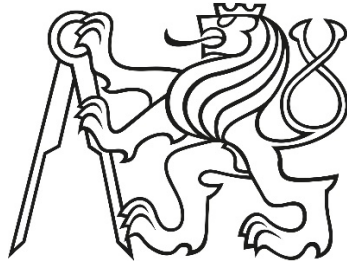


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh a analýza kombinovaně namáhané kompozitní trubky

2016

Marek Žďárský

Originální zadání bakalářské práce

Čestné prohlášení:

Já, Marek Žďárský, student ČVUT v Praze Fakulty strojní, prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Jméno a příjmení autora

Anotační list

- Autor / Author: Marek Žďárský
- Název bakalářské práce: Návrh a analýza kombinovaně namáhané kompozitní trubky
- Title: Design and Analysis of Composite Tube under Combined Load

- Škola / University: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní/
Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
- Ústav / Institute: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky/
Department of Mechanics, Biomechanics and Mechatronics
- Odbor / Division: Odbor pružnosti a pevnosti / Division of Elasticity and Strength

- Rok vydání / Year of Issue: 2016
- Vedoucí bakalářské práce / Bachelor's Thesis Supervisor:
Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D.

- Počet stran / Number of Pages: 52
- Počet obrázků / Number of Figures: 25

- Klíčová slova: kompozitní trubka, klasická laminační teorie, návrh a analýza, experiment
- Key Words: Composite Tube, Classical Lamination Theory, Design and Analysis, Experiment

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je pevnostní analýza kompozitní trubky (se symetrickou skladbou stěny) současně zatížené vnitřní přetlakem, krutem a osovou silou na základě klasické laminační teorie. Pro návrh a kontrolu trubky byl použit program LamiEx v.3.0. V další fázi byly diskutovány výhody a nevýhody symetrické a nesymetrické skladby. Nakonec byla na základě experimentálních dat ověřena platnost teorie pro tahové zatížení.

Abstract

The aim of the thesis is a composite tube strength analysis (a symmetric lay-up of wall) loaded with a combination of internal pressure, torsion and axial load based on the classical lamination theory (CLT). LamiEx v.3.0 was used for a design and a control of the tube. Advantages and disadvantages of a symmetric and an asymmetric configuration were discussed in the next part. In the end were compared experimental data with the theory (CLT) for a tensile test.

Obsah

Úvod	9
Cíl práce	9
Struktura práce	10
Formulace problému	11
Aplikace kompozitních materiálů	12
1 Kompozitní materiály	15
1.1 Definice kompozitního materiálu	15
1.2 Čtyři paradoxy materiálu	15
1.3 Paradox pevného materiálu	16
1.3.1 Paradox vláknité struktury.....	18
1.3.2 Paradox délky zatížení.....	18
1.3.3 Paradox kompozitního materiálu.....	18
1.4 Všeobecné vlastnosti	18
1.5 Výhody a nevýhody laminátů.....	19
1.6 Srovnání kompozitů s kovy	19
1.6.1 Ekonomické srovnání	20
1.7 Dělení kompozitů	20
2 Vláknové kompozity	21
2.1 Vlákná	21
2.1.1 Materiály pro vláknové kompozity.....	21
2.1.1.1 Skleněná vlákna	21
2.1.1.2 Aramidová vlákna.....	21
2.1.1.3 Uhlíková vlákna.....	22
2.1.2 Srovnání vláken.....	23
2.1.2.1 Závislost napětí na poměrném prodloužení	24
2.1.2.2 Anizotropie	24
2.1.2.3 Teplotní stabilita	24
2.1.2.4 Určování tuhosti a pevnosti vláken.....	24
2.1.2.5 Dynamické vlastnosti.....	25
2.1.2.6 Cena.....	25
2.1.2.7 Všeobecné srovnání	25
2.2 Matrice.....	26
2.2.1 Reaktivní pryskyřice.....	26
2.2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice	27
2.2.1.2 Vinylesterové pryskyřice	27
2.2.1.3 Epoxidové pryskyřice	27
2.2.2 Termoplasty.....	27
2.3 Spojení vlákno-matrice.....	28
3 Technologie přesného navíjení.....	29
4 Pevnostní kritéria.....	31

4.1 Kritérium maximálního napětí.....	31
4.2 Kritérium maximální deformace.....	31
4.3 Hillovo kritérium pevnosti.....	32
4.4 Tsai-Hillovo kritérium pevnosti	32
4.5 Hoffmanovo kritérium pevnosti	32
4.6 Tsai-Wu kritérium pevnosti.....	32
4.7 Puckovo kritérium pevnosti.....	32
5 Klasická laminační teorie	33
6 Návrh laminátu	36
6.1 Analýza zadání - zatížení.....	37
6.1.1 Vnitřní přetlak	37
6.1.2 Krouticí moment.....	37
6.1.3 Osová síla	38
6.1.4 Kombinované zatížení.....	38
6.2 Řešení	38
7 Experiment	45
8 Diskuze	47
9 Závěr	48
Seznam použitých informačních zdrojů	49
Seznam obrázků	51
Seznam tabulek	51

Poděkování

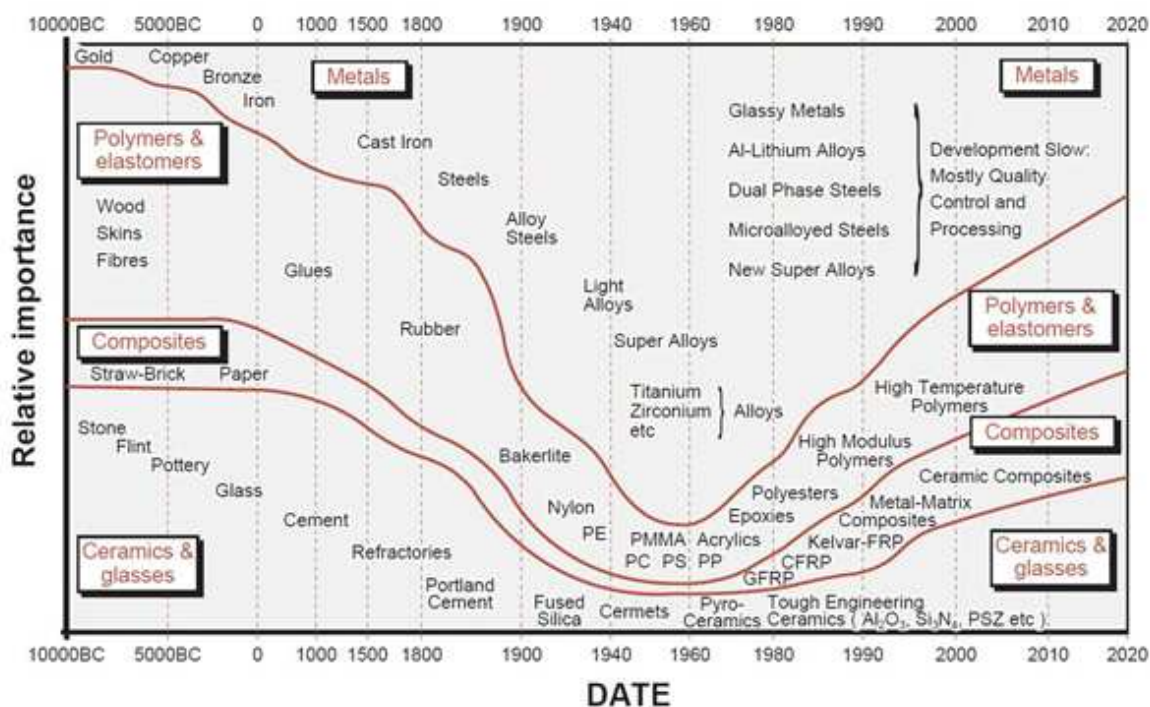
Na tomto místě bych chtěl vyjádřit poděkování Ing. Bc. Zdeňku Padovcovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné rady a vstřícný přístup během celého akademického roku.

Velké dík patří i mým rodičům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

Úvod

Ačkoliv kompozitní materiály byly známy již od nepaměti, teprve v druhé polovině 20. století se vydělily jako svébytná konstrukční skupina od kovů, keramiky nebo polymerů a nově začaly být oceňovány v moderních odvětvích (nejen) strojírenské praxe. Koncepce vícefázového materiálu přináší mnoho příležitostí pro inovativní návrhy, které mohou být realizovatelné rozličnými způsoby díky možnostem neobyčejné kombinaci vlastností, jichž mnohdy nemůže být dosaženo žádným jiným konvenčním (monolitním) materiálem.

Relativní důležitost materiálů v závislosti na technologickém pokroku (času) demonstruje obr. 1, z něhož je patrné, že absolutní dominance kovů z globálního hlediska (napříč průmyslovými odvětvími) je již od 60. let 20. století na ústupu. V některých oborech se začínají čím dál více prosazovat (i již se prosadily) plasty, keramika nebo právě kompozity, kterým se bude věnovat i tato práce.



Obr. 1 Relativní důležitost materiálů v průběhu času [13]

Cíl práce

Hlavní částí této práce je aplikace klasického strojírenského zadání - dimenzování součásti na definované zatížení (s několika omezujícími podmínkami), avšak tentokrát na element, který je z anizotropního, resp. ortotropního materiálu, z čehož vyplývá i celý zvolený způsob postupu. Pro řešení zadaného problému byl zvolen analytický přístup, realizovaný programem LamiEx V3.0, který celou proceduru navrhování (implementovanou algoritmizací) časově zefektivnil. Blíže viz konkrétní zadání v následujících odstavcích.

Struktura práce

Pořadí a struktura kapitol odráží jednotlivé body pokynů k vypracování bakalářské práce.

1. Proveďte pevnostní analýzu kompozitní trubky zatížené vnitřním přetlakem, krutem a osovou silou na základě klasické laminační teorie pro zvolené typy vlákna a matrice.
2. Skladbu stěny navrhnete jako symetrickou.
3. Porovnejte výhody a nevýhody symetrické a nesymetrické skladby.
4. Na základě experimentálních dat ověřte planost teorie pro tahové zatížení.

Přehled vypracovaných bodů ze zadání bakalářské práce a souvisejících výsledků (včetně kontroly) dle pokynů pro vypracování jsou v této práci uvedeny pro bod 1, 2 v kapitole 6., pro bod 4 v kapitole 7. a nakonec problematika bodu 3 je diskutována v kapitole 8.

Další, zejména úvodní, oddíly práce poskytují nezbytný rešeršní prostor pro vysvětlení pojmů, se kterými se pracuje v následných kapitolách, jež řeší zadání bakalářské práce. Cílený komentář k jednotlivým částem je uveden nyní.

Úvodní rešeršní kapitoly si kladou za cíl uvést čtenáře do rozsáhlé problematiky kompozitů (z pohledu nauky o materiálu, mechaniky, technologie, včetně ekonomických postřehů). Bohatý podklad pro teoretický úvod poskytla literatura označená [3].

V kapitole 1 je nejprve vysvětlen termín kompozit. Dále se diskutují výhody a nevýhody kompozitů a to z pohledu mechaniky, nauky o materiálu, ale i z perspektivy ekonomické. Nakonec je v tabelované formě představeno rozdělení kompozitů.

Kapitola 2 se blíže věnuje nejpoužívanějším vláknům, matricím a interakci vlákna a matrice.

Kapitola 3 popisuje technologii přesného navíjení.

Kapitola 4 přibližuje nejpoužívanější pevnostní kritéria.

V kapitole 5 je rozebírána klasická laminační teorie.

V následující kapitole 6 je analyzováno zadání pro návrh kompozitní trubky. Je uveden kompletní výčet hodnot výsledků, které byly navrženy dle zásad klasické laminační teorie pro možnou realizaci s příslušnou bezpečností (dílčí zadání již v podkapitole následující – formulace problému).

Kapitola 7 zpracovává, vyhodnocuje a srovnává experimentální výsledky s analytickým výpočtem pro tahově zatížený (tj. jiný vzorek, resp. situaci, která byla řešena v kapitolách, jež předcházejí kap. 7, tedy zejména kapitola 6) vzorek.

Pro vlastní návrh z teoretického hlediska sloužily zejména monografie [3], [11] a publikace [27].

Formulace problému

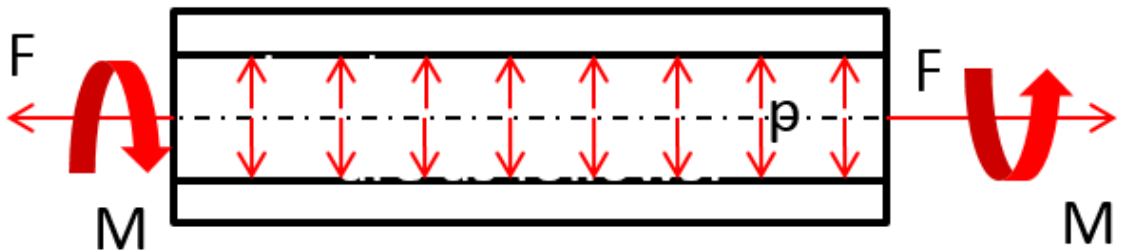
Návrh a analýza kombinovaně (vnitřním přetlakem, krutem a osovou silou na základě klasické laminační teorie pro zvolený typ vlákna a matrice) namáhané kompozitní trubky.

Zásady pro vypracování v bodech:

1. Proveďte rešerši nejpoužívanějších vláken a matric pro výrobu kompozitních konstrukcí
2. Proveďte pevnostní analýzu kompozitní trubky zatížené vnitřním přetlakem, krutem a osovou silou na základě klasické laminační teorie pro zvolený typ vlákna a matrice.
3. Uvažujte symetrickou skladbu stěny (matice vazební tuhosti $B_{ij} = 0$)

Dáno:

1. Provozní zatížení trubky (obr. 2), geometrické a technologické parametry.



Obr. 2 Schématický obrázek zatížené trubky

Zatížení:

osovou silou $F = 10\,000\text{ N}$

kruticím momentem $M = 500\,000\text{ Nmm}$

vnitřním přetlakem $p = 30\text{ MPa}$

Návrhová omezení:

geometrické:

vnější poloměr trubky $R = 30\text{ mm}$

koeficient bezpečnosti ≥ 2 (libovolné pevnostní kritérium)

technologické:

výroba technologií přesného navíjení ($V_f = 45\text{-}65\%$, tloušťka vrstvy $0,5\text{-}1\text{ mm}$)

Aplikace kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se v současné době uplatňují v mnoha oborech lidské činnosti: automobilová (obr. 3, 4) a kolejová vozidla, letectví (obr. 5, 6), kosmonautika (obr. 7), zdravotnictví, sport, stavebnictví, strojírenství (obr. 8), atd.



