

Mechanické vlastnosti pultruzních profilů

Petr Hromada

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr HROMADA**
Osobní číslo: **T10981**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti pultruzních profilů**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Rozdělení polymerních kompozitních materiálů (částicové, vláknové, vícevrstvé), definice jednotlivých složek, význam matrice a výtzuže.
2. Jednosměrné kompozitní materiály, definice, obecný popis chování.
3. Přehled kontinuálních zpracovatelských technologií výroby kompozitních materiálů.

II. Experimentální část

1. Návrh materiálové skladby pultruzních profilů.
2. Výroba navržených profilů pultruzní technologií (popište zpracovatelské podmínky : teploty, čas, doba vytvrzování,...)
3. Mechanické testování pultruzních profilů dle platných norem pro jednosměrné kompozitní materiály.
4. Porovnání dosažených výsledků.
5. Shrnutí dosažených výsledků.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Vyd. 1. Praha : Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

[2] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s.

[3] Bareš, R. A.: Kompozitní materiály. SNTL Praha, 325 s, 1988.

[4] Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího práce.

[5] Firemní literatura.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 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 jsem seznámen s tím, že na moji 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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 17.5.2013

..... Petr Hromada

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). 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 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

Tato bakalářská práce se zabývá mechanickými vlastnostmi vysoce pevných kompozitních profilů vyráběných technologií pultruze. Podle doporučení je práce rozdělena na část teoretickou, na kterou navazuje část praktická. Teoretická část se skládá ze čtyř kapitol. V první kapitole jsou uvedeny teoretické aspekty kompozitních materiálů. Další kapitola se zabývá úlohou vláken v kompozitech. Třetí kapitola práce je věnována zkouškám mechanických vlastností pultruzních profilů. Na závěr je uvedena teoretická podstata technologie pultruze a její použití. Praktická část se věnuje využití technologie pultruze v praxi, složení testovaných vzorků dodaných firmou Willer, popis ohybové zkoušky dle ČSN EN ISO 178, výsledky a vyhodnocení těchto měření.

Klíčová slova: kompozitní materiály, pultruze, mechanické vlastnosti, vyztužující vlákna

ABSTRACT

This thesis deals with the mechanical properties of high strength composite profiles which have been produced using pultrusion technology. As recommended, the thesis is divided into a theoretical and a practical part. The theoretical part contains four chapters. The first chapter focuses on theoretical aspects of composite materials. The following chapter deals with the role fibre plays in composites. The third chapter of the thesis treats tests of mechanical properties of pultrusion profiles. In conclusion, the theoretical foundation of pultrusion technology and its use are presented. The practical part analyses the application of pultrusion technology in practice and the composition of the tested sample which was supplied by the company Willer. Further, the bending test run according to ČSN EN ISO 178 and its results are described and all collected data is interpreted.

Keywords: composite materials, pultrusion, mechanical properties, reinforcing fibers

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Soni Rusnákové Ph.D., za odborné vedení, rady a čas strávený při konzultacích a Ing. Milanu Žaludkovi Ph.D., za pomoc při testování vzorků a následném vyhodnocení.

Dále bych chtěl poděkovat Vladimíru Kotrlovi a firmě Willer, za poskytnutí cenných rad a vzorků pro testování v praktické části.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TEORETICKÉ ASPEKTY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.1 DEFINICE MATERIÁLŮ A KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.1.1 Proměnné definující vlastnosti kompozitních materiálů.....	14
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A CHARAKTERISTIKY ZÁKLADNÍCH TYPŮ.....	14
1.3 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	15
2 ÚLOHA VLÁKNA V KOMPOZITU	16
2.1 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA.....	16
2.1.1 Skleněná a minerální vlákna	16
2.1.2 Uhlíková vlákna	18
2.1.3 Aramidová vlákna	21
2.2 PŘÍRODNÍ VLÁKNA	22
2.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ VLÁKEN	22
2.4 FORMY VÝZTUŽÍ.....	23
2.5 ÚLOHA MATRICE A POJIVA (PRYSKYŘICE)	27
2.6 PRYSKYŘICE.....	28
2.6.1 Reaktivní pryskyřice	29
2.6.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R).....	30
2.6.1.2 Epoxidové pryskyřice	30
2.6.1.3 Vinylesterové pryskyřice (VE-R).....	31
2.6.1.4 Fenolické pryskyřice.....	32
3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH PROFILŮ	34
3.1 MECHANISMUS PORUŠOVÁNÍ.....	35
3.1.1 Tahová zkouška.....	36
3.1.2 Tlaková zkouška.....	37
3.1.3 Smyková zkouška.....	38
3.1.4 Ohybová zkouška	39
4 VÝROBA KOMPOZITU TECHNOLOGIÍ PULTRUZE	43
4.1 TECHNOLOGIE PULTRUZE	43
4.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ PULTRUZNÍ LINKY	45
4.3 ZPŮSOBY VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PULTRUZÍ	47
4.4 POUŽITÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE	49
II PRAKTICKÁ ČÁST	51
5 CÍL PRÁCE	52
6 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE	53
6.1 VÝHODY A NEVÝHODY VÝROBY TECHNOLOGIÍ PULTRUZE	53
6.2 PRINCIP VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PULTRUZÍ VE FIRMĚ WILLER.....	54
6.2.1 Vlastní výroba kompozitních profilů testovaných vzorků	54
7 SLOŽENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ A JEJICH PŘÍPRAVA	57

7.1	PŘEHLED SLOŽENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ	58
7.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ	58
8	POPIS OHYBOVÉ ZKOUŠKY DLE ČSN EN ISO 178	61
8.1	TŘÍBODOVÝ OHYB	61
8.1.1	ČSN EN ISO 178: Plasty - Stanovení ohybových vlastností	62
9	CHARAKTERISTIKA ZKOUŠECÍHO STROJE	65
10	NAMĚŘENÉ HODNOTY	68
10.1.1	Vzorek A	68
10.1.2	Vzorek B	69
10.1.3	Vzorek C	72
10.1.4	Vzorek D	72
10.1.5	Vzorek E	76
10.1.6	Vzorek F	77
11	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	84
11.1	POROVNÁNÍ VZORKŮ A A B	84
11.2	POROVNÁNÍ VZORKŮ C A D	84
11.3	POROVNÁNÍ VZORKŮ E A F	85
11.4	POROVNÁNÍ KERAMICKÉ DESKY A DESKY Z UMĚLÉHO MRAMORU	85
12	ZÁVĚR	86
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ	93
	SEZNAM TABULEK	95
	SEZNAM PŘÍLOH	96

ÚVOD

Jedním z nejpoužívanějších materiálů současnosti jsou kompozitní materiály. Jejich hlavní výhoda spočívá ve vysoké pevnosti, lehkosti a chemické odolnosti. Technologie, kterou se kompozitní materiály mohou vyrábět je technologie pultruze. Ta není pro svou náročnost zatím mnoho známá, ale dá se předpokládat, že v dalších letech se začne rozvíjet mnohem intenzivněji. Jedna z největších výhod technologie pultruze spočívá v tom, že je možno získat až přes 80% výztuže, což prostřednictvím jiné technologie nelze dosáhnout. Tato výhoda byla využita i při testování, kdy byly sledovány mechanické vlastnosti pultruzních profilů s obsahem 82% a 83% skelné a uhlíkové výztuže.

Využití pultruzních profilů se oceňuje v mnoha odvětvích, např. v průmyslu stavebním či automobilovém. Firma Willer, která byla dodavatelem testovaných vzorků se zabývá převážně výrobou profilů pro sportovní odvětví. Z produktů firmy Willer se vyrábí luky, běžky, lyže snowboardy ale i hokejové hole a mnoho dalších výrobků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORETICKÉ ASPEKTY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

„Civilizace prošla několika obdobími, z nichž každé je pojmenováno podle materiálu, který převládal a určoval úroveň výrobní technologie. Jde o dobu kamennou, bronzovou a železnou. Dnes žijeme v „mnohamateriálovém“ věku a směřujeme do věku „kompozitního“. [1]

Dalo by se říci, že neexistuje jiná skupina z oblasti polymerních materiálů, která by nabízela tak široké možnosti využití jako mohou nabídnout vlákny vyztužené plasty. Tyto materiály odpovídají požadavkům od jednoduchých, technických aplikací až po extrémní konstrukce v letectví a kosmonautice. Vlastnosti odpovídají také požadavkům jak jednoduchých způsobů ruční, kusové výroby, tak také složitým výrobním postupům. [2]

1.1 Definice materiálů a kompozitních materiálů

Vzít si za úkol definovat kompozitní materiál není jednoduchým úkolem, neboť problematice kompozitů je jednou přikládán velký význam ze širokého spektra oblastí, jindy je tato problematika omezována velmi specifickými definicemi. Definice materiálu se může lišit právě z toho důvodu, že mohou být využívány v řadě oblastí a liší se podle účelu, ke kterému bylo potřeba definici zformulovat. Podle Bareše (1988) jsou základní hlediska, podle kterých definice vznikají: [1]

- Ekonomické hledisko - pro ekonomy je materiálem vše, co vstupuje do výroby, tedy tzv. energetické materiály, mezi které patří například ropa, uhlí, zemní plyn a průmyslové materiály. Dalšími materiály jsou průmyslové materiály, mezi které patří kovy, cement, sklo, dřevo, textil aj.
- Z hlediska encyklopedií jsou materiály definovány v užším pojetí, jako látka, kterou člověk využívá, bez určitého chemického postupu.
- Z legislativního hlediska se užívá definice, podle níž materiály znamenají přírodní zdroje, které mají být průmyslově využity k výrobě zboží s výjimkou potravin a energetických paliv.

Nejčastější definice materiálu se uvádí: „*Jakýkoliv materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál.*“ Tím by však mezi kompozity patřily téměř všechny přírodní látky a také většina materiálů vytvořených uměle člověkem (některé výrobky práškové metalurgie, plasty plněné pryskyřicí, papírové lamináty atd.). Nedostatkem této definice však je, že do kompozitů zahrnuje jakoukoli směs materiálů, bez označení jejich specifických znaků, které by ji odlišily od běžné heterogenní materiálové směsi. Z toho jasně vyplývá, že kompozity nemohou být označovány jen jednoduše za kombinaci dvou materiálů, neboť kombinací si získají vlastní, odlišné vlastnosti, než může poskytnout některá ze složek sama. [1]

Proto Bareš (1988) považuje první definici založenou pouze na počtu skladebných složek za chybnou, neboť jako kompozity klasifikuje většinu materiálů, které se skutečnými moderními kompozity nemají téměř nic společného. Je proto podle autora třeba stanovit jiné, daleko přesnější definice. Definovány byly definice celkem tři. [1]

První se týká především rozdílu mezi slitinou a kompozitem: „*kompozity jsou složené materiály, které se liší od slitin tím, že jednotlivé složky si ponechávají své charakteristiky, ale jsou tak vloženy do materiálového systému, že se uplatní pouze jejich přednosti a potlačí jejich nedostatky, aby se získalo zlepšení jeho vlastností.*“ [1]

Druhá definice zdůrazňuje jejich vícefunkčnost: „*kompozity jsou multifunkční materiálové systémy, které mají charakteristiky neobdržitelné žádným z jednotlivých materiálů. Jsou to kohezivní struktury, vytvořené fyzikální kombinací dvou nebo více kompatibilních materiálů, lišících se složením a vlastnostmi a někdy tvarem.*“ [1]

Třetí definice klade větší důraz na návrhovou filozofii: „*kompozity jsou takové heterogenní materiály, u kterých se po smíšení materiálu se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jediná struktura; jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídavnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy, nebo smíšené dohromady.*“ [1]

Z předchozí definice jasně vyplývá, že během návrhu a výroby kompozitního materiálu má být vyvolán synergický účinek v jeho struktuře tak, aby bylo možno získat nový materiál s o mnoho lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy nebo ve směsi. [1]

Shrnutím výše uvedeného můžeme dle Bareše (1988) formulovat jednotnou definici kompozitních materiálů jako: „kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací.“ [1]

Některé definice vylučují z kompozitních materiálů také materiály s menším obsahem výztuže než 5% a heterogenní materiály, které nevznikly mísením složek (např. slitiny kovu, ve kterých během tuhnutí vznikla místa s vyloučenými tvrdšími místy). Pro výrobu kompozitních materiálů je v praxi využíváno spojení výztuže s matricí. [6]

1.1.1 Proměnné definující vlastnosti kompozitních materiálů

Z hlavních parametrů, na kterých závisí vlastnosti kompozitů, definuje Bareš (1988) především tyto: [2]

- Vlastnosti fází (včetně fáze tekuté - póry) – tj. mechanické vlastnosti a jejich poměr;
- Objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a jejich geometrické uspořádání v systému včetně pórů;
- Interakce jednotlivých fází a vlastnosti styku, tedy schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužujících částic a naopak.

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů a charakteristiky základních typů

Jak již bylo řečeno, tak v tom nejjobecnějším smyslu je dnes téměř každý užívaný materiál ve skutečnosti kompozitem. Nalézt materiál používaný v čisté formě je velmi obtížné právě proto, že jestliže uvažujeme materiály v atomickém nebo molekulárním měřítku, jsou téměř vždy tvořeny z různých atomů a molekul. [1]

Často se materiály dělí do dvou tříd podle toho, zda mají strukturu krystalickou nebo amorfní. Toto dělení je však dle Bareše (1988) nesprávné, protože jen málokterý reálný materiál je čistě krystalický nebo amorfní. [1]

Kompozitní materiály se dělí podle různých hledisek. [1]

- Podle materiálu matrice (podle základní spojité fáze) rozeznáváme kovové kompozity (např. slitiny, kovy zpevněné disperzemi, kovy vyztužené částicemi, cermety nebo kovy vyztužené vlákny), polymerní kompozity (s termoplastovou, reaktoplastovou nebo elastomerní matricí, zpevněné jinými polymery, partikulárními nebo fibrálními plnivými), keramické kompozity a ostatní anorganické kompozity.
- Podle struktury nebo geometrické charakteristice dispergované (vložené) fáze do matrice - tady rozeznáváme disperzní kompozity, částicové kompozity (partikulární, granulární), s částicemi pravidelných tvarů (koule, destičky) nebo nepravidelných tvarů a vláknové kompozity s dlouhými vlákny (obvykle uspořádanými) nebo s krátkými vlákny (obvykle neuspořádanými nebo jen částečně orientovanými). Granulární částice mohou být z látek různého druhu, dlouhá vlákna jsou obvykle skleněná, uhlíková nebo polymerní, krátká také uhlíková, borová, wolframová aj.
- Dle mechanického hlediska, z něhož budeme dále vycházet.

1.3 Výroba kompozitních materiálů

Výroba kovových kompozitů je založena především na impregnaci vláken, tkanin, slinutých materiálů s pomocí infiltrace po ponoření do roztavené matrice. [1]

Polymery (zejména pak reaktoplasty) jsou často aplikovány za normální teploty a z tohoto důvodu musí mít taky vhodnou viskozitu a vytvářet minimum pórů při tvrdnutí. U vláknových kompozitů je hlavním problémem vložení vláken do matrice tak, aby se mechanicky nepoškodila, aby bylo zachováno přesné usměrnění a rovnoměrné rozdělení vláken ve výrobku a aby byla zajištěna soudržnost vláken a matrice. Při manipulování s vlákny může relativně snadno dojít k jejich mechanickému poškození. Zejména nekovová vlákna (sklo) jsou citlivá, neboť jejich pevnost závisí na tom, aby byly povrchově celistvé. Aby se jejich vlastnosti zachovaly i v kompozitu, je potřeba s nimi zacházet velmi opatrně. Aby se zabránilo povrchovému poškození, byla obvykle používána ruční manipulace, což však nadměrně zvyšovalo poměr prací potřebných pro přípravu kompozitu. Za praktičtější řešení považuje Bareš (1988) ponoření vláken do tekuté matrice (taveniny, monomeru). Toto ponoření však také není bez rizika, neboť může přinést další problémy, jako chemické reakce, difúze do vláken a rekrystalizace nebo rychlé oddělování složek z důvodu rozdílné hmotnosti. [1]

2 ÚLOHA VLÁKNA V KOMPOZITU

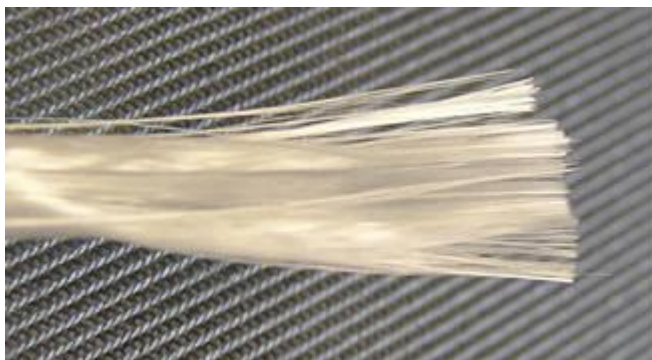
Pro vyztužování matrice k vytvoření kompozitu je k dispozici rozsáhlé spektrum vláken, které je stále rozšiřováno. Vedle přírodních vláken (bavlna, celulóza, azbest) jsou to vlákna slitinová a kovová, whiskery z keramických a metalických materiálů, polykrystalická vlákna z různých keramických materiálů, minerální vlákna a vlákna skleněná, dále pak vlákna polymerní. [1]

2.1 Vyztužující vlákna

Vláknové materiály se používají účelně jako konstrukční prvky jen zřídka. Zajímavou skupinou materiálů začínou tvořit až ve své celistvé formě, jako je tomu právě v kompozitních materiálech. Kompozitní, nebo-li vlákny vyztužené, plasty se skládají jak z vláken s vysokou pevností, popřípadě tuhostí. Dále pak z rozmanitě přízpůsobivého uloženého materiálu, tedy matrice. [2]

2.1.1 Skleněná a minerální vlákna

Textilní skleněná vlákna (GF-Glass Fiber) je společným názvem pro vlákna s pravidelným kruhovým průřezem. Tyto vlákna jsou tažená z roztavené skloviny. Používají se většinou pro textilní účely, pro vyztužování termosetu, termoplastu. Většina těchto skleněných vláken se vyrábí rychlým tažením z taveniny (až 400 m min^{-1}) obvykle v průměru $3,5 - 20 \text{ } \mu\text{m}$. Trysky, ze kterých jsou tato vlákna tažena jsou zahřáté na teplotu, která zaručí, že z jejich trysek umístěných na spodní straně před pecí sklovina pomalu vytékala a tuhla do tvaru vláken. Najednou může být taženo 51 – 408 vláken. Nejčastěji je to vláken 204. Na výstupu z trysky jsou vlákna asi 2 mm tenká a teprve navíjením na navíjecím stroji se kalibrují na zvolený průměr a prodlužují se až na 40 000 násobnou délku. Spojením těchto vláken vzniká spřádací vlákno. Je vytvářen pramenec, který je základní jednotkou pro výroby z vláken, jako jsou různé provazce, rouna, či tkaniny. Rovnoběžné seskupené prameny vytvářejí provazce (roving). Počet pramenců je 12 - 120, obvykle však 60, a provazec je definován buď počtem pramenců, nebo „konců“, které obsahuje, nebo tzv. výtěžkem, tj. počtem metrů vláken na kg. Provazce se užívají pro přímé vyztužování řady výrobků, k výrobě vyztužujících tyčí, k přípravě sekaného vlákna, či mletého vlákna nebo mohou být předimpregnovány pryskyřicí (k přípravě prepregů). V netkaných rounech (rohožích) jsou prameny náhodně ukládány do rovin tak, aby bylo dosaženo stejného rozložení vláken ve všech směrech, a jsou prošity. [1], [2]



Obrázek 1 Skleněná vlákna [19]

Jednotlivá vlákna působí vůči sobě navzájem silně abrazivně, čímž se značně znehodnocuje původní pevnost vláken. Na čerstvě tažená vlákna z trysek se proto při výrobě nanáší lubrikace ve formě vodní emulze za účelem spojení jednotlivých vláken do spřádacího vlákna a ochránění citlivého povrchu těchto vláken. Navíc tato lubrikace slouží k lepší přilnavosti jak k vláknu, tak i k matrici. Lubrikace může být dočasná (např. škrobová), která se odstraní po ukončení výroby skleněné výztuže a nahradí povrchovou úpravou zajišťující dobře spojení skla k matrici, nebo může být trvalá, která tedy plní ochrannou funkci, tak funkci vazebného činidla k matrici. [1]

Vlákna se mohou vyrábět také z tzv. A-skla používaného například při výrobě oken. Dále tzv. C-skla, které mají oproti E-sklu nižší pevnost, ale naopak vyšší odolnost vůči kyselinám, D-skla s nízkou dielektrickou konstantou, které jsou vyvinuty speciálně pro radary, M-skla o vysoké pevnosti a výborné odolnosti proti vodě a kyselinám. Pro zvláštní účely se vyrábí i jiná skla, jako např. L - sklo bohaté na oxid olova používané k ochraně proti radiačnímu záření. [8]

Vlastnosti skleněných vláken

Skleněná vlákna tvořena bezalkalickou sklovinou jsou velice dobrým elektrickým izolantem. Mají vysokou propustnost pro záření. Obvykle se značí E – vlákna. Jejich sklovina se poté označuje jako E – sklovina. Vlákna z E-skla mají slabou chemickou odolnost proti kyselinám, dobře odolávají vodě a CaCl_2 . Naopak bezalkalická skleněná vlákna – AR – vlákna mají odlišné složení od E - vláken a pro svou typickou vysokou odolnost vůči alkáliím se často využívají pro vyztužování betonu. [3]

Skleněné vlákno je izotropní, což znamená, že jeho materiálové vlastnosti v podélném a příčném směru jsou totožné: [2]

- Pevnost v tahu = $3500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ pro čerstvě tažené vlákno
= $1500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ po zpracování
- E – modul = $75000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$

Skleněná vlákna mají vysokou pevnost, tuhost a poměrně nízkou cenu, což je staví do dominantního postavení mezi vyztuženými vlákny. V porovnání například s uhlíkovými vlákny, které mají nejvyšší tuhost, jsou výhodnější právě po cenové stránce. Mají vysokou pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti a dobrou ohybnou pevnost. Odolávají snadno vysokým teplotám, vnějšímu prostředí a vodě. [2]

Modul pružnosti v tahu (E- modul) skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku a činí asi 1/3 hodnoty oceli, pevnost v tahu je vyšší než u 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. Tepelné vlastnosti skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti ostatních materiálů. Ani dlouhodobé trvalé tepelné namáhání při $250 \text{ }^\circ\text{C}$ nesnižuje hodnoty jejich mechanických vlastností. Tepelná vodivost je naproti tomu vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovů. Skleněná vlákna jsou nehořlavá, a tudíž ohnivzdorná. Hodí se proto pro kompozity a závěsy. Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů [2]

2.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou označena jako CF - Carbon Fiber.

