

Vlastnosti polymerních dlouhvláknových kompozitů s různými výztužemi

Petr Kos

Vedoucí práce: Ing. Zdeňka, Jeníková, Ph.D.

Abstrakt

Cílem práce je provést stručný úvod do problematiky kompozitních materiálů a jejich rozdělení. Popsat prováděné mechanické zkoušky (zkouška tahem, zkouška ohybem) Porovnat mechanické vlastnosti zkoušených vzorků, které byly vyrobeny ručním laminováním.

Klíčová slova

Polymerní dlouhvláknový kompozit, mechanické vlastnosti

1. Definice kompozitů

Kompozit je materiál složený ze spojité fáze zvané matrice a nespojitě fáze dispergované v matrici. Nespojitá sekundární fáze má nejčastěji úlohu fáze vyztužující a nazývá se proto výztuží. Výztuž slouží obecně k vytvoření nového materiálu s celkově vysokou úrovní mechanických vlastností. To je nejčastější případ. Nespojitá fáze však může být i nositelem jiných výsledných vlastností materiálu, např. elektrické vodivosti aj. Matrice má v kompozitu několikerou úlohu : zajišťuje spojení sekundární fáze v kompaktní celek a zastává tedy funkci pojiva, zprostředkovává přenos sil na dispergovanou fázi, odděluje vzájemně jednotlivé částice nebo vlákna dispergované fáze od sebe a zabraňuje tak spojitému šíření trhliny. Rovněž chrání sekundární fázi před účinky vnějšího prostředí.[1]

2. Rozdělení kompozitů

Kompozity se mohou dělit z různých hledisek.

2.1. Rozdělení podle druhu matrice

-Kompozity s polymerní matricí

Matrici může tvořit termoplast (např. polypropylen, polyamid, polykarbonát), reaktoplast (např. nenasyčený polyester, epoxid) nebo sesíťovaný elastomer (styren-butadien, akrylonitril-butadien).[1] Jako vyztužující materiály pro tento typ kompozitů mají největší význam vláknové materiály jako je sklo, uhlík nebo aramid.

-Kompozity s kovovou matricí

Z matric mají největší význam lehké slitiny hliníku, hořčíku, titanu, ale i slitiny železa, kobaltu a mědi. Sekundární fázi mohou tvořit jak keramické, tak kovové materiály.[1]

-Kompozity s keramickou matricí

Jako matrice nejčastěji slouží např. karbid a nitrid křemíku, oxidy křemíku a zirkonia. Funkci výztuže plní keramická nebo uhlíková vlákna.[1]

-Kompozity s uhlíkovou matricí

Matrici tvoří uhlík v různém stavu strukturální uspořádanosti. Sekundární vyztužující fázi jsou uhlíková vlákna.[1]

2.2. Rozdělení podle druhu sekundární fáze

-Částicové kompozity

Kompozity s náhodnou orientací částic a kompozity s přednostní orientací částic (přednostní orientace dvourozměrných částic, jako např. uhlíkové destičky).[1]

-Krátkovláknové kompozity

Sekundární fázi tvoří vlákna o délce řádově stonásobku jejich tloušťky a v matrici jsou dispergována buď náhodně, nebo s přednostní orientací.[1]

-Dlouhovláknové kompozity

Výztuž tvoří dlouhá vlákna o délce desítek až stovek mm orientovaná buď náhodně, nebo s přednostní orientací v ploše nebo v prostoru a nebo kontinuální vlákna zabudovaná v matrici s jednosměrnou, dvousměrnou, nebo trojsměrnou orientací (tkaniny, úplety).[1]

-Hybridní kompozity

Kombinace vláknových výztuží různého typu, např. tkaniny složené z uhlíkových a aramidových vláken. K hybridním kompozitům se řadí i kompozity s vláknovou výztuží současně obsahující částicová plniva modifikující vlastnosti matrice.[1]