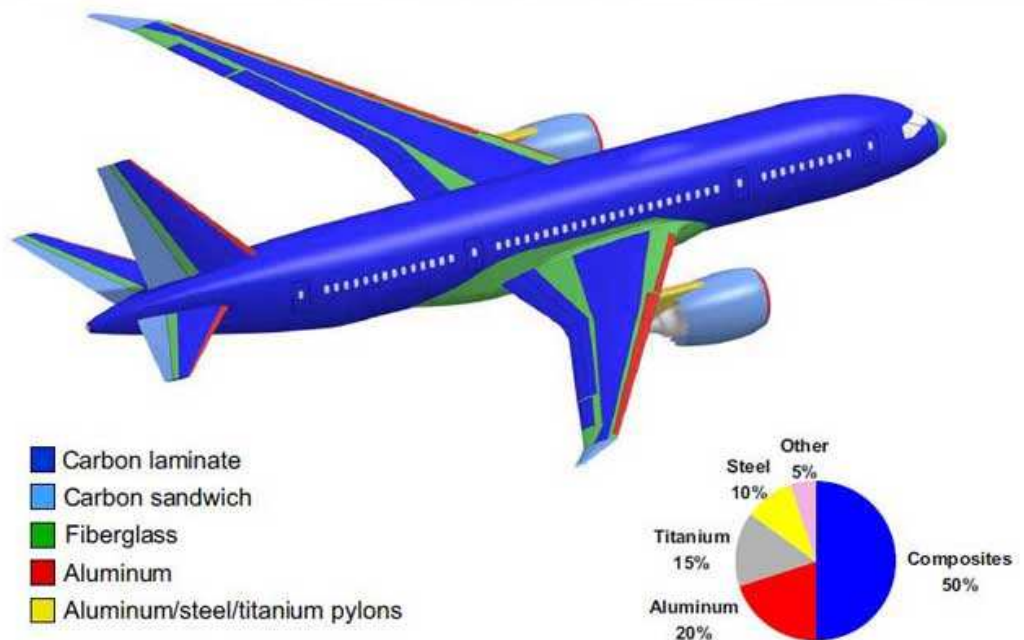
Obr. 3 Šasi Lamborghini z polymeru vyztuženého uhlíkovými vlákny [21]



Obr. 4 Disky kol z uhlíkových vláken [9]



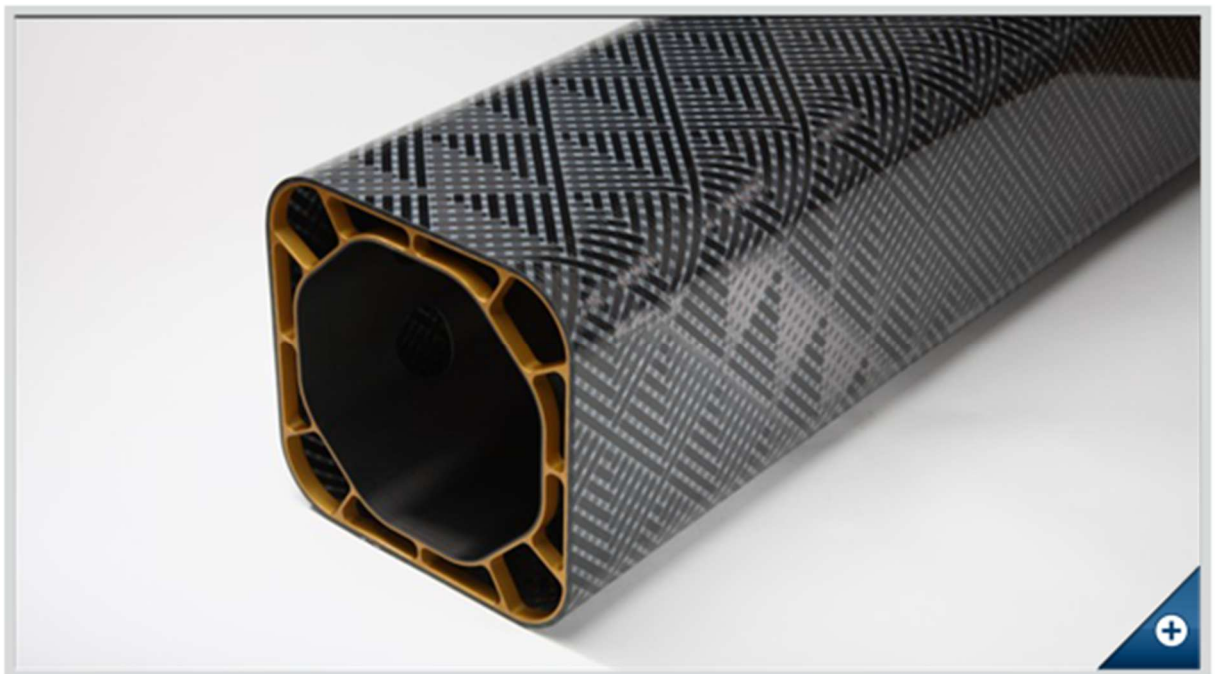
Obr. 5 Kompozitový trup helikoptéry KC 518 [7]



Obr. 6 Boeing 787, zastoupení materiálu v konstrukci [1]



Obr. 7 Vysokoteplotní kompozit s keramickou maticí pro tepelný štít raketoplánu [23]



Obr. 8 Trubka z kompozitního materiálu [10]

1 Kompozitní materiály

Než přejdeme k vlastní (užší) definici významu slova kompozit či kompozitní (materiál), který se uplatnil nejen na poli materiálových věd či chemickém inženýrství, ale pro tuto práci zejména ve strojírenství, není od věci se krátce pozastavit nad původem a obecným významem v širším pojetí. Slovo kompozitní (kompozit) je z etymologického hlediska [15] datováno, navzdory běžnému použití až v nedávné době, již k roku 1400. Pochází ze starofrancouzského composite, či latinského compositus "umístěný společně", z minulého přičestí trpného latinského componere "umístěný společně nebo celek složený z částí," tedy z com- "společně" (viz com-) + ponere "umístit".

1.1 Definice kompozitního materiálu

Definice kompozitního materiálu není jen jedna. Existuje jich dokonce celá řada, avšak jejich význam je víceméně, napříč technickými obory, podobný.

Uvedme některé (popř. ilustrativně, obr. 1-3):

Prostá a přirozeně chápáná definice je tato: „*Kompozitní materiály (kompozity) jsou složené materiály, skládající se ze dvou či více složek, z nichž každá plní jinou specifickou funkci a má jiné materiálové vlastnosti, většinou značně odlišné.*“, převzato z [25], str. 5.

Další v pořadí je definice, kterou poskytuje nauka o materiálu: „*Kompozit je materiál ze spojitě fáze zvané matrice a nespojitě fáze dispergované v matrici. Nespojitá sekundární fáze má nejčastěji úlohu fáze vyztužující (i jinou např. zprostředkovává elektrickou vodivost) a nazývá se proto výztuží. Výztuž slouží obecně k vytvoření nového materiálu s celkově vysokou úrovní mechanických vlastností.*“, převzato z [5], str. 103.

Jiná definice je z perspektivy chemického inženýrství: „*Kompozity jsou heterogenní systémy tvořené minimálně dvěma fázemi, obvykle rozdílného chemického složení, které se od sebe liší svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Fáze oddělené rozhraním jsou téměř vždy v tuhém stavu. Jedna fáze má funkci pojivové matrice, další jsou fázemi sekundárními (u polymerních kompozitů nazývané plniva). Sekundární fáze nejsou obvykle spojitě, jsou tvořeny částicemi rozmanitého tvaru.*“, převzato z [14], str. 276.

Z pohledu nauky o materiálu, strojírenské technologie a navíc s jistou ambicí o sjednocení i vyjasnění pojmu tohoto konstrukčního materiálu se objevuje definice: „*Kompozit je název pro heterogenní materiál složený nejméně ze dvou různých materiálových složek, jehož vlastnosti nedosahuje nejen žádná složka kompozitu samostatně, ale mnohdy ani vlastností, které by se daly předpokládat prostým součtem vlastností těchto složek. Takovýto účinek se nazývá synergický a je rozhodujícím pro určení, co kompozit je a co není. Proto příležitější by pro kompozity bylo označení synergické materiály, což by nejlépe vystihovalo jejich podstatu.*“, převzato z [12], str. 34.

1.2 Čtyři paradoxy materiálu

Mocným argumentem pro použití kompozitních materiálů je efektivita, kterou v kontextu této práce vyjadřujeme mimo jiné veličinou označenou jako měrná pevnost (obr. 1-1), jež je definována coby podíl meze pevnosti v tahu a hustoty materiálu. Efektivita, která je přírodě vlastní, a která inspiruje lidskou tvůrčí činnost v mnoha oblastech (konstrukční nevyjímaje).

Ukázkovými příklady, jež v určité obměně inspirovaly strukturální návrhy běžně užívané v praxi (např. konstrukce letounu nebo perlitická struktura oceli), může být stvol bambusu, dřevo (dřevo obsahuje pevná vlákna celulózy spojená a obklopená amorfním ligninem, který se chová jako termoplast), kosti (v mezibuněčné matrix jsou tvořeny organickými flexibilními kolagenovými vlákny a anorganickým tvrdým a křehkým apatitem), či vlna z ovce merino, která se v detailním zkoumání mikrostruktury prakticky neodlišuje od člověkem designovaných konstrukcí z kompozitního materiálu.

Výše skloňovaná efektivita, která se v praxi rozvine z důsledného dodržování specifických inherentních vlastností (obr. 2-1, 2-2), je důsledkem čtyř paradoxů materiálu [3], rozvedených v podkapitolách 1.3.1 – 1.3.3.

1.3 Paradox pevného materiálu

„Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky.“ (F. Zwicky).

Tab. 1-1 Materiálové srovnání vlastností (mez pevnosti, hustota, měrná pevnost), převzato z [3]

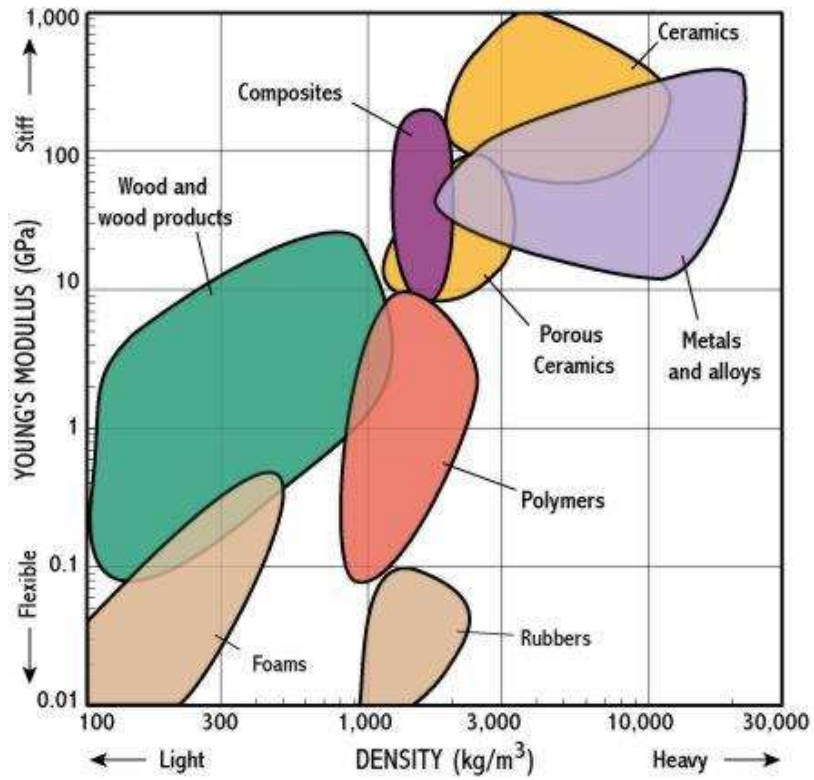
materiál	mez pevnosti v tahu R_m [N.mm ⁻²]		hustota ρ [kg.m ⁻³]	měrná pevnost R_m/ρ [kN.m.kg ⁻¹]	
	teoretická	naměřená			
		vlákno			kompaktní hmota
Ocel	21 000	4 000	1 400	7 850	510 (178 ¹)
Hliník	7 600	800	600	2 700	296
Polyetylen	27 000	1 500	30	900	1 667
polypropylen	16 000	1 300	38	950	1 368
Polyamid	27 000	1 700	50	1 150	1 478

Zajímavou informací nám poskytne tab. 1-1 (nejen srovnání hodnot po sloupcích, ale i mezi sloupci zároveň – mezi teoretickou a naměřenou pevností² a zejména pak mezi vláknem a kompaktní hmotou). Je zřejmé, že plasty v kompaktní formě (nevláknové) v tomto srovnání zůstávají v pozadí za klasickými konstrukčními materiály – ocel, hliník. Situace se mění, přepočteme-li tyto hodnoty (vlákno) vzhledem k hmotnosti, tedy porovnáme-li hodnoty u veličiny označené jako měrná pevnost. Tento parametr je důležitý pro odvětví, ve kterém hmotnost hraje důležitý, ne-li rozhodující faktor – např. letecký průmysl, konstrukce pro sportovní (závodní) využití, výrobní stroje, průmysl dopravních vozidel apod.

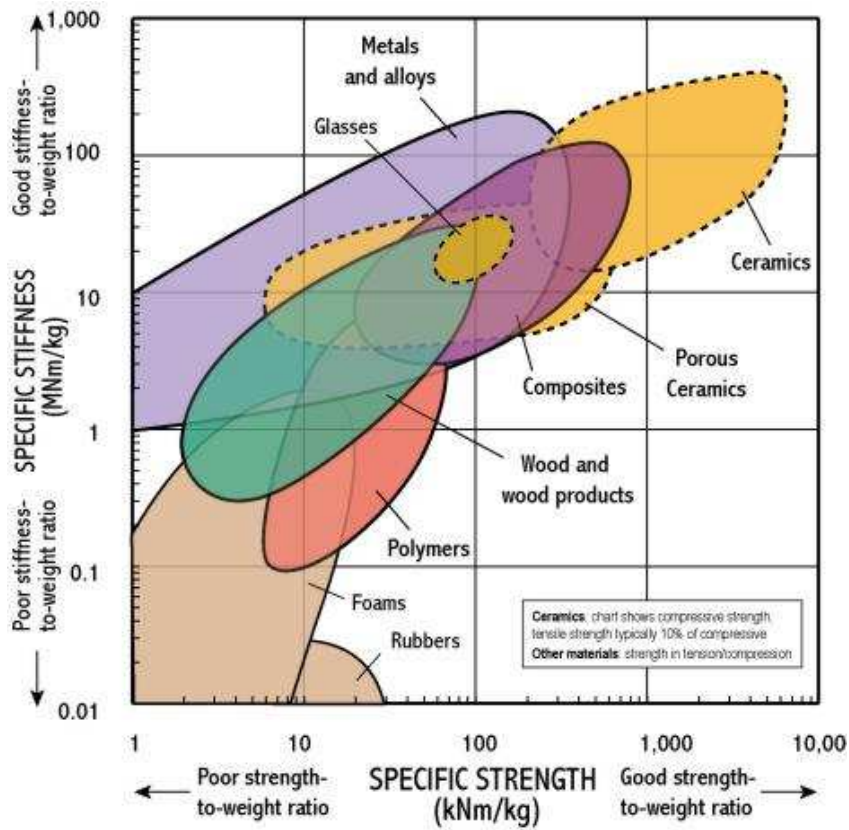
Ačkoliv bylo srovnání provedeno pro ocelové vlákno s mimořádnou hodnotou meze pevnosti v tahu ($R_m = 4\,000\text{ N.mm}^{-2}$), při srovnání s plasty přesto zaostává, díky velké hustotě, několikanásobně. Pro běžnou vysokopevnostní ocel v kompaktní formě, $R_m = 1\,400\text{ N.mm}^{-2}$, je rozdíl dokonce v řádu. Pro aramidové vlákno (Kevlar 49) s hustotou $\rho = 1\,440\text{ kg.m}^{-3}$ a $R_m = 3\,620\text{ N.mm}^{-2}$ se dokonce dostáváme k hodnotě $2\,514\text{ kN.m.kg}^{-1}$.