Charakteristické jsou svojí vysokou pevností. Další významná vlastnost je nízká těžnost. Organické suroviny ve vláknovém stavu (výchozí) se nejdříve karbonizují. Při tomto procesu se odštěpí většina prvků až na uhlík. S rostoucí teplotou se zlepšují jejich mechanické vlastnosti. Tvorba grafitové struktury se ukončí při teplotě nad 1800°C . Vzdálenost vrstev ve vláknech zůstane vždy větší než ve vrstvách z grafitu čistého [2]

Výchozí surovinu pro výrobu uhlíkových vláken tvoří tyto materiály: [3]

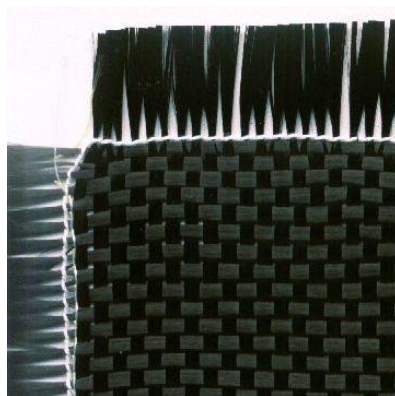
- Celulóza - vlákna mají méně dokonalou strukturu, používá se jako izolační materiál.

- Polyakrylonitril (PAN) – používání tohoto materiálu se datuje od roku 1980 stále častěji, vlákna se považují za standardní.
- Smola – vlákna se připravují nákladným způsobem. Konečná cena je pro nízkou cenu výchozí suroviny příznivá. Charakterizuje ji vysoká hodnota E – modulu, výborné elektrické a tepelné vlastnosti. Pevnost v tlaku je ovšem nižší než u standardních vláken, protože jsou i vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami řidší.

Nejčastěji používaná byla vlákna standardní, která se zpracovala na formu nekroucených pramenců pro náročnější aplikace. Pramenec tvořilo 1000 až 1200 elementárních vláken. Pro méně náročné aplikace to bylo vláken 4800. Pramence s nižším počtem „konců“, tzv. „small“ nebo „low tow“ se méně smyčkuje, snadněji se tkají a propojují maticí než pramence s vyšším počtem konců, tzv. „large“ nebo „heavy tow“ (více než 24000 vláken). To umožňuje pokládat větší množství vláken současně.

Vysokopevnostní a vysokomodulová vlákna musí mít uloženou kontinuální síť silných vazeb co nejtěsněji. Vyžaduje se nízká měrná hmotnost materiálu, proto je vhodné použít pro tyto účely prvky prvních dvou řad periodické soustavy. Ty mohou být například bor, uhlík, kyslík, křemík, dusík). [2], [3]

Uhlíková vlákna tvoří více než 90 % z uhlíku. Dále to je než 7% dusíku, 1% kyslíku, 0,3 % vodíku. Jejich průměr je 5 a 10 μm . E - modul a pevnost se může měnit v širokém rozsahu. Závislé jsou na stupni orientace uhlíkových vrstev a také na výskytu vadných míst, které vzniknou ve vláknech během výroby. [2]



Obrázek 2 Uhlíková vlákna [15]

Průmyslová výroba uhlíkových vláken využívá dva výrobní postupy: [2]

- U polyakrylonitril (PAN) se snažíme o dosažení co největší orientace molekul ve směru osy vlákna. Následně jsou vlákna stabilizována a zahříváním na teplotu 200 až 300 °C pod mechanickým napětím s přístupem vzduchu. Přitom se PAN dehydruje a současně přemění v důsledku cyklizace nitrilových skupin na žebříčkovitý polymer. U druhého stupně výroby se tato žebříčkovitá struktura polymeru mění pyrolýzou v inertní atmosféře při maximální teplotě do 1 600 °C na strukturu grafitickou. Tímto postupem se připravují vlákna s pevností více než 5000 N · mm² (tzv. vysokopevnostní vlákna). Při následném tepelném procesu při teplotách až 2500°C mohou být vlákna vyrobena s hodnotami E – modulu přes 400 000 N · mm², mající ovšem nižší pevnost
- Druhý postup používaný u výroby uhlíkových vláken vychází ze surovin, které jsou bohaté na uhlík. To mohou být smoly na bázi kamenouhelného dehtu nebo dehtu vzniklého při destilaci ropy. Dané suroviny se tepelně zpracují při teplotě vyšší než 350 °C na mezifázi. Mezifáze je vysoce anizotropní, obsahuje vysoký podíl kapalných krystalů. Při průběhu spřádání pak z taveniny vznikají za působení hydrodynamických jevů vlákna, která mají vysokým stupněm orientace v osovém směru. Při následující stabilizaci a karbonizaci při teplotě až do 2000°C dochází k přeměně na uhlík při současném zachování, nebo zlepšení orientace. Při třetím stupni výroby proběhne žihání při teplotách do 3000°C. Přeměna připomíná rekrystalizaci. Grafitizací se vyrábí vysokomodulová uhlíková vlákna s vysoce orientovanou strukturou ze standardních uhlíkových vláken. Vysoká cena vláken je příčinou použitých extrémních teplot.

Vlastnosti uhlíkových vláken

Hlavní předností uhlíkových vláken je jejich vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost. Mezi zajímavé vlastnosti těchto vláken patří jejich dobrá elektrická vodivost a odolnost vůči únavě materiálu. Dále také velmi dobře tlumí vibrace, jsou chemicky odolné a nemění příliš své vlastnosti až do teploty 2000°C. To je však podmíněnou jejich ochranou proti oxidaci při teplotě nad 500°C kovovou maticí kompozitu. [8]

Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn. se zvyšujícím se zatížením, roste hodnota E - modulu. Typická je pro ně nízká hustota. Uhlí-

ková vlákna mají mimořádně vysokou korozní odolnost a ve srovnání se skleněnými vlákny jsou silně anizotropní. Uhlíková vlákna jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. Proto se při zpracování povrchově upravují směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Tato vlákna mají vysokou odolnost vůči dlouhodobému dynamickému namáhání (dynamické vlastnosti laminátu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u všech ostatních materiálů – např. hliníku a oceli). [2]

2.1.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou označena jako AF- Aramid Fiber. Tato vlákna jsou na bázi lineárních organických polymerů. Jejich kovalentní vazby jsou orientovány dle osy vlákna. Přednost těchto vláken spočívá ve vysoké pevnosti a tuhosti. Molekuly jsou spojeny navzájem vazbami vodíkových můstku. Aromatická jádra v řetězcích jsou nositeli vysoké tuhosti. Teoretická pevnost je kolem $200\,000\text{ N} \cdot \text{mm}^2$. Tato hodnota je pouze odhadovaná. Pravidelné uspořádání fenolenových jader a amidových skupin s vazbami vodíkových můstků propůjčuje řetězcům vysokou tuhost. Současně způsobuje vysokou hustotu struktury uspořádání. Aramidová vlákna se dají zpracovat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Až 70% jejich skutečné pevnosti lze využít v laminátu. Tato vlákna mají záporný součinitel teplotní délkové tepelné roztažnosti ve směru vláken vzhledem k vysoké orientaci molekul, stejně jako vlákna uhlíková. Aramidová vlákna byla představena na konci 60. let americkou firmou DuPont pod názvem Kevlar. Aramidová vlákna se vyrábí v různých druzích, které se liší hodnotami modulu pružnosti v tahu a tažností. Typy s nízkým E-modulem a vyšší tažností jsou schopny pojmout podstatně vyšší deformační práci než vlákna s vyšším E-modulem a nižší tažností. Aramidové vlákno a je na povrchu lehce zdrsňené a má kruhový průřez. Vlákna se vyrábí ve formě pramenců, tkanin, přízí a povrchových rohoží. [2], [3]

Vlastnosti aramidových vláken

Aramidové vlákno má mnoho vynikajících vlastností, avšak také některé nevýhody. Například se jedná o nejtenčí vyztužující vlákno, má vysokou měrnou pevnost v tahu a 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. [2]

Mají vysokou schopnost tlumit vibrace nezávisle na orientaci vlákna, čehož je využíváno při výrobě neprůstřelných vest nebo ochranných pancířů. Na rozdíl od skleněných a uhlíkových vláken jsou citlivé na namáhání tlakem a vlhkost. [2]

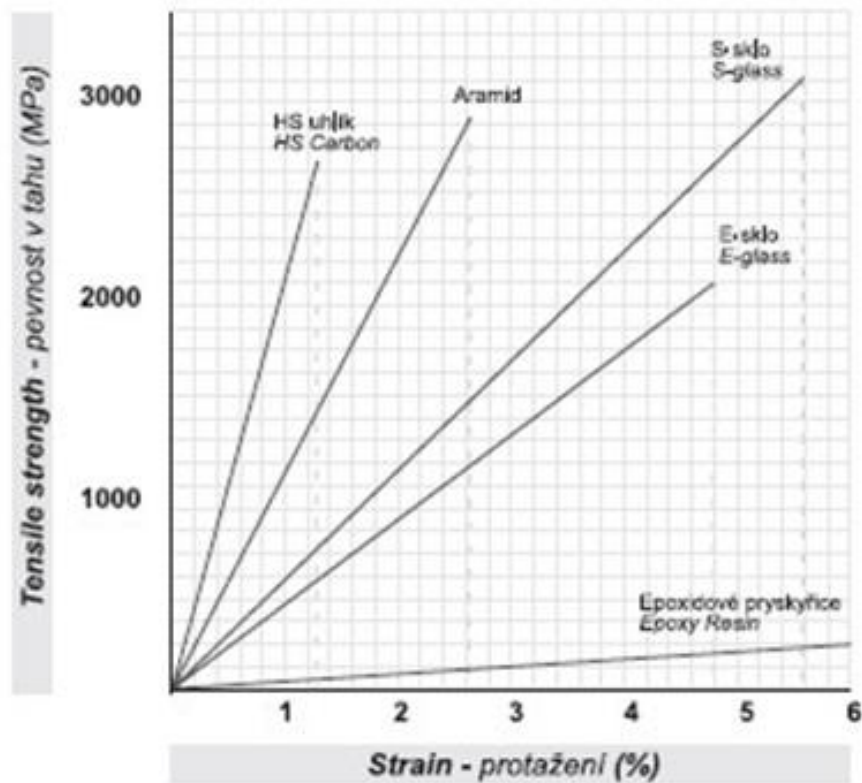
2.2 Přírodní vlákna

Tato vlákna se stávají velmi populární z hlediska ekologické nenáročnosti jejich výroby a s ohledem na nároky v rozvojových zemích. Je vhodné pro vyztužení kompozitu použít přírodní vlákna rostlinná. Ty mají jako základ celulózu. Patří zde např. len, konopí, sisal, ramie, juta a bavlna. K výhodám patří zejména odolnost proti stárnutí, dále čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Zajímavé jsou i jejich pevnosti v tahu. Pro svou nízkou měrnou hmotnost jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou u lehkých konstrukcí. Hlavní přednost je možno uvést nízkou hustotu, malou abrazivitu při mechanickém opracování. Výhodnou je i likvidaci spalováním. Nevýhody tvoří jejich závislost na podmínkách růstu, omezená možnost volby matrice vzhledem k nebezpečí rozkladu vláken při vyšší teplotě zpracování, citlivost na působení vlhkosti, omezená délka vláken, nákladná předběžná úprava pro zlepšení vazby s matricí a možnost změn při biologickém napadení. [3]

2.3 Porovnání jednotlivých typů vláken

Porovnat vlastnosti vláken můžeme z deformačního chování jednosměrně vyztužených laminátů (při stejném obsahu vláken), namáhaných rostoucím tahovým namáháním ve směru výztuže. Nejvyšší hodnoty pevností a tuhostí vykazují vlákna uhlíková. [2]

Vliv vlastností různých druhů skleněných, uhlíkových a aramidových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce je znázorněn na obrázku č. 3.



Obrázek 3 Vliv vlastností různých druhů skleněných, uhlíkových a aramidových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce [21]

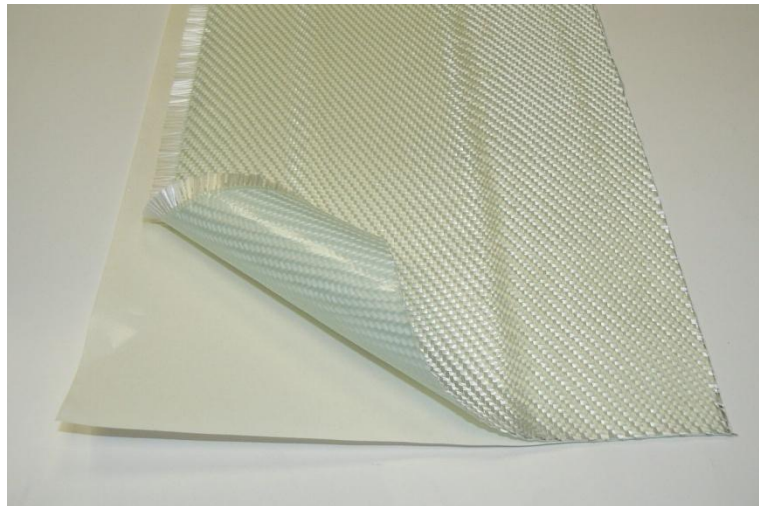
2.4 Formy výztuží

Výztuže vláknových kompozitů jsou nejčastěji (kromě whisklerů) dodávány ve formě pramenců navinutých na cívce (rovingu). Ty jsou dále zpracovány do formy určené ke konečnému zpracování. [6]

Typy výztuží lze rozčlenit do několika kategorií: [6], [23]

- **Prepreg**

Prepreg je polotovar složený z rovingů, které spojuje částečně vytvrzená pryskyřice. Výhodou je, že vlákna drží tvar a přilnou lépe k formě. Tím je jejich zpracování výrazně ulehčeno.



Obrázek 4 Prepreg skelných vláken [16]

- **Roving**

Jedná se o pramenec nekonečných vláken navinutých na cívku. Většina rovingů obsahuje 12 – 120 vláken. Rovingy jsou určeny buď pro vpracování do jiných forem výztuží, nebo přímo pro výrobu kompozitu. Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.



Obrázek 5 Roving [22]

- **Tkanina**

Tkaná výztuž je analogií běžných textilií s tím rozdílem, že v tomto případě bylo použito speciálních vláken. Takováto výztuž má v kompozitu vysoký podíl vláken, má tedy vysokou tuhost a pevnost. Vlastnosti výztuže jsou dány nejen materiálem, ale i orientací vláken

a jejich vzájemným vázáním. Projektovat výrobek, vyrobený z této formy výztuže je velice obtížné a drahé.

Vyrábějí se tavením tzv. sklářského kmene, což je směs křemenného písku vápence, potaše a collemanitu. Směs se taví přibližně při 1400°C a z taveniny se přímo vytahují tzv. elementární vlákna – tavenina vytéká dnem pece malými otvory o průměru cca 1-2 mm. Průměr vláken je 5-25 μ v závislosti na rychlosti odtahu. Hned poté se vlákna dále opracovávají – mažou se lubrikační složkou, především, aby byla chráněna před mechanickým poškozením. Dále se přidávají tzv. apretační složky, které zvyšují spojovací vlastnosti vláken. Následně se vlákna motají do pramenů a navíjejí se na cívky pro jejich další použití. Často se využívá technologie „roving“ pro výrobu pramencových tkanin, případně se stříhají na délku cca. 5cm a z nich se poté vyrábí tzv. rohože. Tkaniny se vyrábějí v několika různých provedeních vzhledem k počtu vláken v osnově, tím vznikají rozdílné typy křížení vláken především se jedná o provedení plátnové, keprové a atlasové, viz. Obrázek č. 6.



Obrázek 6 Různá provedení tkaniny [23]

- **Rohože**

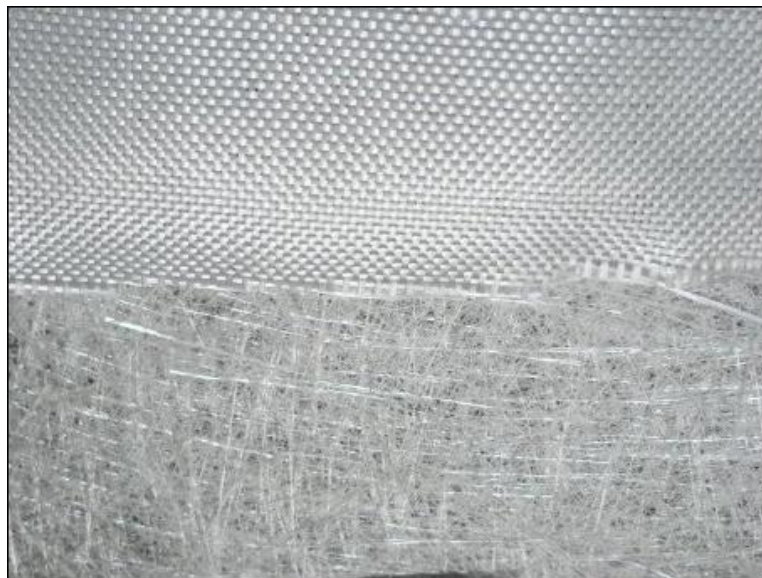
Vznikají ukládáním nepravidelně orientovaných 50 mm dlouhých vláken, pojených emulzí nebo práškovým pojivem. Emulzně spojované rohože jsou podstatně měkčí, lépe se tvarují, používají se pro tvarově složitější dílce. Naopak práškově pojené rohože jsou tužší, a proto se používají na jednodušší velkoplošné dílce nebo ve spojení se speciálními pryskyřicemi na vodě nebo chemicky odolné výrobky. Oproti tkaninám jsou mnohem méně vázané, a proto také nejsou tolik pevné.

- Vyztužovací rohož

Rohož je vyráběna z dlouhých či krátkých rovingů, které jsou naimpregnovány organickým pojivem (tím může být například pryskyřice nebo termoplast), jehož obsah je 5 – 30% hmotnosti, a poté jsou slisovány za zvýšené teploty. Výhodou jsou ovšem kvaziizotropní vlastnosti.

- Povrchová rohož

Povrchové rohože mají jemnou strukturu a malou plošnou hmotnost. Vyrábí se většinou z polyesterových vláken a na jakékoliv mechanické vlastnosti mají minimální vliv. Jejich účelem je ochrana křehkého kompozitu před mechanickým poškozením, před vlivem UV záření, povětrnostních vlivů a také jsou využívány k estetické úpravě materiálu.



Obrázek 7 Rozdíl mezi tkaninou (nahore) a rohoží (dole) [23]

• Pletené výztuže

Pletení vláknitých výztuží umožňuje výrobu komplikovaných dvou i třírozměrných útvarů. Použit lze jen velmi dobře ohebná vlákna, protože při pletení ok dochází k jejich deformaci. Rizikem použití pletených výztuží je možnost křehkého lomu materiálu v oblasti s přebytkem pryskyřice. V pletených výztužích je navíc pouze malá část vláken orientována ve směru předpokládaného namáhání. Důsledkem toho je poměrně snadná deformace ve všech směrech.