3. Význam kompozitů pro nová materiálová řešení ve strojírenství

Použití kompozitních materiálů v moderním strojírenství je motivováno zejména možností navrhovat díly a konstrukce velmi lehké a přitom s vysokými hodnotami mechanických vlastností, které dosahují úrovně mechanických vlastností nejen např. slitin hliníku, hořčíku nebo titanu, ale dokonce ocelí a to i speciálních. Mohou výrazně zvětšit životnost a bezpečnost konstrukce, mají též menší nároky na údržbu (např. není zapotřebí antikorozních nátěrů). Kompozity umožňují velmi efektivní využití hmoty a energie vložené do výrobku nebo konstrukce. To prokazatelně vypovídá o perspektivě těchto materiálů pro budoucí strojírenství. Důležitým materiálovým kritériem uplatňovaným při výběru materiálů pro lehké výrobky a konstrukce ale s požadavkem na jejich velkou tuhost a pevnost jsou měrný modul pružnosti a měrná pevnost. Jsou to modul pružnosti a pevnost dělené hustotou materiálu. Tyto veličiny tak v sobě zahrnují jak hledisko mechanických vlastností, tak hmotnosti materiálu. Další výhodou kompozitů oproti kovovým materiálům je schopnost tlumit rázy. Proto se s kompozitovými díly a konstrukcemi setkáme nejen v leteckém a automobilovém průmyslu, ale v neposlední řadě také u sportovního náčiní všeho druhu. Díváme-li se na kompozitní materiály z pohledu materiálu na matrice, pak pro širší strojírenské aplikace jsou nejvíce atraktivní zcela jednoznačně kompozity s polymerní matricí. Vlastnosti polymerních kompozitů lze řídit v širokém rozmezí hodnot v závislosti na druhu matrice, výztuže, objemového podílu výztuže a jejím prostorovém uspořádání. Bereme-li za kritérium sekundární fázi, pak největším přínosem jsou kompozity s dlouhými vlákny. Dlouhovláknové polymerní kompozity jsou schopny splnit nejnáročnější požadavky na mechanické vlastnosti při současně malé hustotě, dobré korozní odolnosti i elektrických vlastnostech.[1] Zbytek této práce bude proto již věnován pouze dlouhovláknovým kompozitům s polymerní matricí.

4. Dlouhovláknové výztuže polymerních kompozitů

Pro výrobu polymerních kompozitů a kompozitových dílů ve strojírenských oborech mají prakticky význam zejména tři druhy vláken: skleněná, uhlíková a aramidová. Dále je možné se setkat s jejich vzájemnými kombinacemi.

4.1. Skleněná vlákna

Vlastnosti skleněných vláken jsou dány jejich chemickým složením. Klasická skleněná vlákna se vyrábějí z tzv. E-skla (borosilikátové sklo pro elektrotechniku), které se vyznačuje příznivou kombinací mechanických a elektrických vlastností. Používá se většinou v kombinaci s nenasycenými polyestery. Nevýhodou E-skla obsahující alkalické oxidy je absorpce vody a malá korozní odolnost proti vodným roztokům kyselin a zásad. Pro náročné, mechanicky namáhané díly jsou perspektivní bezalkalická S-vlákna, která jsou charakteristická větší pevností i modulem pružnosti, menší hustotou, lepší korozní odolností a

větší teplotní odolností. S-vlákna mají i vyšší teplotu tavení a jsou dražší, což brání jejich zavádění do širší technické praxe. Používají se téměř výhradně pro kompozity s epoxidovou maticí na výrobu dílů s většími nároky na mechanické vlastnosti. Skleněná vlákna mají obecně nižší modul pružnosti ve srovnání s uhlíkovými i aramidovými vlákny, dosahují však větší deformace při přetržení. Vlastnosti skleněných vláken jsou izotropní, tedy stejné v podélném i kolmém směru.[1]

4.2.Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna poskytují nejširší spektrum mechanických vlastností polymerních kompozitů a to při malé hustotě. Vynikající mechanické vlastnosti uhlíkových vláken vyplývají z vysoce anizotropní hexagonální struktury, kterou se vyznačuje grafit, alotropní modifikace uhlíku. V bazálních hexagonálních rovinách grafitu jsou uhlíkové atomy mezi sebou vázány silnými kovalentními vazbami, zatímco mezi těmito rovinami působí slabé Van der Waalsovy síly. V uhlíkových vláknech jsou hexagonální roviny uhlíkových atomů více či méně dokonale orientovány ve směru osy vlákna, jejich vzájemné uspořádání vedle sebe však není tak pravidelné jako v hexagonálních krystalech grafitu. Vlastnosti uhlíkových vláken jsou závislé na míře orientace hexagonálních rovin do směru osy vlákna a míře uspořádání hexagonálních rovin mezi sebou. Struktura a vlastnosti uhlíkových vláken jsou dány technologií jejich výroby. V porovnání se skleněnými vlákny se uhlíková vlákna vyznačují vysokou anizotropií fyzikálních i mechanických vlastností. Např. je-li modul pružnosti ve směru vlákna 500 GPa, pak kolmo na vlákna je to pouze 6 GPa. Koeficient lineární teplotní roztažnosti je ve směru vláken záporný, zatímco ve směru kolmém je kladný a má vysokou hodnotu. Uhlíková vlákna jsou oproti skleněným křehčí a mají nižší hustotu. Kromě kompozitů s polymerní maticí se uhlíková vlákna používají i pro kompozity s kovovou, keramickou a uhlíkovou maticí. Uhlíkových vláken se v současné době vyrábí velké množství, obvykle se dělí na nízkomodulová, středněmodulová a vysokomodulová, hranice ovšem nejsou určeny normou.[1]

