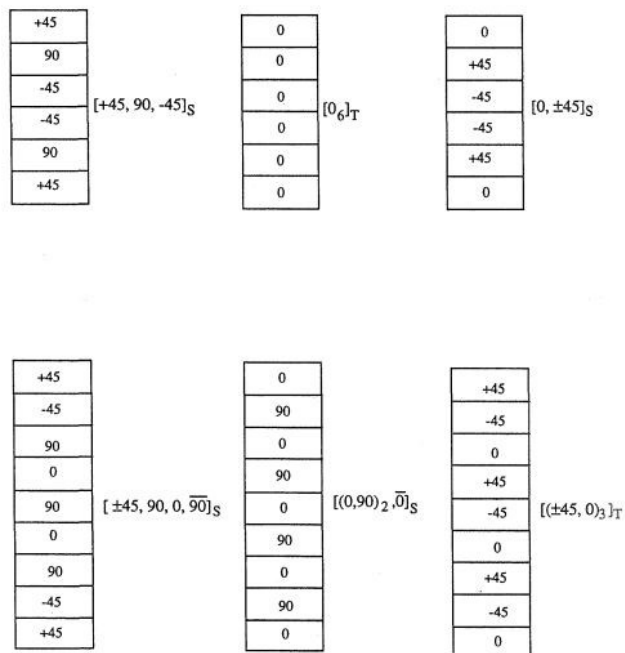
Musí být definován směr vlákna 0° a zároveň tedy i osa x . Pokud vrstva není rovnoběžná s osou x , musí být definována úhlem. Tento úhel se snadno určí od osy x , kdy otočením po směru hodinových ručiček znamená kladný úhel a naopak. Pokud všechny vrstvy mají daný úhel, použije se metoda stacking sequence. [19]

Pokud je laminát symetrický, začne se zapisovat od nejbvzdálenější vrstvy, dokud se nedosáhne střední roviny. Pak se řetězec hodnot úhlů dá do závorky se symbolem "S" (Symmetric). Pokud laminát symetrický není, postupuje se přes střední rovinu až po spodní vrstvu. Tento zápis má index "T" (Total). [19]

Na obrázku (Obr. 42) je názorně ukázána skladba $[0, +45, -45, 90, 90, -45, +45, 0]_T$, která je však symetrická, tudíž použijeme kratší zápis $[0, +45, -45, 90]_S$. [19]



Obr. 42 Souřadnicový systém pro klasický laminát [19]



Obr. 43 Vzorové příklady skladeb materiálu [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ZKUŠEBNÍ VZORKY

Zkušební vzorky byly vyrobeny s využitím zařízení, dostupných v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství a výzkumné centru Cebia-Tech Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

4.1 Použité materiály

4.1.1 Výztuž

Jako výztuž byla použita tkanina s hmotností 200g/m^2 . Jako okrajové vrstvy byly použity skelné plátno se stejnou hmotností a tkanina s keprovou vazbou. Dále byla použita také jednosměrná tkanina o shodné plošné hmotnosti.

4.1.2 Pryskyřice LH 385

Epoxidová pryskyřice LH 385 se vyznačuje nízkou viskozitou. Při vytvrzování aminy nebo polyamidy nabízí vysoce kvalitní aplikační vlastnosti jako vysoké mechanické vlastnosti, dobrou chemickou odolnost, výborné aplikační vlastnosti atd. Lze ji využít i jako epoxidový lak s vhodným tužidlem. Jedná se o pryskyřici nízké viskozity na bázi bisphenolu A. Viskozita $400\text{-}800\text{mPas}/25^\circ\text{C}$. Při normálních skladovacích teplotách nedochází ke zkrystalizování. Předností směsi pryskyřice a doporučeného tužidla je jeho čírost. [20]

4.1.3 Tužidlo

Tužidlo H 535 je kapalné směsné tužidlo s obsahem hydroxylovaného aminu pro nízkomolekulární epoxidové pryskyřice. Tužidlo H 535 se vyznačuje krátkou dobou zpracovatelnosti 25-30 min.[20]

4.1.4 Použité pomocné materiály

- Odtrhová tkanina

Je vyrobena ze syntetických vláken, která je kladena přímo na impregnované výztužné tkaniny. Slouží k oddělení všech dalších pomocných materiálů, které jsou položeny na ní, od vytvrzeného laminátu. Tyto pomocné materiály jsou na jedno použití.[20]

- Sací tkanina

Tato tkanina slouží k odsátí přebytečné matrice z výrobku.

- Vakuová fólie

Je to pružná plastová fólie, která se vyrábí především z PA, PE, PTFE a umožňuje vytvořit vakuum v horní části otevřené formy. Fólie je mechanicky, chemicky i tepelně odolná. Při výrobě taktéž slouží ke stlačení jednotlivých vrstev pomocí vakua. [20]

- Těsnící páska

Tato těsnící oboustranná páska vytvoří nepropustný spoj mezi vakuovou fólií a formou. Je lehce snímatelná z kovových i nekovových povrchů forem. [20]

- Hadice

Slouží k propojení přepadové nádoby a utěsněné formy, kterými se odsaje vzduch z formy a vytvoří se potřebné vakuum.

- Separáčn i vosk

Slouží k vytvoření téměř dokonalého povrchu formy a snadnému oddělení vzorku od formy.

- Vakuová vývěva

Tato vývěva nám zajistí vytvoření vakua v utěsněné formě.

- Přepadová nádoba (rezervoár)

Nádoba je připojena mezi oba hlavní členy soustavy, formu a vývěvu a slouží jako nádrž, kde se zachytí případná přebytečná pryskyřice, která by byla z formy odsáta za pomoci vakua.

4.2 Příprava zkušebních těles

Vzorky byly zhotoveny jednoduchou a zároveň účinnou metodou ručního laminování s využitím vakua pro stlačení pod fólií a lepší prosycení všech vrstev kompozitu. Jelikož bylo potřeba pouze jednoduché desky, jako forma posloužilo sklo tloušťky 5 mm. Forma byla vyčištěna a byl na ni nanesen separační vosk. Gel-coat nebyl vzhledem k použití vzorků vhodný. Na sklo byla jako první nanesena vrstva epoxidové pryskyřice LH 385, která se vyznačuje nízkou viskozitou, připravená v poměru 100:35 s tužidlem H535, jak doporučuje výrobce. Směs měla dobu zpracovatelnosti 25-30 minut. Teprve na tuto vrstvu bylo položeno okrajové plátno, které mělo orientaci vláken buď 0° nebo 45° dle vyráběného typu kompozitu. Dále následovaly vrstvy jednosměrné skelné tkaniny s plošnou hmotností 200g/m², jejichž počet se lišil podle potřeby vzorků (2, 4 nebo 6 vrstev). Jako poslední vrstva výsledného kompozitu byla použita opět vrstva okrajového plátna se stejnou orientací jako v první vrstvě. Každá tkanina nebo plátno byly pečlivě prosyceny směsí pryskyřice. Další, již technologickou, vrstvu tvořila odtrhová fólie a odsávací tkanina pro odstranění přebytečného množství pryskyřice. Takto připravený vzorek byl překryt vakuovou fólií, utěsněn těsnicí páskou a následně byla připojena vývěva, která pod vakuovou fólií vytvořila vakuum. To nám zajistilo dostatečné prosycení jednotlivých vrstev a eliminaci vad (např. vzduchové bubliny), které by ovlivnily výsledky měření.



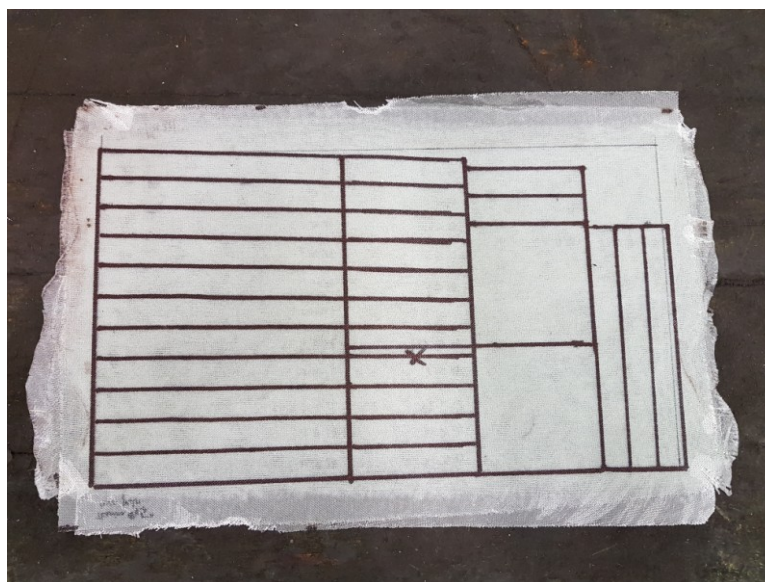
Obr. 44 Příprava vzorků ručním laminováním

Takto zavakuované kompozitní desky byly vytvrzovány 24 hodin a následně byly odformovány. Tímto postupem bylo vytvořeno celkem osm kompozitních desek s různými konfiguracemi, které jsou shrnuty v tabulce (Tab. 2).