2.5 Úloha matrice a pojiva (pryskyřice)

Matrice je materiál, který je prosycen systémem vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Tuto surovinu označujeme jako kompozit. Úkolem matrice u vláknových kompozitů je zaručení geometrického tvaru výrobku, převedení namáhání z vlákna na vlákno, ochrana vláken, zavedení a přenos namáhání na vlákna aj.. Matrice mohou být kovové, polymerní a keramické: [2], [6]

➤ Kovové matrice

Tento typ matric má vyšší hustotu než matrice polymerní, ale nebývají náchylné ke křehkému lomu a mají také vyšší teplotu tání. Významnými kovovými matricemi jsou slitiny hliníku (dural), hořčíku a titanu. Jedny z tepelně nejodolnějších jsou matrice ze slitin niklu.

➤ Keramické matrice

Keramické matrice vynikají svou výbornou tepelnou odolností. Důležitá je také jejich malá tepelná roztažnost a malá ztráta mechanických vlastností do teploty přes 1000 °C, kdy se pevnost v tahu pohybuje kolem 800 MPa. Jsou velmi tvrdé, ale naopak také velmi křehké.

➤ Polymerní matrice

Polymerní matrice nemají tepelnou odolnost jako matrice keramické nebo kovové, ale jsou lehké a je možno je zpracovávat do velice komplikovaných tvarů. Výrobních postupů kompozitních materiálů s polymerní matricí je rozsáhlé množství a řada výrobců používá vlastní metody vhodné pro konkrétní aplikace. Tento typ matric má pojivou funkci, jejím hlavním úkolem je chránit výztuž před mechanickým a chemickým poškozením. Navíc umožňují přenos vnějšího napětí do výztuže a udržují výztuž v požadovaném směru vůči namáhání. [7]

Polymerní matrice může být jak reaktoplastická (termosety), tak termoplastická (termoplasty). Termoplastická matrice zachovává svůj tvar pouze teplotou a může být v libovolnou dobu tvarována zvýšením teploty, zatímco reaktoplastická matrice, zpočátku viskózní, se zesíťováním změní na netavitelný a netvarovatelný materiál. [12]

Mezi termoplasty patří například polystyren (PS), polypropylen (PP), polyetylen (PE), polykarbonát (PC), polyetylentereftalát (PET) aj. Reaktoplasty jsou kupříkladu epoxidy, ne-

nasyčené polyestery, melaminy či fenol formaldehyd. Reaktoplastické matrice jsou nejvíce používaným pojivem ve vláknových kompozitech. Díky své nízké viskozitě před vytvrzením jsou použitelné u mnoha způsobů výroby kompozitů. [13]

2.6 Pryskyřice

Pryskyřice je v kompozitním materiálu tzv. pojivem. Jedná se o složku, která sama o sobě nemá příliš velkou pevnost, ale získává ji po nasycení do vláken. Existuje mnoho druhů speciálních pojiv, které je možné použít. Mezi nejčastěji používané pryskyřice patří nenasycené polyestery (UP) – 75% světové produkce, Vinylestery (VE) – 20% světové produkce, Epoxidové (EP), akrylové (AK), nehořlavé fenolytické pryskyřice a polyimidy – 5% světové produkce. [13]

Nejprve se pro kompozity využívaly pouze vyztužené nenasycené polyesterové (UP-R) nebo epoxidové (EP-R) pryskyřice. Mají především výhodu, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a při normální teplotě jsou také v stavu tekutém. V případě, že jsou zpracovány ve formě taveniny, je jejich viskozita nižší než viskozita taveniny termoplastů. Viskozita licích pryskyřic reaktivních se pohybuje při teplotě zpracování řádově ve stovkách mPa, kdežto u termoplastů dosahuje hodnot 10^3 až 10^5 mPa . s. Termosety se z tohoto důvodu snadněji zpracovávají, smáčejí a lépe prosycují vlákna. [2]

Rozhodujícím aspektem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice – vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a příp. i chemické vazby mezi vláknem a matricí se nanese na vlákno apretace vhodná přímo pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodné povrchové napětí a vhodnou viskozitu, aby se vlákno smočila úplně a bez bublin. [2]

Tabulka 1 Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách [2]

Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenasyčená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzena za studena	10 až 40 °C	stovky mPa . s
Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzena za tepla	~ 140 °C	~ 1000 mPa . s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice (EP-R) vytvrzena 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

2.6.1 Reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice tvoří skupinu termosetů, které jsou při výrobě kompozitů používány nejčastěji. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice. Ty se buď samostatně, nebo za pomoci tvrdidel (urychlovačů, iniciátorů, katalyzátorů, aldehydů - fenolů apod.) vytvrzují polyadici nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek. Tvrdidla jsou sloučeniny, které iniciují katalyticky polymeraci 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 jsou přidávány v malém množství k účelu urychlení síťovací reakce. [2]

Mezi nejznámější typy reaktivních pryskyřic lze zařadit: [2]

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)
- Vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice
- Fenolické pryskyřice
- Izokyanátové Pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice (EP-R)
- Metakrylátové pryskyřice (MA-R)

2.6.1.1 *Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)*

Tento typ reaktivních pryskyřic tvoří bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Za normální nebo mírně zvýšené teploty je můžeme vytvarovat, aniž by přitom vznikaly těkavé vedlejší produkty. Při vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9 %. UP-R (ČSN EN ISO 3672-1, 2) jsou známy již od roku 1936 a v kompozitech se vzhledem ke své nízké viskozitě, vysoké rychlosti vytvrzování, dobrému smáčení vláken a přiměřeně nízké ceně uplatňují nejvíce. Přes 70% výroby těchto pryskyřic je zpracováno ve formě kompozitů. [2], [3]

Zvláštní vlastnosti nenasycených polyesterových pryskyřic: [2]

- Levné, spolehlivé a mnohostranně použitelné pryskyřice
- Velká variabilita při zpracování, snadná manipulace s roztokem při zpracování
- Velké smrštění při zpracování (6 až 9 %), z velké části po zgelovatění
- Dobrá odolnost proti povětrnosti
- Velké nároky na životní prostředí působením styrenu
- nenáročné vytvrzování přidáním iniciátorů polymerace
- velmi dobré vlastnosti vytvrzeného produktu

Nenasycené polyesterové pryskyřice se používají na bezrozpuštědlové laky, lité podlahoviny, nátěry, na materiály vyztužené skleněným vláknem - skelné lamináty a vstříkovací hmoty. [11]

Polyester je nejvíce používanou matricí. Všeobecně mají polyesterové pryskyřice dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Polyestery jsou vhodné do slabě alkalického prostředí. Vhodné jsou také v slabě kyselém prostředí. [13]

2.6.1.2 *Epoxidové pryskyřice*

Epoxidové pryskyřice jsou polymerní materiály charakteristické přítomností dvou a více epoxidových skupin ve své struktuře. Tato epoxidová skupina je velmi reaktivní a právě na její reaktivitě s velkým počtem různých látek závisí i aplikace tohoto druhu pryskyřic. Nej-

častěji používanými typy epoxidů jsou epoxidy na bázi bisfenolu A nebo na bázi novolaků a aromatických aminů. Tento typ pryskyřic neobsahuje škodlivý styren. Epoxidové pryskyřice jsou dále (ČSN EN ISO 3673 1-2) za normální teploty kapalné až pevné látky, mohou obsahovat přidané pomocné látky, např. rozpouštědla. Epoxidové pryskyřice patří mezi velmi hodnotné termosety s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Pouze 8% z nich se zpracovává ve formě vyztužených kompozitů. Vynikají svými vlastnostmi jako je jejich chemická odolnost a minimální smrštitivost při vytvrzování. Důležitými aplikačními oblastmi jsou zalévací hmoty pro elektroniku, výrobu forem a povlaků. Možností, kde je jejich využíváno je však mnohem více, například se jedná o části lodí, motorových vozidel, ochranné přilby, nádoby, síla, izolační materiály v elektrotechnice, nátěry, povrchové úpravy aj. Často se používají také pro přípravu laminátu v kombinaci se skleněnými a jinými vlákny. Podle způsobu aplikace se dělí na lepidla, nátěrové hmoty a licí pryskyřice. [2], [9], [10]

Zvláštní vlastnosti epoxidových pryskyřic: [2]

- Cenově jsou nevýhodné, 3 až 4krát dražší než nenasycené polyesterové pryskyřice
- Musí být dodržen přesný poměr mísení pryskyřice s tvrdidlem
- Vzhledem k velmi dobrým mechanickým vlastnostem jsou vhodné pro vysokopevnostní vlákna (např. uhlíková)
- Dobrá schopnost přilnavosti k mnoha druhům podkladů
- Pro poměrně vysokou viskozitu a pomalou vytvrzovací reakci jsou hůře zpracovatelné
- Možné podráždění kůže a alergie při zpracování kapalných pryskyřic

2.6.1.3 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Odlišnost vinylesterové pryskyřice se od nenasycených polyesterových pryskyřic (UP-R) liší tím, že zesíťování probíhá pomocí koncových metakrylátových skupin, kde se nachází také esterové vazby. Tento typ pryskyřic kombinuje nejlepší vlastnosti polyesterových a epoxidových pryskyřic. VE-R na bázi bisfenolu jsou vysoce houževnaté, velmi dobře

odolné proti alkalickému prostředí, ale také – vzhledem k dvojným vazbám – mají nižší tvarovou stálost za tepla. Tyto pryskyřice, vycházejí ze základních složek fenolických pryskyřic, jsou podstatně reaktivnější a vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají nižší viskozitu a vyšší stupeň zesítnění. Proto jsou také odolné vyšším teplotám, ale také relativně křehké. Vinylestery mají dobrou odolnost vůči kyselému a alkalickému prostředí, zvláště ve vysokých teplotách. Skelným vláknem vyztužené vinylesterové profily mají dobrou tepelnou i elektrickou izolaci. [2], [18]

Zvláštní vlastnosti vinylesterových pryskyřic: [2]

- Ve srovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi (UP-R) jsou VE-R houževnatější a dražší
- Velká variabilita při zpracování pomocí dávkování styrenu a urychlovače
- Aplikace v korozním prostředí
- Zatížení životního prostředí styrenem

2.6.1.4 Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice (ČSN EN ISO 10082) jsou reaktivní pryskyřice. Vyrábějí se kondenzací fenolů a 30 až 50% vodných roztoků aldehydů. Jednotlivé varianty vycházejí z různých druhů fenolických surovin, různých poměrů fenol/formaldehyd a různých chemických nebo fyzikálních modifikací. Tento typ pryskyřic je rozpustný v alkoholech a ketonech, či esterech a alkáliích, a jedná se o termoplastickou formu pryskyřic. Mimo tyto vlastnosti navíc nejsou tvrditelné teplem ani kyselinami [2]

Fenolické pryskyřice jsou využívány k výrobě lisovacích hmot, lepidel a pojiva na dřevo, vyrábí se z nich také různé brzdové materiály (odolávají vyšším teplotám), přísady do nátěrových hmot, nebo se také využívají v galanterii jako ušlechtilé pryskyřice, mimoto také jako lehčené hmoty pro stavebnictví nebo jako antikorozní materiály či syntetická tříslika a iontoměniče – katexy. [11]

Zvláštní vlastnosti fenolických pryskyřic: [2]

- Jejich podíl na celkové výrobě klasicky vyztužených kompozitů je nízký
- Jejich zpracování je ztíženo použitím kyselin a odštěpením reakčních zplodin
- Jsou vysoce chemicky a tepelně odolné a tvarově stálé

3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH PROFILŮ

V porovnání s nevyztuženými plasty není závislost vlastností kompozitu na teplotě, době zatížení a podmínkách prostředí (vlhkost vzduchu, agresivní média, UV záření) tak výrazná. Chování při mechanickém namáhání ovlivňuje především vytvrzení matrice, orientace vláken, rozložení plniva a vláken, příp. jejich zakřivení a zvláště obsah vláken. Proto je třeba při vzájemném srovnávání vlastností nepominout velikost obsahu vláken. Při statických, dynamických, zkouškách pevnosti kompozitů jsou to lokální poškození různého druhu, která způsobují porušení nosných vláken a předcházejí celkovému lomu materiálu. Ve vrstvách, ve kterých existuje nebezpečí vzniku mezivláknové poruchy (při zatížení tahem kolmo kolmo ke směru vláken), nebo smykem pod úhlem 45° , mohou nastat případy, kdy vzniknout trhliny, které se negativně projeví u vrstev zatížených ve směru vláken. Vrstvy s orientací vláken 0° ke směru zatížení samy vykazují vyšší pevnosti než stejné vrstvy ve spojení s vrstvami s orientací výztuže 90° ke směru zatížení, u kterých dochází k prvním poruchám. Při tlakovém zatížení je v takovém případě snížena lokální schopnost podepření vláken maticí, a je tak umožněno jejich lokálnímu vybočení. Při zatížení tahem vedou lokální přerozdělení napětí a vzniká vrubové napětí ke koncentracím napětí a vrubovým účinkům v přilehlých vrstvách. Při dynamickém zatěžování jsou míjivá namáhání příznivější než střídavá a to vlivem různého působení lokálních poškození. Okrajové podmínky vlastní techniky provedení zkoušek často ovlivňují výsledek měření. V oblasti zavedení síly dochází k bránění v příčné kontrakci a k počátečním deformacím. To u vysokopevných a tuhých kompozitů s anizotropními vlastnostmi vyvolá zvýšenou úroveň trojrozměrné napjatosti v okolí upnutí zkušebních těles a může to výrazně ovlivnit výsledek zkoušky. [2]

3.1 Mechanismus porušování

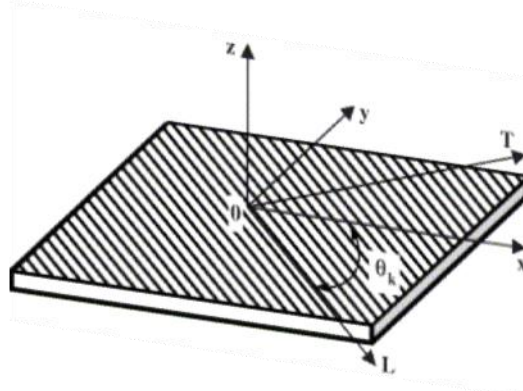
Větší nebezpečí vzniku mezivláknového poškození než u jednosměrně vyztužených vrstev je při namáhání ve směru vláken. To existuje u laminátů zatížených víceosým namáháním. Vznik poškození závisí na druhu zatížení. Nepravidelnosti v uspořádání vláken, vzduchové bubliny, nedostatky v adhezním spojení složek se projevují jako koncentrace protažení a napětí. Podle druhu zatížení lze očekávat vznik tvorby různých typů trhlin. [2]

Ortotropní vrstva

Vyztužené plasty vznikají až při výrobě konstrukčních dílů a vykazují výraznou nehomogenitu a anizotropii. To musí být zohledněno nejen při vyšetřování jejich vlastností, ale též při výrobě zkušebních těles. Z důvodů anizotropie je k charakterizování vyztužených plastů nutný podstatně větší počet hodnot než u platů vyztužených. Pro svoji vysokou pevnost jsou vyztužené plasty vhodné pro tenkostěnné konstrukce nacházející se v tzv. stavu rovinné napjatosti. Tato napjatost existuje např. v desce, která je zatížena silami působící v její rovině. V pravouhlém souřadném systému s osami o_x , o_y je přetvoření popsáno normálovými deformacemi ε_x , ε_y a zkosem γ_{xy} , které jsou vyvolány napětím σ_x , σ_y , τ_{xy} . [2]

Hookeův zákon vyjadřuje lineární závislost mezi složkami přetvoření a napětí. U kompozitů se nejčastěji jedná o tzv. ortotropii (ortogonální anizotropii). Ortotropní deska má dvě na sebe kolmé osy symetrie (o_x a o_y), tzv. osy ortotropie. Pro přetvoření a napětí ve směru os ortotropie, ve směru kterých probíhají např. vlákna tkaniny nebo netkané textilie. [2]

Rovinná ortotropní vrstva je charakterizována čtyřmi elastickými charakteristikami: třemi moduly pružnosti E_x , E_y , G_{xy} a Poissonovým číslem ν_{xy} (x zde znamená směr kontrakce vyvolané zatížením ve směru y). Pro obecný systém souřadnic o_1 a o_2 je nutný větší počet elastických veličin, ty však lze stanovit pomocí zmíněných čtyř základních elastických charakteristik a úhlu α . [2]



Obrázek 8 Znáornění hlavních os ortotropního laminátu [2]

3.1.1 Tahová zkouška

Pro kompozity je navrženo mnoho geometrií zkušebních těles a tvarů v příslušných normách (ČSN EN ISO 527-1 až 5), které zohledňují stavbu kompozitu. U laminátů s výztuží ve formě tkaniny a jednosměrně vyztužených laminátů se pro zkoušky v tahu osvědčila tělesa prizmatická se zesílením v místě upnutí. [2]

Materiál zesílení má mít modul pružnosti přibližně rovný modulu zkušebního tělesa a zesílení má být na konci ve směru k měrné délce tělesa zkoseno. To proto, aby se snížil vliv koncentrace napětí. Síla působí minimálně 10 mm od konců zesílení. [2]

Pevnost v tahu ve směru kolmo k vláknům lze mj. měřit na vinutých plochých zkušebních tělesech. Při měření elastických charakteristik (modulů a Poissonova čísla) musí být tělesa vyříznuta ze zkušební desky přesně ve směru osortotropie. Rychlost zatěžování je 1% délky tělesa za minutu, přičemž nemá maximální deformace překročit 0,5 %, aby nenastalo ovlivnění oblastmi, kde se již tvoří poškození. Při dostatečně malé deformaci je modul pružnosti ve směru osy x: [2]

$$x = \frac{F \Delta l}{A_0 l_0} \Rightarrow x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (1)$$

kde je:

A_0 - původní průřez zkušebního tělesa uvnitř měrné délky l_0

F – zatěžovací síla

l_0 – původní měrná délka

ε_x – deformace ve směru x

σ_x – napětí ve směru osy x

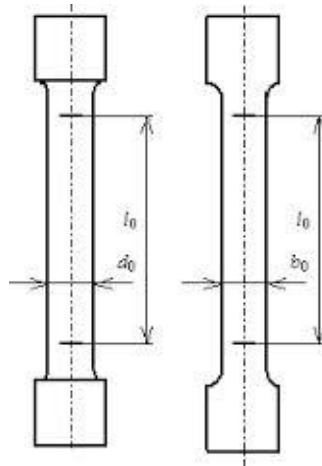
Přetvoření se obvykle snímají odporovými tenzometry nebo průtahoměry. [2]

Šířka tělesa je 25 mm, (přípustná je i menší šířka, např. 10 mm), tloušťka 2 až 4 mm, celková délka 250 mm, pracovní délka 150 mm, u tělesa pro určení pevnosti kolmo k vláknům 95 mm. Na koncích pásků jsou epoxidovým lepidlem přilepeny plechové (obvykle Al nebo slitina Al) příložky o tloušťce cca 3mm. Pro upevnění tělesa v trhacím stroji se pou-

žívají pneumatické nebo hydraulické čelisti. K přesnému určení podélné a příčné deformace (prodloužení a příčné zúžení) je používán elektronický průtahoměr. [26]

Výsledky tahové zkoušky jsou:

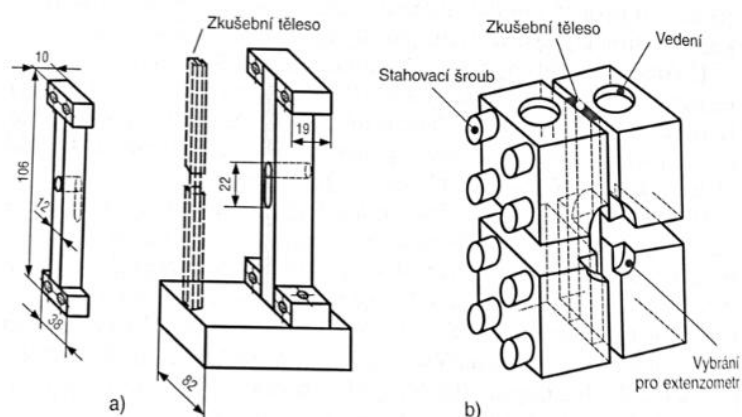
- modul pružnosti v tahu E_1 a E_2
- Poissonův součinitel ν_{12}
- pevnost v tahu σ_{p1} a σ_{p2}
- poměrné prodloužení při přetržení



Obrázek 9 Příklad zkušební tělesa pro zkoušku v tahu jednosměrně, izotropně i anizotropně vystuženého plastového kompozitu [20]