¹ Pro kompaktní formu.

² Přičemž rozlišujícím faktorem mezi skutečnou a teoretickou pevností je přítomnost poruch, povrchové mikrodrsnoty (koncentrátory napětí) a změny teploty (změna smykové pevnosti odpovídá teplotní změně smykového modulu, tzv. Orowanova relace; pro tahovou pevnost přináší komplikaci s teplotní závislostí povrchové energie) v krystalové mřížce. (více viz str. 18 v [19], str. 277 v [6])



Obr. 1-1 Závislost Youngova modulu na hustotě [24]



Obr. 1-2 Závislost měrné tuhosti na měrné pevnosti [24]

1.3.1 Paradox vláknité struktury

„Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší.“ (A. A. Griffith).

Závislost (meze pevnosti na průměru vlákna) je hyperbolická.

1.3.2 Paradox délky zatížení

„Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost.“ (A. A. Griffith).

Bod 2. a 3. je vysvětlován tím, že přítomnost poruch je u tenčího a kratšího vlákna méně pravděpodobná.

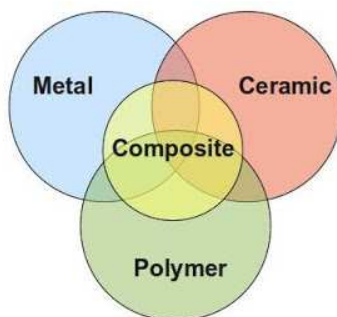
1.3.3 Paradox kompozitního materiálu

„Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně.“ (G. Slayter)

Pozn. platí v případě zatížení tahem, u jiného typu zatěžování mohou vlákna ztratit své geometrické uspořádání.

1.4 Všeobecné vlastnosti

Nejčastěji se využívají plasty vyztužené vlákny, které obsahují vlákna ze skla, uhlíku nebo aramidu a matrici z termosetu nebo termoplastu. Standardní přístup spočívá v cíleném vyztužení podle směru namáhání, takže výsledkem je – na rozdíl od kovů nebo nevyztužených plastů – anizotropní materiál, tj. materiál vykazující v různých směrech rozdílné vlastnosti. V případě jednovrstevného kompozitu je materiálem ortotropním (tzn., že je možné nalézt 3 na sebe kolmé osy, v jejichž směrech se materiál chová jako izotropní, tj. deformují se jen délkové rozměry, nikoliv úhly). Majorita všech v současné době používaných vyztužených plastů (90%) se skládá ze směsi dlouhých skleněných vláken a polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic. Z aplikačního hlediska je většina vyztužených plastů uspořádána vrstevnatě a je nazývána lamináty.



Obr. 1-3 Schématický obrázek vyjadřující podstatu vzniku kompozitu [19]

1.5 Výhody a nevýhody laminátů

Níže (tab. 1-2) jsou uvedeny výhodné, tak i nevýhodné rysy laminátů.

Tab. 1-2 Výhodné a nevýhodné vlastnosti laminátů [3]

Výhody laminátů:
velká pružnost při deformaci
vysoká pevnost a tuhost, kterou lze přizpůsobit směru a druhu zatížení, zejména při zatížení v tahu ve směru vláken, při nízké hmotnosti kompozitu
značná přizpůsobivost každému tvaru
značná odolnost vůči dynamickému namáhání při vysokém mechanickém tlumení
nízký součinitel teplotní délkové roztažnosti
vysoká odolnost proti stárnutí a korozi
mnoho možností kombinace matrice a vláken
dobrá surovinová základna
menší požadavek na investice při malém počtu výrobků
možnost oprav při použití termosetické matrice
Nevýhody laminátů:
množství variant materiálového složení, neexistuje standardní kompozit
neobvyklé chování materiálu (vlastnosti kompozitu nelze jednoduše odvodit součtem vlastností jeho složek)
specifické vlastnosti materiálu a způsoby zpracování
obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu
nízká mez pevnosti v tahu ve směru kolmo ke směru uložení vláken (tvorba trhlin, oslabení spojení vlákna a matrice)
možné katastrofální následky při havárii
vysoké náklady při dimenzování náročných konstrukcí
místní poškození, např. nárazem, se obtížně poznávají a hůře opravují než např. u hliníkových konstrukcí

1.6 Srovnání kompozitů s kovy

Při přímé komparaci (tab. 1-3) vysokopevnostních kompozitních materiálů s kovovými, lze kompozity upřednostnit nad kovy díky těmto vlastnostem:

Tab. 1-3 Komparace kompozitů a kovů [3]

vysoká pevnost a tuhost při současné nízké měrné hmotnosti (u leteckých konstrukcí je možno uspořit přibližně 20 % hmotnosti)
velmi dobrá odolnost proti korozi
lepší dynamické vlastnosti
dobré tlumicí vlastnosti
vysoká tvarová stálost
možnost vyrábět složité díly jednorázově nebo je skládat z celkově menšího počtu dílů

1.6.1 Ekonomické srovnání

Neméně zajímavé je i srovnání ekonomické. Vzhledem k vysokým nákladům na energii se předpokládá dosažení úspor v kosmonautice až 25 000 € na 1 kg ušetřené hmotnosti. V leteckém průmyslu jsou tyto úspory až 1 000 € / 1 kg, v průmyslu dopravních vozidel 0 až 3 € / 1 kg.

1.7 Dělení kompozitů

Kompozity lze rozdělit podle několika hledisek, například podle typu výztuže, matrice, více viz tab. 1-4.

Tab. 1-4 Rozdělení kompozitů, převzato z [3]

výztuž	vláknové	dlouhovláknové	jednosměrové	s jedním druhem vláken
				s více druhy vláken (hybridní)
			vícsměrové	s jedním druhem vláken
				s více druhy vláken (hybridní)
		krátkovláknové	s náhodnou orientací (vláken o řádové délce 100x jejich tloušťky)	
			s přednostní orientací	
	částicové	s náhodnou orientací		
		s přednostní orientací (dvourozměrných částic – uhlíkové destičky)		
matrice	plastová	termoplast (polypropylen, polyamid, polykarbonát,...)		
		reaktoplast (nenasycený polyester, epoxid,...)		
		sesítovaný elastomer (akrylonitril-butadien, styren-butadien,...)		
	kovová	slitiny kovů (lehké – hliník, hořčík, titan; železo, kobalt, měď)		
	keramická	karbid, nitrid křemíku; oxid křemíku, zirkonia		
	uhlíková	tvořena uhlíkem v různém stavu strukturní uspořádanosti		
<i>Vyztužující materiál pro matrici</i>				
plastovou	sklo, uhlík, aramid (polymer na bázi aromatický polyamidů)			
Kovovou	keramické (karbid křemíku), kovové (wolframová) materiály			
keramickou	keramická, uhlíková vlákna			
uhlíkovou	uhlíková vlákna			
<i>Konstrukční hledisko</i>				
laminát	kompozit složený z několika vrstev (lamin) pevně spojených v jeden celek			
sendvič	kompozit složený z lehkého jádra a dvou povrchových desek, které zvyšují ohybovou tuhost; potahy s jádrem spojeny lepením			

Následující text se bude věnovat dlouhovláknovým kompozitům s plastovou (polymerní) matricí.

2 Vláknové kompozity

2.1 Vlákná

Samostatné použití vláken (podkladem pro kapitolu 2.1 byl zdroj [3]), jakožto konstrukčního materiálu, není obvyklé. Široké aplikovatelnosti se užívá právě v kompozitních materiálech, kde zastávají funkci výztuže. V kapitole 2.1.1 budou představeny standardně používané materiály pro vláknové kompozity a v kapitole 2.1.2 bude provedeno jejich srovnání.

2.1.1 Materiály pro vláknové kompozity

2.1.1.1 Skleněná vlákna

Se sklovitými tenkými vlákny (GF – Glass Fiber) s průměrem $\varnothing = 3,5-24 \mu\text{m}$ se standardně setkáváme ve formě tzv. E-skloviny (E-elektrická). Tento typ má vynikající elektrické izolující vlastnosti a je propustný pro záření. Různé modifikace - S-sklovina (S - strength) má vyšší pevnost, C-sklovina odolnost proti kyselinám a AR-sklovina proti alkáliím.

Výroba skleněných vláken je řešena tažením taveniny z trysek. Ve sklářské peci při teplotě 1400°C je roztavena směs surovin (křemičitý písek, vápenec, dolomit, kyselina boritá, kazivec). Proces probíhá pro potřeby homogenizace několik dní, takže je energeticky náročný a posléze je tavenina z předpecí vedena do spřádacích trysek z platinové slitiny. Vlákná odcházející z trysky jsou asi 2 mm tlustá. Následuje proces dloužení, kterým se kalibruje průměr a mění mechanické vlastnosti. Pro ochranu vlákna, následnou manipulaci, zpracování a lepší soudržnost s matricí je zařazena lubrikace povrchu.

Vlákná se zpracovávají do přízí, nití, pramenců, rohoží (povrchové r., r. z kontinuálních vláken, r. ze sekaných pramenců), tkanin (plátňová, keprová, atlasová vazba), pásů, úpletů, trojrozměrné tkaniny, pleteniny.

Skleněné vlákno je izotropní. Mez průtažnosti se pohybuje $\sim 3\%$. Deformace je téměř elastická (nejsou viskoelastická jako syntetická vlákna). Vykazují tepelnou stabilitu (při 250°C). Jsou nehořlavá. Elektrická vodivost je nízká ($\sim 10^{-13} \text{ S.m}^{-1}$). Součinitel teplotní délkové roztažnosti je malý ($\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Bod měknutí je vyšší než 625°C .

2.1.1.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) vytvářejí dlouhé lineární řetězce s aromatickým jádrem spojené kovalentní vazbou, což zajišťuje vysokou pevnost a tuhost. Odhadovaná teoretická mez pevnosti je $200\,000 \text{ N.mm}^{-2}$. Současnou technologií bylo prozatím dosaženo pevnosti v tahu $3\,600 \text{ N.mm}^{-2}$ pro průměr vlákna $12 \mu\text{m}$. Vedlejší vazby mezi makromolekulami tvoří vodíkové můstky.

Spřádání z taveniny není možné, poněvadž teplota tavení se nachází nad teplotou tepelného rozkladu. Spřádá se z vysokoviskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Následuje propírání, neutralizace, sušení. Zlepšení mechanických vlastností se docílí dloužením.

Vlákná mají záporný součinitel teplotní délkové roztažnosti. Měrná hmotnost je nízká, činí $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$. Jsou silně anizotropní, citlivá na tlak (působícím v podélném směru), hydrofilní (absorbující vlhkost; což negativně ovlivňuje pevnost vlákna, ale i spoje s matricí). Teplota

skelného přechodu $T_g = 300\text{ °C}$, teplota rozkladu $T_z = 480\text{ °C}$. Díky organické povaze – nižší odolnost vůči teplotě – do 300 °C ve formě kompozitu. Po vytvrzení obtížně obrobitelné.

2.1.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) vykazují výjimečně vysokou pevnost, tuhost, ale i nízkou tažnost (srovnání základních typů v tab. 2-1). Teoreticky možné hodnoty vypočtené z hodnot energie kovalentní vazeb grafitového monokrystalu ve směru vazeb dosahují pro E-modul $1\,000\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a mez pevnosti o řád nižší. Díky absenci kovalentních vazeb ve směru kolmém (přítomnost slabé van der Waalsovy vazby) je E-modul $40\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

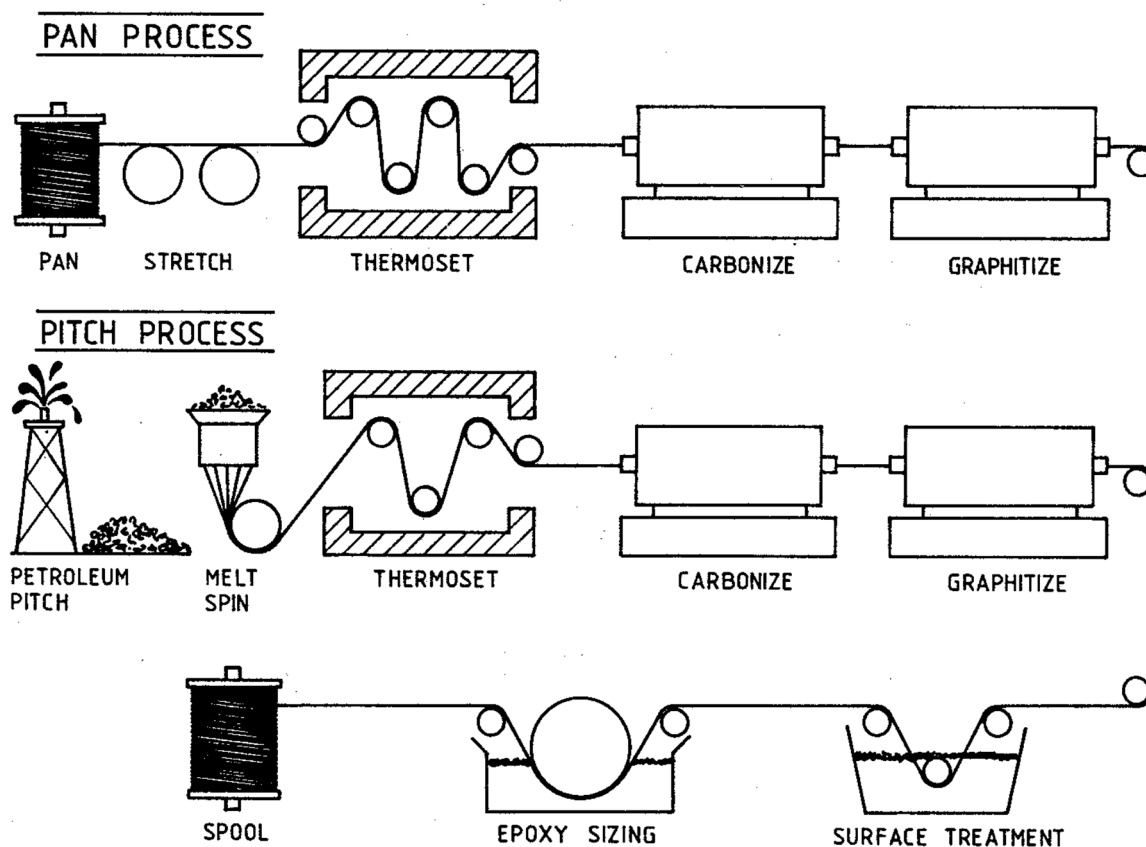
Standardně se vyrábí dvojitým způsobem, obr. 2-1 – a) polyakrylonitrilu (PAN) nebo b) surovin bohatých na uhlík (smoly).