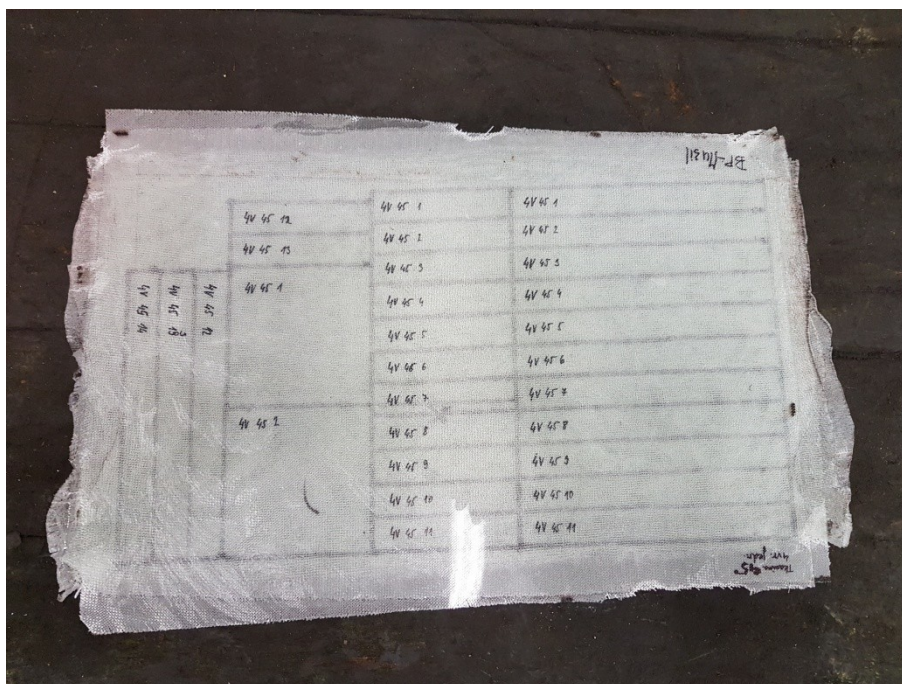
Tab. 2 Konfigurace vyrobených kompozitových desek

Číslo vzorku	Okraj	Jednosměrná tkanina	Okraj	Zkratka
1	plátno 0°	0°, 0°	plátno 0°	2V_0
2	plátno 45°	0°, 0°	plátno 45°	2V_45
3	plátno 0°	0°, 0°, 0°, 0°	plátno 0°	4V_0
4	plátno 45°	0°, 0°, 0°, 0°	plátno 45°	4V_45
5	plátno 0°	0°, 0°, 0°, 0°, 0°, 0°	plátno 0°	6V_0
6	plátno 45°	0°, 0°, 0°, 0°, 0°, 0°	plátno 45°	6V_45
7	kepr 0°	0°, 0°, 0°, 0°	kepr 0°	4K_0
8	kepr 45°	0°, 0°, 0°, 0°	kepr 45°	4K_45

Tyto desky byly orýsovány a rozřezány na menší vzorky k jednotlivým zkouškám (Obr. 45, Obr. 46, Obr. 47), jejichž rozměry jsme zvolili na základě normy ČSN ISO 527, ČSN EN ISO 14125 a ČSN EN 6603-2.



Obr. 45 Kompozitová deska připravená na řezání (rub)



Obr. 46 Kompozitová deska připravená na řezání (líc)



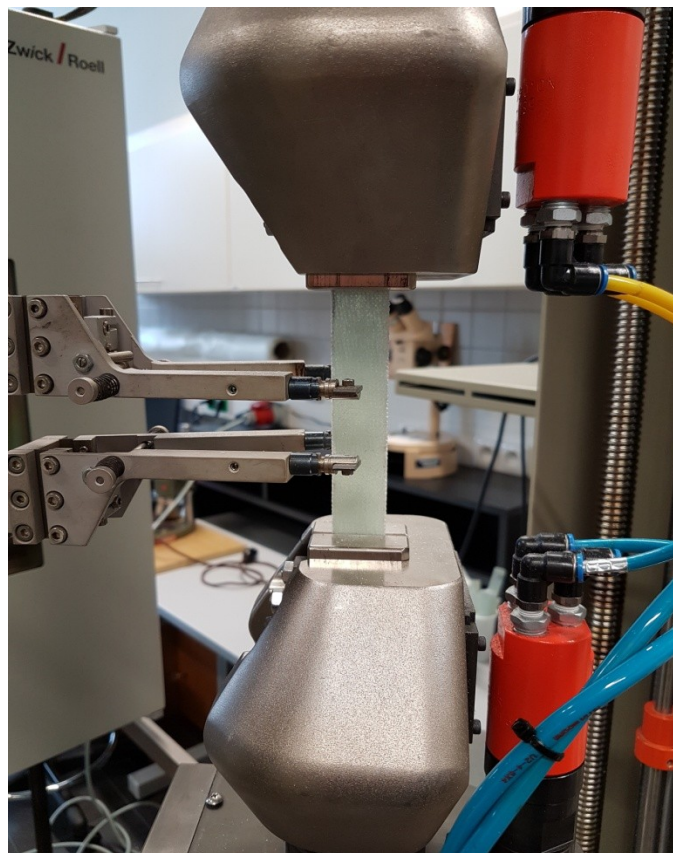
Obr. 47 Nařezané série vzorků

5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Připravená zkušební tělesa byla podrobena celkově třem typům mechanických zkoušek. Jednalo se o zkoušku tahem, ohybovou zkoušku a test na nízko-rychlostní průraz na padostroj. Všechny byly provedeny v laboratořích UTB na strojích ZWICK 1456 (tah, ohyb) a ZWICK HIT230F (průraz) a vyhodnoceny programem testXpert II.

5.1 Zkouška tahem

Pro tahovou zkoušku byly zvoleny rozměry vzorku dle platných norem, a to délka $l=200\text{mm}$ a šířka $b=20\text{mm}$. Tloušťka vzorku se v jednotlivých sériích lišila a byla funkcí počtu vrstev. V programu testXpert II je však možné nastavit různou tloušťku pro správný výsledek měření. Pro každou sérii vzorků je vyhodnocena tabulka (Tab. 3) obsahující naměřenou mez pevnosti v tahu σ_{\max} [MPa] a vypočtený (programem testXpert II) modul pružnosti v tahu E [MPa] pro každý jeden vzorek (Obr. 55, Obr. 56). Je zde i tabulka (Tab. 4), kde jsou zaznamenány chybové měření, při kterých došlo k zatížení kolmo k výztuži.



Obr. 48 Upnutý vzorek před zkouškou tahem

Tab. 3 Tahová zkouška – naměřená data

Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]
2V_0	42400	426	4V_0	38900	351	6V_0	55000	526	4K_0	41300	511
	42100	495		35400	359		45000	501		47000	544
	40400	514		32100	364		49600	574		49500	527
	38300	450		38800	370		52800	543		49100	534
	36800	477		26100	392		48300	541		55200	544
	33100	437		36800	399		47900	506		44200	504
	37700	439		36000	381		48900	535		39200	571
	36500	407		44200	413		45500	503		46200	584
	32100	392		33900	415		46700	566		46200	543
	38200	381		37600	438		50200	529		40600	539
	36700	388		40900	412		48900	523		41900	569
-	-	-	-	-	-	-	-	46300	560		
Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]
2V_45	23200	362	4V_45	30700	411	6V_45	32100	324	4K_45	42200	507
	27600	347		33600	411		33000	338		39600	477
	28200	354		36000	396		34300	338		40400	464
	22000	358		31000	393		31100	341		41200	438
	24600	345		34000	412		33900	311		40500	459
	24000	339		31900	412		33200	337		41400	464
	27200	355		33100	391		38700	341		37700	422
	30400	364		33600	365		40700	384		40700	439
	28600	321		32500	380		31800	358		36400	432
	26300	329		32900	352		32600	326		39400	449
	-	-		-	-		33000	382		39800	473
-	-	-	-	37700	319	34800	477				

Tab. 4 Tahová zkouška – naměřená data (zatížení 90°)

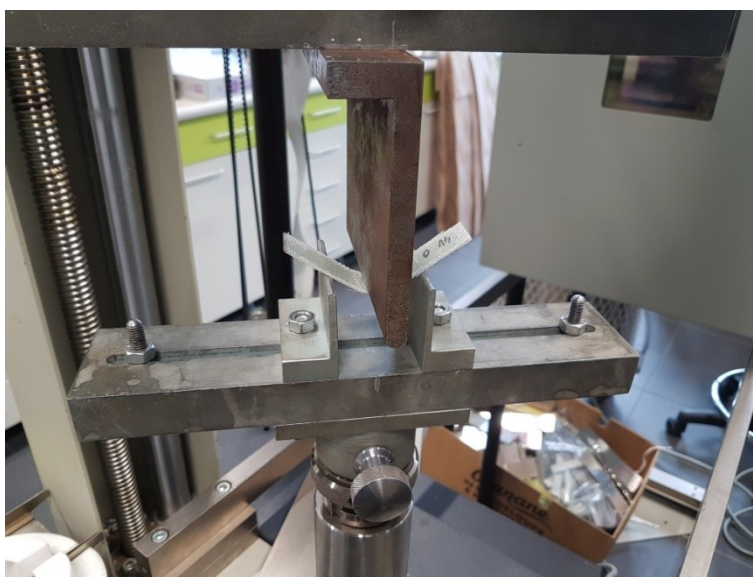
Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]
2V_0	13600	180	4V_0	9550	114	6V_0	9560	94,1	4K_0	8710	137
	9850	180		8800	114		-	-		8570	137
2V_45	5820	73,8	4V_45	24500	233	6V_45	-	-	4K_45	4800	65,1
	7950	76,5		6930	42,8		-	-		7060	64,2

5.2 Zkouška ohybem

Pro ohybovou zkoušku byly zvoleny rozměry vzorku dle platných norem, a to délka $l=100\text{mm}$ a šířka $b=20\text{mm}$. Tloušťka vzorku se v jednotlivých sériích lišila a byla funkcí počtu vrstev. V programu testXpert II je však možné nastavit různou tloušťku pro správný výsledek měření. Bylo zde také třeba nastavit vzdálenost podpor. Dle normy byla tato vzdálenost $a=40\text{mm}$. Pro každou sérii vzorků je vyhodnocena tabulka (Tab. 5) obsahující naměřenou mez pevnosti v ohybu σ_{\max} [MPa] a vypočtený (programem testXpert II) modul pružnosti v ohybu E [MPa] pro každý jeden vzorek (Obr. 59, Obr. 60).