3.1.2 Tlaková zkouška

Z důvodů nebezpečí ztráty stability při určování pevnosti v tlaku jednosměrně vyztuženého laminátu musí být zkušební vzorek pečlivě navržen. Pro tyto účely jsou vhodná pravoúhlá prizmata, trubky nebo válce, neboť zajišťují symetrické zatížení. [2]



Obrázek 10 Modifikované přípravky pro zkoušku pevnosti v tlaku s opěrným provedením: a) Přípravek vyvinutý v Boeing (dle ASTM D 659, DIN 65375); b) Přípravek CLC (Combined-Loading-Compression podle ASTM D 6641) [2]

Lom nastává vlivem smyku při dobré adhezi vlákno-matrice. Při adhezi špatné vlivem delaminace. Aby se odstranilo rozvrstvení v kontaktní rovině se zatěžovacím zařízením, byly navrženy různé opěrné přípravky, sloužící také k vyloučení vyloučení zkušební tělesa. Při tlakovém zatížení je obtížné v celém zkušebním tělese realizovat jednoznačně čistý stav napjatosti během celé zkoušky. Plochy, které slouží k zavedení vnějšího zatížení, musí být zcela rovné a rovnoběžné. Zeslabení tloušťky stěny vede k rozdílům v odolnosti vůči ztrátě stability. Největší pevnost v tlaku mají kompozity s vysoce tuhými vlákny o velkých průměrech, tj. vlákny bóru nebo SiC vyrobených depozicí par na vláknový substrát (CVD metoda). [2], [26]

Zkušební tělesa pro tlakové zkoušky mohou být opět ve tvaru pásku, ale s pracovní částí mnohem kratší (použije-li se těleso s příložkami, je mezi nimi ponechána pracovní část dlouhá 10 mm). Těleso bez příložek (ve tvaru hranolku) musí být při tlakové zkoušce vedeno, aby nedošlo k namáhání ve vzpěru. [26]

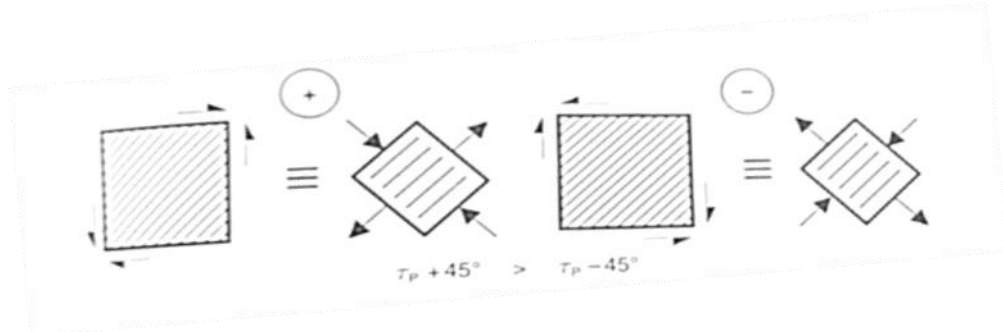
Výsledky tlakové zkoušky jsou: [2]

- modul pružnosti v tlaku E_d
- Poissonův součinitel v tlaku ν_d
- pevnost v tlaku σ_{pd1} a σ_{pd2}
- poměrné zkrácení při porušení

3.1.3 Smyková zkouška

Ke zvláštnosti kompozitních materiálů patří též závislost pevnosti ve smyku na směru zatížení. Únosnost jednosměrně vyztuženého laminátu při tahu ve směru vláken je mnohem vyšší než ve směru kolmo na vlákna. Při namáhání tlakem je tomu naopak. To způsobuje závislost pevnosti ve smyku na směru namáhání. Je-li jednosměrný laminát namáhán smykovým napětím působícím ve směru skloněném ke směru vláken o úhel 45° , pak ve směrech rovnoběžném a příčném k vláknům působí jen normálová napětí. Působí-li smyková

napětí ve smyslu označeném jako +, pak je příčné namáhání tlakové. Při smyslu označeném – je toto napětí tahové. Z toho plyne, že pevnost ve smyku je v druhém případě menší než v prvním [2]



Obrázek 11 Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení [2]

Realizace namáhání při prostém smyku je obtížná, nejvhodnějším jsou zkušební tělesa tvaru trubky namáhaná krutem. Pro pevnost ve smyku platí: [2]

$$\tau = \frac{2M_T R_M}{\pi(R^4 - r^4)} \quad (2)$$

kde je:

M^T – kroutící moment při porušení

R^M – střední poloměr

3.1.4 Ohybová zkouška

Pevnost laminátu při ohybu je nejvíce závislá na vrstvení a to u laminátů s jednoznačným směrem tahového namáhání (listová pera, nosníky). Proto krajní vrstvy musí mít vlákna orientovaná ve směru tahového napětí. [26]

Modul pružnosti v ohybu u laminátů se neshoduje s modulem pružnosti naměřeným při tahovém namáhání. K měření ohybových vlastností je používáno buď tříbodového nebo čtyřbodového ohybu, podpory jsou válečky o průměru 12,7 mm a délce 63,5 mm. Poměr vzdálenosti tloušťky tělesa k podpěrám by měl být minimálně 16:1, aby smykové zatížení bylo malé. [26]

Při stanovení elastických a pevnostních charakteristik u zkoušky ohybem se předpokládá lineární rozdělení normálových napětí po průřezu. Hodnota pevnosti v ohybu závisí výrazně na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině. Zkouška ohybem se dělí na tři nebo čtyř bodové uložení. Výhoda zkoušky čtyřbodovým ohybem je v konstantním ohybovém momentu M_0 po celé délce rozteče uložení vzorku, což je především důležité při stanovení modulu pružnosti. [2]

Při zkoušce tří bodovým ohybem existuje ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v bodě zatížení, tj. ve středu délky tělesa. Maximální smykové napětí leží mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělesa. Stanovené veličiny mají v první řadě význam srovnávací. Také zde je nutné sledovat druh porušení. Akceptovatelný druh porušení ohýbaného nosníku je porucha vzorku lomem vyvolaným tlakem nebo tahem. Rovněž při ohybu existuje řada norem pro různé druhy vyztužení, např. ČSN EN ISO 14 125. Měření je třeba provádět na dostatečně štíhlých vzorcích. S rostoucím štíhlostním poměrem (poměr rozteče podpor a tloušťky vzorku) až do úrovně rovné 10 výrazně stoupají naměřené hodnoty pevnosti a modulu pružnosti. [2]

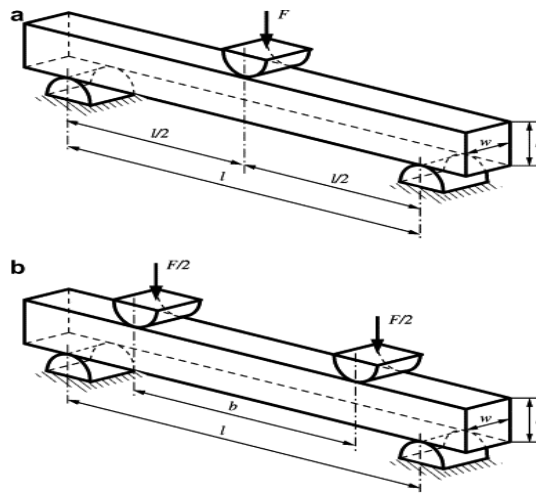
Tříbodový ohyb

Při zkoušce tříbodovým ohybem je zkušební těleso zatíženo osamělou silou F , která působí uprostřed mezi dvěma podporami tak dlouho, dokud se těleso nezlomí.

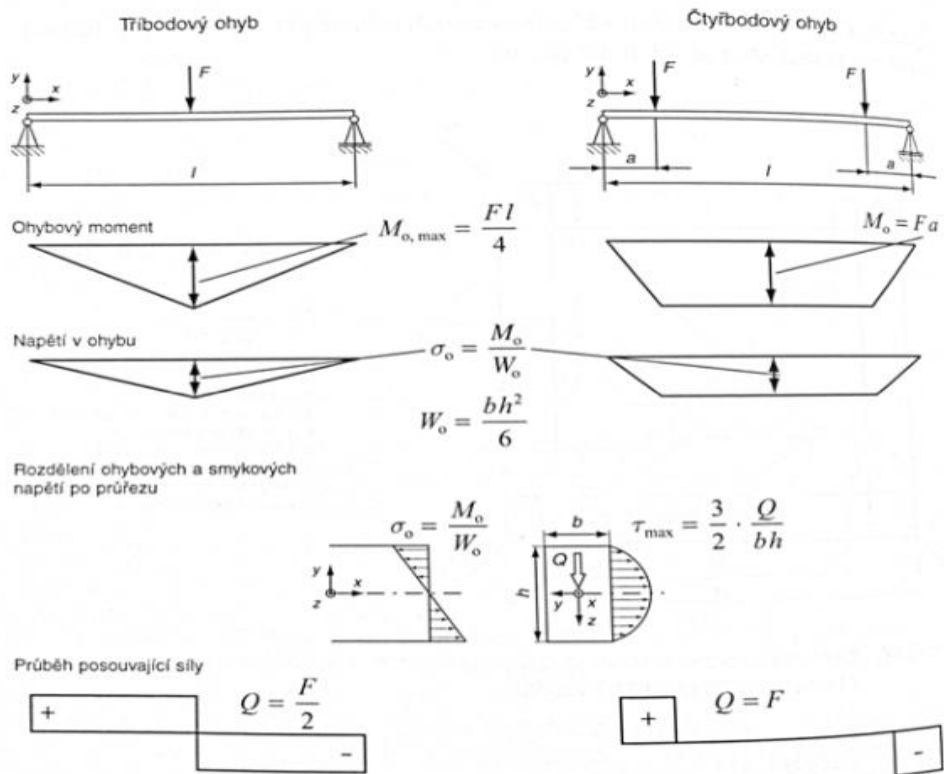
Ohybový moment vyvolaný silou F způsobí v horních vláknech průřezu tlakové napětí, ve spodních napětí tahové. Výhodou této zkoušky je, že můžeme změnou vzdálenosti podpor dosáhnout velkých ohybových momentů i při malé zatěžující síle. [2]

Čtyřbodový ohyb

Při zkoušce čtyřbodovým ohybem je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny působícími v jedné třetině vzdálenosti podpěrných trnů. Rozložení ohybového napětí na povrchu vzorku během čtyřbodového ohybu je v porovnání s tříbodovým ohybem odlišné v tom, že místo maximálního ohybového napětí není lokalizováno do úzké oblasti povrchu vzorku, ale je rozloženo na určité délce vzorku. Tato délka je rovna vzdálenosti zatěžovacích trnů. [2]



Obrázek 12 Tříbodový a čtyřbodový ohyb[24]



Obrázek 13 Průběh ohybových momentů u tříbodového a čtyř bodového ohybu[2]

Přehled pevností v hlavním materiálovém směru σ_x

Tabulka 2 Střední hodnoty pevností v jednom z hlavních materiálových směrů σ_x , vypočítané ze širokého spektra publikovaných hodnot. [5]

Obsah skla v hm %	45	50	55	60	Jednotky
Pevnost v tahu	230	280	320	350	MPa
Pevnost v tlaku	200	220	250	260	MPa
Pevnost v ohybu	400	430	450	480	MPa
Smyková pevnost v rovině mat.	—	95	110	—	MPa
Interlaminární pevnost	18	25	26	29	MPa

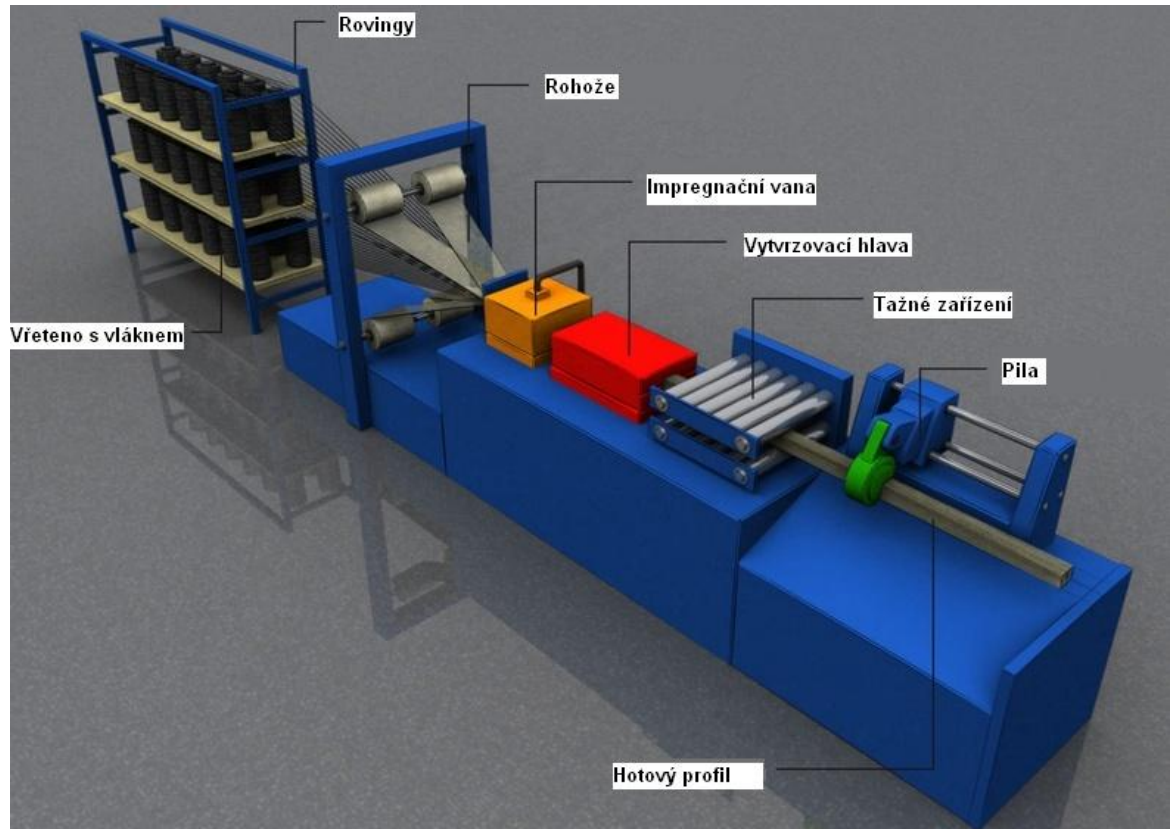
4 VÝROBA KOMPOZITU TECHNOLOGIÍ PULTRUZE

Výroba kompozitu je velice obsáhlou oblastí, které se s ohledem na rozsah této práce není možné věnovat v plném rozsahu. Z tohoto důvodu práce zaměřuje svou pozornost především na výrobu kompozitů vyráběných technologií pultruze. [9]

4.1 Technologie pultruze

Pultruze je nepřetržitý kontinuální proces výroby kompozitních profilů, při kterém jsou zpevňující vlákna napouštěna termoplastickou pryskyřicí. Metoda zaručuje opakovaně konstantní kvalitu. Jde o proces, který se používá od 50. let minulého století. Pryskyřicí napuštěná vyztužená vlákna ve formě cívek se skelným vláknem, tkanin nebo rohoží jsou protahována vyhřátými tvářecími formami, kde později probíhá i jejich vytvrzování. Zde dochází k tvarování při současném zesíťování pryskyřice. Před vytvrzovací formou je sekce, kde dochází k dokonalému nanesení polymerní matrice na vyztužovací materiál (impregnace). Výztuž prosycena polymerní matricí je vedena přes stírací desku do tvarovací a vytvrzovací formy, kde se odstraní přebytečná polymerní matrice. Forma má v této fázi tvar budoucího výrobku a je udržována na předem dané teplotě potřebné k vytvrzení pryskyřice. Vytvrzený profil je poté odtahován a řezán na potřebnou délku. Tolik o definici pultruze pouze ve zkratce. Podrobnější popis průběhu celé technologie je popsán dále. [9]

Základními částmi pultruzní linky jsou: zásobník výztuží a naváděcí systém, impregnační sekce a přetvarování impregnované výztuže, tvarovací a vytvrzovací forma, tažná sekce, dělicí sekce. Rovinky a rohože jsou taženy přes impregnační vanu a vytvrzovací tažným zařízením k pile.



Obrázek 14 Výrobní postup na pultruzní lince [14]

4.2 Popis jednotlivých částí pultruzní linky

V dnešní době existuje několik způsobů strojního uspořádání pultruzní linky, které může být jak horizontální, tak vertikální. Popis jednotlivých částí pultruzní linky je uveden dále.

[4], [9]

➤ Zásobník výztuží a naváděcí zařízení

- Nejdůležitějších součástí celé technologie. Správné prostorové uspořádání výztuže v rámci taženého profilu je nutným předpokladem dosažení maximálních užitečných vlastností kompozitu i jejich požadované reprodukovatelnosti.
- Zásobník výztuží se skládá ze stojanu pro rovingy a držáků pro zavěšení rolí rohoží a tkanin. Roving je ve stojanu umístěn buď tak, že válcové cívky stojí vertikálně na policovém typu stojanu (vlákno se odvíjí středem cívky) nebo tak, že jsou zavěšeny středem na horizontálně umístěných trnech.
- Držáky tkanin a rohoží jsou ve formě horizontálních tyčí kolmých k ose taženého profilu a umístěných nad i pod jeho osou. Pro tažení běžných profilů je počet cívek rovingu v rozmezí 10-100 a počet rohoží 1-5.
- Naváděcí zařízení pro roving a rohože je většinou ve formě desek kolmých ke směru tažení se soustavou otvorů a štěrbin. Otvory, kterými jsou vlákna a rohože postupně prostorově uspořádávána, by měly být opracovány nebo obloženy tak, aby nedocházelo k poškozování vláken. To vede ke zhoršování vlastností taženého profilu.

➤ Impregnační sektor a přetvarování

- Smáčení výztuže pojivem (pryskyřicí) je dalším nepostradatelným krokem pro dosažení požadovaných vlastností vyráběného kompozitu. Nedokonalá impregnace zhoršuje mechanické vlastnosti kompozitu, odolnost proti agresivnímu prostředí, kvalitu povrchu atd.
- Existují dva základní typy impregnace. První je systém s otevřenou lázní, druhý tvoří tlaková impregnace buď ve speciální uzavřené komoře, nebo přímo ve vytvrzovací hlavě. Díky jednoduchosti a variabilitě je systém s otevřenou lázní používán více.

- Pro dosažení důkladné impregnace výztuže je v lázni umístěna soustava tyčí (breaker bars), která nutí výztuž procházející lázní měnit směr a tím umožnit poměrně viskózní pryskyřici proniknout důkladně do celého objemu výztuže a také vytlačí z profilu vzduchové bubliny.
- Po výstupu z lázně je na horní a spodní povrch impregnované výztuže nanášena povrchová rouška. Tato velmi tenká tkaná či netkaná rouška je vyrobena většinou ze syntetických vláken, nejčastěji polyesterových a slouží k dosažení kvalitního povrchu vytvrzeného profilu a ke zlepšení odolnosti proti UV záření. V některých speciálních případech se používají i roušky vyrobené ze skleněných, uhlíkových či kevlarových vláken

➤ **Tvarovací a vytvrzovací hlava**

- Vytvrzovací hlava může být vyhřívána buď elektricky, nebo olejovým topením a bývá konstruována tak, že obsahuje 1 - 4 teplotní zóny. Počet teplotních zón závisí na procesních parametrech (typ pryskyřice, požadovaná průchodnost linky, délka tvarovací hlavy, atd.) než čistě chemickými požadavky spojenými s průběhem vytvrzovací reakce.
- Podél vytvrzovací hlavy jsou nainstalovány kontrolní termočlánky, aby bylo možno teplotní profil hlavy udržovat konstantní a sledovat maximální teplotu. Vytvrzovací hlava je zpravidla dvoudílná s leštěným povrchem. Pouze ve speciálních případech, kdy je požadována vyšší trvanlivost hlavy se k jejich výrobě používá speciálních tvrzených ocelí. Z tohoto důvodu je cena vytvrzovacích hlav mnohem nižší ve srovnání s formami pro vstřikovací lisu.

➤ **Tažné zařízení**

- Je zařízení, které mechanicky vytahuje vytvrzený profil konstantní rychlostí a zajišťuje tak i pohyb výztuže přes impregnační zónu a vytvrzovací formu. Tažným zařízením mohou být dvě soustavy dvou proti sobě jdoucích hydraulicky ovládaných desek posouvajících se a předávajících si vytahovaný profil anebo dva proti sobě otáčející se pásy vyrobené z různých materiálů jako je dřevo a pryž. Tažné zařízení bývá umístěno na dvou místech a to za vytvrzovací hlavou a před dělicím zařízením.