4.3.Aramidová (kevlarová) vlákna

Aramidy jsou po stránce chemické struktury aromatickými polyamidy. Makromolekuly ve svém řetězci obsahují amidové (-CO-NH-) a aromatické skupiny. Největší praktický význam má para-aramid, ve kterém jsou benzenová jádra vázána v para-poloze na amidové skupiny. Tato obchodní vlákna jsou známa pod obchodním názvem Kevlar, v současné době se jich vyrábí několik druhů lišících se chemickou strukturou i vlastnostmi. Aramidová vlákna mají vynikající odolnost proti účinku rozpouštědel, kapalných paliv a slané vody. Kvůli silně polárním vodíkovým můstkům ve struktuře sice absorbují vodu, ale nemá to za následek výraznější zhoršení mechanických vlastností. Kevlar má vysokou pevnost v tahu a podobně jako skleněná i uhlíková vlákna se porušuje křehce. Při zatěžování v tlaku kolmo na vlákna se však plasticky deformuje, mez kluzu je nízká, srovnatelná s běžnými konstrukčními polymery. Tímto chováním se zcela vymyká jak skleněným, tak i uhlíkovým vláknům. Aramid má velkou odolnost proti abrazi a při textilním zpracování se vlákna nepoškozují. Hustota kevlaru je nižší než hustota předchozích typů vláken.[1]

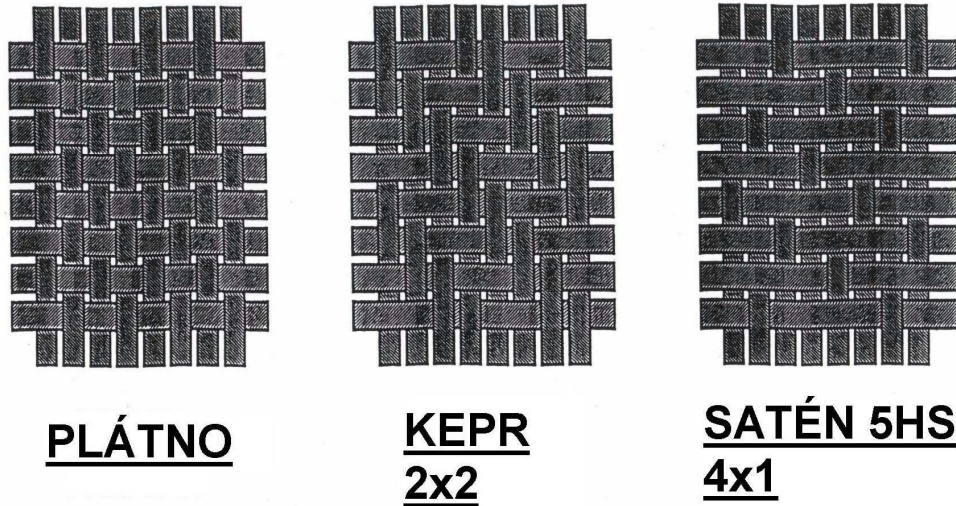
4.4.Srovnání hustoty jednotlivých dlouhovláknových výztuží

Tabulka 1. – Porovnání hustoty použitých výztuží

VÝZTUŽ	HUSTOTA[kg.m ⁻³]
Skleněná vlákna	2490 ÷ 2540
Uhlíková vlákna	1800 ÷ 2200
Aramidová vlákna	1440

5. Přehled dlouhvláknových tkanin

Výztuže do kompozitních materiálu lze sehnat v mnoha různých variantách zpracování. Běžně jsou k dostání v metráži nebo v podobě pásek různé šířky. Tkaniny jsou děleny podle hmotnosti 1m^2 . Vlákna v tkaninách mohou být uspořádány buď jednosměrně, nebo různými směry dle typu tkaní, jak je vidět na obrázku 1.



Obr. 1. Přehled dlouhvláknových tkanin[5]

6. Vliv materiálu dlouhvláknové výztuže na mechanické vlastnosti kompozitu

Výztuž kompozitu z velké části určuje jeho mechanické vlastnosti. Pevnost vláken lze měřit pouze ve směru podél vláken a to stejně velmi obtížně, protože upnutí působí jako slabé místo. Ve směru kolmo na vlákno se prakticky měřit nedá. Anizotropie vláken se tedy vyjadřuje snadněji jako hodnota pružnosti. Z vláken využívaných k vyztužení plastů jsou izotropní pouze skleněná vlákna.[2] Nejvyšší tabulkovou pevnost v tahu ze tří porovnávaných výztuží mají uhlíková vlákna, následují vlákna aramidová a nejnižší pevnost v tahu mají vlákna skleněná. Uhlíková vlákna mají i nejvyšší modul pružnosti ve směru podél vlákna, opět následují vlákna aramidová a nejnižší modul pružnosti mají vlákna skleněná. Uhlíková vlákna si zachovávají své mechanické vlastnosti i při teplotách přes 300°C , pevnost skleněných a aramidových vláken s rostoucí teplotou klesá. Při výrobě se často využívá možnosti kombinovat jednotlivé typy výztuží pro dosažení požadovaných vlastností výsledného laminátu. Je možné kombinovat buď jednotlivé vrstvy různých materiálů, nebo rovnou zakoupit tkaniny již vyrobené ze dvou typů vláken. Nejčastější kombinace bývá uhlík-aramid. Tato skladba je výhodná, protože uhlíková vlákna dodají laminátu vysokou tuhost a pevnost, zatímco aramid pozitivně ovlivní výsledný laminát svou houževnatostí.

7. Vliv použitého epoxidu a jeho zpracování na mechanické vlastnosti kompozitu

Epoxidů pro výrobu laminátů je široká škála pro různé typy použití. Epoxid (matrice) v kompozitu určuje především tepelný rozsah použití. Vytvrzování epoxidu v laminátu je výhodné za zvýšené teploty a to nejen z důvodu urychlení procesu vytvrzení, ale také z důvodu dosažení následně vyšší teplotní odolnosti výrobku. Teploty a časy vytvrzování a následně teploty skelného přechodu vždy uvádí výrobce.

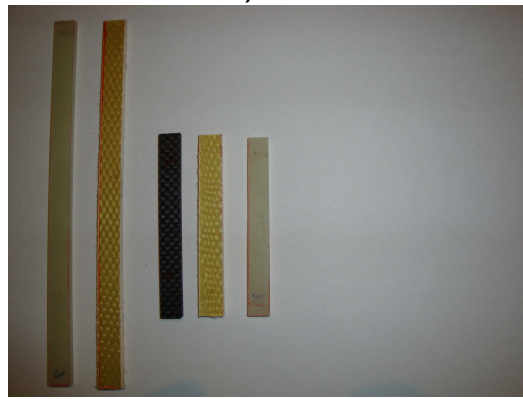
8. Výroba vzorků

Vzorky jsem vyrobil ručním laminováním v podmínkách domácí dílny. Pro výrobu vzorků jsem použil jako výztuž plátna ze skleněných, aramidových a uhlíkových vláken a hmotnosti

200g/m². Jako matrici jsem použil Epoxid Araldyt GY 764BD s tvrdidlem Aradur H285. Tato epoxidová laminační pryskyřice je vhodná pro výrobu sportovního náčiní a dílů pro automobily a letadla. Splňuje testy LBA pro letecký průmysl.



Obr. 2. Výroba vzorků



Obr. 3. Hotové zkušební vzorky

9. Zkouška tahem ČSN EN ISO 527-1

9.1. Podstata zkoušky

Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí do jeho porušení, nebo okamžiku, kdy napětí v tahu (zatížení) nebo protažení (poměrné prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení.[3]

9.2. Zkušební zařízení

Zkušební zařízení musí odpovídat podmínkám ISO 5893 a požadavkům uvedeným v 5.1.2 až 5.1.5 ČSN EN ISO 527-1. Zkoušení našich vzorků bylo provedeno v laboratořích ČVUT v Praze na zařízení Walter+Baiag CH-8224 Lohningen.

9.3. Zkušební tělesa

Pro zkoušku byla použita tělesa o těchto rozměrech:

Šířka zkušebního tělesa $b = 10[mm]$

Tloušťka zkušebního tělesa $h = 4[mm]$

Vzdálenost mezi upínacími čelistmi $L = 115[mm]$

9.4. Vztahy použité pro vyhodnocení

$$A = b \cdot h [mm^2] \quad (1)$$

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A} [MPa] \quad (2)$$

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A} [MPa] \quad (3)$$

10. Zkouška ohybem ČSN EN ISO 178

10.1. Podstata zkoušky

Zkušební těleso obdélníkového průřezu na dvou podpěrách, je konstantní rychlostí zatěžováno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se zkušební těleso nezlomí na svém vnějším povrchu, nebo dokud deformace nedosáhne maximální hodnoty 5%, podle toho, který případ nastane dříve. V průběhu tohoto postupu je měřená síla působící na zkušební těleso a výsledný průhyb zkušební tělesa uprostřed mezi podpěrami.[4]

10.2. Zkušební zařízení

Zařízení musí splňovat ISO 7500-1 a ISO 9513 a požadavky uvedené v 5.2 až 5.4 ČSN EN ISO 178. Zkoušení našich vzorků bylo provedeno v laboratořích ČVUT v Praze na zařízení plastics bending tester typ AS-102.

10.3. Zkušební tělesa

Pro zkoušku byly použity tělesa o těchto nominálních rozměrech:

$$\text{Šířka zkušební tělesa} \quad b = 10[\text{mm}]$$

$$\text{Tloušťka zkušební tělesa} \quad h = 4[\text{mm}]$$

$$\text{Vzdálenost podpěr zkušební tělesa} \quad L = 64[\text{mm}]$$

10.4. Vztahy a veličiny použité pro vyhodnocení

$$L = (16 \pm 1)h = 16.4 = 64[\text{mm}] \quad (4)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} [\text{mm}^4] \quad (5)$$

$$E = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot \Delta s \cdot 1000} [\text{GPa}] \quad (6)$$

Při zkouškách, kde jsme určovali modul pružnosti v ohybu, byla zkušební tělesa zatěžována pouze do deformace $\varepsilon_f = 2,5\%$.

Maximální průhyb, který tedy mohl během zkoušení nastat:

$$s_{\max} = \frac{\varepsilon_f \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad (7)$$

$$s_{\max} = \frac{0,0025 \cdot 64^2}{6 \cdot 4} = 0,43[\text{mm}]$$

11. Naměřené hodnoty – zkouška tahem

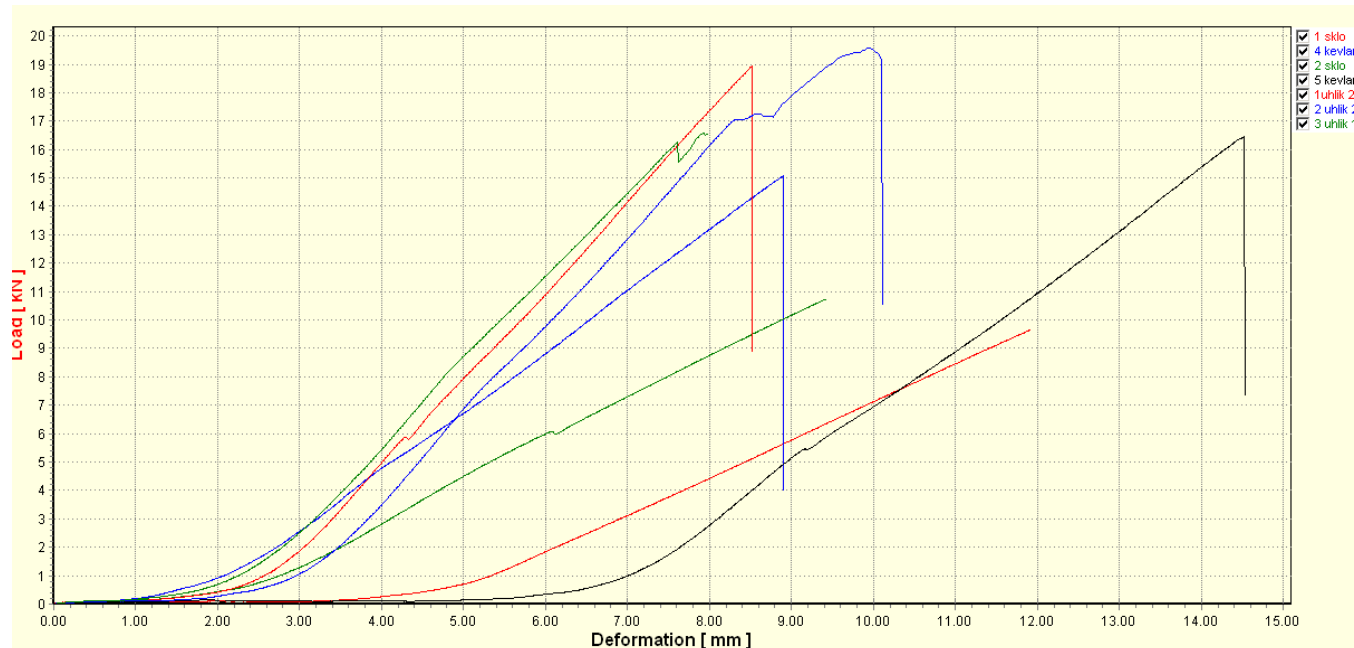
Tabulka 2. Naměřené hodnoty – zkouška tahem

Naměřené hodnoty - tah						
vzorek č.	Materiál výztuže	L [mm]	A [mm ²]	F _M =F _B [kN]	σ _M =σ _B [MPa]	σ _{M stř.} =σ _{B stř.} [MPa]
1	sklo	115	38,95	9,70	249	263
2	sklo	115	38,80	10,75	277	
4	kevlar	115	38,41	15,00	391	394
5	kevlar	115	41,59	16,50	397	
1	uhlík	115	39,07	19,00	486	473
2	uhlík	115	39,73	19,50	491	
3	uhlík	115	37,46	16,50	440	

12. Výsledky – zkouška tahem

Tabulka 3. Výsledky – zkouška tahem

Skleněná vlákna - tah								
vzorek č.	tloušťka h [mm]	h _{stř.} [mm]	šířka b [mm]	b _{stř.} [mm]	A [mm ²]	F _M =F _B [kN]	σ _M =σ _B [MPa]	σ _{M stř.} =σ _{B stř.} [MPa]
1	3,85	3,66	10,60	10,63	38,95	9,70	249	263
	3,65		10,70					
	3,49		10,60					
2	3,87	3,60	10,70	10,77	38,80	10,75	277	
	3,48		10,80					
	3,46		10,80					
Kevlarová vlákna - tah								
vzorek č.	tloušťka h [mm]	h _{stř.} [mm]	šířka b [mm]	b _{stř.} [mm]	plocha A [mm ²]	F _M =F _B [kN]	σ _M =σ _B [MPa]	σ _{M stř.} =σ _{B stř.} [MPa]
4	3,57	3,75	10,40	10,23	38,41	15	391	394
	3,72		10,40					
	3,97		9,90					
5	4,08	3,92	10,70	10,60	41,59	16,5	397	
	3,69		10,60					
	4,00		10,50					
Uhlíková vlákna - tah								
vzorek č.	tloušťka h [mm]	h _{stř.} [mm]	šířka b [mm]	b _{stř.} [mm]	plocha A [mm ²]	F _M =F _B [kN]	σ _M =σ _B [MPa]	σ _{M stř.} =σ _{B stř.} [MPa]
1	4,06	3,95	10,00	9,90	39,07	19	486	473
	3,77		9,90					
	4,01		9,80					
2	4,08	3,99	9,90	9,97	39,73	19,5	491	
	3,79		10,00					
	4,09		10,00					
3	4,08	4,01	9,20	9,33	37,46	16,5	440	
	3,82		9,30					
	4,14		9,50					



Obr. 4. Graf závislosti $F-\Delta l$ u zkušebních vzorků při zkoušce tahem

13. Naměřené hodnoty – zkouška ohybem

Tabulka 4. Naměřené hodnoty – zkouška ohybem

Naměřené hodnoty - ohyb									
F[N]	průhyb $s[10^{-2}mm]$								
	vzorek č. - výztuž								
	1-sklo	2-sklo	3-sklo	4-kevlar	5-kevlar	6-kevlar	4-uhlík	5-uhlík	6-uhlík
10	9,0	11,0	11,0	15,0	14,0	18,0			
12			13,0	16,0	17,0				
14	16,0	15,0	16,0	18,0	18,5	20,0			
16	21,0	17,0	18,0	19,0	21,0	23,0			
18	24,0	19,0	21,0	21,0	23,0	25,5			
20	26,0	22,0	24,0	23,0	25,0	27,0			
22	31,0	24,0	26,0	24,0	27,0	29,0			
24	35,0	27,0	29,0	26,5	29,5	31,0			
26	39,0	29,0	32,0	28,0	31,5	33,0			
28		31,0	34,0	30,0	33,0	35,0			
30		33,0	37,0	31,0	34,5	37,0	2,0	0,0	0,0
32		35,0	39,0	33,0	36,5	38,5			
34		38,0	41,0	35,0	38,5	40,5	3,0	1,0	1,0
36		40,0		36,5	40,5				
38				38,0			3,5	2,5	1,5
40				40,0					
42							4,5	3,5	2,0
46							5,5	5,0	2,5
50							6,5	6,0	3,0

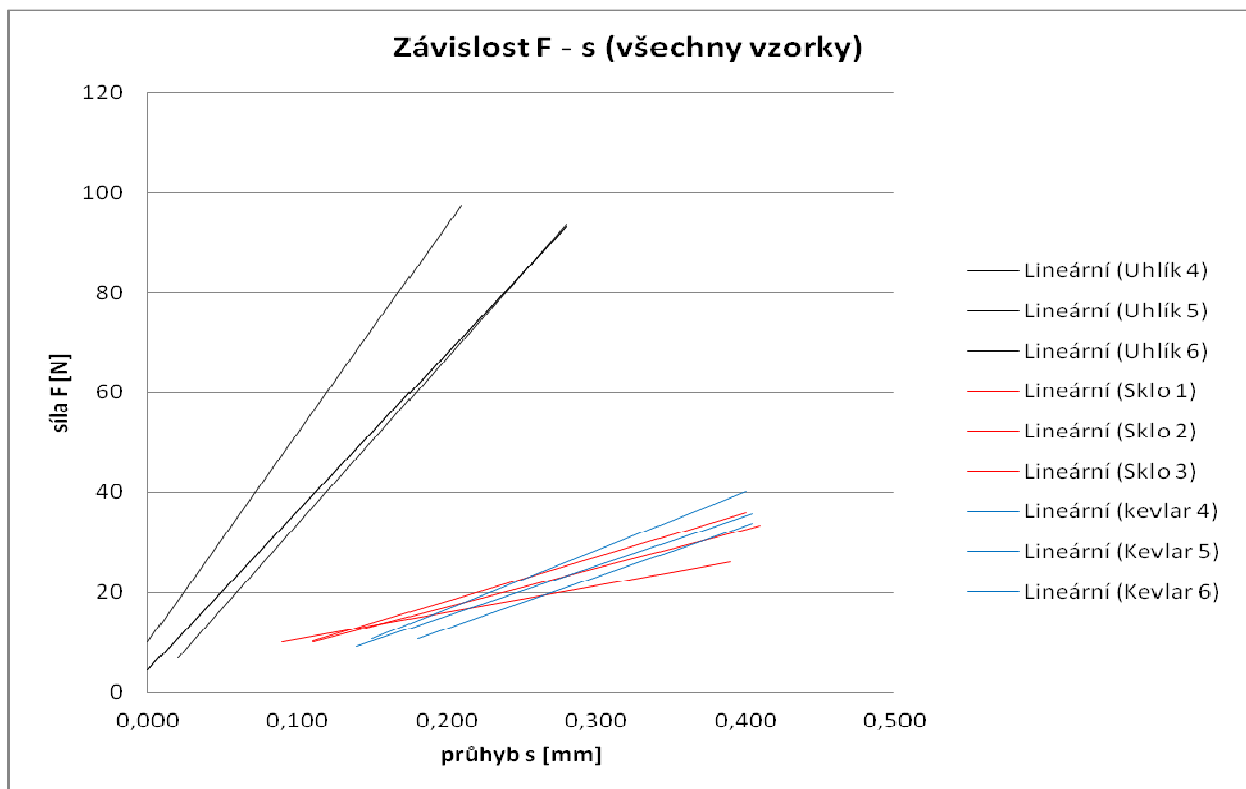
54							8,0	7,0	3,5
58							9,0	8,5	4,0
62							10,0	9,0	5,0
66							11,0	10,5	6,0
70							12,0	11,5	6,5
74							13,0	12,5	7,5
78							14,0	13,5	8,0
82							15,0	14,0	9,0
86							16,0	15,5	10,0
90							16,5	16,5	10,5
94							17,5	17,5	11,5
98							18,5	18,5	12,5
102							19,5	19,0	13,0
106							20,5	20,0	14,0
110							21,5	21,0	14,5
114							22,0	22,0	15,0
118							23,0	23,0	16,0
122							24,0	23,5	17,0
126							25,0	25,0	18,0
130							26,0	25,5	19,0
134							26,5	26,5	19,5
138							27,0	27,0	20,5
142							28,0	28,0	21,0