Obr. 49 Nachystaný vzorek před zkouškou na ohyb



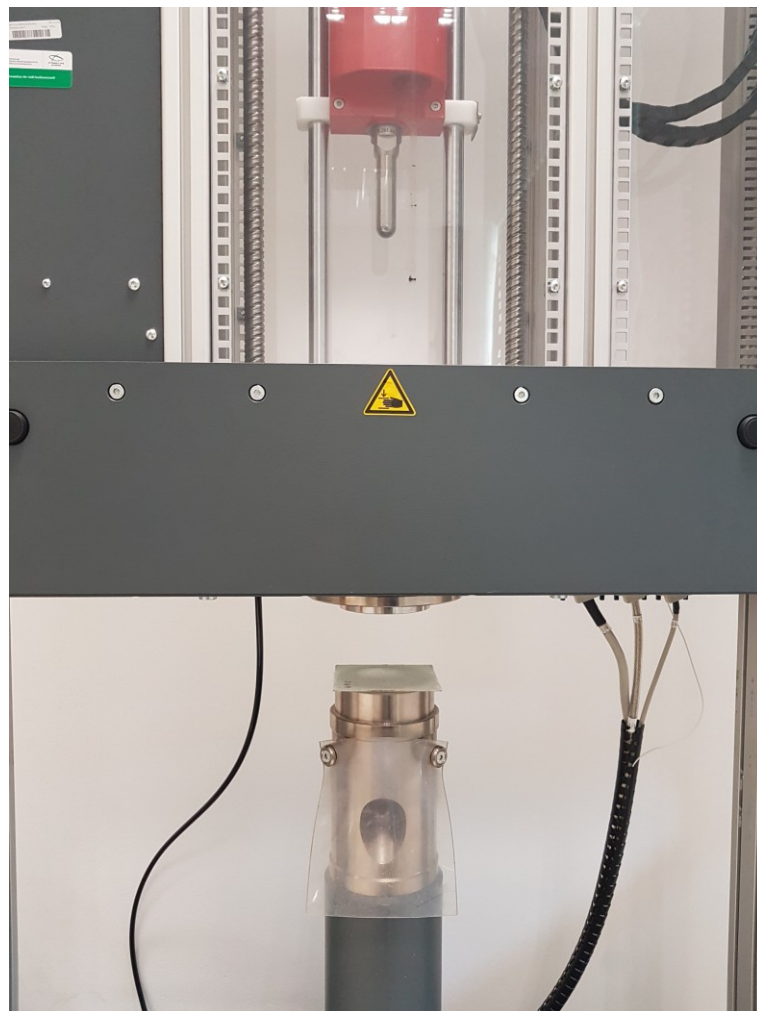
Obr. 50 Vzorek při zkoušce na ohyb

Tab. 5 Ohybová zkouška – naměřená data

Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]
2V_0	11000	194	4V_0	15200	237	6V_0	13000	413	4K_0	14400	325
	12600	227		10800	265		11900	388		13700	321
	13200	227		11800	287		12300	384		14500	331
	11700	204		10400	279		12200	391		13100	302
	12400	226		9910	258		11800	399		13300	306
	10700	201		9160	242		12400	404		14200	325
	11800	221		11300	284		12100	400		13400	297
	13500	232		11000	271		12500	450		12300	277
	-	-		-	-		11700	454		13800	308
	-	-		-	-		-	-		14900	344
-	-	-	-	-	-	13900	307				
Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]	Série	E [MPa]	σ_{\max} [MPa]
2V_45	8410	150	4V_45	9130	248	6V_45	9010	353	4K_45	10500	263
	8160	149		8600	237		8470	331		10600	270
	8500	153		8090	231		8190	327		11600	306
	8250	150		8940	256		8380	341		11500	295
	8150	146		8420	244		9590	358		12100	299
	8200	143		8410	250		9350	374		11800	284
	7910	146		8700	249		9180	347		11700	294
	8710	156		8350	231		9870	429		10600	281
	8680	156		-	-		9400	405		10600	268
	8970	156		-	-		8480	369		11000	267
8910	161	-	-	-	-	-	-				

5.3 Průrazová zkouška

Pro průrazovou zkoušku byly zvoleny rozměry vzorku dle platných norem, a to délka $l=100\text{mm}$ a šířka $b=100\text{mm}$. Tloušťka vzorku se v jednotlivých sériích lišila a byla funkcí počtu vrstev. Bylo zde nutné nastavit počáteční výšku padostroje, respektive jmenovitou energii, aby došlo k proražení vzorku. Vzhledem ke zkušenosti obsluhy padostroje byla doporučena počáteční výška $h=429\text{mm}$, resp. jmenovitá energie $E_p=100\text{J}$, při které byly všechny vzorky bez problémů proraženy. Pro každou sérii vzorků je vyhodnocena tabulka (Tab. 6) obsahující naměřenou maximální sílu F_{\max} [N] a vypočtenou (programem testXpert II) práci při maximální síle W_m [J] pro každý jeden vzorek.



Obr. 51 Nachystaný vzorek před zkouškou průrazem

Tab. 6 Zkouška průrazem – naměřená data

Série	F_{\max} [N]	W_m [J]	Série	F_{\max} [N]	W_m [J]	Série	F_{\max} [N]	W_m [J]	Série	F_{\max} [N]	W_m [J]
2V_0	2619,02	6,68	4V_0	4083,57	14,73	6V_0	5192,37	16,53	4K_0	3790,41	13,34
	2811,33	5,59		4075,98	15,25		4704,13	10		3533,3	12,2
	3033,91	6,52		3676,57	18,49		4625,22	11,55		3582,03	15,31
Série	F_{\max} [N]	W_m [J]	Série	F_{\max} [N]	W_m [J]	Série	F_{\max} [N]	W_m [J]	Série	F_{\max} [N]	W_m [J]
2V_45	2862,11	4,44	4V_45	3550,51	9,17	6V_45	4521,47	8,68	4K_45	3325,59	8,16
	2679,24	4,34		3681,12	6,38		4211,02	7,29		3471,97	8,82
	2812,3	4,58		3522,11	5,96		3307,68	7,47		3360,23	5,86



Obr. 52 Padostroj Zwick Roell HT230F

6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

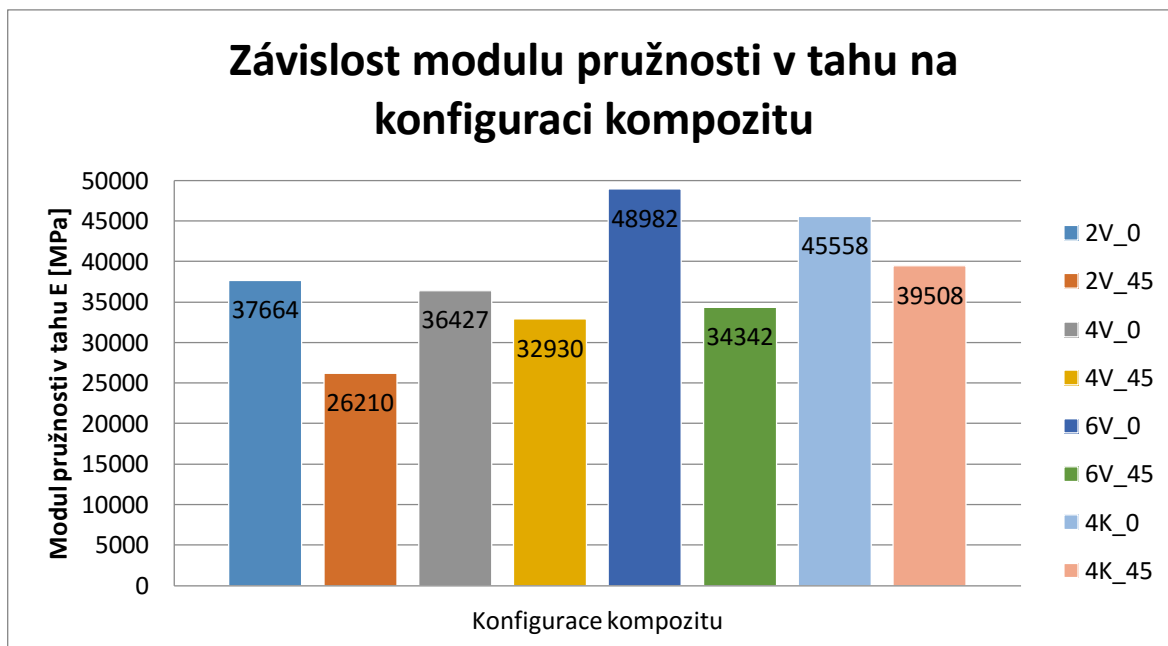
6.1 Zkouška tahem

V každé sérii byl spočítán z naměřených hodnot aritmetický průměr (\bar{x}), směrodatná odchylka (s) a variační koeficient (V_x) pro modul pružnosti v tahu E a mez pevnosti v tahu σ_{\max} (Tab. 7). Z těchto hodnot pak byly sestrojeny grafy (Obr. 53, Obr. 54) závislosti mechanických vlastností materiálu na skladbě a orientaci výztuže.