- **Dělicí zóna** - Mezi prvním a druhým stupněm tažného zařízení bývá umístěno měřicí ústrojí, které pomocí ovládacího zařízení řídí zařízení v dělicí zóně. Pomocí pily je vytvrzený profil dělen na požadovanou délku.
- Po ukončení řezání se vrací zpět do výchozí polohy. Řeznými nástroji jsou kotouče obsahující diamantový prach. Je možno použít i ručního řezacího zařízení, ale délka profilu je poté mírně nepřesná.

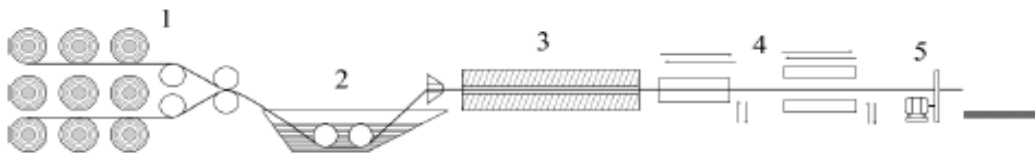
➤ Pohyblivá pila

- Tato část slouží k řezání taženého profilu na požadovanou délku. Je umístěna za tažným mechanismem.
- Vzhledem k tomu, že se jako výztuže používá především skleněných vláken, je třeba použít k řezání kotouče, jejichž ostří je pokryto diamantovým práškem. V případě synchronizovaného řezání je součástí celého systému i chlazení břitů a systém manipulace s nařezanými profily

4.3 Způsoby výroby kompozitních materiálů pultruzí

Existují principiálně *dva základní způsoby impregnace*. S otevřenou lázní a s uzavřenou tlakovou impregnací (vstřikováním). Oba způsoby jsou zobrazeny na obr. níže. [13]

Při otevřeném postupu se vlákna vedou buďto přes ponořovací válec do impregnační vany s pryskyřicí, kde se prosycují matricí a tato směs prosycených vláken a matrice pokračuje do formy, kde dojde k zformování a k vytvrzení do požadovaného tvaru. [13]



Obrázek 15 Návrh pultruzní linky s otevřenou lázní a odtahem pomocí podavačů [4]

Popis linky: [4]

- 1) Zásobník rovingů
- 2) nádoba, ve které se vlákna namočí pryskyřici
- 3) Vytvrzovací forma
- 4) Odtah pomocí podavačů
- 5) Pila

- Uzavřený postup je druhá možnost. Jedná se o tzv. vstřikování, při němž dochází k vtažení výztuže do formy, do které je vstřikována pryskyřice. Ve formě je profil prohříván a dochází k jeho vytvrzování. Ke konečnému vytvrzení dochází v poslední části výrobního zařízení. Profil, který opouští výrobní zařízení je zcela tvarově stálý a pevný. Následně je profil tažen k pile, která řeže profily na zvolenou délku. Tímto výrobním postupem se dosahují vyšší objemy obsažených vláken, lepší impregnace a snížení emise styrenu. [12]



Obrázek 16 Nákres pultruzní linky s přímým přívodem pryskyřice do pultruzní hlavy a odtahem pomocí pásů

[4]

Popis linky: [4]

- 1) Zásobník rovingů
- 3) Vytvrzovací forma
- 4) Odtah pomocí pásů
- 5) Pila

Další způsoby výroby kompozitních materiálů pultruzí: [26]

- U novějších pultruzních strojů je pryskyřice do tvarovací hlavy vstřikována (**RIP, “Resin Injection Pultrusion”**), což zajistí lepší prosycení výztuže a odstranění par reaktivního rozpouštědla při použití UP a VE pryskyřic. Nekonečný profil je řezán na potřebné délky strojní pilou vybavenou diamantovým kotoučem. Pultruzí se vstřikováním lze vyrábět i sendvičové panely.
- **Pulforming** - Pultruze lze použít i pro výrobu zakřivených profilů. Jde o kombinaci pultruze a BMC (“Bulk Molding Compaund”) technologie. Tažený profil je pomocí mikrovlnného ohřevu ohřát, vložen polotovar BMC a profil je dotvarován a vytvrzen.
- **PDM (“Post Die Manipulation Pultrusion”)**, neboli „3D“ pultruze umožňuje řízené proměnné zakřivení profilu. Vlastní vytvrzení profilu nastává UV zářením za tvarovací částí (tažnicí).
- **“Pullwinding” (“In-Line Winder“)** - Je to kontinuální technologický proces kombinující ovíjení a pultruzi. Výhodou je lepší kombinace podélné a příčné pevnosti.

4.4 Použití technologie pultruze

Výrobky vyrobené pultruzí, jejichž obsah vyztužení je větší než u běžných kompozitních materiálů, mají nízkou hmotnost, vynikající mechanické vlastnosti, vysokou korozní odolnost, nízkou tepelnou vodivost, teplotní roztažnost srovnatelnou s kovy, vysokou rozměrovou stálost a jsou elektricky nevodivé. Další výhodou jsou nízká navlhavost, téměř neomezená velikost profilů o různých tloušťkách stěny, velké množství možných průřezů, nekonečná délka, přesné a reprodukovatelné uložení vyztužovacího materiálu a nízké výrobní náklady. Právě proto je tato technologie vhodná právě k výrobě relativně cenově výhodných kompozitových profilů. [13]

Kvalita těchto kompozitů zhotovených za vysoké teploty při vytvrzování a při konstantních podmínkách podstatně převyšuje ručně skládané a za studena tvrzené kompozity. Pultruzí se vstřikováním lze vyrábět i sendvičové panely. V současné době se pro pultruzi používají také prerepregy, profily je potom možno použít pro primární prvky letadel Pultruze prepe-

gu s uhlíkovými vlákny a epoxidovou pryskyřicí je však nepřetržitý proces, protože epoxidová pryskyřice pomaleji reaguje a profil se musí před odtažením nechat vytvrdit alespoň na 70%. [26]

Tažené profily jsou jednosměrně orientované lamináty s vynikajícími mechanickými vlastnostmi ve směru vláken, ale horšími napříč vlákny. To ale vyplývá s jejich struktury. Tyto vlastnosti je předurčují jako výborný konstrukční materiál, který je možno používat v elektrotechnice, pro dobré izolační vlastnosti profilů a i v chemickém průmyslu pro jejich dobrou chemickou odolnost. Typickou aplikací v elektrotechnice je nevodivý žebřík, izolanty i celé sloupy elektrického vedení. Ve stavebnictví se používají jako výztuži do betonu, protihlukových bariér, náhrada části poškozených mostních konstrukcí, podpůrných konstrukcí. V dopravě se používají jako nosníky a nosné i nenosné panely nákladních vozů, autobusů a železničních vagónů, části lodních trupů. Dále existuje několik netypických aplikací pultruze, jako např. výroba velkých zásobníků přímo na místě pomocí mobilní pultruzní linky, či výroba pultruzních profilů s pěnovou strukturou vytvrzené polymerní matrice zvaná vakuová pultruze. Nevýhodu horších mechanických vlastností v příčném směru na vlákna částečně odstraňuje pultruze kombinovaná s navíjením, tzv. pullwinding. [13]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je studium speciálních kompozitních materiálů připravených technologií pultruze, zjistit jejich mechanické vlastnosti, prozkoumat vliv vyztužení v kombinaci s jinými druhy materiálu (keramiku, umělý mramor, atd.)

Cíle bakalářské práce můžeme shrnout do následujících bodů:

I. Teoretická část bakalářské práce

1. Polymerní kompozitní materiály, vlastnosti, výhoda a nevýhody
2. Zpracovatelské technologie kompozitních materiálu, definice a význam jednotlivých systémů tvořících kompozitní materiál
3. Mechanické zkoušky kompozitních materiálu – teoretický přehled

II. Experimentální část bakalářské práce

1. Technologie pultruze – seznámení se s jednotlivými částmi a technologickými postupy
2. Výroba pultruzních profilů s kontinuální vyztuží pomocí pultruze (skelné, uhlíkové vlákna)
3. Příprava zkušebních tělísek pro experimentální pozorování, zkušební tělíška dle možnosti otestujte i v kombinaci s jinými druhy materiálu, s cílem poukázat na význam zpevnění.
4. Experimentální testování dle zvolených norem – zkouška ohybových vlastností dle CSN EN 178 pro navržené kombinace materiálů
5. Vyhodnocení naměřených výsledků a jejich vzájemné srovnání.
6. Závěr

6 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ TECHNOLOGIE PULTRUZE

Technologie pultruze a její teoretické vymezení je uvedeno v kapitole č. 4 teoretické části této práce. S ohledem na detailní informace uvedené v teoretické části, jsou zde uvedeny pouze základní informace o této technologii zpracování kompozitů.

V dalších kapitolách se práce věnuje využití technologie pultruze na konkrétním příkladu firmy Willer.

Pultruze je nepřetržitý kontinuální proces výroby kompozitních profilů, při kterém jsou zpevňující vlákna napouštěna termoplastickou pryskyřicí. Metoda zajišťuje opakovaně konstantní kvalitu. Pryskyřicí napuštěná vyztužená vlákna ve formě cívek se skelným vláknem, tkanin nebo rohoží jsou protahována vyhřátými tvářecími formami, kde později probíhá i jejich vytvrzování. Forma má tvar budoucího výrobku a je udržována na předem dané teplotě potřebné k vytvrzení pryskyřice. Vytvrzený profil je poté odtahován a řezán na potřebnou délku. [9]

6.1 Výhody a nevýhody výroby technologií pultruze

Hlavní výhody pultruze: [5]

- vysoká produktivita,
- vysoký stupeň automatizace,
- minimální nároky na lidskou práci,
- nekonečná délka vyrobeného profilu,
- prakticky neomezená variabilita tvaru průřezů,
- vysoká reprodukovatelnost fyzikálních vlastností

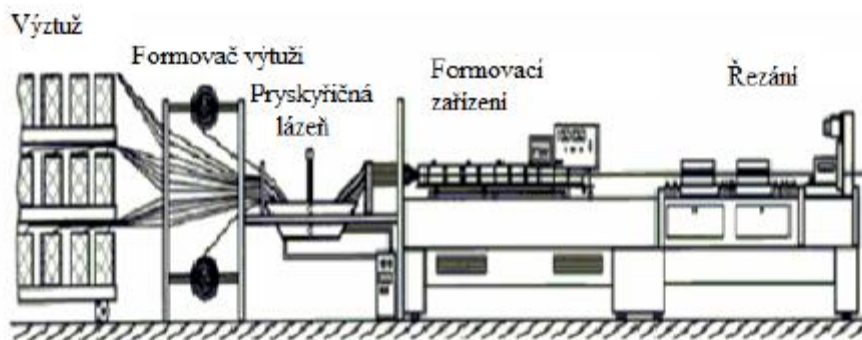
Nevýhody pultruze: [5]

- relativně drahý provoz,
- nutnost velmi kvalitního řídicího systému,
- poměrně velké investiční náklady na pořízení technologie

6.2 Princip výroby kompozitních materiálů pultruzí ve firmě Willer

Existují principiálně dva základní způsoby impregnace, a to otevřená lázeň s přímým máčením rovingů do pryskyřice a uzavřená tlaková impregnace (vstříkování).

Materiál vzorků dodaných firmou Willer byl vyroben postupem s otevřenou lázní. Vlákna vedou přes ponořovací válec do impregnační vany s pryskyřicí, kde se prosycují matricí a tato směs prosycených vláken a matrice se vede do formy, kde dojde ke konečnému zformování a k vytvrzení do požadovaného tvaru.



Obrázek 17 Schéma výrobní pultruzní linky [25]

6.2.1 Vlastní výroba kompozitních profilů testovaných vzorků

Výrobní linka, na které byly vyrobeny vzorky pro náš účel testování, je zobrazena na obrázku pod tímto textem. Linka se skládá ze zásobníků rovingů, od kterých bylo navedeno šedesát pramenů. Ty pokračovaly přes naváděcí hřebeny do nádoby, ve které se vlákna prosytily pryskyřicí. Po nasycení vlákna pokračují přes stírací hřebeny do vyhřáté formy, ve které dojde k vytvrzení. Vytvořený profil je odtahován pěti válci, přičemž první z nich je pryžový, zbylé pak ocelové. Hotový výrobek je následně motán do rolí a připraven pro další operace. Rychlost výroby se dá regulovat frekvenčním měničem, který linka obsahuje. Pro naše účely byla zvolená rychlost 12 a 15 m/hod. Celou linku pak pohání elektromotor.



Obrázek 18 Výrobní pultruzní linka firmy Willer

Jedinou podmínkou firmy bylo zachovat firemní „know how“ systému navádění rovingů přes naváděcí hřebeny do nádoby, ve které se pramence nasycovaly pryskyřicí. Dále pak uspořádání stíracích hřebenů na přívodu pramenců do formy. Proto nemohl být tento systém detailněji zachycen.



Obrázek 19 Uskutečnění odtahu pultruzní linky pomocí ocelových válců 1.



Obrázek 20 Uskutečnění odtahu pultruzní linky pomocí ocelových válců 2.

7 SLOŽENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ A JEJICH PŘÍPRAVA

K testování nám bylo celkem poskytnuto šest vzorků. Ty byly označeny písmeny A, B, C, D, E a F pro lepší rozlišitelnost.

Vzorek označen pracovním názvem A je složen z jednosměrně uložených přímých skelných rovingů. Matrice, kterou se rovingy prosycují, je Epoxid 520 1787. Hmotnostní % skleněné výstuže je 82%. Tloušťka materiálu je 1 mm. Nosný materiál, na který byl profil nalepen, je keramická deska. Celý proces výroby probíhá při 160 °C a rychlosti výroby 15 m/hod.

Vzorek označen jako B má některé parametry výroby stejné. Ty jsou tedy matrice, výrobní teplota, tloušťka materiálu, materiál nosné plochy a uspořádání rovingů. Právě v materiálu rovingů je oproti vzorku A největší rozdíl. Zatím co u vzorku A se použily skleněná vlákna, vzorek B má vlákna uhlíková. Další rozdíl je v hmotnostním % výstuže. To je 83%. Celý proces výroby vzorku B probíhá při rychlosti výroby 12 m/hod.

Vzorek C je složen z jednosměrně uložených přímých skelných rovingů. Matrice je u všech vzorků stejná, tedy Epoxid 520 1787. Hmotnostní % skleněné výstuže je 82%. Tloušťka materiálu je 1 mm. Nosný materiál, na který byl profil nalepen je umělý mramor. Celý proces výroby probíhá při 160 °C a rychlosti výroby 15 m/hod.

Vzorek D je složen z rovingů uhlíkových, ty jsou uloženy také jednosměrně. Hmotnostní % uhlíkových vláken bylo určeno na 83% při tloušťce 1 mm. Materiál, na který byl tento vzorek nalepen je umělý mramor. Rychlost výroby byla 12 m/hod při teplotě 160 °C.

Vzorek E a F jsou do testování zahrnuti pro lepší porovnání výsledků. Tvoří je samostatné profily, které nebyly nalepeny na žádný další materiál. Tím získáme samostatné hodnoty pouze samotných pultruzních profilů tloušťky 1 mm. Vzorek E tvoří skelné vlákna, oproti tomu vzorek F vlákna uhlíková.

7.1 Přehled složení testovaných vzorků

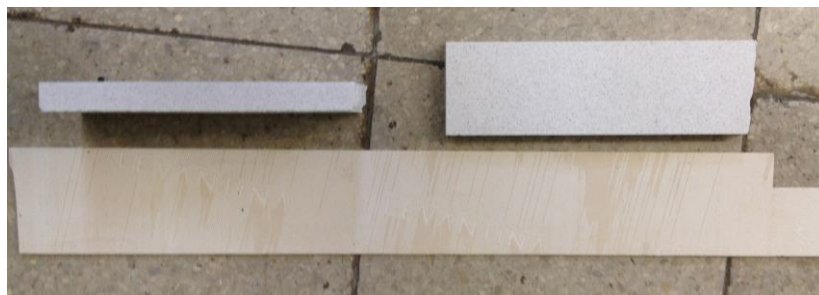
Tabulka 3 Přehled složení testovaných vzorků

Vzorek	Uložení vláken	Matrice	Hm.% výztuže [%]	Rychlost odtahu [m/hod]	Tloušťka mat. [mm]	Teplota [°C]	Materiál nosné plochy vzorku
A	Jednosměrná/přímé skleněné rovingy	Epoxid 520 1787	82	15	1	160	Keramika
B	Jednosměrná/přímé uhlíkové rovingy	Epoxid 520 1787	83	12	1	160	Keramika
C	Jednosměrná/přímé skleněné rovingy	Epoxid 520 1787	82	15	1	160	Umělý mra- mor
D	Jednosměrná/přímé uhlíkové rovingy	Epoxid 520 1787	83	12	1	160	Umělý mra- mor
E	Jednosměrná/přímé skleněné rovingy	Epoxid 520 1787	82	15	1	160	-
F	Jednosměrná/přímé uhlíkové rovingy	Epoxid 520 1787	83	12	1	160	-

7.2 Příprava vzorků

Profily byly dodány ve formě pásů, které byly vyrobeny technologií pultruze. Dodaný materiál bylo potřeba upravit na požadovaný normovaný tvar, aby bylo možné vzorky změřit.

Vyrobené pásy z uhlíku a skelného vlákna byly orýsovány na daný rozměr. Poté byly dle normy nařezány na šestnácti násobek tloušťky testovaného materiálu pomocí úhlové brusky. Pro lepší vyhodnocení a porovnání výsledků byly výrobky s označením A, B, nalepeny na keramickou. Výrobky C a D se nacházeli na desce mramorové. Pro dokonalé spojení byly dány do pece, kde proběhlo vytvrzení lepidla a vysušení. Tato operace trvala přibližně 90 minut.



Obrázek 21 Keramická a mramorová deska před nařezáním na testovaný rozměr



Obrázek 22 Příprava mramorové desky pro testování



Obrázek 23 Orysování mramorové desky na rozměr testovaného vzorku

Tabulka 4 Přehled rozměrů testovaných vzorků

Vzorek	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Materiál nosné plochy vzorku
A	4	64	88	keramika
B	4	64	88	keramika
C	21	336	21	mramor
D	21	336	21	mramor
E	1	40	52	-
F	1	40	52	-

8 POPIS OHYBOVÉ ZKOUŠKY DLE ČSN EN ISO 178

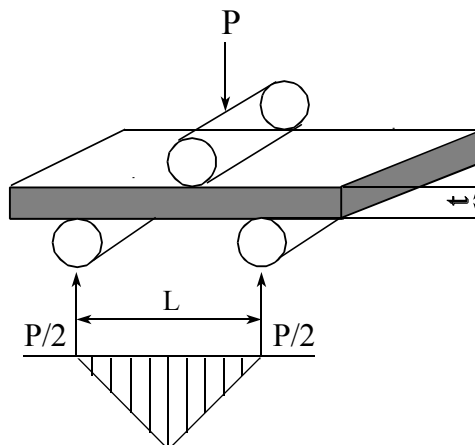
Všechny materiály v této práci budou testovány na tříbodový ohyb dle normy ČSN EN ISO 178

8.1 Tříbodový ohyb

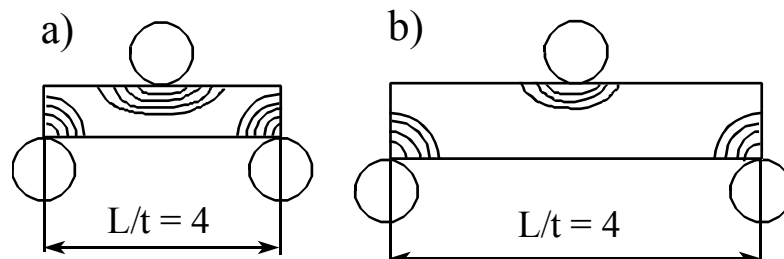
Při zkoušce tříbodovým ohybem je zkušební těleso zatíženo osamělou silou F , která působí uprostřed mezi dvěma podporami tak dlouho, dokud se těleso nezlomí.

Ohybový moment vyvolaný silou F způsobí v horních vláknech průřezu tlakové napětí, ve spodních napětí tahové. Výhodou této zkoušky je, že můžeme změnou vzdálenosti podpor dosáhnout velkých ohybových momentů i při malé zatěžující síle.

Zkouška v ohybu charakterizuje polymery z hlediska použitelnosti. Polymery dělíme na křehké (lámavé) a na houževnaté. Při této zkoušce na materiál působíme tlakem. [17]



Obrázek 24 Schéma tříbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu



Obrázek 25 Koncentrace napětí u vzorků rozlišné tloušťky (a: tenký vzorek, b: tlustý vzorek)

8.1.1 ČSN EN ISO 178: Plasty - Stanovení ohybových vlastností

Tato norma uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností plastů za definovaných podmínek. Je definováno standardní zkušební těleso, ale tam kde je to vhodné, lze volit alternativní rozměry těles. Je udána řada hodnot rychlostí zkoušky.