16. Výsledky – zkouška ohybem

Tabulka 4. Výsledky – zkouška ohybem

Epoxid - skleněná vlákna - ohyb									
vzorek č.	tloušťka h [mm]	h _{stř.} [mm]	šířka b [mm]	b _{stř.} [mm]	A [mm ²]	I [mm ⁴]	ΔF/Δs	E [GPa]	E _{stř.} [GPa]
1	3,99	4,04	9,20	9,37	37,85	51,49	53,76	5,70	6,77
	4,02		9,40						
	4,12		9,50						
2	4,11	4,17	10,50	10,47	43,66	63,27	88,22	7,62	
	4,36		10,50						
	4,05		10,40						
3	4,02	4,14	10,20	10,23	42,35	60,49	77,50	7,00	
	4,12		10,20						
	4,29		10,30						

Epoxid - kevlarová vlákna - ohyb									
vzorek č.	tloušťka h [mm]	h _{stř.} [mm]	šířka b [mm]	b _{stř.} [mm]	A [mm ²]	I [mm ⁴]	ΔF/Δs	E [GPa]	E _{stř.} [GPa]
4	4,02	4,16	10,20	10,40	43,26	62,39	117,88	10,32	10,67
	4,27		10,40						
	4,14		10,60						
5	4,20	4,14	9,90	9,93	41,11	58,72	99,80	9,28	
	4,22		10,00						
	3,99		9,90						
6	3,90	3,78	9,80	10,00	37,80	45,01	102,35	12,42	
	3,75		10,10						
	3,69		10,10						
Epoxid -uhlíková vlákna - ohyb									
vzorek č.	tloušťka h [mm]	h _{stř.} [mm]	šířka b [mm]	b _{stř.} [mm]	A [mm ²]	I [mm ⁴]	ΔF/Δs	E [GPa]	E _{stř.} [GPa]
4	3,81	3,94	9,50	9,60	37,82	48,93	333,31	37,20	39,83
	3,90		9,50						
	4,12		9,80						
5	3,72	3,84	9,60	9,67	37,13	45,63	316,87	37,93	
	3,83		9,70						
	3,98		9,70						
6	4,10	3,95	10,00	9,97	39,38	51,20	416,02	44,37	
	3,94		9,90						
	3,82		10,00						



Obr. 5. Graf závislosti F-s u zkušebních vzorků při zkoušce ohybem

17. Závěr

Cílem praktické části práce bylo porovnat mechanické vlastnosti ručně vyráběných laminátů s různými typy výztuže. Výsledky viz. tabulka 5.

Tabulka 5. Výsledky

Materiál výztuže	E [GPa]	$\sigma_M = \sigma_B$ [MPa]
skleněná vlákna	6,77	263
kevlarová vlákna	10,67	394
uhlíková vlákna	39,83	473

Na tuto práci bych rád navázal ve své bakalářské práci, kde bych chtěl zkoušet i další mechanické vlastnosti kompozitů. Dále bych také chtěl zkoušet výztuže vzájemně kombinovat mezi sebou, případně použít i sendvičovou konstrukci. Na základě dalších výsledků chci zhodnotit vhodnost použitých výztuží u konkrétních aplikací z technické praxe.

Seznam symbolů

F_M	Maximální síla	[kN]
F_B	Síla při přetržení	[kN]
A	Počáteční průřez zkušebního tělesa	[mm ²]
σ_M	Pevnost	[MPa]
σ_B	Napětí při přetržení	[MPa]
F	Zátěžná síla	[N]
s	Průhyb	[mm]
I	Moment setrvačnosti	[mm ⁴]
E	Modul pružnosti	[GPa]

Seznam použité literatury

- [1] Janovec, J., Cejp, J., Steidl, J. Perspektivní materiály. ČVUT v Praze, 2008.
- [2] Ehrenstein G.W. Polymerní kompozitní materiály. Scientia, 2009.
- [3] ČSN EN ISO 527-1 Plasty – stanovení tahových vlastností – část 1 : základní principy. Český normalizační institut, 1997.
- [4] ČSN EN ISO 178 Plasty – stanovení ohybových vlastností. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] www.havel-composites.com
- [6] www.skolil.cz