Tab. 7 Statistické vyhodnocení tahové zkoušky

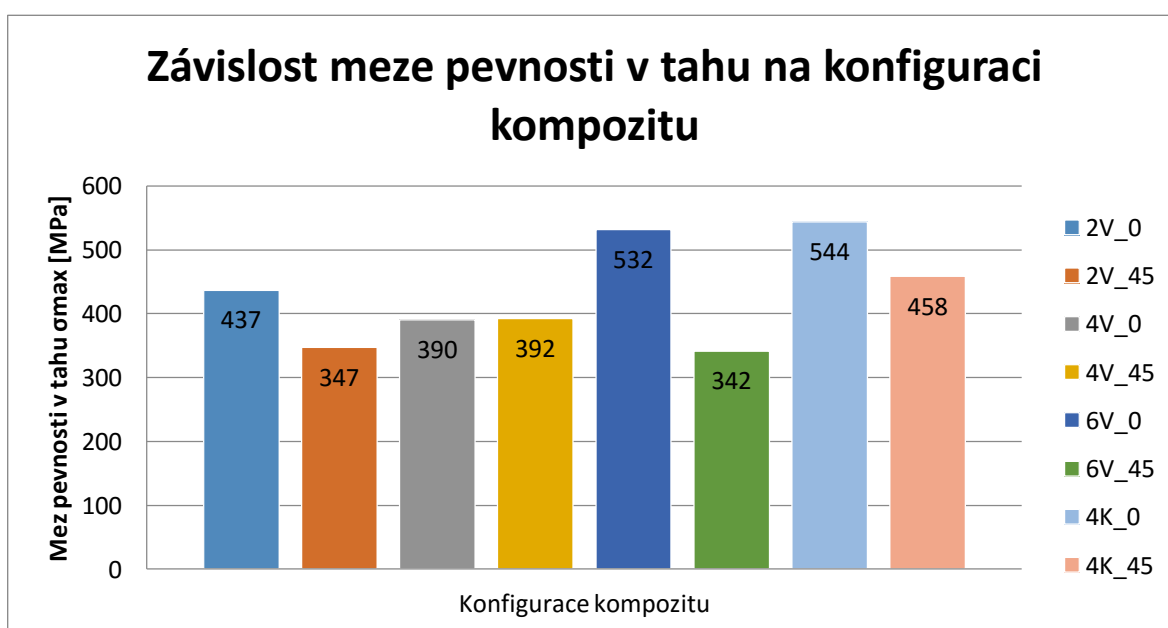
Série	Char. vlastnosti	\bar{x}	s	V_x
2V_0	E [MPa]	37664	3091	8,2
	σ_{\max} [MPa]	437	42	9,7
2V_45	E [MPa]	26210	2538	9,7
	σ_{\max} [MPa]	347	13	3,9
4V_0	E [MPa]	36427	4540	12,5
	σ_{\max} [MPa]	390	26	6,8
4V_45	E [MPa]	32930	1464	4,4
	σ_{\max} [MPa]	392	20	5,1
6V_0	E [MPa]	48982	2820	5,8
	σ_{\max} [MPa]	532	23	4,3
6V_45	E [MPa]	34342	2899	8,4
	σ_{\max} [MPa]	342	22	6,4
4K_0	E [MPa]	45558	4310	9,5
	σ_{\max} [MPa]	544	23	4,2
4K_45	E [MPa]	39508	2083	5,3
	σ_{\max} [MPa]	458	23	5,0

Z výsledků v grafu na obrázku níže (Obr. 53) je patrné, že nejvyšší modul pružnosti v tahu byl naměřen pro 6V_0, která měla v okrajových vrstvách tkaniny uložené pod úhlem 0° . Při pootočení tkaniny o 45° došlo k poklesu modulu o cca 30%. Jistý pokles byl zaznamenán i pro všechny ostatní skladby při srovnání 0° a 45° uložené tkaniny v okrajové lamině.



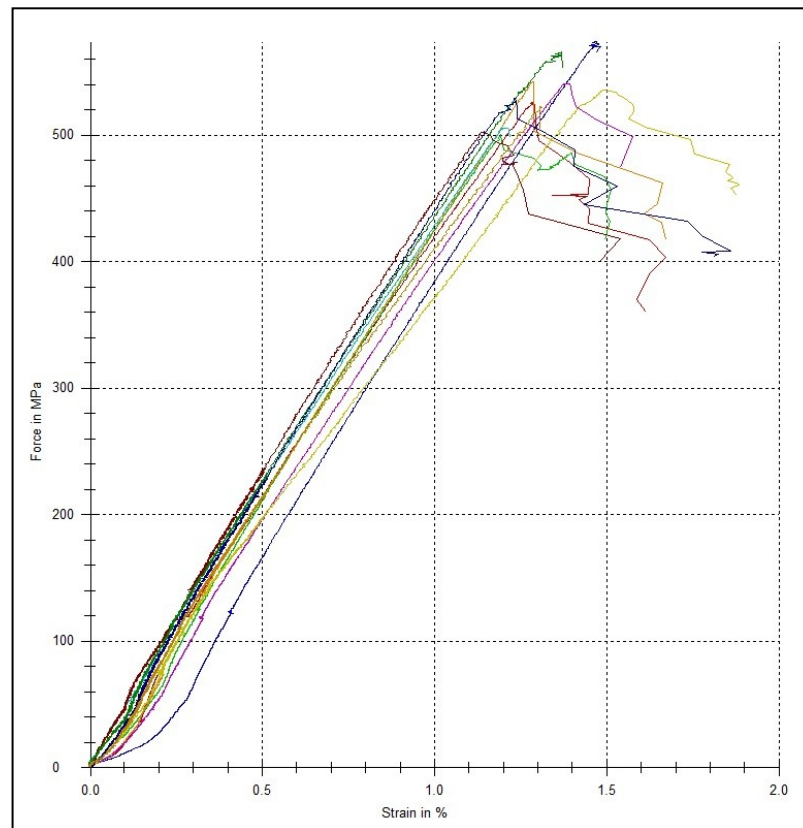
Obr. 53 Graf závislost modulu pružnosti v tahu na konfiguraci kompozitu

Z výsledků v grafu na obrázku (Obr. 54) je patrné, že nejvyšší mez pevnosti v tahu byla naměřena pro 4k_0, která měla v okrajových vrstvách tkaniny s vazbou kepr (Obr. 27) uložené pod úhlem 0° . Tyto hodnoty byly téměř shodné s hodnotami naměřenými pro sérii 6V_0. Při pootočení tkaniny o 45° došlo k poklesu modulu o cca 30%. Jistý pokles byl zaznamenán i pro všechny ostatní skladby při srovnání 0° a 45° uložené tkaniny v okrajové lamině. Výjimkou byla konfigurace 4V_0 a 4V_45, kde byla mez pevnosti téměř shodná. Tyto odchylky lze vysvětlit nějakou vadou v materiálu při výrobě vzorků.

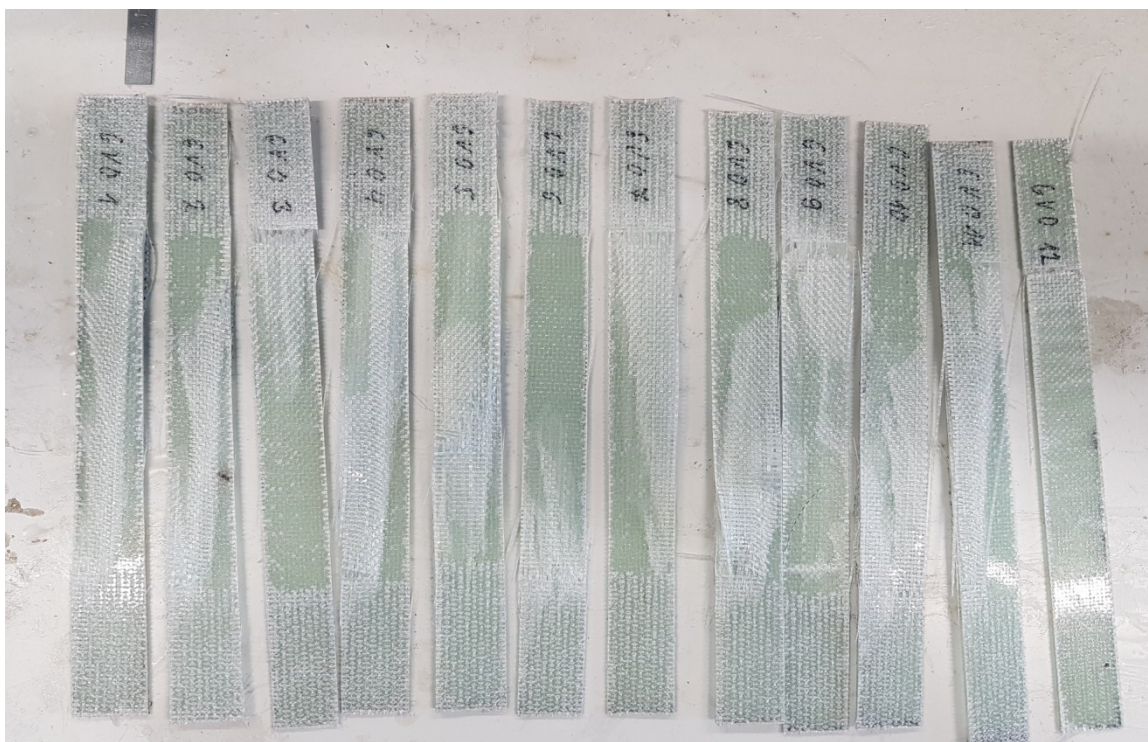


Obr. 54 Graf závislost meze pevnosti v tahu na konfiguraci kompozitu

Na obrázcích níže je vyobrazen vzorový průběh tahové zkoušky (Obr. 55) a vzhled zkušebních těles po zkoušce (Obr. 56).