Metoda se používá ke zjištění chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstata zkoušky spočívá v zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítláčným trnem uprostřed jejich rozpětí (tříbodový ohyb). [17]

Metoda je vhodná pro následující materiály: [17]

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

Podpěry a zatěžovací trn

Poloměr trnu (R_1) a poloměr podpěr (R_2) musí být následující:

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

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

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

Přednostní typ tělesa

$$\text{délka } l = (80 \pm 2) \text{ mm}$$

$$\text{šířka } b = (10 \pm 0,2) \text{ mm}$$

$$\text{tloušťka } h = (4 \pm 0,2) \text{ mm}$$

Ostatní zkušební tělesa

Délka a tloušťka zkušební tělesa musí být ve stejném poměru jako u přednostního tělesa, tj.

$$\frac{l}{h} = (20 \pm 1) \text{ mm} \quad (3)$$

Hodnoty šířky b ve vztahu k tloušťce h

$$3 < h \leq 5 \quad b = (10 \pm 0,5) \text{ mm}$$

$$5 < h \leq 10 \quad b = (15 \pm 0,5) \text{ mm}$$

Rozpětí podpěr L se nastaví tak, aby vyhovovalo následujícímu vztahu (s přesností 0,5 %):

$$L = (16 \pm 1)h \quad (4)$$

Rychlost zkoušky se nastaví dle požadavků v předmetové normě zkoušeného materiálu. Nemá-li k dispozici, vybere se hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1% za minutu. To je rychlost zkoušky, která během 1 minuty způsobí průhyb tělesa co nejblíží 0,4 násobku jeho tloušťky (tzn. 2 mm/min pro přednostní těleso). [17]

Výpočet a vyjádření výsledků

Pevnost v ohybu - maximální napětí v ohybu, které zkušební těleso snese během zkoušky

Napětí v ohybu σ_f - jmenovité napětí vnějšího povrchu zkušební tělesa uprostřed rozpětí podpěr; počítá se dle vztahu: [17]

$$\sigma_f = 3FL/2bh^2 \quad (5)$$

kde F je zatěžující síla v newtonech, L rozpětí podpěr v milimetrech, b šířka zkušební tělesa v milimetrech, h tloušťka zkušební tělesa v milimetrech.

Modul pružnosti v ohybu E_f - pro stanovení modulu pružnosti v ohybu se vypočítají průhyby s_1 a s_2 odpovídající daným hodnotám deformace ohybem $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,0025$ dle rovnice: [17]

$$s_i = \varepsilon_{fi} L^2 / 6h \quad (6)$$

kde s_i je jednotlivá hodnota průhybu v milimetrech, ε_{fi} odpovídající deformace ohybem, L rozpětí podpěr v milimetrech, h tloušťka zkušební tělesa v milimetrech

Modul v ohybu vyjádřený v megapascalch se vypočítá dle rovnice:

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}) \quad (7)$$

kde σ_{f1} je napětí v ohybu, vyjádřené v megapascalch, stanovené pro průhyb s_1 , σ_{f2} je napětí v ohybu, vyjádřené v megapascalch, stanovené pro průhyb s_2 . [17]

9 CHARAKTERISTIKA ZKOUŠECÍHO STROJE

Měření byla provedena na zkušebním stroji ZWICK 1456 s použitím testovacího softwaru testXpert v7.11 od výrobce. Na stroji lze provádět zkoušky tlakové, ohybové a tahové. Různými přípravky se mohou na stroji provádět zkoušky mnohých tvarů a materiálů. Použité snímače síly jsou do 2,5 kN a do 20kN. Na zkoušecím stroji je možno využít i teplotní komory k měření při různých teplotách. Stroj je vybaven extenzometry pro zpřesnění měření modulu pružnosti. Všechny výpočty naměřených hodnot provádí software automaticky. Výsledky zaznamenává do tabulek a grafů

Technické údaje:

Tabulka 5 Technické údaje stroje ZWICK 1456

ZWICK 1456	
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače teploty	2,5 kN a 20 kN
Teplotní komora	-80 / + 250 °C
testXpert	Tah/Ohyb/Tlak

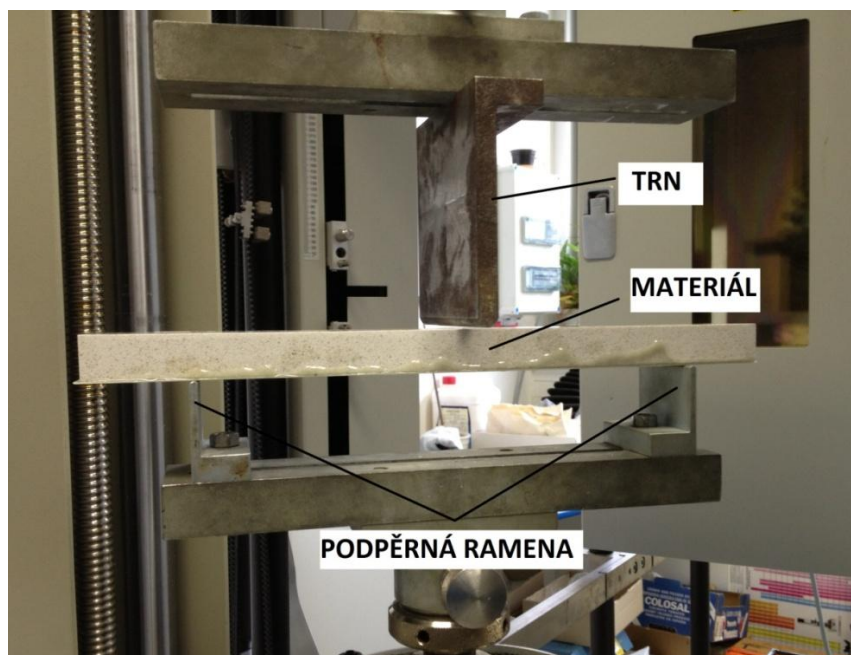


Obrázek 26 Zkušební stroj ZWICK 1456

Popis uložení vzorku v testovacím stroji ZWICK 1456

Pro úspěšné provedení ohybové zkoušky je nutné správně nastavit rozměr a uložení podměrných ramen ve zkušebním stroji.

Zkoušený materiál vložíme mezi ramena, která jsou nastavena dle velikosti zkoušeného materiálu a následně je dotáhneme pomocí šroubů. Tlačný trn musí být nastaven na takovou vzdálenost, aby odpovídala polovině vzdálenosti mezi podpěrnými rameny. Následně je také dotáhnut šrouby.



Obrázek 27 Popis upevnění vzorku ve zkušebním stroji

10 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Všechny naměřené hodnoty byly získány pomocí zkušebního stroje ZWICK 1456 s použitím testovacího softwaru testXpert v7.11. Pro měření byly do této práce zahrnuty pouze výsledky, které byly stanoveny jako důležité pro samotné vyhodnocení. Tyto výsledky se nacházejí v následujících tabulkách a grafech.

10.1.1 Vzorek A

Vzorek A je tvořen pultruzním profilem tvořeným přímými skelnými rovingy, které byly nalepeny na keramické desce.

Tabulka 6 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek A

A	E	σ_f	E_{BREAK}	W
Č. vzorku	[MPa]	[N]	[%]	[Nmm]
1	28600	378	1,3	2859,22
2	34100	365	1,1	2405,13
3	37800	290	0,9	1754,25

Tabulka 7 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku A

A	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 3	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	33500	334	1,1	2316,97
s	4660	47,5	0,2	569,01
{ny}	13,92	13,8	15,25	24,56

10.1.2 Vzorek B

Vzorek B je tvořen pultruzním profilem tvořeným přírodními uhlíkovými rovingy, které byly nalepeny na keramické desce.

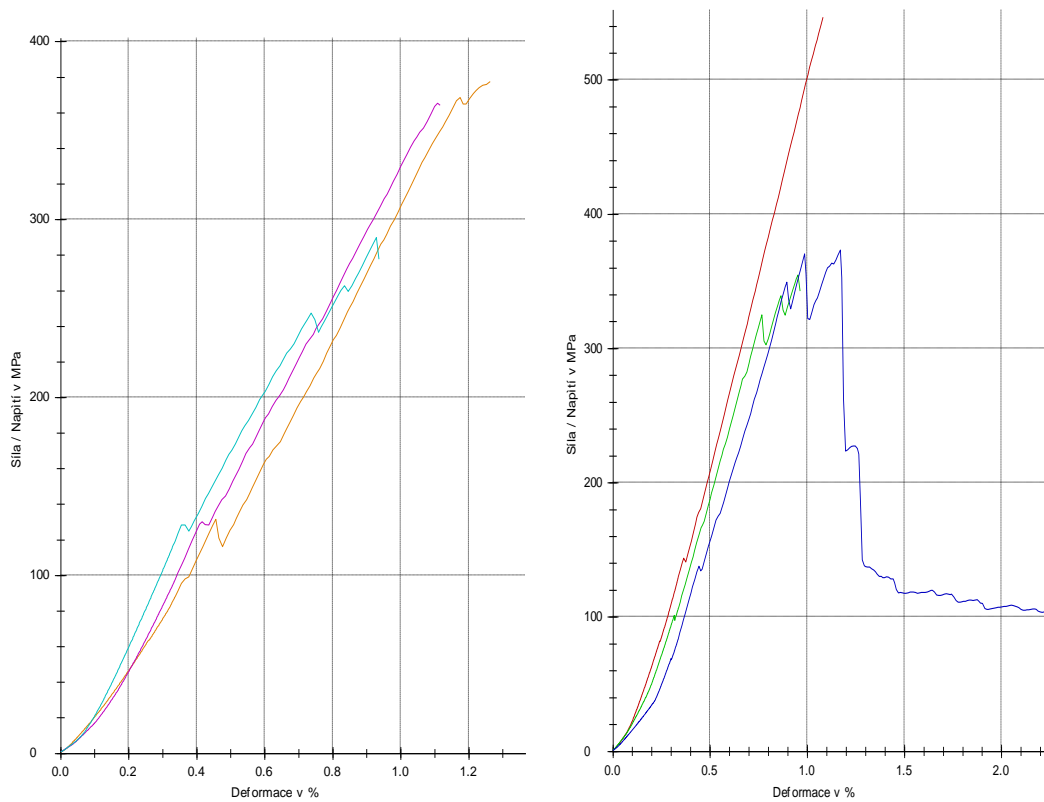
Tabulka 8 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek B

B	E	σ_f	E_{BREAK}	W
Č. vzorku	[MPa]	[N]	[%]	[Nmm]
1	52400	547	1,1	3273,23
2	49800	355	1	2089,04
3	44700	373	1,2	2785,58

Tabulka 9 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku B

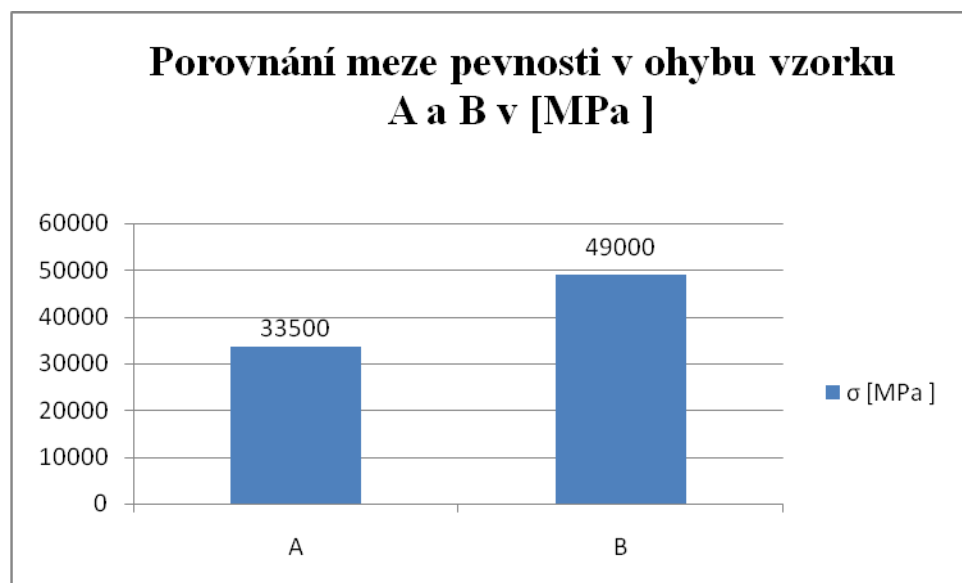
B	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 3	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	49000	425	1,1	2715,95
s	3920	106	0,1	595,16
{ny}	8,01	24,93	10,22	21,91

Graf Síla/Napětí a Deformace pro testované vzorky A a B.

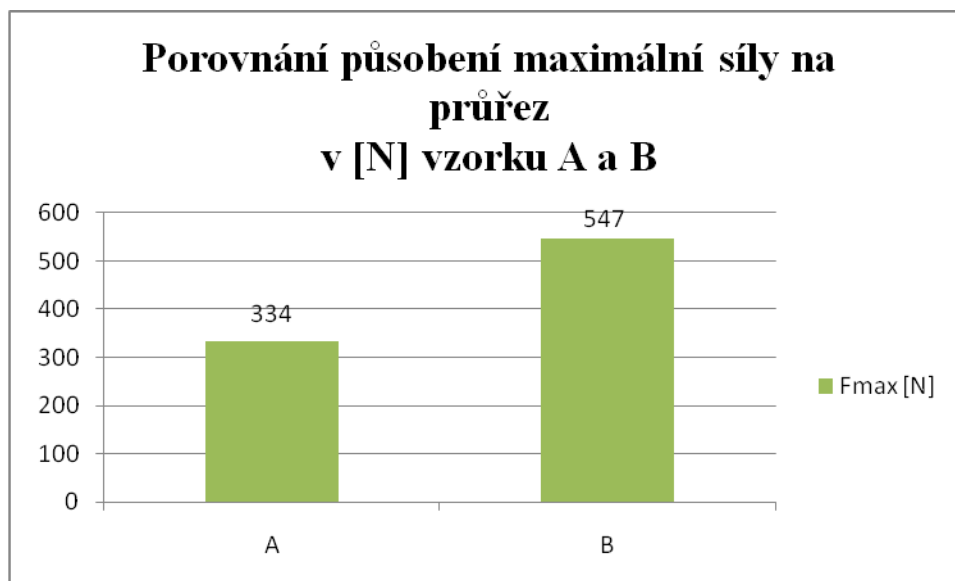


Graf 1 Hodnoty pro testované vzorky A a B

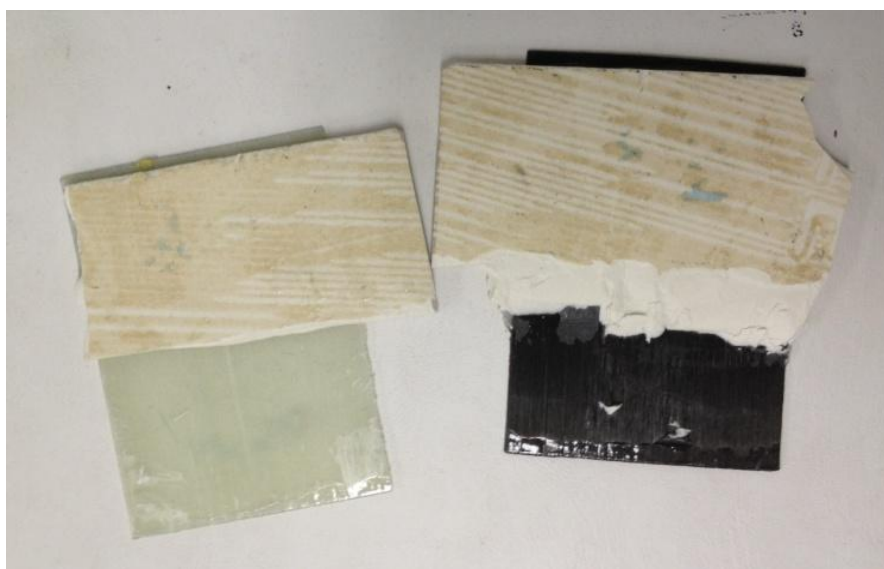
Porovnání vzorků A a B



Graf 2 Porovnání meze pevnosti v ohybu vzorku A a B



Graf 3 Porovnání působení maximální síly vzorku A a B



Obrázek 28 Pohled na testované vzorky po zkoušce třibodovým ohybem

10.1.3 Vzorek C

Vzorek C je tvořen pultruzním profilem tvořeným přímými skelnými rovingy, které byly nalepeny na desce z umělého mramoru.

Tabulka 10 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek C

C	E	σ_f	E_{BREAK}	W při F
Č. vzorku	[MPa]	[MPa]	[%]	[Nmm]
1	22900	132	1	23316,05
2	21700	118	0,9	17803,48
3	21700	139	1,2	27734,18

Tabulka 11 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku C

C	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 3	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	22100	130	1	22951,23
s	690	11,1	0,2	4975,39
{ny}	3,12	8,54	15,72	21,68

10.1.4 Vzorek D

Vzorek D je tvořen pultruzním profilem tvořeným přímými uhlíkovými rovingy, které byly nalepeny na desce z umělého mramoru.

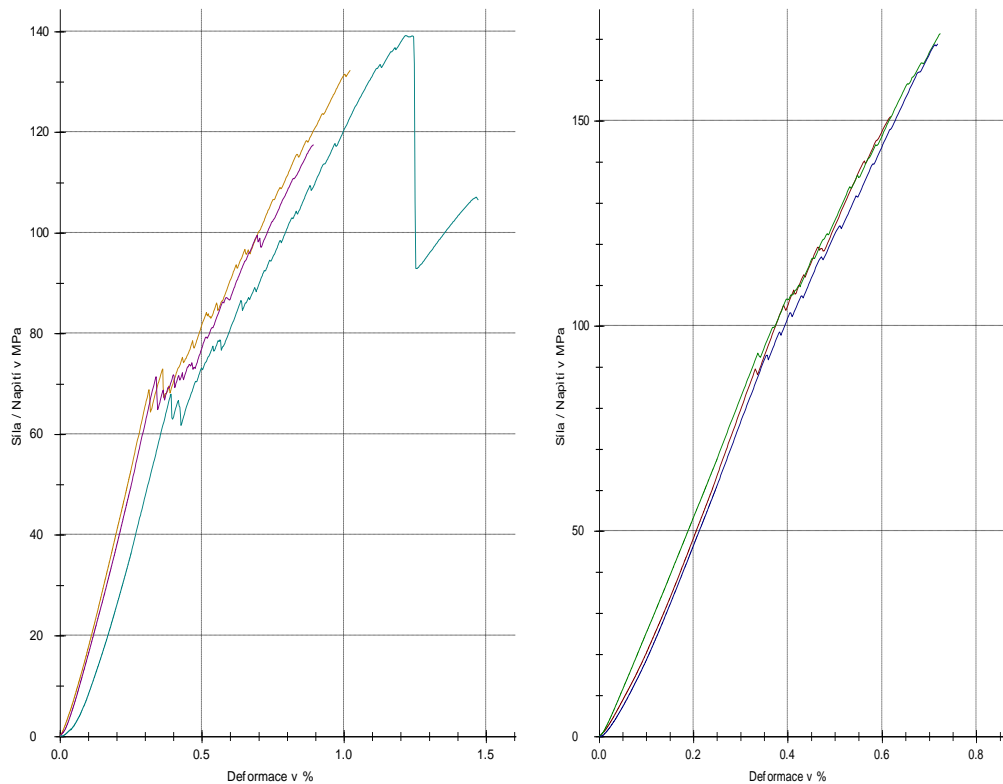
Tabulka 12 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek D

D	E	σ_f	E_{BREAK}	W
Č. vzorku	[MPa]	[MPa]	[%]	[Nmm]
1	27500	151	0,6	14286,28
2	28100	171	0,7	19843,18
3	27400	169	0,7	18192,4

Tabulka 13 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku D

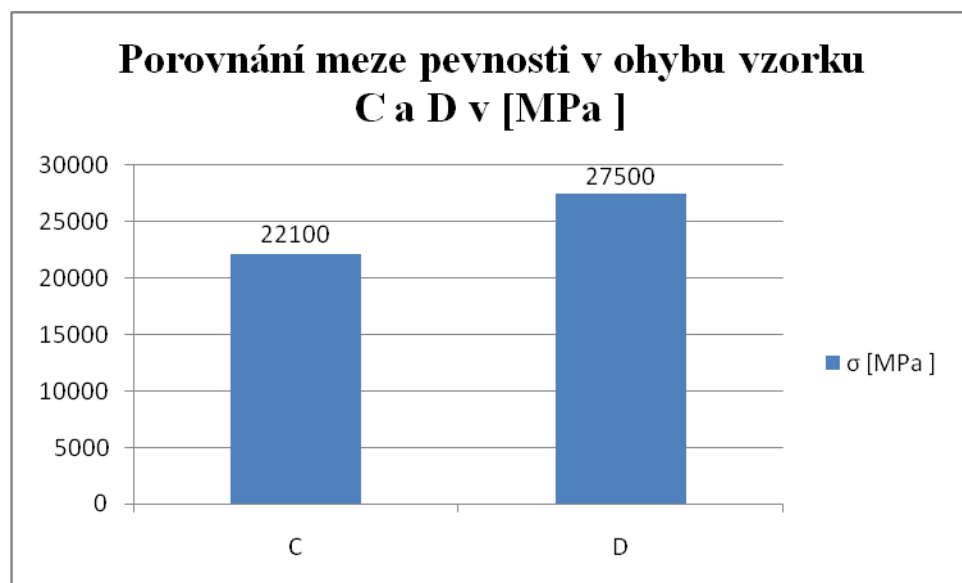
D	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 3	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	27700	164	0,7	17440,62
s	369	11	0,1	2853,71
{ny}	1,34	6,72	8,6	16,36

Graf Síla/Napětí a Deformace pro testované vzorky C a D.