- a) Výroba probíhá ve třech stupních (oxidace – $200\text{--}300\text{ °C}$, karbonizace – max. do $1\,600\text{ °C}$, grafitizace do $2\,500\text{ °C}$) se stupňující se teplotou a konečným ochlazením a navinutím. PAN vlákna se za zvýšené teploty při oxidaci dluží – nastává dehydratace a změna mikrostruktury nitrilových skupin na žebříčkový polymer. Ve druhém stupni, nyní již v inertní atmosféře, se karbonizací (pyrolýzou) struktura žebříčkovitá přemění na grafitickou. Tato struktura má vysokou hodnotu pevnosti i E-modulu – tzv. vysokopevnostní vlákna s mezí pevnosti $5\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$). Lze připravit vlákna i s vyšší E-modulem $400\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ (vysokomodulová), čehož docílíme následným tepelným procesem při teplotě $2\,500\text{ °C}$. Standardně vyráběná mez pevnosti je přibližně $3\,500\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a E-modul $230\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.
- b) Smoly z kamenouhelného dehtu nebo z dehtů vzniklých při destilaci ropy se zpracovávají při 350 °C na tzv. mezofázi (přechodná fáze mezi krystalickou a kapalnou fází), která je anizotropní a obsahuje kapalné krystaly. Tento speciální stav zajišťuje při spřádání získat vysoce orientovanou strukturu. Následuje zahřátí k $2\,000\text{ °C}$, čímž nastává karbonizace (přeměna na uhlík), přičemž se zachovává směr. Tímto způsobem lze získat vlákna s E-modulem do $700\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ (pokud následuje žhání při $3\,000\text{ °C}$), avšak se sníženou mezí pevnosti $2\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, oproti postupu a).

Tab. 2-1 Rozdělení uhlíkových vláken podle struktury [3]

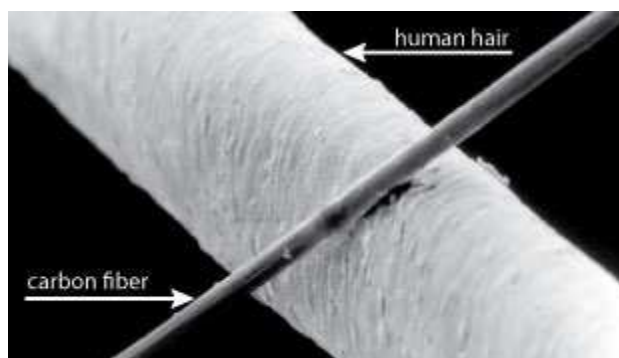
Typ uhlíkového vlákna	Hlavní znaky struktury
Vysoce pevné vlákno (HT)	Roviny vrstev převážně rovnoběžné s osou vláken, osově nepravidelná struktura
Vlákno s vysokým modulem pružnosti (HM)	Roviny vrstev zcela rovnoběžné s osou vláken, osově pravidelná struktura
Sekaná vlákna s nízkou pevností (LM)	Žádná zřetelná orientace, velmi slabé uspořádání vláken v osovém směru

Uhlíková vlákna vykazují vysoký E-modul a pevnost do 500 °C , jsou mimořádně odolná vůči korozi (až na prostředí oxidační), mají dobrou elektrickou a tepelnou vodivost ($\sigma \sim 6,7 \cdot 10^4\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$), nízkou hustotu $\rho = 1,6 - 2,0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, jsou silně anizotropní - typická hodnota $E_{||f} / E_{\perp f} = 28$, $\alpha_{||f} = -0,1$ až $1,5 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\perp f} = 15 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, jsou křehká, snadno se lámou (proto je nutné je apretací na bázi epoxidové pryskyřice povrchově upravit), vysoce odolná proti dynamickému namáhání (lepší než, kterýkoli jiný materiál – ocel, hliník).



Obr. 2-1 Schématické znázornění procesu výroby uhlíkových vláken [26]

Současný technologický um lze demonstrovat např. při srovnání uhlíkového vlákna s lidským vlasem (obr. 2-2).

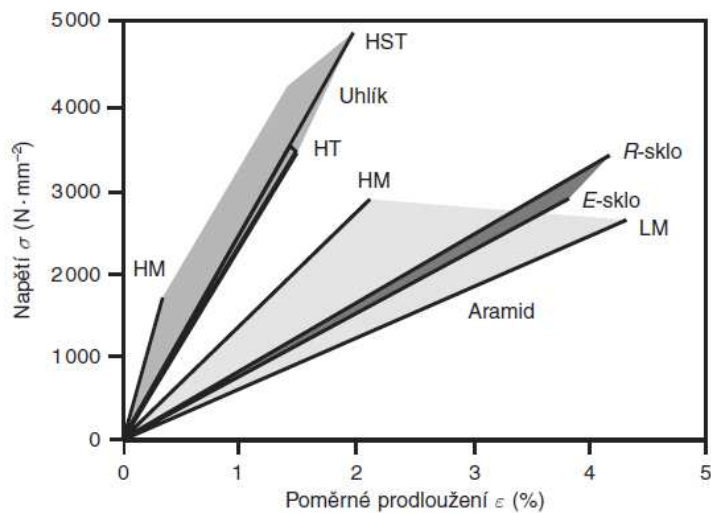


Obr. 2-2 Srovnání velikosti lidského vlasu a uhlíkového vlákna [8]

2.1.2 Srovnání vláken

Jednotlivá vlákna lze srovnávat z mnoha hledisek (podkapitoly 2.1.2.1-7). Celkový přehled nabízí tab. 2-5 v podkapitole 2.1.2.7. Obrázky (obr. 2-3) a tabulky (tab. 2-2 až 2-5) příslušné k těmto kapitolám jsou převzaty z [3].

2.1.2.1 Závislost napětí na poměrném prodloužení



Obr. 2-3 Vliv vlastností různých druhů skleněných, uhlíkových a aramidových vláken na průběh zatěžovacího diagramu jednosměrně vyztuženého laminátu při tahové zkoušce [3]

2.1.2.2 Anizotropie

Anizotropie se vyjadřuje jako hodnota poměru pružnosti $E_{\parallel} / E_{\perp}$. Čím vyšší je tento poměr, tím výraznější je anizotropie vlastností vlákna.

Tab. 2-2 Demonstrace závislosti mechanických hodnot na zvoleném směru [3]

Vlákno	E_{\parallel} [kN.mm ⁻²]	E_{\perp} [kN.mm ⁻²]	$G_{\parallel\perp}$ [kN.mm ⁻²]	$\nu_{\perp\parallel}$	$E_{\parallel} / E_{\perp}$
E-sklo	73	73,0	30	0,25	1,0
aramidové vysokomodulové (HM)	133	5,4	12	0,38	24,6
uhlíkové standardní (HT)	240	15,0	10	0,28	16,0
uhlíkové vysokomodulové (HM)	500	5,7	8	0,36	88,0

2.1.2.3 Teplotní stabilita

U uhlíkových vláken nedochází do 300°C k poklesu meze pevnosti v tahu a limitujícím faktorem je výdrž matrice. Skleněná vlákna jsou stabilní do 200°C, zatímco u aramidových vláken nastává výrazný pokles již od normální (standardních) podmínek.

2.1.2.4 Určování tuhosti a pevnosti vláken

Výpočet elastických charakteristik (moduly, Poissonova konstanta) a meze pevnosti se odvozují z teoretické analýzy vlastností matrice a jednosměrně vyztužených zkušebních těles. Pro analýzu se zavádějí podíly vláken – hmotnostní ψ [hm. %] (pro váhové dávkování, měření) a objemový ϕ [objem. %] (pro výpočet veličin vztažených na plochu – napětí,

E-modul). Vzájemný vztah mezi hmotnostním a objemovým podílem binárního systému je vyjádřena takto, kde ρ_f je hustota vláken a ρ_m je hustota matrice.

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi \rho_f}{\psi \rho_m}} \quad (2.1)$$

$\rho_{\text{sklo}} \sim 2,5 \text{ g.cm}^{-3}$; $\rho_{\text{aramid}} \sim 1,45 \text{ g.cm}^{-3}$; $\rho_{\text{uhlíkové vlákno}} \sim 1,8 \text{ g.cm}^{-3}$.

2.1.2.5 Dynamické vlastnosti

Srovnání pevnosti laminátů po 10^8 a po 10^4 zatěžovacích cyklech.

Tab. 2-3 Pevnost při dynamickém namáhání [3]

Pevnost při dynamickém namáhání	Kompozity		
	vyztužené sklem	aramidové	Uhlíkové
$\sigma_p (10^8) / \sigma_p (10^4)$	0,45	0,40	0,83

2.1.2.6 Cena

Orientační cena k roku 2009 daná použitou surovinou, technologií výroby a vlastní situací na trhu.

Tab. 2-4 Tržní cena běžně užívaných vláken [3]

materiál vlákna	cena [€/1kg]
Sklo	2 – 3
Aramid	20 – 30
uhlík – standardní typ (HT)	20 – 80
uhlík – vysokomodulový typ (HM)	100 – 500
uhlík – speciální typ (UHM)	100 – 1 000

2.1.2.7 Všeobecné srovnání

Tab. 2-5 Všeobecné srovnání významných vlastností [3]

Vlastnosti	Kompozity		
	vyztužené sklem	aramidové	Uhlíkové
hustota	+-	++	+
mez pevnosti v tahu	+	+	+
E-modul	-	+	++
mez pevnosti v tlaku	+	-	+
rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
dielektrické vlastnosti	++	++	-
adheze, přilnavost	++	-	+
nasákavost	+	-	+
Cena	++	+-	-

2.2 Matrice

Matrice je materiál, který vytváří kontinuální fázi (na rozdíl od vláken nebo částic, které jsou v matici dispergovány) a zároveň obklopuje fázi druhou, která obsahuje vlákna nebo partikule. Zpracováním vznikne tvarově stálý výrobek – kompozit. Informačním podkladem pro tuto kapitolu byla literatura [3].

Funkce matrice:

- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
- zavedení, přenos sil na vlákna a z vláken na vlákno
- ochrana vláken před vlivy okolí

Zásadní faktor pro kvalitu kompozitu je dán zajištěním adheze na fázovém rozhraní vlákno-matrice, která je fyzikálně a chemicky podmíněná (dána zejména viskozitou a povrchovým napětím pro dokonalé smočení vlákna a prostředím bez bublin). Zlepšení vazby se docílí nanesením apretace na vlákno podle použité matrice.

V dalším textu bude brán zřetel na skupinu polymerních kompozitů, jejichž matici buď tvoří termosety (reaktoplasty), nebo termoplasty. Zásadní rozdíl je ve viskozitě těchto skupin. Zatímco viskozita termosetů se pohybuje ve stovkách mPa.s, tak u termoplastů se dosahuje řádově vyšších hodnot 10^3 až 10^5 mPa.s. Z důvodu snadnějšího zpracování jsou termosety rozšířenější. Dalším jejich kladem je, že energetické nároky na impregnaci vláken jsou nižší. Přidáním tvrdidel (iniciátorů – iniciují polymeraci, urychlovačů – urychlují síťování, dále katalyzátorů, aldehydů, resp. energie – teplo, záření) se termoset vytvrdí (polymerací nebo polyadicí vznikne zesíťovaná struktura), tím získá své finální vlastnosti (vysoká pevnost, tuhost, dobrá odolnost proti chemickým a tepelným vlivům, ale také křehkost a nízkou houževnatost). Termoplasty vynikají svojí houževnatostí a jsou šetrnější k životnímu prostředí. Zpracovávají se pouze roztavením/ztuhnutím matrice, tedy podobné chemické procesy, které probíhají u termosetů, zde nejsou.

2.2.1 Reaktivní pryskyřice

Nejčastěji používanými materiály jsou kapalné nebo tavitelné reaktivní pryskyřice (taktéž licí, laminační, zalévací pryskyřice), které přísluší do skupiny termosetů. Typově jsou nejvýznamnější tyto kategorie: a) nenasycené polyesterové (UP-R), b) vinylesterové (VE-R), c) epoxidové (EP-R), d) fenolické (PF-R), e) metakrylátové (MA-R), f) izokyanátové pryskyřice.

Proces vytvrzování (vznik prostorové zesíťované hmoty – vytváření chemických vazeb mezi molekulami výchozích materiálů) je doprovázen exotermní reakcí (vznikem reakčního tepla), zvýšením viskozity (při neizotermní průběhu – tj. teplo se neodvádí – po počátečním poklesu) a změnou objemu (smrštění – zvýšení měrné hmotnosti). Během procesu změny tekuté směsi na pevnou se objevuje želatinace, která vzniká při dosažení bodu gelace („stav vytvrzování, při kterém vzniká první molekula s nekonečně vysokou molekulární hmotností“ [3], str. 101, čili pryskyřice již není rozpustná v rozpouštědlech). Úplné vytvrzení (definováno nejvyšší teplotou skelného přechodu T_g , resp. nejvyšší možné zesíťování) je většinou nezbytné pro dosažení dobrých vlastností materiálu.

2.2.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Tuto nejpoužívanější podskupinu tvoří roztoky (bezbarvé, nažloutlé) v reaktivních rozpouštědlech, které lze vytvrzovat za normálních nebo zvýšených teplot, přičemž vzniká reakční teplo a dochází k vysokému objemovému smrštění (do 10%). Vyznačují se dobrou smáčivostí vláken, vysokou rychlostí vytvrzování, nízkou viskozitou a cenou. Nepostradatelnou složkou je rozpouštědlo styren, který se přidává za účelem snížit viskozitu, usnadnění vytvrzení nebo zvýšit odolnost vůči alkáliím, avšak zatěžuje životní prostředí a větší množství způsobuje zkřehnutí. Řídit vlastnosti lze příslušnými příměsemi, např. tepelnou odolnost nebo houževnatost zajistí kyselina tetrahydroftalová, chemickou odolnost a snadnější zpracování kyselina ortoftalová, hydrolytickou odolnost kyselina izoftalová.

2.2.1.2 Vinylesterové pryskyřice

VE-R jsou houževnatější a dražší v porovnání s UP-R. Vynikají chemickou odolností, proto se používají v různých prostředích se zvýšenou korozní schopností – odsiřovací zařízení, potrubí, skladovací nádrže, čistírny odpadních vod, atp.

Často užívanou skupinou jsou VE-R na bázi bisfenolu A (vynikají vysokou houževnatostí, odolností proti alkalickému prostředí) a fenolických pryskyřic (které jsou odolné proti vyšším teplotám a aromatickým uhlovodíkům). Hybridní vinylesteruretanové pryskyřice (VEU-R) spojují dobré mechanické vlastnosti s odolností proti vysokým teplotám (teplota skelného přechodu $T_g = 220$ °C) a chemickou odolností.

2.2.1.3 Epoxidové pryskyřice

EP-R jsou za normální teploty kapalné až pevné látky, které vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi (zejména při dynamickém namáhání), rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Spolu s tvrdidlem (např. aminy – odolnost proti alkáliím, anhydridy kyselin – odolnost proti kyselinám, fenoly apod.), které je nutné přidat v přesném stechiometrickém poměru (epoxidové číslo), vytváří epoxidové systémy nejrůznějšího chemického složení, a tudíž vynikají značnou univerzálností. Nevýhodou je vyšší cena (3-4x dražší než UP-R), pomalé vytvrzení, vysoká viskozita, možnost podráždění kůže. T_g je vyšší než u UP-R a VE-R.

Nejdůležitějšími typy EP-R patří bisfenol A a novolakové pryskyřice.

2.2.2 Termoplasty

Termoplasty jsou za normální teploty pevné látky. Po zahřátí na teplotu roztavení (většinou nad 200 °C) jsou dostatečně tekuté a lze je tvarovat.

Základní rozdělení vyztužených termoplastů je dle velikosti vláken

- Krátká vlákna – velikost vláken á 0,2 mm; pro vyztužení matrice při vstřikování; objem vyztuže 15% (pod touto hranicí je vyztužující efekt zanedbatelný) až 50% (nad touto hranicí nastává problém s rovnoměrným smáčením)
- Dlouhá vlákna – až do 25 mm; dávkování z plastifikačního extruderu do lisovací formy
- Nekonečně dlouhá vlákna – termoplasty vyztužené skleněnou rohoží, jednosměrnými pásy; slouží jako polotovary pro další zpracování

Zásadní rozdíly mezi termosety a termoplasty demonstruje tab. 2-6.

Tab. 2-6 Nejpodstatnější rozdíly mezi termosety a vyztuženými termoplasty [3]

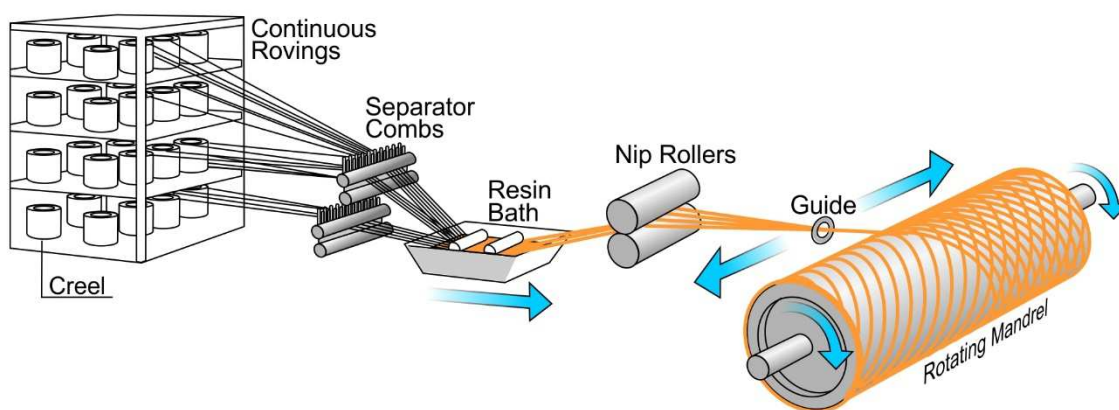
	Termosety	Termoplasty
Matrice	nevytvrzená, nízkoviskózní, dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem	Polymerovaná, vysokoviskózní tavenina, špatně se spojuje lepením
Cena matrice	Nízká	Nízká, ale i vysoká
Předimpregnace	Snadné	Obtížně smáčení a prosycování
Cena předimpregnace	Nízká	Vysoká
Skladování	Omezená skladovatelnost, reakce pomalu pokračuje	neomezeně skladovatelné
Polotovar	Prepregy	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GMT), pásy
Přímé zpracování	Výztuž a reaktivní pryskyřice	Granulát (krátká vlákna), dlouhovláknitý polotovar (D-LFT)
Teplota při zpracování	Teplota okolí	Teplota taveniny
Tvarování	Nevhodné	Vhodné pro velké série
Ruční kladení	Vhodné pro velkoplošné díly	Nevhodné
Kladení pásů	Vysoká automatizace, dobrá lepivost, citlivé vytvrzování	Vysoká automatizace, malá lepivost, svařování
Teplota nástroje při lisování	Reakční doba 140 až 160 °C	Teplota taveniny 150 až 180 °C
Lisovací tlak	20 až 50 N.mm ⁻²	GMT (200 až 300 N.mm ⁻²) D-LFT (30 až 100 N.mm ⁻²)
Plocha povrchu	Dobrá a tvrdá, lze ji lepit, natírat	Přiměřená, svařitelná
Mechanické chování	Dynamicky zatížitelné, křehký lom	Houževnaté, sklon ke creepu
Chování za tepla	Méně závislé na teplotě	Výrazné změknutí při T _g
Stárnutí	Velmi odolné proti stárnutí	Málo odolné až odolné
Možnost opravy	Dobrá	Omezená

2.3 Spojení vlákno-matrice

Optimálních vlastností kompozitů je dosaženo tehdy, když se všechny síly, které na výrobek působí, přenesou výztuží. Abychom dosáhli tohoto stavu, je nutné zajistit dobré spojení vlákna a matrice. Tento předpoklad bude splněn tehdy, když se vlákna ošetří apreturou (např. ze skupiny organosilanů, γ -aminosilanem používaným pro epoxidové pryskyřice), která zvýší pevnost vazby s matricí, popř. dalšími funkčními materiály. Apertura je často součástí lubrikace (šlichty), která plní mnoho funkcí (filmotvornou – např. chránit vlákno před třením pomocí vodní emulze – textilní zpracování; antistatickou atd.). Lubrikace, jako taková, má však negativní vliv na toto spojení, ale tento kompromis je z pohledu získaných vlastností přijatelný. Přímá lubrikace (polymerní šlichta) se uplatňuje při výrobě rovingu (pramenců), který se užívá při technologii přesného navíjení (viz kapitola 3).

3 Technologie přesného navíjení

Technologií přesného navíjení (filament winding) jsou vyráběna dutá tělesa (textová část této kapitoly převzata z [3]), která jsou symetrická k ose otáčení (roury, nádrže, atp.). Při této technologii je svazek nekonečných textilních vláken (tzv. roving) odvíjen z cívky, následně impregnován pryskyřicí (u mokrého navíjení; u suchého navíjení je již vlákno prosyceno předem) a pod požadovaným úhlem navíjen na trn, který vytváří dutinu budoucího laminátu (viz obr. 3-1). Posléze je kompozit vložen do pece, kde je vytvrzen. Poté je jádro vytahovacím zařízením odtaženo.



Obr. 3-1 Schématický obrázek technologie přesného navíjení [22]

Technologická zařízení, zajišťující správný chod stroje, pracují v daném sledu operací, které obstarává a) přísuv, b) napínání, c) smáčení vlákna, d) řízení náviny a nakonec e) strojní navíjení vláken na f) pevný trn.

a) přísuv vláken

Cívku, kolem které je vlákno omotané, lze odvíjet standardně třemi způsoby. Ve svislé (1.) nebo vodorovné (2.) poloze, přičemž v poloze svislé se uplatňuje dvojí způsob odvíjení a to buď z vnějšího (1a.), nebo vnitřního (1b.) průměru.

b) napínání vlákna

Jednou z metod řízení objemového podílu vlákna a pryskyřice je skrze napínání vlákna, čímž se ovlivňuje i jeho povrch. V praxi je obvyklý dvojí způsob buď se přibrzdí cívka, či vlákno v tzv. vozíku, což je zařízení, které vykonává posuvný pohyb a navinuje vlákno na pevný trn.

c) impregnace vlákna

Prosycení vlákna pryskyřicí předchází náviny na trn. Děje se tak buď v lázni potopením, nebo v nálevce, anebo pomocí válečků.

d) řízení náviny

U řízení náviny se sleduje jak relativní rychlost navíjecího trnu (který vykonává rotační pohyb) a suportu (vodícího oka; který se pohybuje translačně dopředným a zpětným

pohybem) a úhel návínu. Optimální situace nastane tehdy, když je roving (obr. 3-2) namáhán jen na tah, tj. bez smýkání vlákna po povrchu.

e) stroje pro navíjení

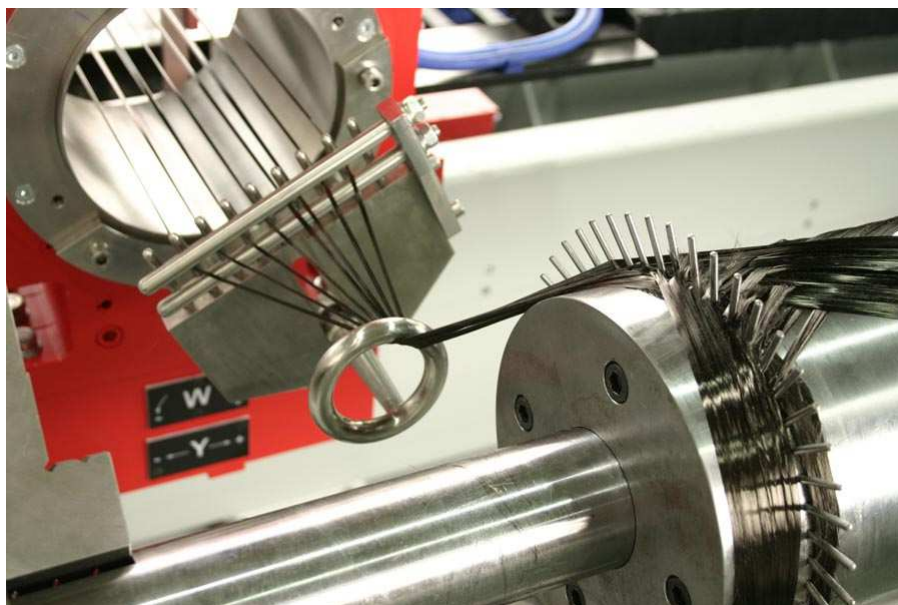
Pro technologii přesného navíjení se používají dva typy strojů – stroje soustruhového (nejrozšířenější; možnost navíjení v celém rozsahu 0 - 90°) a planetového typu (rozsah 0 - 15°).

f) pevné trny (na obr. 3-3)

Geometrie (s průřezy kruhovými, elipsovými, čtvercovými, obdélníkovými, kónickými, atp.) trnů je podmíněna tvarem výrobku a limitována ostrými přechody v zaoblení. Nejčastěji používanými materiály jsou oceli, plasty, slitiny hliníku, dřevo. Klade se důraz na ohybovou tuhost.



Obr. 3-2 Roving, uhlíkové vlákno [18]



Obr. 3-3 Systém vláken, které procházejí vodícím okem k pevnému trnu [16]

4 Pevnostní kritéria

Rozlišujeme pevnostní kritéria neinteraktivní (není vazba mezi složkami normálových napětí ani mezi normálovými a smykovými napětí) a interaktivní, informace pro tuto kapitolu převzaty z informačního zdroje [11], z podkapitoly 4.2 (str. 77-79).

4.1 Kritérium maximálního napětí

K porušení materiálu dojde, když některá ze složek napětí $\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$ v lamině dosáhne příslušné meze pevnosti materiálu.

$$-F_{Lc} < \sigma_L < F_{Lt} \quad (4.1)$$

$$-F_{Tc} < \sigma_T < F_{Tt} \quad (4.2)$$

$$-F_{LT} < \sigma_L < F_{LT} \quad (4.3)$$

F_{Lt} – podélná tahová pevnost

F_{Lc} – podélná tlaková pevnost

F_{Tt} – příčná tahová pevnost

F_{Tc} – příčná tlaková pevnost

F_{LT} – smyková pevnost

4.2 Kritérium maximální deformace

K porušení dojde, když některá ze složek deformace (poměrné deformace nebo zkos), dosáhne příslušné mezní složky deformace.

$$-F_{Lc}^{\varepsilon} < \varepsilon_L < F_{Lt}^{\varepsilon} \quad (4.4)$$

$$-F_{Tc}^{\varepsilon} < \varepsilon_T < F_{Tt}^{\varepsilon} \quad (4.5)$$

$$-F_{LT}^{\varepsilon} < \gamma_{LT} < F_{LT}^{\varepsilon} \quad (4.6)$$

$F_{Lt}^{\varepsilon} = \frac{F_{Lt}}{E_L}$... mezní tahová deformace v podélném směru

$F_{Lc}^{\varepsilon} = \frac{F_{Lc}}{E_L}$... mezní tlaková deformace v podélném směru

$F_{Tt}^{\varepsilon} = \frac{F_{Tt}}{E_T}$... mezní tahová deformace v příčném směru

$F_{Tc}^{\varepsilon} = \frac{F_{Tc}}{E_T}$... mezní tlaková deformace v příčném směru

$F_{LT}^{\varepsilon} = \frac{F_{LT}}{G_{LT}}$... mezní hodnota zkosu ve smyku

4.3 Hillovo kritérium pevnosti

Hill vyšel z von Misesovy podmínky pro izotropní materiál:

$$\frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2 + \sigma_{xy}^2)] = \sigma_k^2 \quad (4.7)$$

kde σ_k je mez kluzu izotropního materiálu a získal pevnostní kritérium ve tvaru:

$$A(\sigma_T - \sigma_{T'})^2 + B(\sigma_{T'} - \sigma_L)^2 + C(\sigma_L - \sigma_T)^2 + 2D\sigma_{TT'}^2 + 2E\sigma_{LT'}^2 + 2F\sigma_{LT}^2 = 1 \quad (4.8)$$

Parametry A, B, C, D, E, F jsou materiálové charakteristiky závislé na pevnostech materiálu ve směrech L, T, T' a na pevnostech ve smyku. Je uvažována stejná pevnost materiálu v tahu a tlaku.

Pokud předpokládáme pevnost v tahu a tlaku stejnou, dále rovinnou napjatost v rovině L a T, lze kritérium pevnosti zjednodušit:

$$\frac{\sigma_L^2}{F_L^2} + \frac{\sigma_T^2}{F_T^2} + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2} - \left(\frac{1}{F_L^2} + \frac{1}{F_T^2} - \frac{1}{F_{T'}^2} \right) \sigma_L \sigma_T = 1 \quad (4.9)$$

4.4 Tsai-Hillovo kritérium pevnosti

Pro rovinnou úlohu ($F_T = F_{T'}$) Tsai kritérium Hillovo zjednodušil.

$$\frac{\sigma_L^2}{F_L^2} + \frac{\sigma_T^2}{F_T^2} + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{F_L^2} = 1 \quad (4.10)$$

4.5 Hoffmanovo kritérium pevnosti

Hoffmanovo kritérium je zobecněním Hillova kritéria tím, že je rozlišováno chování v tahu a tlaku.

$$B_1(\sigma_T - \sigma_{T'})^2 + B_2(\sigma_{T'} - \sigma_L)^2 + B_3(\sigma_L - \sigma_T)^2 + B_4\sigma_L + B_5\sigma_T + \\ + B_6\sigma_{T'} + B_7\sigma_{TT'}^2 + B_8\sigma_{LT'}^2 + B_9\sigma_{LT}^2 = 1 \quad (4.11)$$

Parametry B_1 a B_9 jsou materiálové konstanty.

$$\frac{\sigma_L^2}{F_{Lt}F_{Lc}} + \frac{\sigma_T^2}{F_{Tl}F_{Tc}} + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{F_{Lt}F_{Lc}} + \frac{F_{Lc} - F_{Lt}}{F_{Lt}F_{Lc}} \sigma_L + \frac{F_{Tc} - F_{Tl}}{F_{Tc}F_{Tl}} \sigma_T = 1 \quad (4.12)$$

4.6 Tsai-Wu kritérium pevnosti

Kritérium pevnosti Tsai-Wu představuje obecnou teorii poškození anizotropních materiálů. Má polynomiální tvar a předpovídá porušení materiálů i při obecném stavu napjatosti.

4.7 Puckovo kritérium pevnosti

Puckovo kritérium vychází z aplikace dvou nezávislých kritérií porušení, která jsou odlišného charakteru: kritérium porušení vláken a kritérium porušení mezi vlákny (blíže viz [11] str. 90-99, z důvodu komplikovanosti a množství rovnic; podobně Tsai-Wu).

5 Klasická laminační teorie

Klasická laminační teorie (KLT) je přímým rozšířením Kirchhoffovy teorie (tenkých) desek pro izotropní a homogenní materiály.

Vyjdeme-li ale z obecného vztahu

$$\begin{bmatrix} N \\ M \\ Q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & \mathbf{0} \\ B & D & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_m^0 \\ \mathbf{k} \\ \boldsymbol{\gamma}_s \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

N – matice výslednic sil vztažených na jednotku délky

M – matice momentů vztažených na jednotku délky

Q_s – vektor vnějších příčných sil působících na laminát

A – matice tahové tuhosti

B – matice vazební tuhosti

D – matice ohybové tuhosti

F – matice smykové tuhosti

$\boldsymbol{\varepsilon}_m^0$ – deformace střední plochy

\mathbf{k} – vektor křivosti střední vrstvy laminátu,

$\boldsymbol{\gamma}_s$ – vektor zkosů

a zohledníme-li předpoklady KLT:

- 1) každá lamina je ortotropní a kvazihomogenní
- 2) tloušťka laminy je zanedbatelná ve srovnání se svojí délkou a šířkou, lze uvažovat stav rovinné napjatosti
- 3) deformace jsou malé
- 4) spoj mezi laminami je dokonalý a nekonečně malý, což zaručuje spojitost posunutí
- 5) posunutí se po tloušťce mění lineárně
- 6) kolmice ke středové ploše zůstanou kolmé i po deformaci
- 7) závislost mezi deformací a napětím je lineární

Pak podle předpokladu KLT bodu 6

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_m^0 \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Ze zadání explicitně – symetrický laminát, tj. matice vazební tuhosti $B = \mathbf{0}$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_m^0 \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Ze zadání implicitně – $N_x, N_y, N_{xy} \neq 0 \rightarrow \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy} \neq 0 \rightarrow \mathbf{A} \neq \mathbf{0}, \mathbf{D} \neq \mathbf{0}, \mathbf{M} = \mathbf{0}, \mathbf{k} = \mathbf{0}$

$$\mathbf{A}_{ij} = \sum_{k=1}^n (\mathbf{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \dots \text{matice tahové tuhosti} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{D}_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\mathbf{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \dots \text{matice ohybové tuhosti} \quad (5.5)$$

\mathbf{Q}_{ij} – matice mimoosové tuhosti

h_k – tloušťka k-té vrstvy laminátu

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & 0 & 0 & 0 \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

\rightarrow matice \mathbf{D}_{ij} není potřeba. Trubka není zatížena ohybem

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A_{ij} je funkce Q_{ij} a tloušťky vrstvy

$$Q_{ij} = C'_{ij} - \frac{C'_{i3} \cdot C'_{3j}}{C'_{33}}, \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (5.8)$$

\mathbf{C}' – matice osové tuhosti (v x, y, z)

\mathbf{C} – matice osové tuhosti (v L, T, T')

$$\mathbf{C}' = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{C} \mathbf{T}_\varepsilon \quad (5.9)$$

\mathbf{T}_ε – transformační matice pro vektor deformace

\mathbf{T}_σ^{-1} – inverzní transformační matice pro vektor napětí

$$\mathbf{T}_\sigma^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$\mathbf{T}_\varepsilon = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -2\sin\theta\cos\theta & 2\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$C_{11} = \frac{E_L}{1 - \frac{E_T}{E_L} \nu_{LT}^2} \quad (5.13)$$

$$C_{22} = \frac{E_T}{E_L} C_{11} \quad (5.14)$$

$$C_{12} = C_{21} = \nu_{LT} C_{22} \quad (5.15)$$

$$C_{66} = G_{LT} \quad (5.16)$$

C je funkce $E_L, E_T, G_{LT}, \nu_{LT}, \nu_{TL} \dots$ vhodný materiál se volí z materiálového listu

Deformace

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m^0 = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{N} \quad (5.17)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & \mathbf{A}^{-1} & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Napětí pro každou z jednotlivých lamin

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & \mathbf{Q} & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Napětí $\boldsymbol{\sigma}'$ se srovná s pevnostními kritérii a zohlední se minimální bezpečnost k

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{T}_\sigma \boldsymbol{\sigma} \quad (5.20)$$

$\boldsymbol{\sigma}'$ – vektor napětí v s.s. $O(L, T, T')$

$\boldsymbol{\sigma}$ – vektor napětí v s.s. $O(x, y, z)$

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Konkrétní napětí $\boldsymbol{\sigma}'$ se porovná s pevnostním kritériem např. σ_{MAX} s bezpečností $k = 2$

$$k_L = \frac{F_L}{\sigma_L} > 2 \quad (5.23)$$

$$k_T = \frac{F_T}{\sigma_T} > 2 \quad (5.24)$$

$$k_{LT} = \frac{F_{LT}}{\tau_{LT}} > 2 \quad (5.25)$$

6 Návrh laminátu

Při návrhu složení laminátu by měla být respektována určitá pravidla, převzato z [3], str. 26:

- strukturu navrhnout jako symetrickou vzhledem ke střední rovině vrstvy, aby při provozním namáhání nedocházelo vlivem různých deformačních vlastností jednotlivých vrstev a zbytkových napětí vzniklých v průběhu technologického procesu k prostorovým deformacím a ke zborcení tvaru výrobku.
- jednotlivé vrstvy ze stejných nebo podobných materiálů uložit tak, aby měly stejnou tloušťku a byly uloženy souměrně k rovině symetrie
- zajistit položení stejného počtu vrstev s kladným a záporným úhlem uložení
- vzhledem k možné tvorbě trhlin se vyvarovat kumulace vrstev se stejnou orientací, zejména vrstev uložených pod stejným úhlem (90° , 45° apod.)
- zabránit rozlaminování volných hran, otvorů po vrtání a místního zesílení postupným vrstvením laminátu nebo položením první a poslední vrstvy jako přídatné jisticí vrstvy pod doplňujícím úhlem, např. $\pm 45^\circ$
- standardizovat složení vrstev a tím zjednodušit možné opravy
- ukládat minimálně 10 % vrstev v každém ze čtyř hlavních směrů (0° , 45° , -45° , 90°) tak, aby bylo minimalizováno zatížení matrice

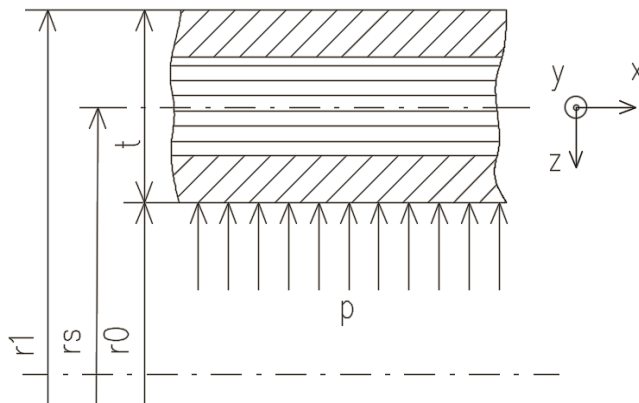


Obr. 6-1 Ilustrativní obrázek řešené kompozitové trubky [4]

6.1 Analýza zadání – zatížení

Pro analýzu zadání bylo využito poznatků získaných zejména z [27].

6.1.1 Vnitřní přetlak



Obr. 6-2 Osový řez (schematicky) symetrickou tenkostěnnou vrstevnatou válcovou laminátovou stěnou

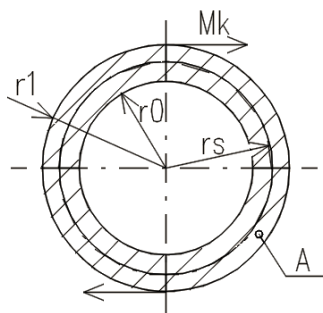
Navrhovaná trubka (ilustrativně na obr. 6-1) je válcová tenkostěnná (tloušťka stěny t) otevřená nádoba, tudíž tvar liniových sil od vnitřního přetlaku (zatížení - schematicky obr. 6-2) bude následující

$$N_x = t \sigma_x = \frac{p r_s}{2} = \frac{p (r_1 + r_0)}{4} = 0 \quad (6.1)$$

$$N_y = t \sigma_y = p r_s = \frac{p (r_1 + r_0)}{2} \quad (6.2)$$

$$N_{xy} = t \sigma_{xy} = 0 \quad (6.3)$$

6.1.2 Krouticí moment



Obr. 6-3 Schématický obrázek namáhání trubky krouticím momentem

Zatížení krouticím momentem demonstruje obr. 6-3.

$$M_k = \tau_{xy} A r_s = \tau_{xy} \pi (r_1^2 - r_0^2) r_s \quad (6.4)$$

$$r_s = \frac{r_1 + r_0}{2} \quad (6.5)$$

$$t = r_1 - r_0 \quad (6.6)$$

$$N_{xy} = t \tau_{xy} = \frac{M_k}{\pi(r_1^2 - r_0^2)r_s} t = \frac{M_k}{\pi(r_1 + r_0)(r_1 - r_0)\frac{r_1 + r_0}{2}} (r_1 - r_0) = \frac{2M_k}{\pi(r_1 + r_0)^2} \quad (6.7)$$

6.1.3 Osová síla

$$F_0 = \sigma_x A = \sigma_x \pi(r_1^2 - r_0^2) \quad (6.8)$$

$$N_x = t \sigma_x = (r_1 - r_0) \sigma_x = (r_1 - r_0) \frac{F_0}{\pi(r_1 + r_0)(r_1 - r_0)} = \frac{F_0}{\pi(r_1 + r_0)} \quad (6.9)$$

6.1.4 Kombinované zatížení

Schéma kombinovaného zatížení je uvedeno již v úvodní kapitole, viz obr. 2.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_0}{\pi(r_1 + r_0)} \\ \frac{p(r_1 + r_0)}{2} \\ \frac{2M_k}{\pi(r_1 + r_0)^2} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

6.2 Řešení

Pro návrh byl využit program LamiEx v.3.0, fungující v tabulkovém procesoru Microsoft Excel, který časově náročné maticové operace propočítává v reálném čase podle klasické laminační teorie.

Výsledné hodnoty návrhu, které splňují dikci zadání, jsou uvedeny na obrázcích a tabulkách v této podkapitole. Zvolený laminát, jenž respektuje návrhová omezení a zatížení je v konfiguraci $[\pm 45|90|0]_S$, je navržen jako osmivrstvý, o jednotné tloušťce $t = 0,5 \text{ mm}$ každé z lamin. Schematicky je znázorněn na obr. 6-4, kde lze dohledat informaci o orientaci jednotlivých vrstev, i jejich poloze. Barevně jsou odlišeny vrstvy ležící pod (modře) a nad (zeleně) střední rovinou, resp. explicitně krajní vrstvy (oranžově). Následují tabelované detaily, demonstrující vlastnosti vlákna (tab. 6-1), matrice (tab. 6-2), laminy (tab. 6-3), laminátu (tab. 6-4), přepočtené velikosti zatížení laminátu (tab. 6-5), velikost deformace (tab. 6-6), napětí s odpovídající bezpečností určenou podle kritéria Tsai-Hilla (tab. 6-7). Následuje informace o hodnotách matic tuhosti \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{D} (tab. 6-8), efektivních modulech pružnosti laminátu (tab. 6-9) a nakonec vykreslení průběhu napětí po výšce laminátu v globálním a lokálním souřadném systému, tedy v souřadnicích laminátu (obr. 6-5) a laminy (obr. 6-6).

Číslo vrstvy	t	směr orientace vláken									
		theta	45°	-45°	90°	0°	0°	90°	-45°	45°	
1	0,5	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
2	0,5										
3	0,5										
4	0,5										
5	0,5										
6	0,5										
7	0,5										
8	0,5										
		Rmax	Rmin	r 1	r 2	r 3	r 4	r 5	r 6	r 7	r 8
		30	26	29,5	29	28,5	28	27,5	27	26,5	26
		poloha i-té vrstvy		30,0-29,5	29,5-29,0	29,0-28,5	28,5-28,0	28,0-27,5	27,5-27,0	27,0-26,5	26,5-26,0
		Rs		28 mm							
		celková tloušťka stěny		4 mm							

Obr. 6-4 Počet, tloušťka, poloha, orientace jednotlivých lamin; střední poloměr a celková tloušťka stěny trubky

Tab. 6-1 Fyzikální a mechanické hodnoty pro materiál vlákna

Vlákno	Hustota	Podélný modul pružnosti v tahu	Příčný modul pružnosti v tahu	Modul pružnosti ve smyku	Poissonovo číslo
	ρ_f	E_{fL}	E_{fT}	G_f	ν_f
	$[kg/m^3]$	$[MPa]$	$[MPa]$	$[MPa]$	$[-]$
HM uhlík	1 800	390 000	5 000	20 000	0,35

Tab. 6-2 Fyzikální a mechanické hodnoty pro materiál matrice

Matrice	Hustota	Modul pružnosti v tahu	Modul pružnosti ve smyku	Poissonovo číslo
	ρ_m	E_m	G_m	ν_m
	$[kg/m^3]$	$[MPa]$	$[MPa]$	$[-]$
epoxid	1 200	4 500	1 600	0,4

Tab. 6-3 Mezní hodnoty napětí pro 60% objemový podíl vláken v matrici

Mezní hodnoty napětí	Podélná tahová pevnost	Podélná tlaková pevnost	Příčná tahová pevnost	Příčná tlaková pevnost	Smyková pevnost
	$R_{\parallel(+)}$	$R_{\parallel(-)}$	$R_{\perp(+)}$	$R_{\perp(-)}$	$R_{\perp\parallel}$
	$[MPa]$	$[MPa]$	$[MPa]$	$[MPa]$	$[MPa]$
C/e 60%	2 940	900	50	230	100

Tab. 6-4 Skladba laminátu

Číslo vrstvy	Vlákna nebo jiné materiály		Matrice	Objemový podíl vlákn	Hustota	Modul pružnosti v podélném směru	Modul pružnosti v příčném směru	Modul pružnosti ve smyku	Poissonovo číslo	Poissonovo číslo	Tloušťka vrstvy	Orientace vláken	Hodnoty pevností materiálu
				V_f	ρ	E_L	E_T	G_{LT}	ν_{LT}	ν_{TL}	t	θ	
				[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[mm]	[°]	
1	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	45	C/e 60%
2	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	-45	C/e 60%
3	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	90	C/e 60%
4	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	0	C/e 60%
5	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	0	C/e 60%
6	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	90	C/e 60%
7	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	-45	C/e 60%
8	HM uhlík	v	epoxid	60	1 560	235 800	4 787	3 571	0,370	0,008	0,500	45	C/e 60%

Tab. 6-5 Zatížení laminátu

Zatížení			
Osový tah/tlak	N_x	61,21	[N/mm]
Osový tah/tlak	N_y	780,00	[N/mm]
Smyk	N_{xy}	117,72	[N/mm]

Tab. 6-6 Velikost deformace jednotlivých vrstev

Vrstva	Materiál	Tloušťka vrstvy	Orientace vrstvy	Deformace vrstev na horní / spodní straně		
		t	φ	ε_x	ε_y	γ_{xy}
		[mm]	[°]	[-]	[-]	[-]
1	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	45,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04
2	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	-45,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04
3	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	90,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04
4	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	0,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04
5	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	0,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04
6	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	90,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04
7	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	-45,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04
8	HM uhlík + epoxid (60%)	0,50	45,0	-5,7E-04	2,3E-03	9,3E-04

Tab. 6-7 Velikost napětí v horní / spodní vrstvě v souřadnicích laminátu, laminy; hodnota bezpečnosti pevnostní kritérium dle Tsai-Hilla

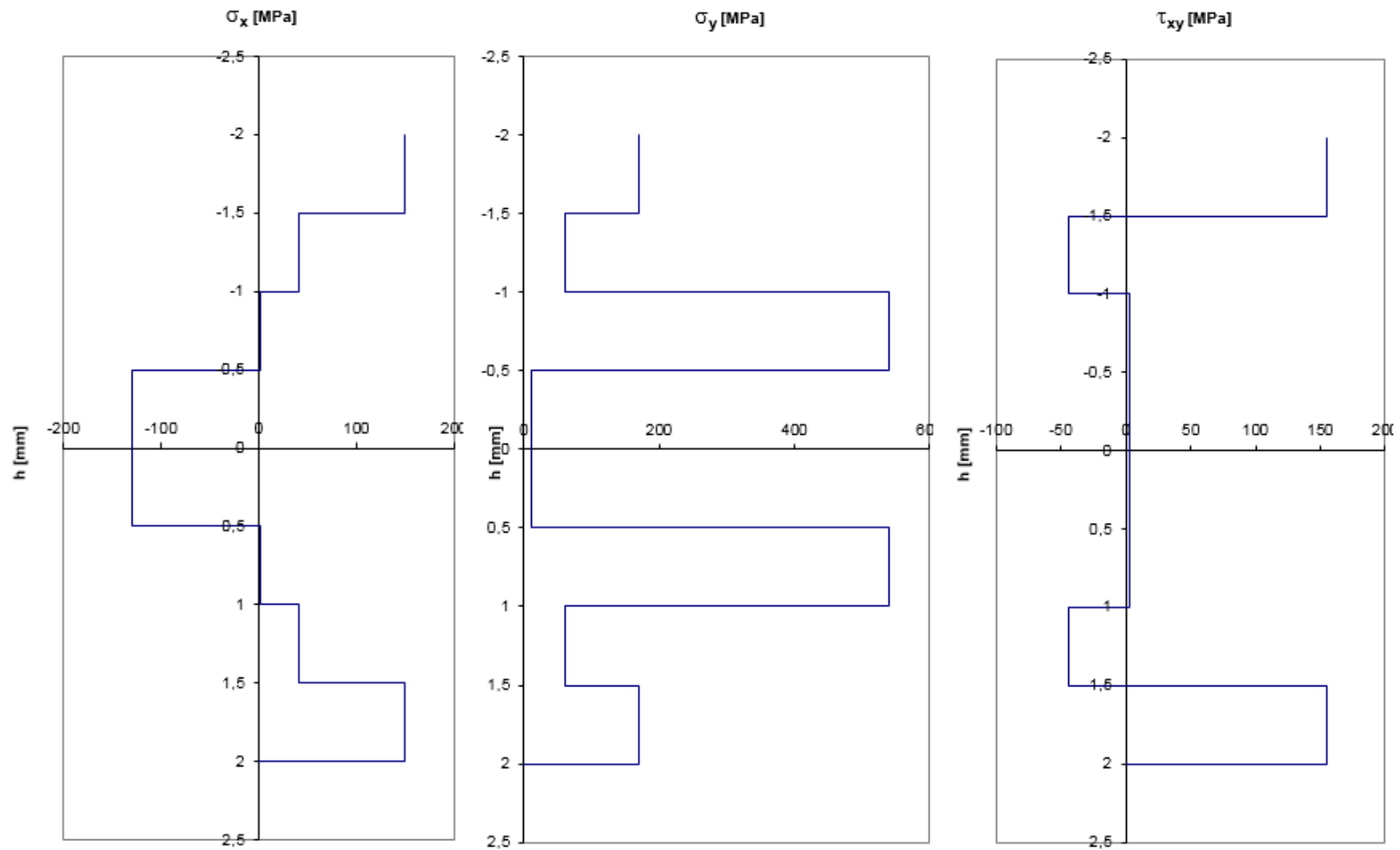
Vrstva	Napětí v horní / spodní vrstvě v souřadnicích laminátu			Napětí v horní / spodní vrstvě v souřadnicích laminy			Modifikované Tsai-Hillovo pevnostní kritérium pro horní / spodní vrstvu	Bezpečnost vypočtená dle Tsai-Hillova pev. krit. pro horní / spodní vrstvu
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_L	σ_T	τ_{LT}		
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		
1	149,07	169,45	155,02	314,29	4,24	10,19	0,170	5,88
2	40,85	61,23	-43,98	95,02	7,06	-10,19	0,177	5,65
3	1,34	539,36	3,34	539,36	1,34	-3,34	0,188	5,32
4	-130,05	9,963	3,34	-130,05	9,96	3,34	0,245	4,08
5	-130,05	9,96	3,34	-130,05	9,96	3,34	0,245	4,08
6	1,34	539,36	3,34	539,36	1,34	-3,34	0,188	5,32
7	40,85	61,23	-43,98	95,02	7,06	-10,19	0,177	5,65
8	149,07	169,45	155,02	314,29	4,24	10,19	0,170	5,88

Tab. 6-8 Hodnota matice tahové tuhosti A, matice vazbové tuhosti B, matice ohybové tuhosti D

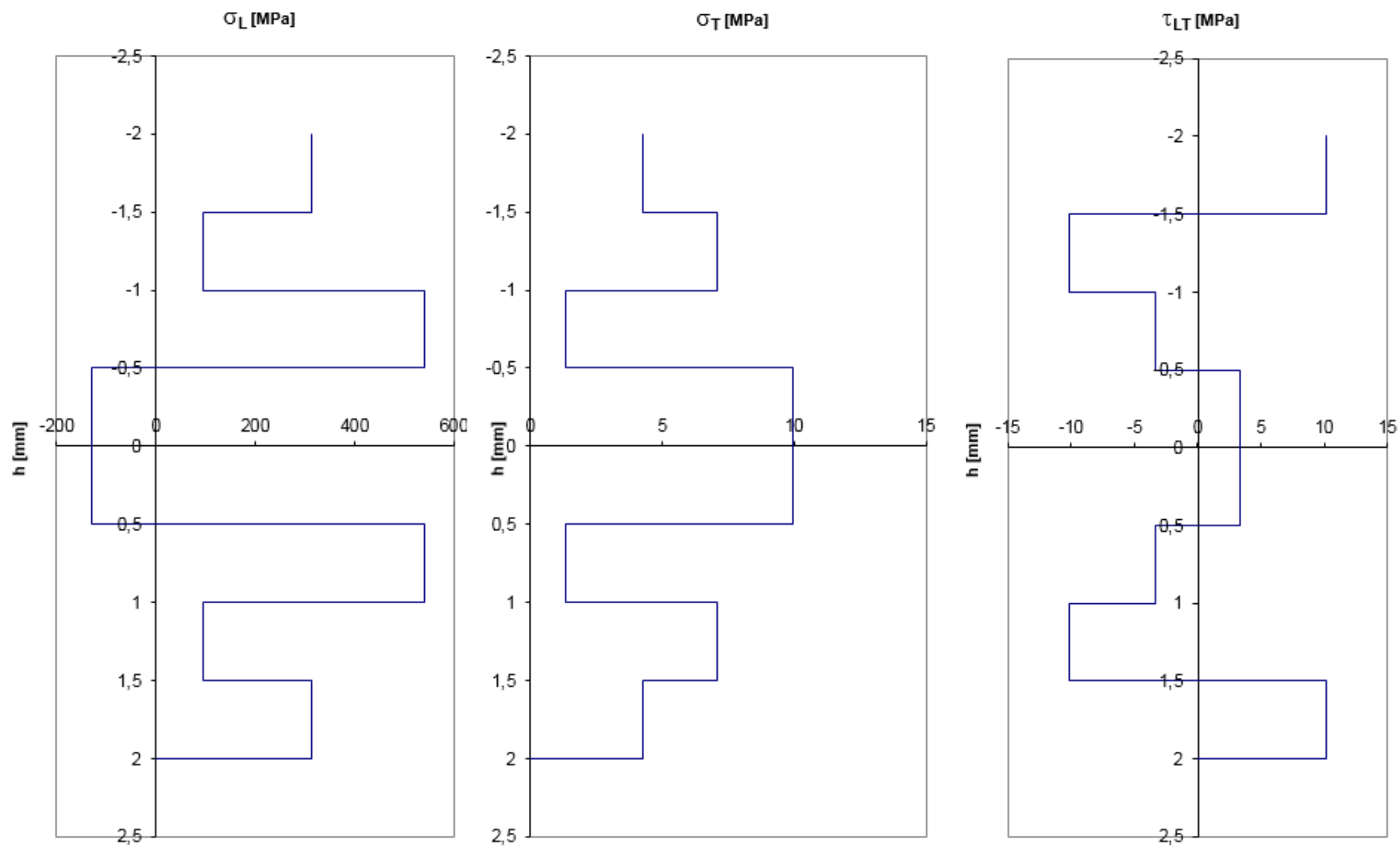
A		B		D	
B	D				
3,71E+05	1,19E+05	0	0	0	0
1,19E+05	3,71E+05	0	0	0	0
0	0	1,26E+05	0	0	0
0	0	0	3,25E+05	2,70E+05	8,69E+04
0	0	0	2,70E+05	4,41E+05	8,69E+04
0	0	0	8,69E+04	8,69E+04	2,80E+05

Tab. 6-9 Efektivní moduly pružnosti laminátu

Efektivní moduly pružnosti laminátu					
Membránové			Ohybové		
E_x	83 183,7 MPa		E_x	29 038,2 MPa	
E_y	83 183,7 MPa		E_y	40 332,5 MPa	
G_{xy}	31 498,9 MPa		G_{xy}	47 902,2 MPa	
ν_{xy}	0,3204		ν_{xy}	0,5878	
ν_{yx}	0,3204		ν_{yx}	0,8165	



Obr. 6-5 Vykreslení průběhu napětí v souřadnicích laminátu



Obr. 6-6 Vykreslení průběhu napětí v souřadnicích laminy

7 Experiment

Tato část je zaměřena na vyhodnocení experimentu (foto situace - obr. 7-1), který proběhl v roce 2010 [2]. Vzorky byly vyrobeny technologií přesného navíjení v CompoTech Plus Company. Bylo použito kompozitu složeného z uhlíkových vláken (dvojice materiálu - Toray T700 a Mitsubishi k63712) a epoxidové pryskyřice. Testována byla kompozitní trubka o vnitřním průměru 26 mm a délce 400 mm.

Skladba jednotlivých lamin byla následující (tab. 7-1, 7-2) :

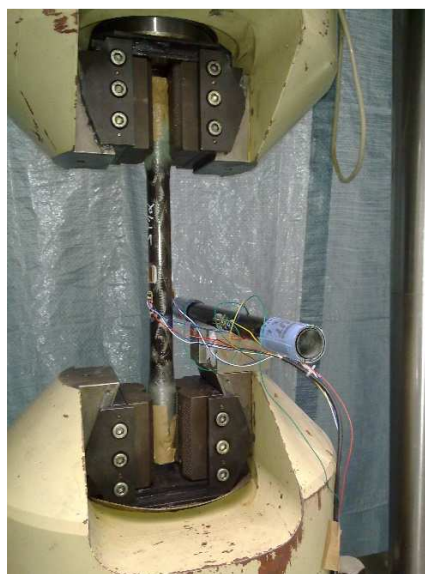
Tab. 7-1 Konfigurace laminátu

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1.	t700/E	0,176	87,1°
2.	k63712/E	0,450	0°
3.	t700/E	0,480	± 22.9° sym

Tab. 7-2 Materiálové vlastnosti

materiál	V _f [-]	v [kg.m ⁻³]	E ₁₁ [MPa]	E ₂₂ [MPa]	v ₁₂ [-]	v ₁₃ [-]	v ₂₃ [-]	G ₁₂ [MPa]	G ₁₃ [MPa]	G ₂₃ [MPa]
T700/E	0,6	1 510	143 120	6 672	0,26	0,26	0,38	3 390	3 390	1 914
K63712/E	0,6	1 620	358 779	4 981	0,21	0,21	0,40	2 210	2 210	1 968

Na šestivrstvou trubku bylo aplikováno tahové zatížení v oblasti elastické deformace (pro vyhodnocení byly použity, díky lineární závislosti, 2 body, počáteční – nulový, koncový – zvolený stav). Tenzometrické snímače byly umístěny na vnějším průměru trubky (dva, proti sobě; pro komparaci použit průměr hodnot), tudíž i pro srovnání s výpočetním modelem byla zjišťována deformace horní strany (na vnějším průměru).



Obr. 7-1 Upnutá kompozitní trubka v zatěžovacím stroji

Pro srovnání byl zvolen stav (oproti stavu nezatíženému) s aplikovanou silou 9 100 N. Tuto sílu bylo nutné, dle vzorce 6.9, přepočítat na liniové zatížení (v osové směru) N_x .

$$N_x = \frac{F_0}{\pi(r_1 + r_0)} = \frac{F_0}{\pi([r_0 + t] + r_0)} = \frac{F_0}{\pi(d_0 + t)} = \frac{9\,100,00}{\pi(26,00 + 2,55)} = 101,46 \text{ N/mm}$$

Podobně jako v úloze dimenzování trubky byl použit LamiEx. Tentokrát však byla sledována a srovnávána deformace. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 7-3:

Tab. 7-3 Vypočtená deformace jednotlivých vrstev

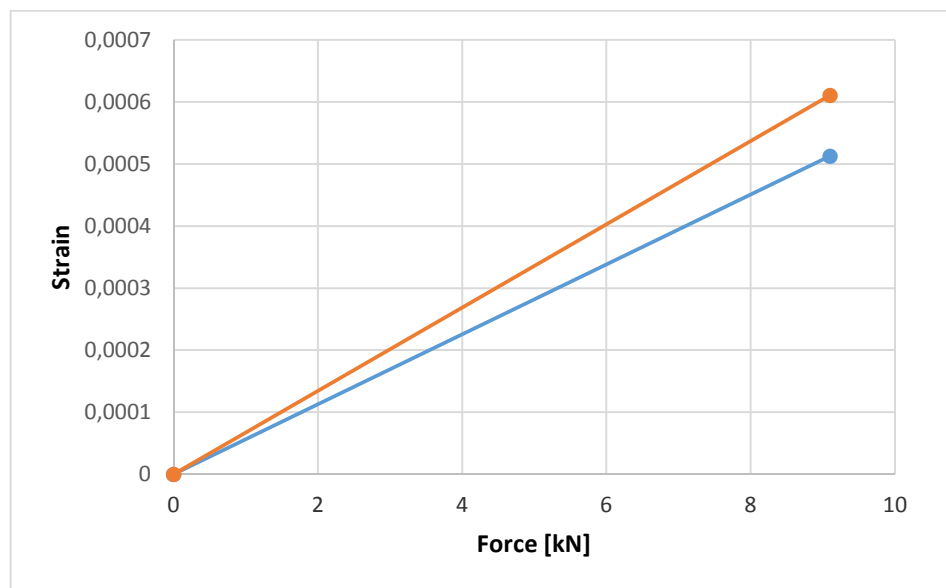
pořadí vrstvy	t [mm]	q [°]	ϵ_x 10^{-3} [1]
1.	0,176	87,1	10,3
2.	0,450	0,0	15,0
3.	0,480	22,9	26,4
4.	0,480	-22,9	37,2
5.	0,480	-22,9	49,3
6.	0,480	22,9	61,1

Rozdíl (resp. relativní chyba δ) naměřené (průměrná hodnota v tab. 7-4) a teoreticky (dle KLT) vypočtené hodnoty (obr. 7-2) deformace je uveden níže:

Tab. 7-4 Výpočet průměrné hodnoty naměřené poměrné deformace

změřená relativní deformace trubky vyvolaná silou $F = 9100 \text{ N}$		
snímač 1	snímač 2	průměrná hodnota $\epsilon_{x_změřená}$
0,000 497 716	0,000 527 950	0,000 512 833

$$\delta = \frac{\epsilon_{x_vypočtená} - \epsilon_{x_změřená}}{\epsilon_{x_změřená}} = \frac{61,1 - 51,3}{51,3} \cong 19\%$$



Obr. 7-2 Vizualizace rozptylu hodnot z experimentu (modře) a výpočtu dle KLT (červeně)

8 Diskuze

V této kapitole bude komentována jen ta část výsledků, která tematicky nezapadala do předcházejících kapitol z důvodu obsahu sdělení v nich obsažených.

Posledním, byť rozsahem nejkratším, je ze zadání bod 3., tedy porovnání výhod a nevýhod symetrické a nesymetrické skladby.

Obecné výhody a nevýhody kompozitů z materiálové hlediska byly uvedeny již v kapitole 1.5. Vezmeme-li nyní v úvahu problematiku skládání vrstev (resp. symetrie) a jestliže důsledky odvodíme z příslušné anulace některých prvků (konsekvence speciální konfigurace), popř. celých submatic odvozených z klasické laminační teorie, dospějeme k těmto kategoriím závěrů (výčtem – laminát symetrický, vyvážený, vyvážený symetrický, symetrický křížově vrstvený, antisymetrický, antisymetrický křížově vrstvený), přičemž vzhledem k zadání, se omezíme na komentování symetrického laminátu, resp. vyrovnaného symetrickému laminátu.

U symetrického laminátu chybí vazba mezi tahem a ohybem, mezi tahem a krutem. Matice vazbové tuhosti $\mathbf{B} = \mathbf{0}$

$$\mathbf{B}_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\mathbf{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) = \mathbf{0} \quad (8.1)$$

Matice \mathbf{B} bude rovna nule tehdy, pokud ve stejné vzdálenosti od střední roviny budou existovat identické laminy (vlastnosti, orientace) pod i nad střední plochou (vzdálenost od střední plochy, tloušťka laminy).

Na druhou stranu, nesymetrická skladba poskytuje téměř nepředvídatelné chování poněvadž, pokud jsou matice \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{D} plné (obecný kompozit), tak například tahové namáhání generuje prodloužení, zkos, ohyb, zkrut, totéž platí pro ohybové namáhání (generuje tytéž, všechny, deformace). Z tohoto důvodu se jednak proto, aby se ctily základní filozofie při návrhu kompozitů o důmyslném řízení vlastností, ale především, abychom měli představu o předvídatelném chování, tak se povětšinou (až na jisté speciální účely, kdy chceme, aby se materiál choval nestandardně – anizotropně – např. ve smart aplikacích) využívá jisté souměrnosti (pro nesymetrický laminát je možné tvarové zborcení produktu následkem napěťových reziduí nedůsledně dodržené technologie výroby nebo i kvůli běžnému provoznímu zatížení). Pro již zmíněné symetrické lamináty, kde není vazba mezi silami a momenty, tak síly přirozeněji („izotropní očekávání“) generují pouze prodloužení a zkos, ale již ne ohyb a zkrut (totéž, ale opačně, platí pro ohybový moment).

Vzhledem k zadání je nadimenzovaný laminát nejen symetrický (podmínka), ale i vyrovnaný (volba). Takzvaná vyrovnanost je důsledkem stejné tloušťky symetrických vrstev. Pro takovýto laminát je charakteristické, že chybí vazba mezi silami a momenty, tak mezi normálovými a smykovými silami, tudíž osová namáhání (tah, tlak) generuje pouze prodloužení, zkrácení a ohybové namáhání generuje ohyb, zkrut, protože submatice \mathbf{D} (matice ohybové tuhosti) je plná. (Pokud bychom chtěli, aby ohybové namáhání generovalo pouze ohyb, ne zkrut, tak k výše uvedeným podmínkám musíme přidat ještě jednu a využít pouze skladbu na sebe kolmých vláken 0° a 90° , takový laminát se pak nazývá symetrický křížově vrstvený).

9 Závěr

V prvé řadě byl představen kompozit, coby progresivní materiál a byly diskutovány jeho výhody a nevýhody (kapitola 1). Následovalo vypracování řešerše zaměřené na nejpoužívanější vlákna (podkapitola 2.1) a matrice (podkapitola 2.2) pro výrobu kompozitních konstrukcí. V kapitole 3 byla rozebírána výrobní technologie (technologie přesného navíjení), která konkretizovala (číselně limitovala) vlastní návrh v možnostech objemového (procentuálního) zastoupení vláken v matrici. Na klasické laminátové teorii (kapitola 5) byl demonstrován obecný postup návrhu řešení pro konkrétní zadání. Byla provedena pevnostní analýza kompozitní trubky (kapitola 6) zatížené vnitřním přetlakem, krutem a osovou silou podle zásad klasické laminační teorie pro zvolený typ vlákna a matrice. Nakonec byla ověřena minimální bezpečnost návrhu dle zvoleného pevnostního kritéria, které bylo představeno (i s jinými standardně používanými) v kapitole 4.

Z množiny několika návrhů, která představovala kombinační problém (pro parametry orientace vláken, tloušťky, dostupných materiálů matrice a vlákna, technologického omezení), byla zvolena varianta skladby kompozitu popsána zejména v kapitole 6.2, přičemž dalším hlediskem, za prioritním splněním omezujících požadavků ze zadání, byla jednoduchost a rychlost výroby, která koreluje s nejmenším počtem vrstev. Tedy znalost zatížení a dostupnost kvalitních materiálů, dovovalo, i při malém počtu lamin, dosáhnout (po obecné analýze problému – zejména typu zatížení a jeho vlivu na tvar součásti, trubku – z klasické laminační teorie) bezpečnosti k dokonce přes 4.

Výsledkem numerického a experimentálního srovnání (kapitola 7) tahově zatížené šestivrstvé trubky bylo zjištění 19% odchylky, což je hodnota, která při testování kompozitních materiálů není neobvyklá.

V kapitole 8 byly diskutovány výhody a nevýhody symetrického kompozitu. Z obsahu odstavců vyplynula nezmenšující se perspektiva v potenciální inovativnosti konstrukčních řešení aktuálních problémů díky vysoké variabilitě možné kombinace materiálů a konfigurace lamin.

V budoucí práci je možné se zaměřit například na problematiku vázaného krutu poblíž místa uložení kompozitu, popř. na komplikované problémy, jejichž řešení lze s výhodou nalézt pomocí numerických metod, zvláště pak skrze MKP. Eventualitou, necht' je i jiná cesta, která spočívá v optimalizaci návrhu podle více kritérií (nejen mechanických), např. podle údajů o aktuální ceně dostupných materiálů. Popřípadě je zde možnost využít vysokou měrnou pevnost kompozitů k úspoře hmotnosti, srovnáním se standardními (např. ocelovými) konstrukčními materiály, což je velice atraktivní přístup zejména v oborech rozvedených v úvodních kapitolách.

Seznam použitých informačních zdrojů

- [1] *Boeing 787* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>>
- [2] BOGOMOLOV, S.; KULÍŠEK, V.; ŠPANIEL, M.; RŮŽIČKA, M.: *Simulation of Composite Tubes Subjected to Compressive Loading*. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, FS U12105, 2010. 12105/2010/26. 32 s.
- [3] EHRENSTEIN, G. W.: *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] *Ilustrativní obrázek řešené kompozitní trubky* [online]. [cit. 2016-06-11]. Dostupný z WWW: <<http://edge.rit.edu/edge/P09226/public/carbontube.gif>>
- [5] JANOVEC, J.; CEJP J.; STEIDL, J.: *Perspektivní materiály*. Vyd. 3. přeprac. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [6] JANOVEC, J.; MACEK, K.; ZUNA, P.: *Fyzikální metalurgie*. Praha: [České vysoké učení technické v Praze. Středisko pro podporu studentů se specifickými potřebami ELSA], [2014].
- [7] *Kompozitový trup helikoptéry* [online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupný z WWW: <http://www.helistart.com/helicopters/Composite_Helicopters/KC518_Adventourer>
- [8] *Komparace velikosti vlasu s uhlíkovým vláknem* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://zoltek.com/carbonfiber/>>
- [9] *Kompozitové disky kol pro automobily* [online]. [cit. 2016-01-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.plastics.gl/automotive/carbon-fiber-car-wheel-weighs-only-5-2-kg/>>
- [10] *Kompozitní trubka* [online]. [cit. 2016-01-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.nammo-cs.com/our-company/what-we-do>>
- [11] LAŠ, Vladislav.: *Mechanika kompozitních materiálů*. 2. přepracované vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, 200s. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [12] MACHEK, V.; SODOMKA, J.: *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 85 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [13] *Materials Analysis* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.attar.com.au/materials-engineering.aspx>>
- [14] MEISSNER, B.; ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. SNTL. 1987.
- [15] *Online Etymology Dictionary* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupný z WWW: <http://www.etymonline.com/index.php?term=composite&allowed_in_frame=0>
- [16] *Pevný trn navíjecího stroje* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupný z WWW: <http://www.mikrosam.com.mk/filament/maw20fb4/sl/filament_6.jpg>
- [17] PLUHAŘ, J.; BENEŠ, V.; MACEK, K.: *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 1985, 253 s.

- [18] *Roving* [online]. [cit. 2016-02-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.easycomposites.co.uk/#!/fabric-and-reinforcement/carbon-fibre-reinforcement/carbon-fibre-tow/carbon-fibre-tow-3k.html>>
- [19] *Schématická geneze kompozitu* [online]. [cit. 2016-06-08]. Dostupný z WWW: <<http://maybach300c.blogspot.cz/2012/07/1-overview-of-composites.html>>
- [20] ŠANDERA, Pavel.: *Současný stav a historie výpočtů teoretické pevnosti*. Dostupný z WWW: <<http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3001-X.pdf>>
- [21] *Šasi Lamborghini* [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupný z WWW: <<http://maybach300c.blogspot.cz/2012/07/1-overview-of-composites.html>>
- [22] *Technologie přesného navíjení* [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.nuplex.com/composites/processes/filament-winding>>
- [23] *Tepelný štít raketoplánu* [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://maybach300c.blogspot.cz/search/label/NASA>>
- [24] *Vlastnosti materiálů* [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupný z WWW: <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/spec-spec/NS6Chart.html>
- [25] VRBKA, Jan.: *Mechanika kompozitů* [online]. 2008. Brno. [cit. 2015-10-22]. Dostupný z: <<https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=54211>>
- [26] *Výroba uhlíkových vláken* [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupný z WWW: <http://www.arrhenius.ucsd.edu/miakel/Miakel_B.html>
- [27] WHITNEY, J. M.; HALPIN, J. C.: *Analysis of Laminated Anisotropic Tubes under Combined Loading*. Journal of Composite Material. Vol. 2, No. 3, p. 360-367.

Seznam obrázků

Obr. 1	Relativní důležitost materiálů v průběhu času	9
Obr. 2	Schématický obrázek zatížené trubky	11
Obr. 3	Šasi Lamborghini z polymeru vyztuženého uhlíkovými vlákny	12
Obr. 4	Disky kol z uhlíkových vláken	12
Obr. 5	Kompozitový trup helikoptéry KC 518	13
Obr. 6	Boeing 787, zastoupení materiálu v konstrukci	13
Obr. 7	Vysokoteplotní kompozit s keramickou maticí pro tepelný štít raketoplánu	14
Obr. 8	Trubka z kompozitního materiálu	14
Obr. 1-1	Závislost Youngova modulu na hustotě	17
Obr. 1-2	Závislost měrné tuhosti na měrné pevnosti	17
Obr. 1-3	Schématický obrázek vyjadřující podstatu vzniku kompozitu	18
Obr. 2-1	Schématické znázornění procesu výroby uhlíkových vláken	23
Obr. 2-2	Srovnání velikosti lidského vlasu a uhlíkového vlákna	23
Obr. 2-3	Vliv vlastností vláken na průběh zatěžovacího diagramu při tahové zkoušce	24
Obr. 3-1	Schématický obrázek technologie přesného navíjení.....	29
Obr. 3-2	Roving, uhlíkové vlákno	30
Obr. 3-3	Systém vláken, které procházejí vodícím okem k pevnému trnu	30
Obr. 6-1	Ilustrativní obrázek řešené kompozitové trubky	36
Obr. 6-2	Osový řez symetrickou tenkostěnnou vrstevnatou válcovou laminátovou stěnou	37
Obr. 6-3	Schématický obrázek namáhání trubky krouticím momentem	37
Obr. 6-4	Počet, tloušťka, poloha, orientace jednotlivých lamin	39
Obr. 6-5	Vykreslení průběhu napětí v souřadnicích laminátu	43
Obr. 6-6	Vykreslení průběhu napětí v souřadnicích laminy	44
Obr. 7-1	Upnutá kompozitní trubka v zatěžovacím stroji	45
Obr. 7-2	Vizualizace rozptylu hodnot z experimentu a výpočtu dle KLT	46

Seznam tabulek

Tab. 1-1	Materiálové srovnání vlastností (mez pevnosti, hustota, měrná pevnost).....	16
Tab. 1-2	Výhodné a nevýhodné vlastnosti laminátů	19
Tab. 1-3	Komparace kompozitů a kovů	19
Tab. 1-4	Rozdělení kompozitů.....	20
Tab. 2-1	Rozdělení uhlíkových vláken podle struktury	22
Tab. 2-2	Demonstrace závislosti mechanických hodnot na zvoleném směru	24
Tab. 2-3	Pevnost při dynamickém namáhání	25
Tab. 2-4	Tržní cena běžně užívaných vláken	25
Tab. 2-5	Všeobecné srovnání významných vlastností	25
Tab. 2-6	Nejpodstatnější rozdíly mezi termosety a vyztuženými termoplasty	28
Tab. 6-1	Fyzikální a mechanické hodnoty pro materiál vlákna.....	39
Tab. 6-2	Fyzikální a mechanické hodnoty pro materiál matrice	39
Tab. 6-3	Mezní hodnoty napětí pro 60% objemový podíl vláken v matici	39
Tab. 6-4	Skladba laminátu	40
Tab. 6-5	Zatížení laminátu	40

Tab. 6-6 Velikost deformace jednotlivých vrstev	41
Tab. 6-7 Velikost napětí v horní / spodní vrstvě v souřadnicích laminátu, laminy	41
Tab. 6-8 Hodnota matice tahové tuhosti A, vazbové tuhosti B, ohybové tuhosti D.....	42
Tab. 6-9 Efektivní moduly pružnosti laminátu	42
Tab. 7-1 Konfigurace laminátu	45
Tab. 7-2 Materiálové vlastnosti	45
Tab. 7-3 Vypočtená deformace jednotlivých vrstev	46
Tab. 7-4 Výpočet průměrné hodnoty naměřené poměrné deformace	46