Obr. 55 Záznam měření série 6V_0 v tahu



Obr. 56 Testované vzorky ze série 6V_0 na tah

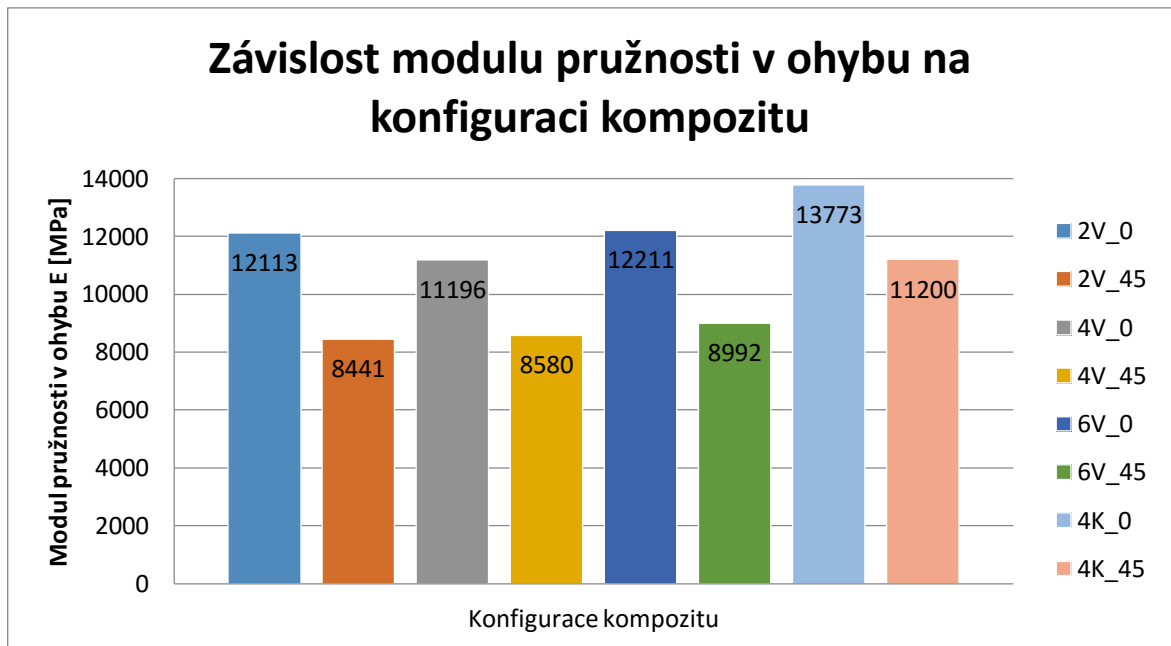
6.2 Zkouška ohybem

V každé sérii byl spočítán z naměřených hodnot aritmetický průměr (\bar{x}), směrodatná odchylka (s) a variační koeficient (V_x) pro modul pružnosti v ohybu E a mez pevnosti v ohybu σ_{\max} (Tab. 8). Z těchto hodnot pak byly sestrojeny grafy (Obr. 57, Obr. 58) závislosti mechanických vlastností materiálu na skladbě a orientaci výztuže.

Tab. 8 *Statistické vyhodnocení ohybové zkoušky*

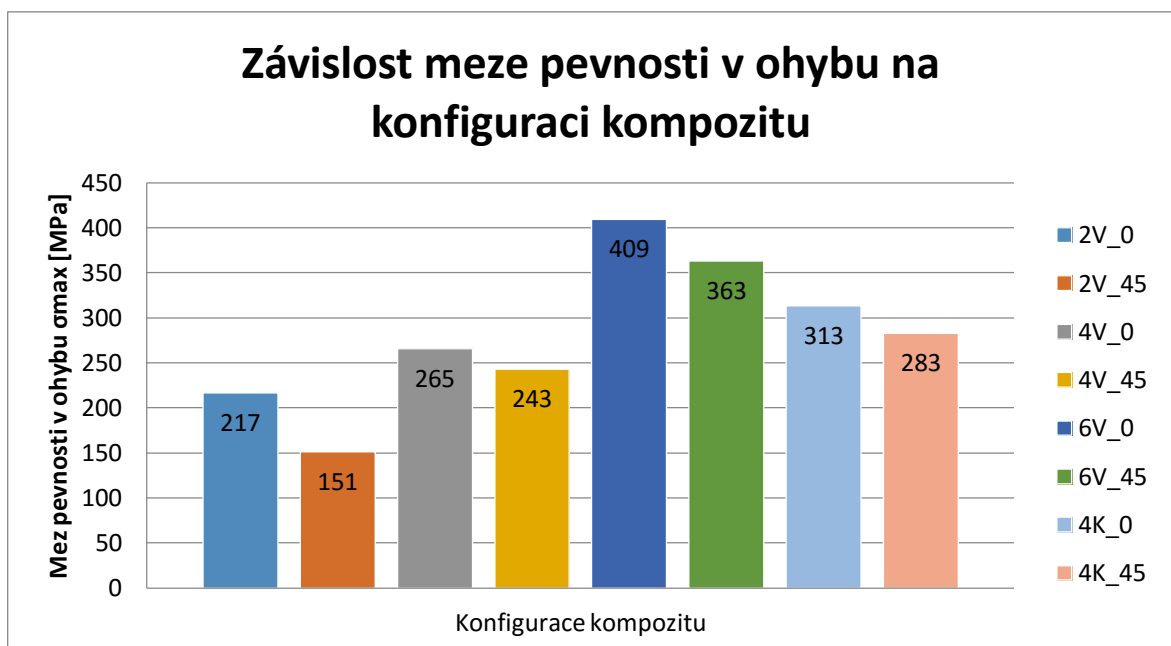
Série	Char. vlastnosti	\bar{x}	s	V_x
2V_0	E [MPa]	12113	931	7,7
	σ_{\max} [MPa]	217	14	6,3
2V_45	E [MPa]	8441	327	3,9
	σ_{\max} [MPa]	151	5	3,4
4V_0	E [MPa]	11196	1697	15,2
	σ_{\max} [MPa]	265	17	6,6
4V_45	E [MPa]	8580	315	3,7
	σ_{\max} [MPa]	243	9	3,6
6V_0	E [MPa]	12211	378	3,1
	σ_{\max} [MPa]	409	24	5,9
6V_45	E [MPa]	8992	549	6,1
	σ_{\max} [MPa]	363	31	8,5
4K_0	E [MPa]	13773	699	5,1
	σ_{\max} [MPa]	313	18	5,6
4K_45	E [MPa]	11200	573	5,1
	σ_{\max} [MPa]	283	15	5,1

Z výsledků v grafu na obrázku níže (Obr. 57) je patrné, že nejvyšší modul pružnosti v ohybu byl naměřen pro 4K_0, která měla v okrajových vrstvách tkaniny s vazbou kepr (Obr. 27) uložené pod úhlem 0° . Při pootočení tkaniny o 45° došlo k poklesu modulu o cca 20%. Jistý pokles byl zaznamenán i pro všechny ostatní skladby při srovnání 0° a 45° uložené tkaniny v okrajové lamině.



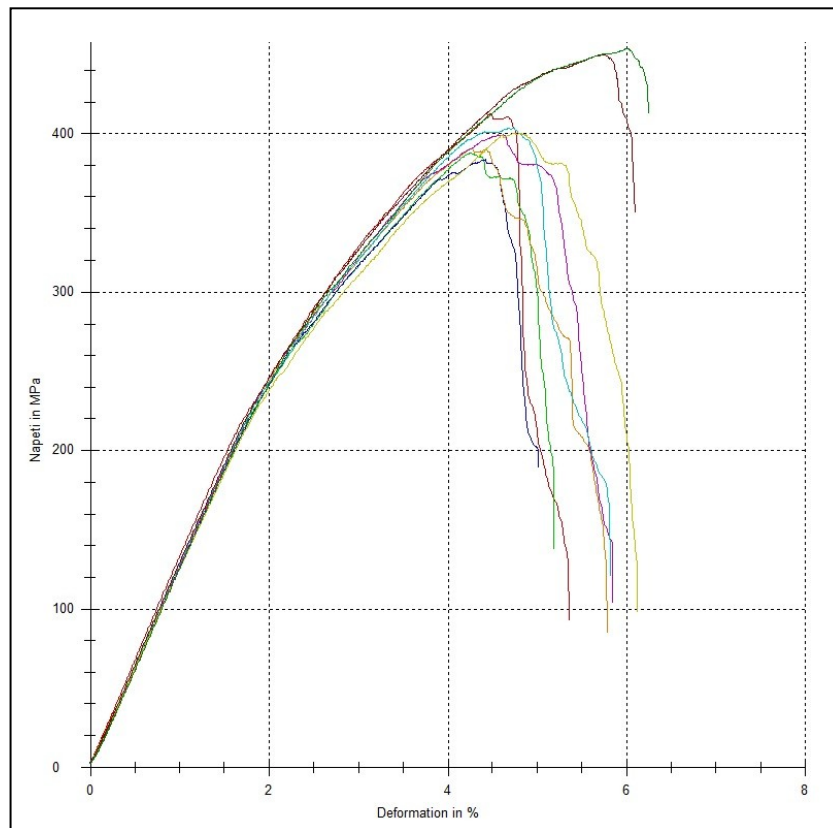
Obr. 57 Graf závislost modulu pružnosti v ohybu na konfiguraci kompozitu

Z výsledků v grafu na obrázku níže (Obr. 58) je patrné, že nejvyšší mez pevnosti v ohybu byl naměřen pro sérii 6V_0, která měla v okrajových vrstvách tkaniny uložené pod úhlem 0°. Při pootočení tkaniny o 45° došlo k poklesu modulu o cca 10%. Jistý pokles byl zaznamenán i pro všechny ostatní skladby při srovnání 0° a 45° uložené tkaniny v okrajové lamině.

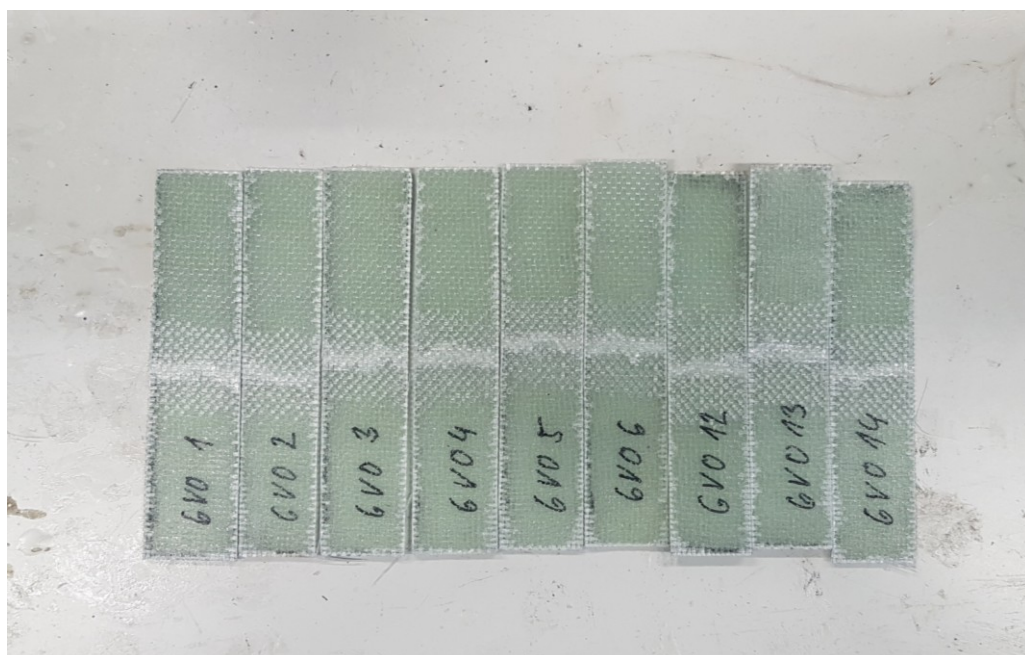


Obr. 58 Graf závislost meze pevnosti v ohybu na konfiguraci kompozitu

Na obrázcích níže je vyobrazen vzorový průběh ohybové zkoušky (Obr. 59) a vzhled zkušebních těles po zkoušce (Obr. 60).



Obr. 59 Záznam měření série 6V_0 v ohybu



Obr. 60 Testované vzorky ze série 6V_0 na ohyb

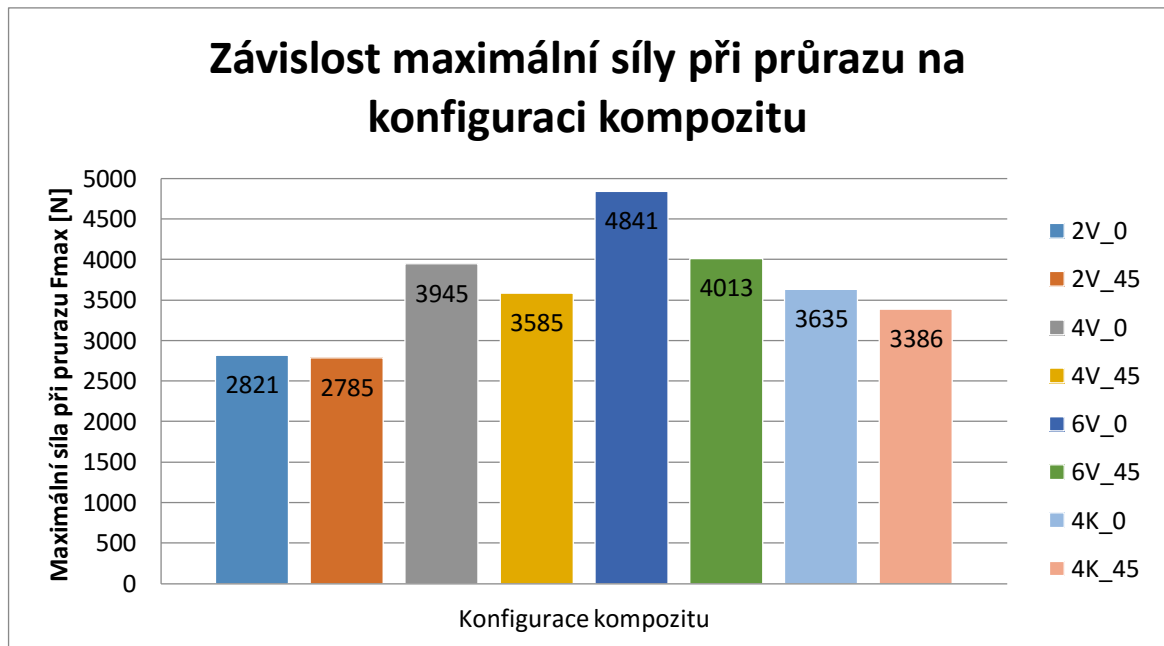
6.3 Průrazová zkouška

V každé sérii byl spočítán z naměřených hodnot aritmetický průměr (\bar{x}), směrodatná odchylka (s) a variační koeficient (V_x) pro maximální sílu F_{\max} a práci při maximální síle W_m (Tab. 9). Z těchto hodnot pak byly sestrojeny grafy (Obr. 61, Obr. 62) závislosti mechanických vlastností materiálu na skladbě a orientaci výztuže.

Tab. 9 *Statistické vyhodnocení zkoušky průrazu*

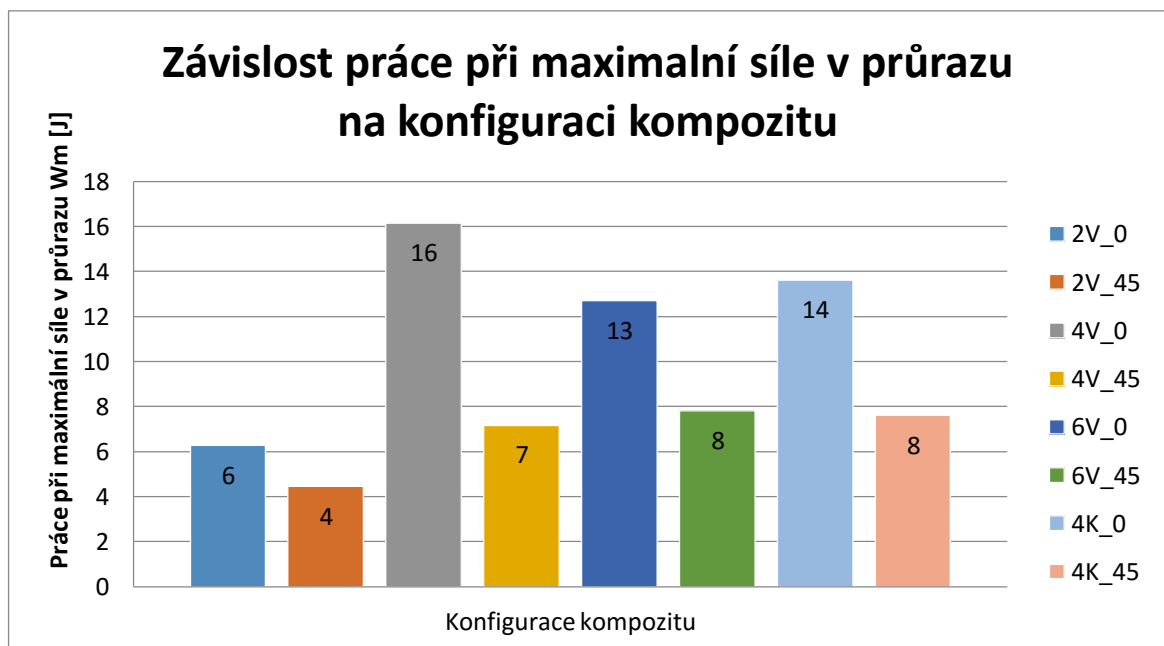
Série	Char. vlastnosti	\bar{x}	s	V_x
2V_0	F_{\max} [N]	2821	169,5	6,0
	W_m [J]	6	0,5	7,7
2V_45	F_{\max} [N]	2785	77,2	2,8
	W_m [J]	4	0,1	2,2
4V_0	F_{\max} [N]	3945	190,1	4,8
	W_m [J]	16	1,7	10,3
4V_45	F_{\max} [N]	3585	69,2	1,9
	W_m [J]	7	1,4	19,9
6V_0	F_{\max} [N]	4841	250,8	5,2
	W_m [J]	13	2,8	21,9
6V_45	F_{\max} [N]	4013	514,9	12,8
	W_m [J]	8	0,6	7,9
4K_0	F_{\max} [N]	3635	111,5	3,1
	W_m [J]	14	1,3	9,4
4K_45	F_{\max} [N]	3386	62,5	1,8
	W_m [J]	8	1,3	16,7

Z výsledků v grafu na obrázku níže (Obr. 61) je patrné, že nejvyšší maximální sílu při průrazu má série pro 6V_0, která měla v okrajových vrstvách tkaniny uložené pod úhlem 0°. Při pootočení tkaniny o 45° došlo k poklesu síly o cca 15%. Jistý pokles byl zaznamenán i pro všechny ostatní skladby při srovnání 0° a 45° uložené tkaniny v okrajové lamině.