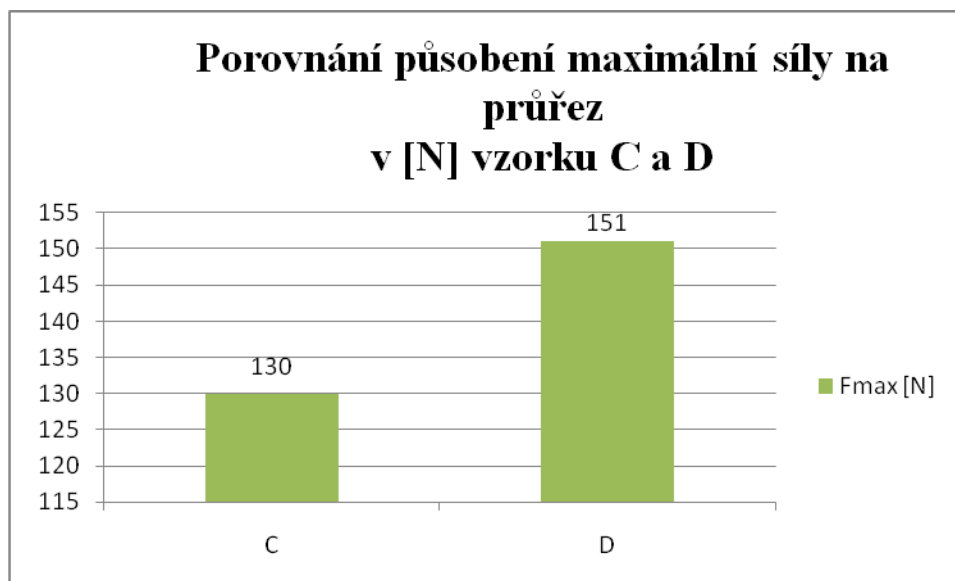


Graf 4 Hodnoty pro testované vzorky C a D

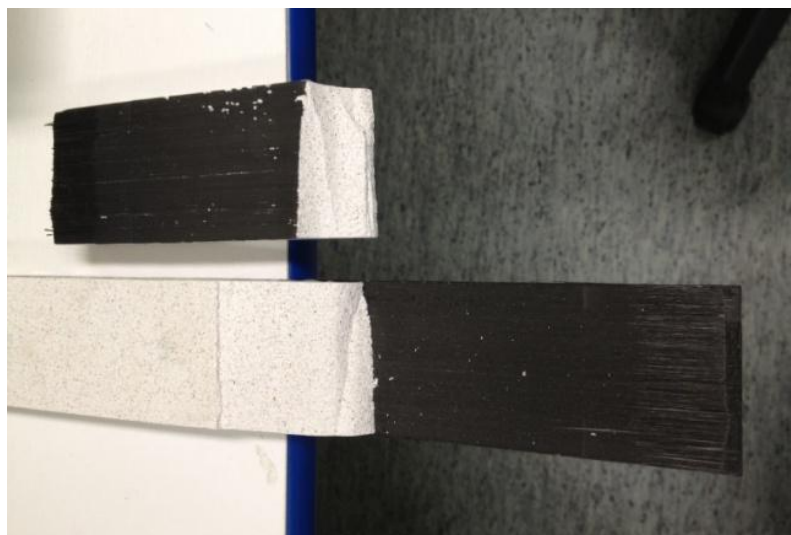
Porovnání vzorků C a D



Graf 5 Porovnání meze pevnosti v ohybu vzorku C a D



Graf 6 Porovnání působení maximální síly vzorku C a D



Obrázek 29 Pohled na testovaný vzorek D po zkoušce tříbodovým ohybem

10.1.5 Vzorek E

Vzorek E je tvořen pultruzním profilem tvořeným přímými skelými rovingy. Tento profil se nelepil na žádný další materiál.

Tabulka 14 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek E

E	E	σ_f	E_{BREAK}	W
Č. vzorku	[MPa]	[MPa]	[%]	[Nmm]
1	51800	1930	4,5	5773,97
2	48600	1900	4,5	4817,58
3	48100	1900	4,3	4443,29
4	50300	2000	4,4	5441,37
5	50600	1940	4	4266,38

Tabulka 15 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku E

E	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 3	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	49900	1930	4,3	4948,52
s	1510	41,3	0,2	644,59
{ny}	3,03	2,14	4,42	13,03

10.1.6 Vzorek F

Vzorek F je tvořen pultruzním profilem tvořeným přímými uhlíkovými rovingy. Tento profil se nelepil na žádný další materiál.

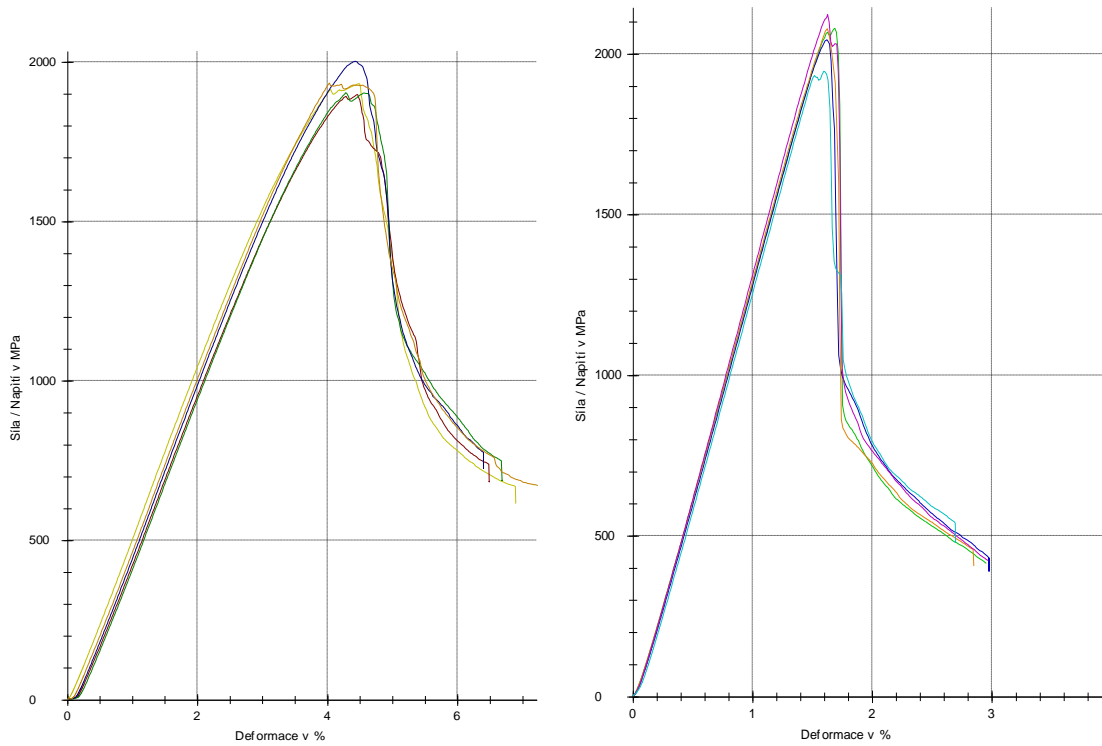
Tabulka 16 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek F

F	E	σ_f	E_{BREAK}	W
Č. vzorku	[MPa]	[MPa]	[%]	[Nmm]
1	133000	2080	1,7	1947,4
2	133000	2050	1,6	1782,5
3	134000	2080	1,6	1812,36
4	137000	2120	1,6	1848,74
5	132000	1950	1,6	1687,74

Tabulka 17 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku F

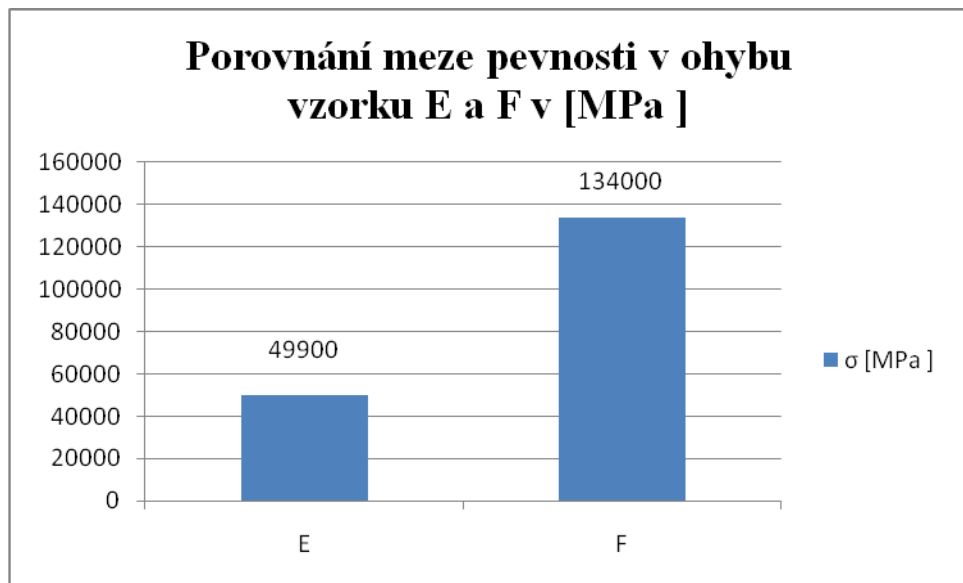
F	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 3	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	134000	2060	1,6	1815,75
s	1560	66,6	0	94,77
{ny}	1,17	3,24	2,1	5,22

Graf Síla/Napětí a Deformace pro testované vzorky E a F.

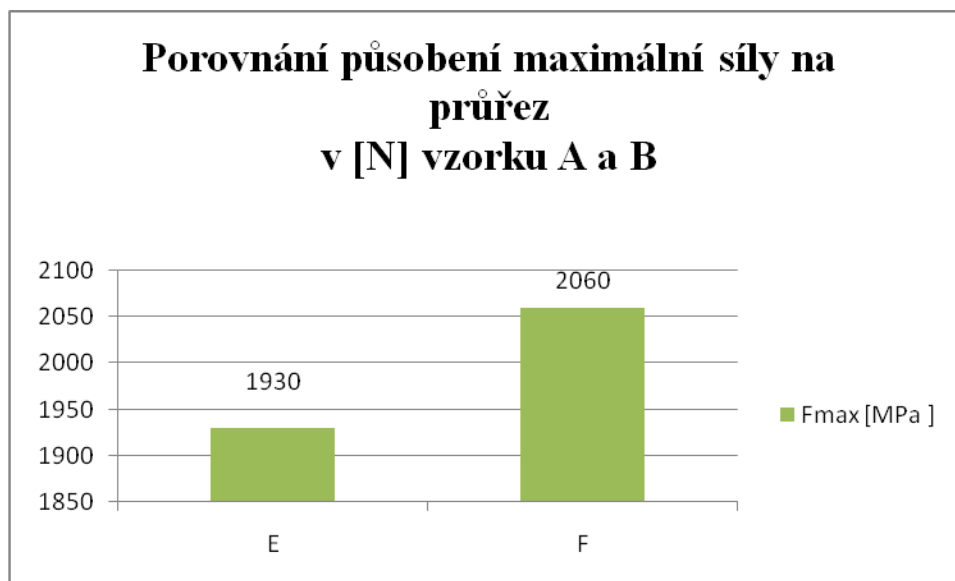


Graf 7 Hodnoty pro testované vzorky E a F

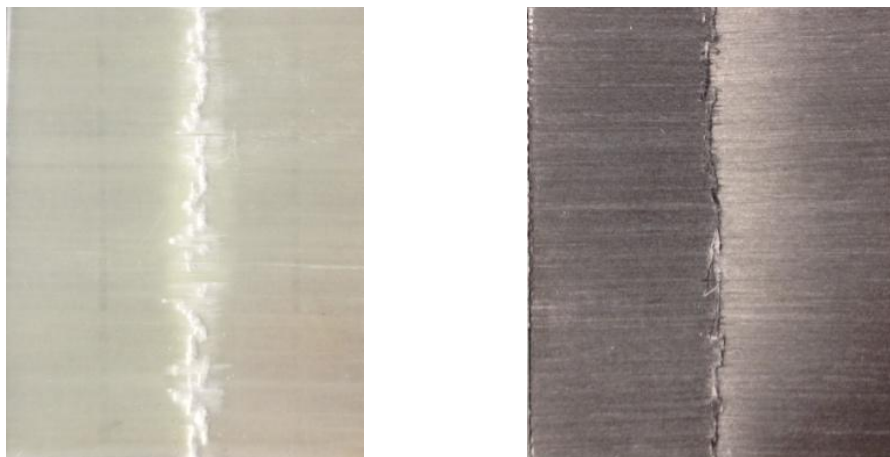
Porovnání vzorků E a F



Graf 8 Porovnání meze pevnosti v ohybu vzorku E a F



Graf 9 Porovnání působení maximální síly vzorku E a F



Obrázek 30 Pohled na testované vzorky složené ze skleněných uhlíkových vláken po zkoušce tříbodovým ohybem

Hodnoty pro desky z umělého mramoru a keramiky

Pro úplné doplnění testování byly do porovnání zařazeny i hodnoty pro materiály, na kterých byly nalepeny vzorky A, B, C a D

Tabulka 18 Experimentálně stanovené hodnoty pro keramickou desku

Keramika	E	σ_f	E_{BREAK}	W
Č. vzorku	[MPa]	[MPa]	[%]	[Nmm]
1	52600	59,4	0,1	42,84

Tabulka 19 Aritmetické průměry experimentálně stanovené pro keramickou desku

Keramika	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 1	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	52600	59,4	0,1	42,84
s	-	-	-	-
{ny}	-	-	-	-

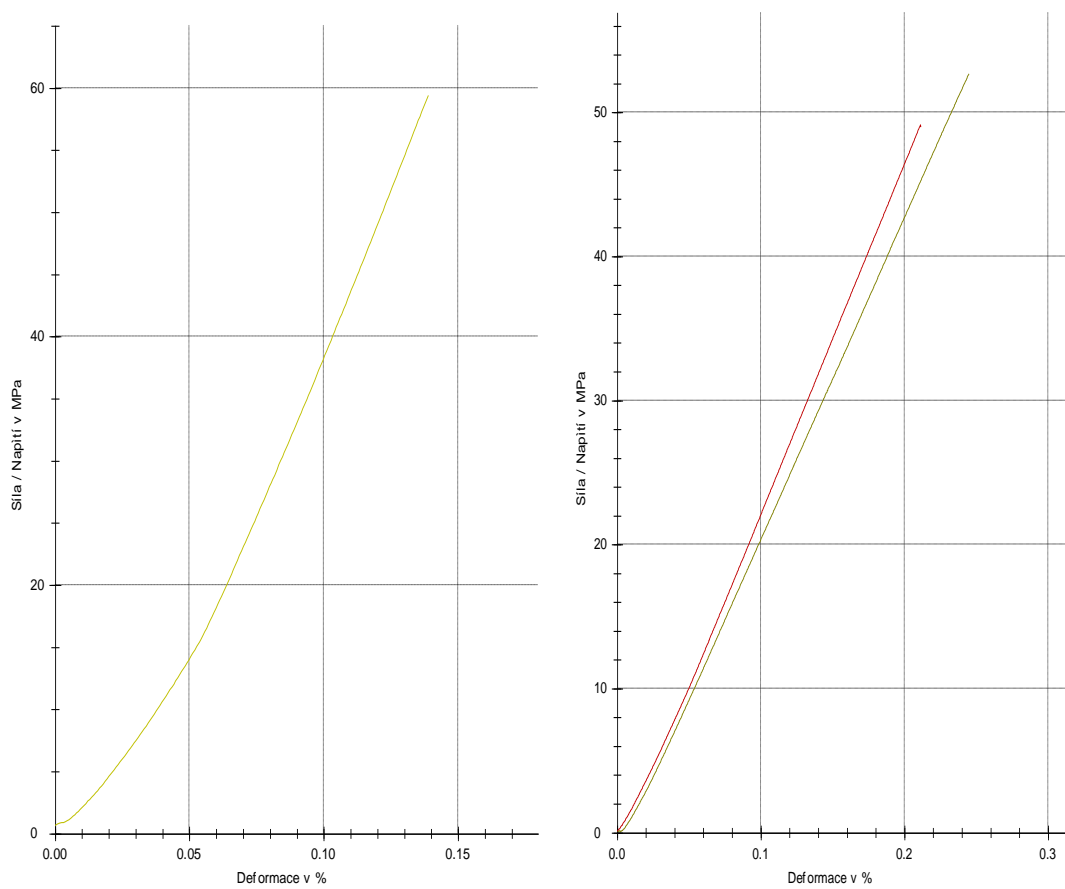
Tabulka 20 Experimentálně stanovené hodnoty pro desku z umělého mramoru

Mramor	E	σ_f	E_{BREAK}	W
Č. vzorku	[MPa]	[MPa]	[%]	[Nmm]
1	22300	52,7	0,2	1875,22
2	24300	49,2	0,2	1372,14

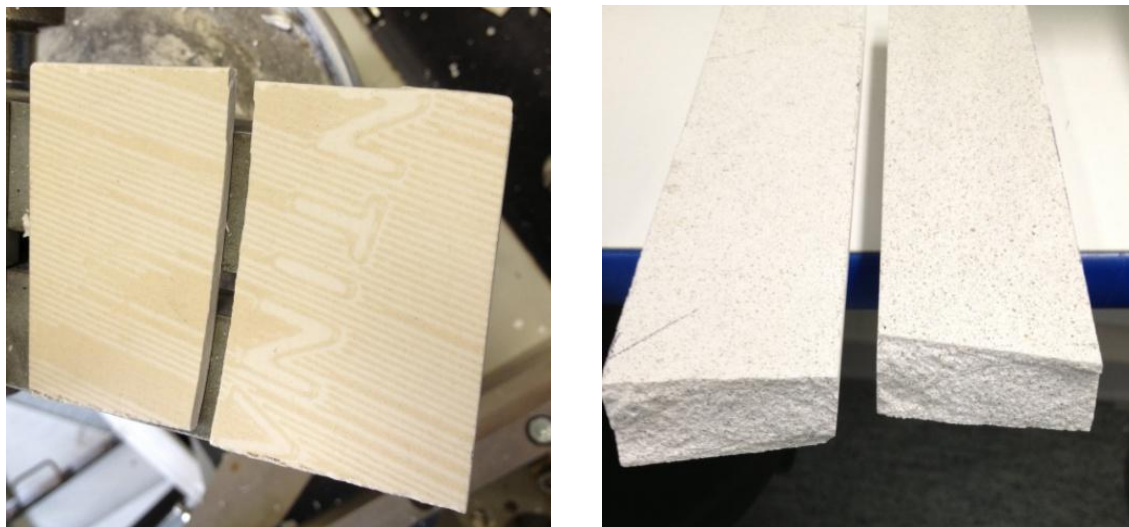
Tabulka 21 Aritmetické průměry experimentálně stanovené pro desku z umělého mramoru

Mramor	E	σ_f	E_{BREAK}	W
n = 2	MPa	MPa	%	Nmm
{ol x}	23300	50,9	0,2	1623,68
s	1410	2,5	0	355,73
{ny}	6,04	4,92	10,46	21,91