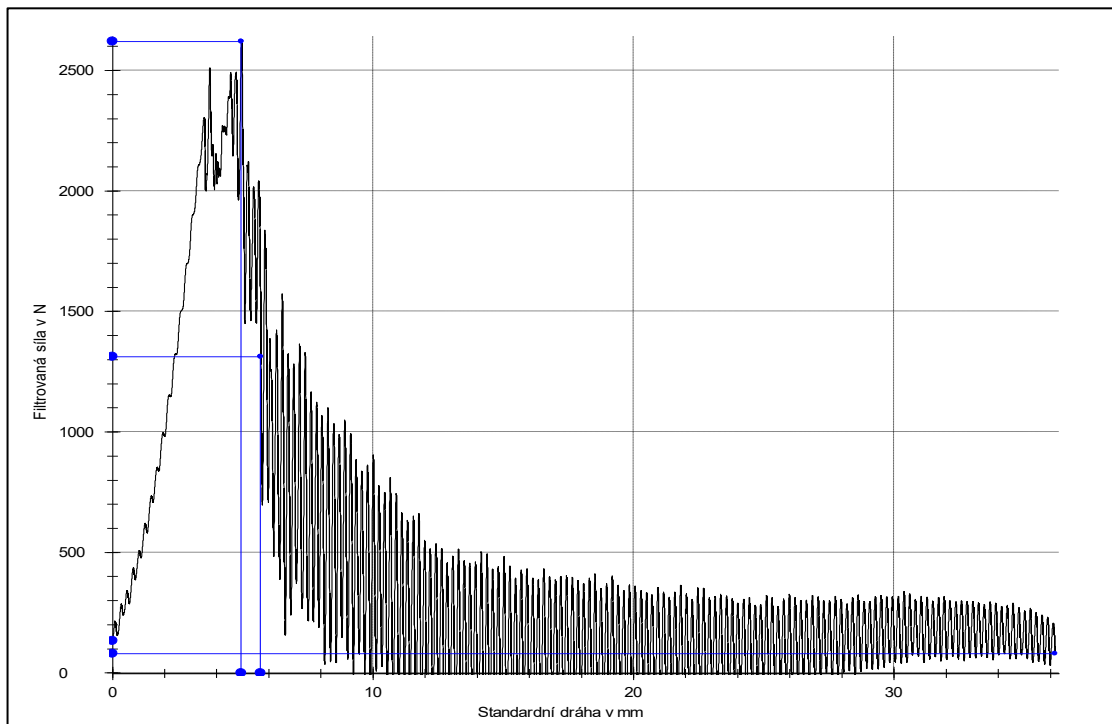
Obr. 61 Graf závislost maximální síly při průrazu na konfiguraci kompozitu

Z výsledků v grafu na obrázku níže (Obr. 62) je patrné, že nejvyšší práce při maximální síle v průrazu byla naměřena pro sérii 2V_0, která měla v okrajových vrstvách tkaniny uložené pod úhlem 0° . Při pootočení tkaniny o 45° došlo k poklesu modulu o cca 50%. Jistý pokles byl zaznamenán i pro všechny ostatní skladby při srovnání 0° a 45° uložené tkaniny v okrajové lamině.

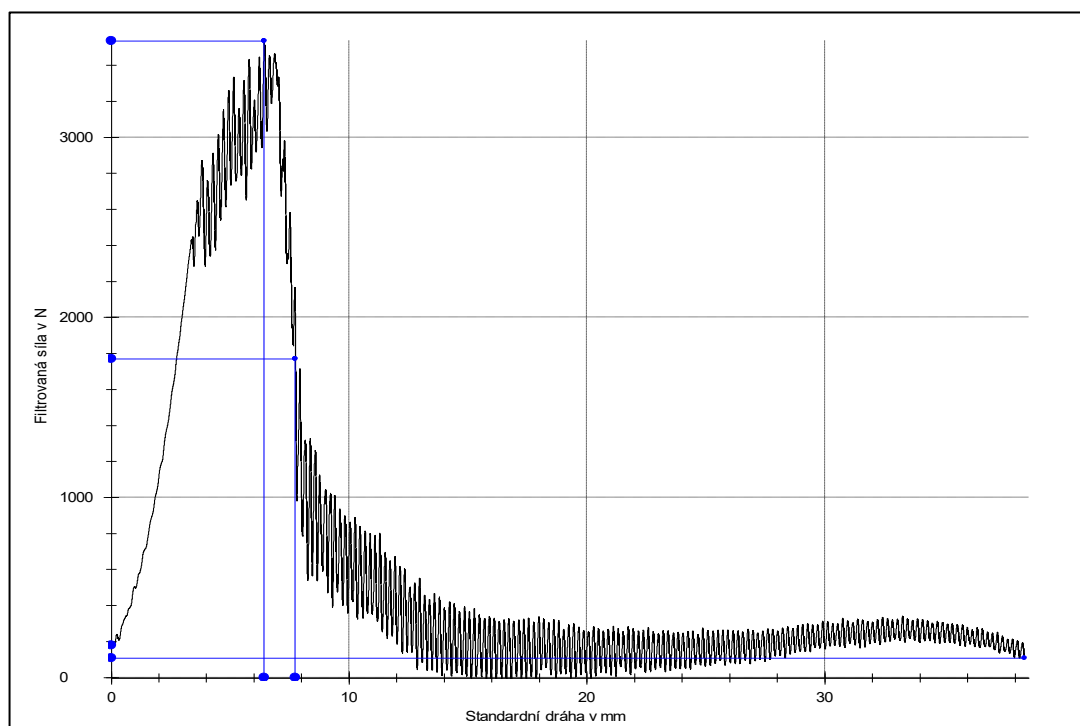


Obr. 62 Graf závislost práce při maximální síle v průrazu na konfiguraci kompozitu

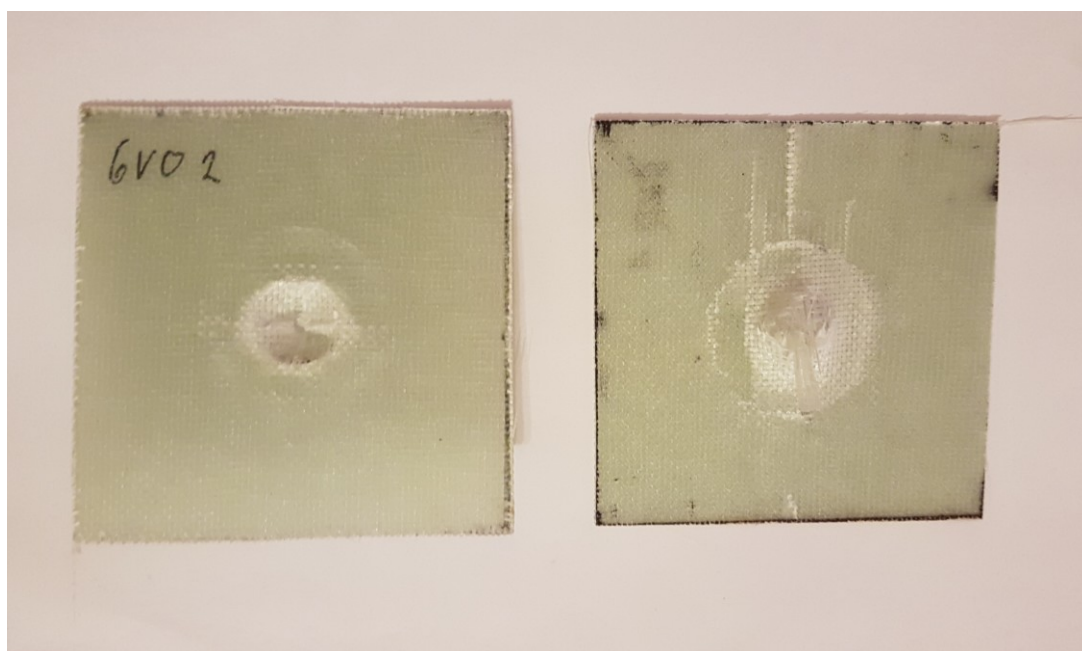
Na obrázcích níže jsou vyobrazeny vzorové průběhy ohybové zkoušky (Obr. 63, Obr. 64) a vzhled zkušebních těles po zkoušce (Obr. 65).



Obr. 63 Průběh zkoušky průrazu v sérii 2V_0



Obr. 64 Průběh zkoušky průrazu v sérii 4V_0



Obr. 65 Testovaný vzorek ze série 6V_0 na průřez

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na vliv orientace a skladby materiálu na výsledné mechanické vlastnosti kompozitního systému, který tvoří směs epoxidové pryskyřice s tužidlem a jednosměrná skelná vlákna. V teoretické části je popsáno, jak a proč se mění tuhost kompozitního systému v závislosti na směru zatížení. Což je jedna z nejdůležitějších vlastností pro použití v průmyslu a je ji třeba uvažovat při návrhových a kontrolních výpočtech. Je totiž potřeba navrhnout správnou skladbu a orientaci vláken dle daného zatížení při použití samotného kompozitu.

Při výrobě vzorků bylo použito volné místo na formách, které se nepodařilo jinak využít, k nařezání vzorků pro tah v kolmém směru na výztuhu. Tyto vzorky byly otestovány na tah a potvrdil se teoretický předpoklad. U těchto vzorků byla naměřena průměrně pevnost $\sigma_{\max} = 90$ MPa, což je zhruba 5x méně než systémů zatížených ve směru vláken výztuhy.

Pro poslední zkoušku, jsme z důvodů časové náročnosti výroby měli pouze 3 vzorky v každé sérii. Není to však bohužel dostatečné množství pro vytvoření kvalitního statistického souboru. Ovšem i přes malý počet vzorků tento test potvrdil teoretické předpoklady, a tudíž když je vezmeme v potaz, zjistíme, že nejpevnější materiál byl kompozit, obsahující šest vrstev jednosměrně kladené výztuže. To ovšem neznamená, že by tenčí materiály nebyly použitelné. Velikou výhodou kompozitních materiálů je právě jejich váha v poměru k pevnosti, kde se hledá to nejideálnější řešení.

V této práci bylo ověřeno, že při všech třech pevnostních zkouškách výrazně roste tuhost s přibývajícím počtem vrstev v kompozitu a pevnost zásadně ovlivňuje i orientace vláken vůči zatížení a jejich vazba. Kdy nejlepší vlastnosti má kompozitní systém, který má výhradně jednosměrnou orientaci (tedy tkaniny v krajních vrstvách nejsou natočeny o 45°) a tento kompozit je zatížen ve směru těchto vláken. V námi měřených sériích se tak jednalo o ty se zkratkami 2V_0, 4V_0, 6V_0 a 4K_0.

Možným pokračováním této práce by mohlo být detailnější prozkoumání této problematiky a pokus o nalezení ideální skladby materiálu pro konkrétní aplikaci a zatížení. Dále se předpokládá vytvoření shodných skladeb a tedy výsledných kompozitů pomocí technologie vakuové infuze a následné vzájemné srovnání výsledků. Velmi zajímavé se jeví také srovnání s kompozity vytvořenými z prepreg materiálů s přesně definovaným množstvím pryskyřice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN.** *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* 1. vydání. Praha : SNTL, 1987. str. 294. ISBN.
2. **KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH.** *Úvod do studia materiálů.* Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
3. **EHRENSTEIN, Gottfried W.** *Polymerní kompozitní materiály .* 1. vydání. Praha : Scientia, 2009. str. 351. ISBN 978-80-86960-29-6.
4. **JANČÁŘ, Josef.** *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů.* 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2003. str. 194. ISBN 80-214-2443-5.
5. **Gurit.com.** Guide to composites. [Online] 2017. [Citace: 10. 1 2017.] <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>.
6. **BOUCHAL, P.** *Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. str. 41. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc..
7. **Group, BMW.** [Online] [Citace: 8. 2 2017.] <https://www.press.bmwgroup.com/czech/article/detail/T0141661CS/bmw-i-karbonov%C3%A1-revoluce-1-3-recyklace-uhl%C3%ADkov%C3%BDch-kompozit%C5%AF-a-bmw-i?language=cs>.
8. **1001Crash.** [Online] [Citace: 10. 2 2017.] <http://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>.
9. **Rinard, Damon.** *How I Built a Composite Bike.* [Online] [Citace: 10. 2 2017.] <https://www.sheldonbrown.com/rinard/howibuil.htm>.
10. **Labara.** Skelné tkaniny, rohože a příze. [Online] 2017 Labara. [Citace: 27. 2 2017.] <http://www.labara.cz/cs/skelne-tkaniny-rohoze-a-prize/skelne-prize>.
11. **Bohemiatrix.** Skané příze. [Online] BOHEMIATEX, s.r.o. [Citace: 27. 2 17.] <http://www.bohemiatrix.eu/7-skane-prize>.
12. **PLASTIC, GLASS FIBER REINFORCED.** Composite materials. [Online] [Citace: 27. 2 2017.] http://www.speedace.info/composites/glass_fibre_reinforced_plastic.htm.

13. **Co., Jiujiang Huirong New Materials.** Fiberglass Roving. *Alibaba.com*. [Online] [Citace: 27. 2 2017.] https://jjhrt.en.alibaba.com/productgroupdetail-800217072/Fiberglass_Roving_Series.html.
14. **WALLMO CZ s.r.o.** Rohože ze sekaných vláken. [Online] [Citace: 27. 2 2017.] <http://www.wallmocz.cz/?page=nabidka>.
15. **DEVELOPMENTS, FIBRE GLAST.** Fiberglass Mat. [Online] [Citace: 27. 2 2017.] http://www.fibreglast.com/product/Continuous_Strand_Mat_251/Fiberglass_Mat.
16. **GUIDE, FIBERGLASS.** Fiberglass Work Product Guide. [Online] [Citace: 27. 2 2017.] <http://www.fiberglassguide.com/>.
17. **Textiles, UNIQUE.** Sklotkaniny. [Online] [Citace: 27. 2 2017.] <http://unique.cz/produkty/sklotkaniny/>.
18. **Campbell, F.C.** *Structural Composite Materials*. místo neznámé : ASM International, 2010. ISBN: 978-1-61503-037-8.
19. **Nettles, A.T.** *Basic Mechanics of Laminated Composite Plates*. Washington : National Aeronautics and Space Administration , 1994. B0006PBN78.
20. **Composites, Havel.** Havel Composites CZ s.r.o. [Online] [Citace: 17. 2 2019.] <http://www.havel-composites.com/>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

l	mm	délka
b	mm	šířka
σ_{\max}	MPa	mez pevnosti v tahu/ ohybu
E	MPa	modul pružnosti v tahu/ ohybu
a	mm	vzdálenost podpor
h	mm	počáteční výška hlavy padostroje
E_p	J	jmenovitá energie
F_{\max}	N	maximální síla
W_m	J	práce při maximální síle
s	-	směrodatná odchylka
\bar{x}	-	aritmetický průměr
V_x	%	variační koeficient
θ	°	úhel natočení
ε	MPa	deformace
γ	MPa	smykové napětí
σ	MPa	normální napětí
t	°C	teplota
ν	-	Poissonova konstanta
d	mm	průměr
Al_2O_3		oxid hlinitý
SiC		karbid křemíku
ZrO_2		oxid zirkoničitý
Si_3N_4		nitrid křemičitý
C		uhlík

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Tahový diagram [2]	12
Obr. 2 Rozdělení kompozitů podle matrice	13
Obr. 3 Rozdělení podle struktury	14
Obr. 4 Rozdělení podle výztuže	14
Obr. 5 Příklad uspořádání vláknové výztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) vícená výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou [1].....	15
Obr. 6 Synergické chování kompozitu [2].....	16
Obr. 7 Vliv průměru skelného vlákna na jeho pevnost [3]	18
Obr. 8 Schéma ručního kladení [5]	19
Obr. 9 Schéma vakuového prosycování [5]	20
Obr. 10 Schéma vytvrzování v autoklávu [5]	21
Obr. 11 Schéma výroby navíjením [5].....	22
Obr. 12 Schéma výrobní metody RTM [5]	23
Obr. 13 Schéma výrobní metody SMC [5]	24
Obr. 14 Schéma pultruze [5]	24
Obr. 15 Konstrukce vozu BMW i3 z uhlíkových vláken [7]	25
Obr. 16 Skladba materiálu v Airbus A350 [8]	26
Obr. 17 Použití kompozitních materiálů v cyklistice [9]	26
Obr. 18 Příže [10]	27
Obr. 19 Skaná příže [11].....	27
Obr. 20 Roving [12].....	28
Obr. 21 Spředený roving [13]	28
Obr. 22 Rohož ze sekaných vláken [14].....	29
Obr. 23 Rohož z kontinuálních vláken [15]	29
Obr. 24 Krátká vlákna [16].....	30
Obr. 25 Tkaniny [17]	30
Obr. 26 Plátňová vazba [5].....	31
Obr. 27 Keprová vazba [5]	31
Obr. 28 Atlasová vazba [5]	31
Obr. 29 Košíková vazba [5]	32
Obr. 30 Perlinková vazba [5].....	32

Obr. 31 <i>Falešná perlínková vazba</i> [5].....	32
Obr. 32 <i>Skleněné vlákno – rovinová tkanina</i> [14].....	33
Obr. 33 <i>Aramidové vlákno</i> [14].....	34
Obr. 34 <i>Hybridní tkanina - Uhlíkové vlákno spolu se skelným</i> [5].....	35
Obr. 35 <i>Konopné vlákno</i> [14].....	37
Obr. 36 <i>Zatížený element izotropního materiálu</i> [18].....	38
Obr. 37 <i>Zatížený element anizotropního materiálu</i> [18].....	39
Obr. 38 <i>Definice úhlů v desce</i> [18].....	39
Obr. 39 <i>Zatížení tahem ve směru 45° a 0°</i> [18].....	40
Obr. 40 <i>Lamina a laminát</i> [18].....	41
Obr. 41 <i>Závislost maximálního napětí a modulu pružnosti na natčení vláken</i> [18].....	42
Obr. 42 <i>Souřadnicový systém pro klasický laminát</i> [19].....	43
Obr. 43 <i>Vzorové příklady skladeb materiálu</i> [19].....	43
Obr. 44 <i>Příprava vzorků ručním laminováním</i>	47
Obr. 45 <i>Kompozitová deska připravená na řezání (rub)</i>	48
Obr. 46 <i>Kompozitová deska připravená na řezání (líc)</i>	49
Obr. 47 <i>Nařezané série vzorků</i>	49
Obr. 48 <i>Upnutý vzorek před zkouškou tahem</i>	50
Obr. 49 <i>Nachystaný vzorek před zkouškou na ohyb</i>	52
Obr. 50 <i>Vzorek při zkoušce na ohyb</i>	52
Obr. 51 <i>Nachystaný vzorek před zkouškou průrazem</i>	54
Obr. 52 <i>Padostroj Zwick Roell HT230F</i>	55
Obr. 53 <i>Graf závislost modulu pružnosti v tahu na konfiguraci kompozitu</i>	57
Obr. 54 <i>Graf závislost meze pevnosti v tahu na konfiguraci kompozitu</i>	57
Obr. 55 <i>Záznam měření série 6V_0 v tahu</i>	58
Obr. 56 <i>Testované vzorky ze série 6V_0 na tah</i>	58
Obr. 57 <i>Graf závislost modulu pružnosti v ohybu na konfiguraci kompozitu</i>	60
Obr. 58 <i>Graf závislost meze pevnosti v ohybu na konfiguraci kompozitu</i>	60
Obr. 59 <i>Záznam měření série 6V_0 v ohybu</i>	61
Obr. 60 <i>Testované vzorky ze série 6V_0 na ohyb</i>	61
Obr. 61 <i>Graf závislost maximální síly při průrazu na konfiguraci kompozitu</i>	63
Obr. 62 <i>Graf závislost práce při maximální síle v průrazu na konfiguraci kompozitu</i>	63
Obr. 63 <i>Průběh zkoušky průrazu v sérii 2V_0</i>	64

Obr. 64 *Průběh zkoušky průrazu v sérii 4V_0* 64
Obr. 65 *Testovaný vzorek ze série 6V_0 na průraz*..... 65

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 <i>Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot E-modulu a meze pevnosti v tahu u některých konstrukčních materiálů [3].....</i>	17
Tab. 2 <i>Konfigurace vyrobených kompozitových desek.....</i>	48
Tab. 3 <i>Tahová zkouška – naměřená data</i>	51
Tab. 4 <i>Tahová zkouška – naměřená data (zatížení 90°).....</i>	51
Tab. 5 <i>Ohybová zkouška – naměřená data</i>	53
Tab. 6 <i>Zkouška průrazem – naměřená data</i>	55
Tab. 7 <i>Statistické vyhodnocení tahové zkoušky.....</i>	56
Tab. 8 <i>Statistické vyhodnocení ohybové zkoušky</i>	59
Tab. 9 <i>Statistické vyhodnocení zkoušky průrazu.....</i>	62