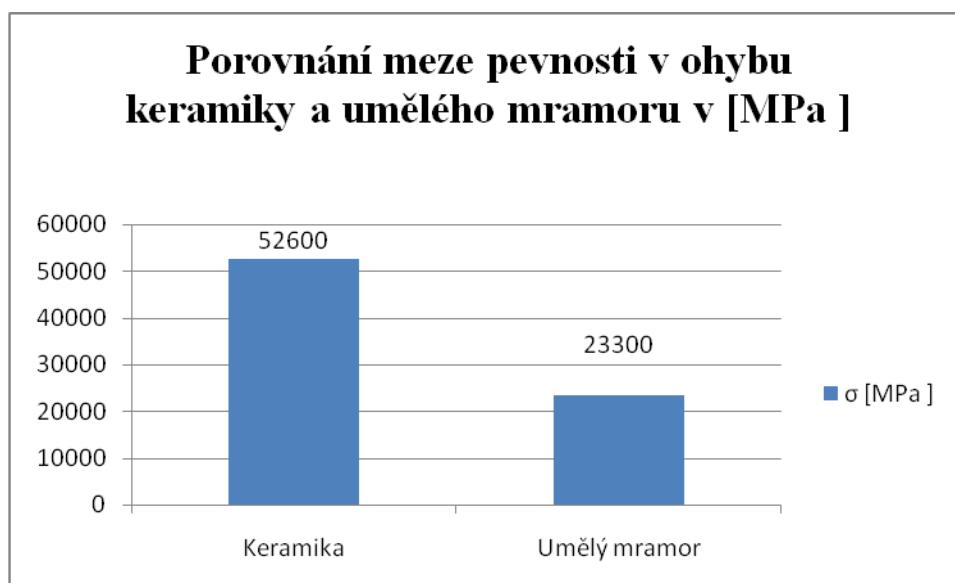
Graf Síla/Napětí a Deformace pro testované desky z keramiky a umělého mramoru



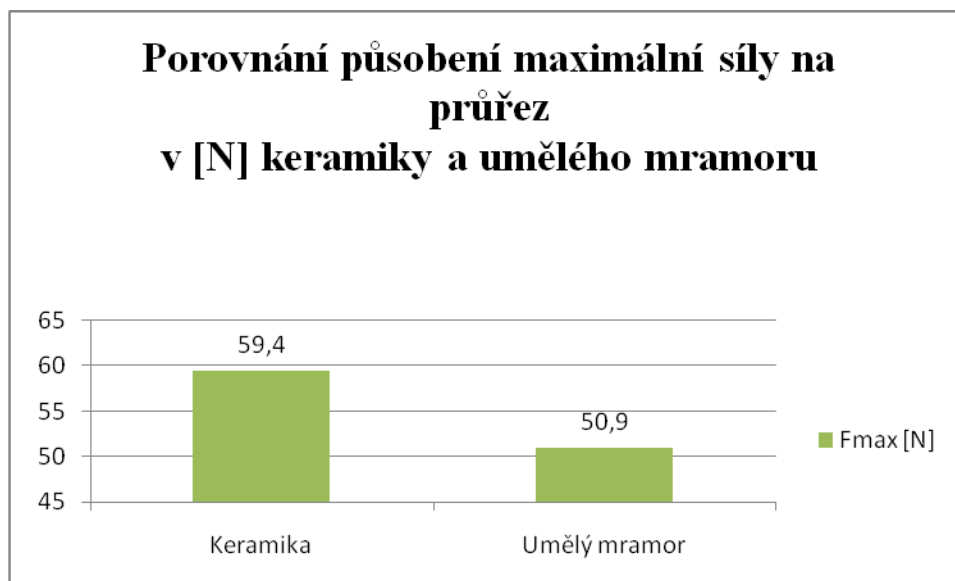
Graf 10 Hodnoty pro keramickou desku a desku z umělého mramoru



Obrázek 31 Pohled na testované vzorky z keramiky a umělého mramoru po zkoušce tříbodovým ohybem



Graf 11 Porovnání meze pevnosti v ohybu keramiky a umělého mramoru



Graf 12 Porovnání působení maximální síly keramiky a umělého mramoru

11 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Cílem testování vzorků bylo zjistit a porovnat hodnoty meze pevnost v ohybu a maximální síly F_{\max} působící na průřez.

11.1 Porovnání vzorků A a B

– mez pevnosti v ohybu

Vzorek označen jako A byl složen z jednosměrných přímých skelných rovingů, které byly nalepeny na keramické desce. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu byla 33500 MPa.

Vzorek B byl složen z jednosměrných přímých uhlíkových rovingů. Ty byly nalepeny na keramické desce. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu byla 49000 MPa.

Větší zatížení v ohybu tedy snese vzorek B, který má hodnotu o 15500MPa větší.

– maximální síla F_{\max} na průřez

Hodnota vzorku A při pozorování síly F_{\max} byla 334 N. Vzorek B měl hodnotu sledovaného parametru 547 N.

Větší zatížení snesl opět vzorek B a to o hodnotu 213 N.

11.2 Porovnání vzorků C a D

– mez pevnosti v ohybu

Vzorek C byl složen z přímých skelných rovingů, které byly nalepeny na desce z umělého mramoru. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu byla 22100 MPa.

Vzorek D byl složen z jednosměrných přímých uhlíkových rovingů. Nalepeny byly na desce umělého mramoru. Jeho průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu byla 27500 MPa

Větší zatížení v ohybu snese vzorek D. Jeho hodnota je o 5400 MPa větší.

– maximální síla F_{\max} na průřez

Hodnota vzorku C při pozorování síly F_{\max} byla 130 N. Vzorek D měl hodnotu sledovaného parametru 151 N.

Větší zatížení snesl vzorek D o hodnotu 21 N.

11.3 Porovnání vzorků E a F

– mez pevnosti v ohybu

Vzorek E byl složen z přímých skelných rovingů. Tento vzorek se nelepil na žádný další materiál. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu byla 49900 MPa.

Vzorek F byl složen z jednosměrných přímých uhlíkových rovingů. Tento vzorek nebyl také nalepen na žádný přídavný materiál. Jeho průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu byla 134000 MPa

Větší zatížení v ohybu snese vzorek F. Jeho hodnota je o 84100 MPa větší.

– maximální síla F_{\max} na průřez

Hodnota vzorku E při pozorování síly F_{\max} byla 1930 N. Vzorek F měl hodnotu sledovaného parametru 2060 N.

Větší zatížení snesl vzorek F o hodnotu 130 N.

11.4 Porovnání keramické desky a desky z umělého mramoru

– mez pevnosti v ohybu

Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu keramické desky byla 52600 MPa. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu desky z umělého mramoru vyšla 23300 MPa.

Větší zatížení v ohybu snese deska keramická. Její hodnota je o 29300 MPa větší.

– maximální síla F_{\max} na průřez

Průměrná hodnota maximální síly F_{\max} na průřez keramické desky byla 59,4 N. Průměrná hodnota maximální síly F_{\max} na průřez desky z umělého mramoru byla 50,9 N.

Větší zatížení v ohybu snese deska keramická. Její hodnota je o 8,5 N větší.

12 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá experimentálním testováním vysoce pevných kompozitů, vyráběných technologií pultruze. Vzorky byly testovány tříbodovým ohybem. Materiál byl dodán firmou Willer ve formě pásů ze skelných a uhlíkových vláken, které se následně lepily na keramickou desku a desku z umělého mramoru (pro lepší demonstraci získaných výsledků, vyztužení a zvýšením tuhosti u křehkých materiálů jako je keramika a umělý mramor). Jedna z největších výhod technologie pultruze spočívá v tom, že je možno získat až přes 80% výtzuže, což u jiné technologie nejde dosáhnout. Pro příklad technologie ručního laminování je schopna pojmout maximálně 50% vláknové výtzuže. Tuto výhodu jsme využili i při testování, kdy vzorek tvořen skelnými vlákny obsahoval 82% těchto vláken. Vzorek tvořen vlákny uhlíkovými obsahoval 83% vláken. Vzorky pak byly mezi sebou vzájemně porovnávány. Porovnávaly se vždy vzorky, které měly stejný podkladový materiál.

Z výsledků měření bylo zjištěno, že mez pevnosti v ohybu vzorku nesoucího označení B (tvořen přímými uhlíkovými rovingy, které byly nalepeny na keramické desce) byla o 46,2 % větší, než u vzorku A s rovingy skleněnými. U porovnání maximální síly byla hodnota vzorku B vyšší o 63,7%.

Porovnání vzorku C a D probíhalo stejným způsobem. Vzorek C tvořil profil tvořený přímými skelnými rovingy, které byly nalepeny na desce z umělého mramoru. Vzorek D profil z uhlíkových rovingů nalepen na desce z umělého mramoru, snesl větší ohybovou zátěž o 24,4 %. Maximální síla působící na vzorek D byla o 16,1 % větší než u vzorku C, který tvořily rovingy skelné.

Poslední dvojice testovaných vzorků nesla označení E a F. Vzorek E tvořen pultruzním profilem s přímými skelnými rovingy. Tento profil se nelepil na žádný další materiál, abychom znali hodnotu pro samotný profil. Vzorek F byl tvořen pultruzním profilem s přímými uhlíkovými rovingy. U tohoto porovnání meze pevnosti z ohybu vyšel nejlépe vzorek F, který snesl o 173,4% větší zátěž než vzorek E. Při porovnávání maximální síly měl vzorek F lepší hodnoty o 6,7%.

Do testování byly zařazeny i hodnoty obou přídatných desek, na kterých byly nalepeny vyrobené profily. Mez pevnosti v ohybu měla o 125% větší deska keramická, než deska z umělého mramoru. U porovnávání maximální síly měla lepší parametry opět deska keramická, jejíž hodnota byla větší o 16%.

Při testování jsme zjistili, že pultruzní vzorky, které byly nalepeny na desce z umělého mramoru nebo keramiky (vzorky A, B, C, D) se o mnoho nelišily od hodnot, jaké měla keramika nebo umělý mramor samotné. Tento fakt, že se při testování zlomily pouze přidané desky a nikoliv pultruzní profil přičítáme tomu, že byla zjištěna např. mez pevnosti pro samotné lepidlo, ale nebyly zjištěny pravé hodnoty zkoušeného vzorku.

Největší váhu pro nás tedy má zjištění u vzorku F, neboť nám z výsledku vyplývá, že nejlepší hodnoty pro mez pevnosti v ohybu, měl právě vzorek F, tedy přímé uhlíkové rovingy bez dalšího přídavného materiálu. Jeho hodnota byla o 173,5% vyšší než u rovingů skleněných. Na tomto výsledku tedy můžeme jasně prokázat výborné vlastnosti uhlíkových pultruzních profilů.

Využití těchto materiálů má široké uplatnění ať už v průmyslu stavebním, automobilovém nebo sportovním. Firma Willer, pro kterou jsme vzorky testovali, se zabývá převážně průmyslem sportovním. Z jejich produktů se dále vyrábí luky, hokejové hole, zimní sportovní nářadí jako běžky, snowboardy, lyže a mnohé další produkty.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURYMonografické publikace:

- [1] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [2] EHRENSTEIN, GOTTFRED. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] HÁBA, D. *Studium ohybové tuhosti a únosnosti HP kompozitu*. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc.Ing. Oldrich Šuba CSc., 2010. Zlín: FT UTB. 66 s.
- [4] JANČÁŘ, J.: *8. mezinárodní konference strojů a zpracování plastů*. Brno 1996
- [5] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s.
- [6] JIRÁSEK, J. *Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů*. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Dušan Fojtů, Ph.D., 2010. Zlín: FT UTB. 73 s.
- [7] KRATOCHVÍL, B., Švorčík, V., Vojtěch, D. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [8] MACHEK, V. *Nauka o materiálu. 4.část, Polymery a kompozity s polymerní matri-cí*. PRAHA: Nakladatelství ČVUT, 2008. 86s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [9] PAVLICA, R. *Vytvrzování polymerní matrice kompozitů*, doktorská disertační práce. Zlín, UTB FT, 2003
- [10] RYBNIKÁŘ, F. *Makromolekulární chemie II.*, [skripta], VUT Brno, 1987)
- [11] STOKLASA, K. *Makromolekulární chemie*, Skripta FT UTB, Zlín.
- [12] TOMANOVÁ, S. *Vytvrzování nenasycených polyesterových pryskyřic*. Diplomová práce. Zlín: VUT FT, 2000.
- [13] VAŇKOVÁ, M. *Měření krípych vlastností polymerních kompozitů se skleněnou výztuží připravených technologií pultruze*. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Slobodian Ph.D., 2011. Zlín: FT UTB 84 s.

Internetové zdroje:

- [14] *cs.wikipedia.org* [online]. [cit. 2013-03-30]. Pultruze. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pultruze>
- [15] *datok.cz* [online]. [cit. 2013-03-02]. Carbon. Dostupné z WWW: <http://datok.cz/carbon/>
- [16] *directindustry.com* [online]. [cit. 2013-03-06]. Pepreg. Dostupné z WWW: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/glass-fiber-fabric-epoxy-resin-prepreg-54443-2502061.jpg
- [17] *fch.vutbr.cz* [online]. [cit. 2013-03-06]. Praktikum ze struktury a vlastnosti polymerů Dostupné z WWW: www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha9.doc
- [18] *gdpkoral.cz* [online]. [cit. 2013-03-26]. Vinylesterové pryskyřice. Dostupné z WWW: <http://www.gdpkoral.cz/UserFiles/File/PDF-design-manual/kompozity.pdf>
- [19] *izobitum s.r.o.* [online]. [cit. 2013-03-01]. Fiberglass. Dostupné z WWW: <http://www.sembofiberglass.cz/proc.html>
- [20] *jhamernik.sweb.cz* [online]. [cit. 2013-03-26]. Mechanické zkoušky statické. Dostupné z WWW: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [21] *moddin.cz* [online]. [cit. 2013-03-02]. Vlastnosti složek kompozitů. Dostupné z WWW: <http://www.modding.cz/?p=73>
- [22] *nauticexpo.com* [online]. [cit. 2013-03-15]. Roving. Dostupné z WWW: <http://www.nauticexpo.com/prod/abahsain-fiberglass/fiberglass-rovings-39124-296882.html>
- [23] *pctuning.tyden.cz* [online]. [cit. 2013-03-20]. Rohož. Dostupné z WWW: http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni_zazrak-laminat
- [24] *sciencedirect.com* [online]. [cit. 2013-04-20]. Tříbodový a čtyřbodový obyh. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/browse/sub/engineering>

-
- [25] *stefanmichna.com* [online]. [cit. 2013-04-20]. Schéma výrobní pultruzní linky. WWW:http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf
- [26] *volny.cz* [online]. [cit. 2013-03-20]. Informace o vláknech, technologiích a historii kompozitů. Dostupné z WWW: <http://www.volny.cz/zkorinek/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AF	Aramid Fiber
A_0	Původní průřez zkušebního tělesa uvnitř měrné délky l_0
b	Šířka
BMC	Bulk Molding Compaund
CF	Carbon Fiber
Ed	Modul pružnosti v tlaku
EP	Epoxidové pryskyřice
EP-R	Nenasycené epoxidové pryskyřice
F	Zatěžovací síla
F_{\max}	Maximální síla na průřez
GF	Glass Fiber
h	Tloušťka
l	Délka
l_0	Původní měrná délka
ΔL	Prodloužení v mm
MA-R	Metakrylátové pryskyřice
M^T	Kroutící moment při porušení
PAN	Polyakrylonitril
PC	Polykarbonát
PDM	Post Die Manipulation Pultrusion
PE	Polyetylén
PEEK	Polyéteréterketon
PET	Polyetyléntereftalát
PFA-R	Fenakrylátové pryskyřice
PP	Polypropylen

PS	Polystyren
R^M	Střední poloměr
RIP	Resin Injection Pultrusion
UP	Nenasycené polyestery
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice
VE	Vinylestery
VE-R	Vinylesterové pryskyřice
W	Vykonaná práce
ε	Deformace
σ	Napětí
E	Modul pružnosti
ν	Poissonův součinitel
ν_d	Poissonův součinitel v tlaku
E_{BREAK}	Poměrné prodloužení při F_{max}

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Skleněná vlákna [19]</i>	17
<i>Obrázek 2 Uhlíková vlákna [15]</i>	19
<i>Obrázek 3 Vliv vlastností různých druhů skleněných, uhlíkových a aramidových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce [21]</i>	23
<i>Obrázek 4 Prepreg skelných vláken [16]</i>	24
<i>Obrázek 5 Roving [22]</i>	24
<i>Obrázek 6 Různá provedení tkaniny [23]</i>	25
<i>Obrázek 7 Rozdíl mezi tkaninou (nahore) a rohoží (dole) [23]</i>	26
<i>Obrázek 8 Znázornění hlavních os ortotropního laminátu [2]</i>	35
<i>Obrázek 9 Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku v tahu jednosměrně, izotropně i anizotropně vyztuženého plastového kompozitu [20]</i>	37
<i>Obrázek 10 Modifikované přípravky pro zkoušku pevnosti v tlaku s opěrným provedením: a) Přípravek vyvinutý v Boeing (dle ASTM D 659, DIN 65375); b) Přípravek CLC (Combined-Loading-Compression podle ASTM D 6641) [2]</i>	38
<i>Obrázek 11 Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení [2]</i>	39
<i>Obrázek 12 Tříbodový a čtyřbodový ohyb[24]</i>	41
<i>Obrázek 13 Průběh ohybových momentů u tříbodového a čtyř bodového ohybu[2]</i>	41
<i>Obrázek 14 Výrobní postup na pultruzní lince [14]</i>	44
<i>Obrázek 15 Náskres pultruzní linky s otevřenou lázní a odtahem pomocí podavačů [4]</i>	47
<i>Obrázek 16 Náskres pultruzní linky s přímým přívodem pryskyřice do pultruzní hlavy a odtahem pomocí pásů [4]</i>	48
<i>Obrázek 17 Schéma výrobní pultruzní linky [25]</i>	54
<i>Obrázek 18 Výrobní pultruzní linka firmy Willer</i>	55
<i>Obrázek 19 Uskutečnění odtahu pultruzní linky pomocí ocelových válců 1.</i>	56
<i>Obrázek 20 Uskutečnění odtahu pultruzní linky pomocí ocelových válců 2.</i>	56
<i>Obrázek 21 Keramická a mramorová deska před nařezáním na testovaný rozměr</i>	59
<i>Obrázek 22 Příprava mramorové desky pro testování</i>	59
<i>Obrázek 23 Orýsování mramorové desky na rozměr testovaného vzorku</i>	59
<i>Obrázek 24 Schéma tříbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu</i>	61

<i>Obrázek 25 Koncentrace napětí u vzorků rozlišné tloušťky (a: tenký vzorek, b: tlustý vzorek)</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 26 Zkušební stroj ZWICK 1456</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 27 Popis upevnění vzorku ve zkušebním stroji</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 28 Pohled na testované vzorky po zkoušce tříbodovým ohybem</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 28 Pohled na testovaný vzorek D po zkoušce tříbodovým ohybem</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 30 Pohled na testované vzorky složené ze skleněných uhlíkových vláken po zkoušce tříbodovým ohybem</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 31 Pohled na testované vzorky z keramiky a umělého mramoru po zkoušce tříbodovým ohybem</i>	<i>82</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách [2]</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 2 Střední hodnoty pevností v jednom z hlavních materiálových směrů σ_x, vypočítané ze širokého spektra publikovaných hodnot. [5]</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 3 Přehled složení testovaných vzorků</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 4 Přehled rozměrů testovaných vzorků</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 5 Technické údaje stroje ZWICK 1456</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 6 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek A</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 7 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku A</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 8 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek B</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 9 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku B</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 10 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek C</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 11 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku C</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 12 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek D</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 13 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku D</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 14 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek E</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 15 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku E</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 16 Experimentálně stanovené hodnoty pro vzorek F</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 17 Aritmetické průměry experimentálně stanovených hodnot vzorku F</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 18 Experimentálně stanovené hodnoty pro keramickou desku</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 19 Aritmetické průměry experimentálně stanovené pro keramickou desku</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 20 Experimentálně stanovené hodnoty pro desku z umělého mramoru</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 21 Aritmetické průměry experimentálně stanovené pro desku z umělého mramoru</i>	<i>81</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1</i> Hodnoty pro testované vzorky A a B	70
<i>Graf 2</i> Porovnání meze pevnosti v ohybu vzorku A a B.....	70
<i>Graf 3</i> Porovnání působení maximální síly vzorku A a B.....	71
<i>Graf 4</i> Hodnoty pro testované vzorky C a D	74
<i>Graf 5</i> Porovnání meze pevnosti v ohybu vzorku C a D.....	74
<i>Graf 6</i> Porovnání působení maximální síly vzorku C a D.....	75
<i>Graf 7</i> Hodnoty pro testované vzorky E a F	78
<i>Graf 8</i> Porovnání meze pevnosti v ohybu vzorku E a F.....	78
<i>Graf 9</i> Porovnání působení maximální síly vzorku E a F.....	79
<i>Graf 10</i> Hodnoty pro keramickou desku a desku z umělého mramoru.....	81
<i>Graf 11</i> Porovnání meze pevnosti v ohybu keramiky a umělého mramoru	82
<i>Graf 12</i> Porovnání působení maximální síly keramiky a umělého mramoru	83

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY