



Konstrukce prototypových kompozitních rámů z předimpregnovaných vláken

Disertační práce

Studijní program: P2302 – Stroje a zařízení
Studijní obor: 2302V010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Ing. Petr Kulhavý**
Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Fliegel, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Design of Prototype Composite Frames Made of Prepreg Fibres

Dissertation

Study programme: P2302 – Machines and Equipment
Study branch: 2302V010 – Machine and Equipment Design
Author: **Ing. Petr Kulhavý**
Supervisor: doc. Ing. Vítězslav Fliegel, CSc.



Tento list nahradte
originálem zadání.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování:

Je mi velkou poctou moci poděkovat svému školiteli Doc. Vítězslavu Fliegelovi za osobní i odborné vedení poskytnuté během studia a tvorby disertační práce.

Ve velké míře vděčím Dr. Radovanu Kovářovi, autorovi původní konstrukční myšlenky a spolutvůrci mnoha společných nápadů.

Téměř žádný z provedených experimentů či měření by se nepodařilo realizovat bez pomoci, vždy ochotně poskytnuté, od Dr. Aleše Lufinky.

Dalšími, jimž patří mé velké díky, jsou Doc. Michal Petrů a Prof. Ladislav Ševčík, jejichž osobnosti, pracovní nasazení i poskytnuté rady mi byly v mnohých oblastech inspirací.

Za poskytnutí možnosti odborné realizace vděčím Prof. Sylvio Simonovi a za osobnostní progres dosažený v pohledu na vědeckou práci Doc. Viktoru Šainovi.

V neposlední řadě patří největší díky mé drahé choti Monice a celé rodině, bez jejichž podpory a trpělivosti by práce nikdy nevznikla.

Ještě jednou díky,

Petr

Disertační práce byla vypracována na Katedře částí a mechanismů strojů Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci za podpory projektu Studentské grantové soutěže pro rok 2018 na Fakultě strojní TU v Liberci s názvem: "Innovation of technical systems structures with the use of composite materials", podporované Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Veškeré v práci uvedené výsledky jsou ovšem výhradním dílem autora a bez jeho souhlasu není možné jejich zveřejňování mimo vnitřní potřeby a propagace TUL.

Anotace:

Nosným tématem disertační práce je studium a popis možností aplikace kompozitních materiálů navíjených z dlouhých předimpregnovaných vláken do rámových konstrukcí otevřených, ale i uzavřených tvarů. Daná práce by měla poskytnout v současné době chybějící popis tohoto konstrukčního přístupu a představit vlastní metodiku vhodnou pro návrh pokročilých rámových struktur komplikovaných tvarů a průřezů, v prototypovém či malosériovém objemu produkce. První kapitoly práce se zabírají popisem kompozitních materiálů používaných v oblasti konstrukce automobilů, jejich členěním, hodnotami základních fyzikálních parametrů daných materiálů a konvenčními možnostmi výroby. V práci jsou testovány mechanické vlastnosti daných kompozitních materiálů a navržených laboratorních dílů, včetně přenosu vibrací či nalezení závislosti dílčích parametrů na vnitřní geometrii jednotlivých vlákenných vrstev. Práce obsahuje teoretickou studii a výklad jednotlivých principů metod výpočtu. Následují praktické aplikace numerického modelování kompozitních struktur s využitím nejmodernějších simulačních nástrojů, včetně jejich verifikace a úprav materiálových modelů na bázi výsledků získaných z provedených experimentů. Významným přínosem je aplikace numerického algoritmu, vhodného pro nalezení optimálních parametrů dané vrstvené struktury s ohledem na reálné okrajové podmínky definované charakterem působícího zatížení, demonstrované na problému tříbodého ohybu. Dále se práce zabývá studiem současných trendů ve výrobě kompozitních dílů od tvarů jednoduchých až po složité prostorově zakřivené a uzavřené rámové konstrukce. Jedním ze stěžejních cílů práce je ovšem na základě výše zmíněných poznatků, dostupných výrobních metod a principů využívaných při navíjení dlouhých vláken, modifikace výrobního zařízení a souvisejících metod pro vlákna předimpregnovaná. Daná technologie bude následně využita pro výrobu prototypu vlastního kompozitního rámu. V práci je na základě provedených testů a simulací navržen vhodný materiál, vnější tvar i řídicí křivka použitých nenosných jader s ohledem na sériovou či prototypovou tvorbu výrobku. Pro celý proces ovíjení dané struktury jsou z konstrukčního i technologického hlediska zpracovány parametrické simulace a následně vyrobeny prototypové rámy. Na výrobě daných dílů byla ověřena funkčnost celého výrobního zařízení, zjištěných vlastností na reálném dílu a posouzena vhodnost dané metodiky. Dané rámy byly podrobeny testům a výsledky porovnány s analytickým výpočtem i s konvenčním ocelovým rámem identického tvaru. Na příkladu možného těla opěradla automobilové sedačky je představen rám uzavřený a na příkladu podvozku dětského vozítka rám otevřený. V závěru práce je posouzena vhodnost náhrady konvenčních metalických rámu kompozitními a uvedeny možné příležitosti pro budoucí rozvoj a inovace v dané oblasti konstrukčního návrhu.

Klíčová slova: Navíjení, Prepreg, Kompozit, Rám, Výroba, Konstrukce prototypu

Annotation:

The main topic of this dissertation thesis is study and description of possibilities in application of composite materials wound from long fiber prepregs into open and closed frame structures. This thesis should provide the missing description of this structural designing approach and introduce its own methodics, suitable for designing prototype frames. The designed parts will be frame structures with complicated shapes and variable cross-sections, targeted to the field of small-volume production. The first chapters of the thesis deal with description of composite materials used in the field of automotive, their sorting and classification, basic physical parameters and possibilities of conventional manufacturing processes. Further, the mechanical properties of the chosen composite materials and of the designed laboratory parts have been assessed. The carried tests include transmission of vibrations, dynamic sensitivity and determination dependencies of the main mechanical parameters on the internal structure of individual layers. The next chapters contains a theoretical mechanical description and practical applications of numerical modeling of composite structures by means of the most modern simulation tools, including verification and modification of the models based on results obtained from the performed experiments. An important chapter is the application of advanced numerical methods, suitable for obtaining the optimal parameters of the given layered structure regards to the real boundary conditions, demonstrated on the real problem of three point bending. Furthermore, the thesis deals with study of the current trends in the field of composite parts production from the simple shapes to the complicated spatially curved and closed frame structures. However, one of the main tasks in this work, based on the available production methods and principles used for the winding, it was design modification of the production device and methods used for so called wet winding. This inovated device and methods were used for production of the own prototype frames. Based on the conducted experiments and carried simulations, the suitable material, shape and the leading curve of the non-bearing mandrels were designed. For the entire process of the structure winding, the parametrical simulations of the mechanical and technological aspects were carried and subsequently two kinds of open and closed prototype frames have been created. Based on production of those parts, functionality of the manufacturing device, individual features and suitability of the proposed methodology have been verified. The frames were tested and the results compared with the analytical calculation and subsequently also with the experimental data obtained on the conventional steel frames. The closed frame should represent an example of the body of a car seat backrest and the open frame represents the example of a child cart chassis. At the end of this thesis, the suitability of the replacement of conventional metallic frames with composite materials and the opportunities for future development and innovation in the field of designing of wound pre-impregnated materials have been assessed.

Key words: Winding, Prepreg, Composite, Frames, Manufacturing, Prototype design

Obsah

Úvod	13
Cíle disertační práce	13
1 Současné materiály v konstrukci technických řešení	16
2 Kompozity v konstrukci	19
2.1 Rozdělení kompozitů	19
2.2 Používaná vlákna	21
2.2.1 Uhlíková vlákna	21
2.2.2 Skelná vlákna	24
2.2.3 Aramidová vlákna	25
2.2.4 Bazaltová vlákna	25
2.3 Matrice	25
2.4 Prepregy	26
2.5 Konvenční principy výroby	28
2.5.1 Metody tvorby dílů kruhových průřezů	31
2.5.2 Porovnání „Dry & Wet“ metod	32
2.5.3 3D-tisk z vyztužených materiálů	33
2.6 Recyklace	33
2.7 Závěr kapitoly Kompozity v konstrukci	34
3 Základní materiál – předimpregnovaná vlákna	34
3.1.1 Základní fyzikální parametry kompozitů	36
3.2 Analytické výpočetní modely	37
3.2.1 Podélný Voigtův model	38
3.2.2 Příčný Reussův model	39
3.3 Přenos napětí	40
3.4 Makromechanické vlastnosti	43
3.4.1 Tlustostěnný laminát	48
3.5 Transformace napětí	50
3.6 Základní test mechanických parametrů	53
3.7 Závěr kapitoly o mechanických vlastnostech	54
4 Konstrukce zařízení pro výrobu kompozitních rámu	55
4.1 Oplétací mechanismy	56
4.2 Současné trendy v oplétání a navíjení	57
4.2.1 Průzkum patentů a nejnovějších výrobních metod v průmyslu	59

4.2.2	Nejnovější výrobní metody	62
4.3	Nenosná jádra	64
4.3.1	Materiály	64
4.3.2	Vypěňovací systémy	66
4.3.3	Vlastnosti použitých pěn	68
4.4	Průvlačné kroužky	68
4.5	Konstrukce – držák cívek	69
4.6	Konstrukce – navíjecí hlava	72
4.7	Závěr kapitoly – konstrukce zařízení k ovíjení.....	76
5	Výpočty, experimenty a optimalizace kompozitních struktur	77
5.1	Aplikace FE pro kompozity	77
5.2	Testování pevnosti v tahu	81
5.2.1	Lepení	83
5.2.2	Idea_1 - Korunka	84
5.2.3	Idea_2 - Kroužek.....	85
5.2.4	Numerické ověření	86
5.3	Ohybové zatížení	88
5.4	Přenos vibrací a možnosti tlumení	89
5.4.1	Experimentální určení přenosových charakteristik kompozitního materiálu.....	91
5.4.2	Tlumení a možnosti navýšení tlumení kompozitu.....	92
5.4.3	Numerické určení přenosových charakteristik kompozitního materiálu.....	95
5.4.4	Porovnání výsledků z experimentu a výpočtu.....	97
5.5	Parametrické modely návinu obecně zakřivených dílů.....	97
5.5.1	Návin 2D kolene	101
5.5.2	Šířka pásky	103
5.6	Závěr kapitoly výpočty a experimenty	104
6	Tvorba a testování zjednodušených prototypových dílů	105
6.1	Porovnání konvenčního obalování a navíjení prepregových pásek	106
6.1.1	Přenos vibrací	107
6.2	Optimalizace návinu	111
6.2.1	Aplikace kritériální optimalizace pro ohyb.....	113
6.3	Závěr kapitoly:	118
7	Výroba prototypového rámu	119
7.1.1	Výpočet potřebné délky vlákna.....	121



7.2	Řídící křivka tvaru jádra	123
7.2.1	Návin otevřeného a uzavřeného rámu.....	126
7.3	Možnosti aplikace vyrobených rámuů	127
7.4	Závěr kapitoly - výroba prototypů.....	128
8	Vlastnosti prototypového rámu	128
8.1	Testování mechanických vlastností.....	129
8.2	Numerická simulace	130
8.3	Výsledky testů rámuů.....	132
8.4	Závěr kapitoly testování prototypových rámuů.....	134
	Závěr.....	136
	Témata plynoucí z práce do budoucna:	138
	Přínosy pro vědní obor	139
	Přínosy pro praxi	139
	Literatura:.....	140
	Seznam odborných publikací autora.....	152
	Seznam příloh.....	155
	Odborné ohlasy práce	155
	Použitý software.....	155

Seznam použitých zkratk a symbolů

ACP – (Advanced Composite Processor), Modul použitý k výpočtům kompozitů

CAE – (Computer Aided Engineering), Metody počítačové podpory konstruování

CMC – Ceramic matrix composite, Kompozit s keramickou maticí

CVD – (Chemical Vapor Deposition of Carbon), Metoda výroby uhlíkových vláken a částic

DFX – (Design For X), Metodika konstruování s ohledem, na specifické vlastnosti výrobku

DOE – (Design of Experiment), Metoda optimalizace součásti či procesu

DOF – (Degrees of Freedom), Počet stupňů volnosti tělesa

Euro NCAP - (European New Car Assessment Programme), Nezávislé konsorcium, které provádí zkoušky automobilů

FDM – (Fused deposition modelling), Metoda 3D tisku

FEM – (Finite Element Method), MKP – metoda konečných prvků, numerická metoda sloužící k simulaci průběhu fyzikálních dějů na vytvořeném virtuálním modelu.

FRP – (Fiber Reinforced Polymers), Vlákna vyztužené materiály s polymerní maticí,

Hoop – Metoda navíjení pod navíjecím úhlem 90°

HT – (High Tenacity), Vlákno s vysokým modulem pružnosti

MDF – (Medium Density Fibreboard), Polotvrdé dřevovláknité desky

MMC – (Metal matrix composite), Kompozit s kovovou maticí

PMC – (Plastic matrix composites), Kompozit s keramickou maticí

Prepreg – Předimpregnované uhlíkové vlákno, v částečně vytvrzené pryskyřici

PSD – (Power Spectral Density), Ukazatel míry přenosu výkonu danou frekvencí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{Hz}$]

ROM – (Rule of mixture), Směšovací pravidlo

Singularita – Z matematického pohledu znamená singularita výjimečný bod, v němž funkce není definována nebo nemá řešení, derivaci apod.

SP – (Sampling point), Body řešení při kriteriální optimalizaci

Strain – Změna tvaru objektu v reakci na vnější zatížení, nebo vnitřní pnutí

Stress – Napětí či namáhání vztažené na jednotku plochy materiálu.

SW – Zkratka pro Software, počítačová aplikace

UD – Unidirectional, jednosměrná orientace

A	[mm]	Amplituda
α	[°]	Sklon střední roviny
a	[kg ms ⁻²]	Zrychlení
α_0	[°]	Počáteční úhel návinu
C	[N.m ⁻¹]	Matice tuhosti
δ	[-]	Ztrátová tangenta
d_i	[m]	Průměr
d_{xyz}	[mm]	Posuv ve směrech daných os
E^*	[MPa]	Měrný modul pružnosti materiálu
E'	[MPa]	Fundamentální modul
E''	[MPa]	Ztrátový modul
E_f	[MPa]	Modul pružnosti vláken
E_{ijkl}	[MPa]	Tenzor deformace
E_m	[MPa]	Modul pružnosti matrice
ε_i	[m]	Deformace ve daném směru
f	[Hz]	Frekvence
F	[N]	Síla
F_i	[°]	Referenční úhel vláken
F_{kr}	[N]	Limitní síla při vzpěru
F_{kr}	[N]	Kritická síla ve vzpěru
f_p	[N tex ⁻¹]	Poměrná pevnost vlákna
F_p	[N]	Síla předepnutí filamentu
F_s	[N]	Statická síla na DMA
F_T	[%]	Povolená variace aktuální sledované síly
γ	[°]	Zkos, smyková deformace
$H_{(f)}$	[-]	Přenosová funkce
J	[mm ⁴]	Polární moment průřezu
φ_i	[-]	Poměrný objemový obsah složky
k_s	[mm]	Geodetická křivost
k_{si}	[-]	Koeficient tlumení
k_{xy}	[mm]	Křivost střední plochy
L_{kr}	[m]	Kritická délka vlákna
λ_n	[Hz]	Frekvence i-teho modu
m	[kg]	Hmotnost
M_B	[N.m]	Brzdný moment
M_k	[Nm]	Kroutící moment působící na těleso
M_o	[Nm]	Ohybový moment působící na těleso
O_{cm}	[mm]	Obvod cívky na středním poloměru
$\vec{p}(t)$	[-]	Řídící vektor křivky
P_i	[N]	Síly složek v kompozitu

ρ	[kg m ⁻³]	Hustota
R	[mm]	Poloměr zakřivení 2D tělesa
Re	[MPa]	Mez kluzu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti
S	[mm ²]	Obsah plochy
s	[mm]	Posuv
σ	[Pa]	Mechanické napětí
σ_c	[MPa]	Napětí časové - mez únavy
σ_e	[MPa]	Napětí ekvivalentní
σ_{max}	[MPa]	Maximální napětí při namáhání v ohybu
t	[s]	Čas
Δt	[s]	Časový krok výpočtu
T	[tex]	Jemnost textilie - délková hmotnost
T	[-]	Transformační matice
$T_{(\nu,\phi)}$	[-]	Vektor popisující zakřivený element
t_i	[mm]	Tloušťka
τ_{max}	[Pa]	Maximální napětí při namáhání v krutu
τ_t	[MPa]	Adhezní napětí
U	[J]	Elastická energie
u_0, v_0, w_0	[m]	Posuvy ve směru XYZ
μ_f	[-]	koeficient tření mezi vláknem a jádrem
μ_i	[-]	Poissonův součinitel
V_f	[m ³]	Objem vláken
V_m	[m ³]	Objem matrice
W	[mm ³]	Modul průřezu
ω	[Rad s ⁻¹]	Úhlová rychlost
ξ	[-]	Strukturní tlumení
η	[-]	Ztrátový faktor tlumení
θ	[°]	Navíjecí úhel
z_i	[-]	Počet závitů při navíjení

Úvod

V obecném povědomí i knihách zabývajícími se historickým vývojem v technice, jak vhodně poukázali například Saulovič [1], Zeithammer [2] či jak pravý nezapomenutelná scéna populárního českého filmu, lze 19. století jednoznačně označit za století páry. Dále následovalo století elektřiny, kdy docházelo k zásadní změně v přístupu a jejím zkrocení - využití. Jak asi jednou v budoucnu označí naše období? Dle [1][3] je možné polemizovat o názorech jako věk otevírání bran vesmíru, atomové energie, mikroelektroniky, chemie, devastace prostředí či prolnutí a dezintegrace kultur? Z pohledu čistě technického vidíme jak stroje, které byly malé, mohou být mnohonásobně větší a přístroje mohutné umíme zcela minimalizovat. U každého systému ovšem narazíme na pomyslnou hranici, za kterou už se nevyplatí dané zařízení dále upravovat, měnit, inovovat ani více modernizovat a je tedy nutné postoupit dále, či několik technických systémů vzájemně zkombinovat [4]. Významným prvkem, při kombinaci několika systémů je dosažení tzv. synergického efektu. Tento efekt je zásadní v tom, že zneplatňuje jeden z prvních matematických zákonů, s nímž se děti setkávají již při počátcích svého studia, tzv. komutativní a asociativní zákon. Pouhým sečtením vlastností jednoho a druhého prvku nedosahujeme výsledné vlastnosti rovné očekávanému výsledku, ale vlastnosti skokově lepší. Stejně, jako technické zařízení ani živé organismy či rostliny nejsou určeny součtem vlastností buněk, z kterých jsou složeny. Zemi tedy nevládne éra buněk, či elementárních prvků, ale kombinovaných systémů a jejich sloučených vlastností, jenž na okolí působí jako jeden autonomní celek. Vývoj na zemi se tedy v současné době ubírá cestou růstu komplexity a složitosti systémů, to je nediskutovatelný fakt vývoje. Z tohoto důvodu, jak to ve svém díle již koncem 20. století predikuje Altsuler [3], můžeme naše století nazvat věkem kombinovaných technických systémů. Jednotlivé prvky vzájemně slouží prvkům složitějším a stejně tak jejich funkci zase zajišťují prvky či subsystémy podřazené. Stejně je tomu u jednotlivých členů konstruovaného kompozitního dílu, tvořeného nenosným jádrem, pojivem a vytvrzující disperzí, kdy každá z daných složek sama za sebe již dosáhla pomyslného maxima. Jak můžeme cítit, není již více předmětná snaha vyvinout např. vlákno ještě pevnější, ale vhodnou kombinací s jinými prvky a modifikací vzájemné interakce docílit výsledné synergie.

Cíle disertační práce

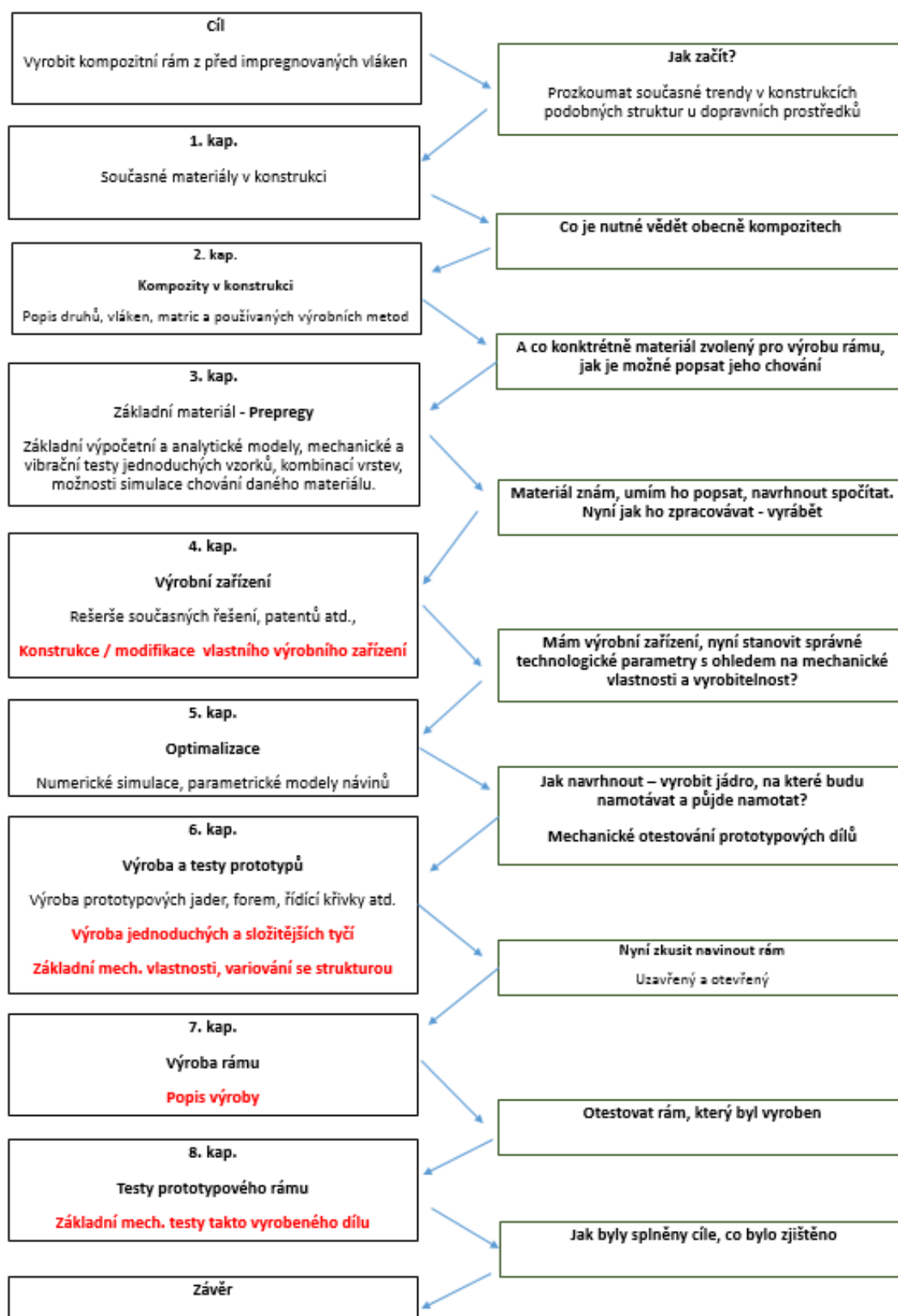
Cílem disertační práce je studie kompozitních materiálů, tvorba vlastní metodiky, konstrukční návrh a výroba prototypových ráků z předimpregnovaných vláken včetně návrhu možností jejich aplikací. Dále testování a optimalizace mechanických vlastností prototypů daných ráků a jejich porovnání s metalickými či konvenčními kompozitními ráky. Jelikož jsou současné technologie určené pro výrobu kompozitních rákových konstrukcí velmi nákladné z hlediska investic do výrobních nástrojů a zařízení (formy, autoklávy), je jejich použití omezeno výhradně na velkosériovou výrobu. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout a otestovat vlastní konstrukční řešení včetně výrobního postupu, vhodných pro ráky malosériové či prototypové zhotovené z vláken předimpregnovaných tzv. „prepregů“. Výchozím bodem práce bude důkladný průzkum současných trendů v možnostech aplikací materiálů pro výrobu lehkých konstrukcí, především v automobilovém průmyslu. Jedná se o kompozitní materiály na bázi dlouhých vláken, popis jejich základních druhů a možnosti výroby. Jelikož se žádná konstrukce, konstrukční návrh, technické řešení ani sebestřednější výpočet neobejde bez dokonalé znalosti parametrů použitých materiálů, bude v jednotlivých kapitolách práce kladen důraz na určení základních mechanických

charakteristik, studii možnosti jejich ovlivnění, vhodných metod testování a verifikace pomocí přesného numerického modelování dle teorií vrstvených skořepin. Z mechanických parametrů se při efektivním návrhu pokročilých kompozitních struktur nejedná pouze o znalost základních vlastností jako moduly pružnosti či Poissonovy konstanty, ale současně je bezpodmínečná znalost přenosových a útlumových charakteristik, dynamické fundamentální a ztrátové moduly, mezifázové soudržnosti a kohezní síly mezi jednotlivými vrstvami. S ohledem na možnosti dnešní výpočetní techniky a existující pokročilé numerické metody bude v práci pro konkrétní řešení aplikována metoda genetické optimalizace struktury daného kompozitu s ohledem na reálné okrajové podmínky vycházející z praktických aplikací.

Obsahem dalších kapitol bude důkladné studium nejnovějších metod výroby uzavřených kompozitních dílů. Tématem práce by neměl být popis standardní tzv. mokré výroby, kdy jsou vlákna ve vyhřívané formě sycena pryskyřicí ani konvenčních metod jako např. ruční laminování ve formě, infúzní vakuování či obalování, ale především použití vláken předimpregnovaných. Cílenými oblastmi důkladného rozboru budou tedy především metody pro tvorbu tenkostěnných rámových struktur od nejjednodušších přímých tvarů, až po komplikované prostorově zakřivené geometrie. Dalším z milníků je rozbor a aplikace tzv. „centreless wheel“ technologií, užívaných pro aplikaci v ovíjení vysocepevnostních vláken kolem nenosných jader variabilních průřezů k výrobě prototypového rámu. Obecně, jsou podobné technologie ovíjení, obalování či oplétání známé již dlouhou dobu, nicméně jejich použití se vždy nacházelo spíše v okrajových odvětvích jako např. oplétání lan, hadic atd. V dnešní době, vlivem vysokého využití kompozitních materiálů v různých oblastech, se tato aplikace navíjení vláken používá stále častěji pro výrobu pevnostních dílů v konstrukci dopravních prostředků, průmyslových zařízení i strojů.

V představené práci se bude jednat konstrukční návrh inovovaného výrobního zařízení na bázi původního konceptu TUL, upraveného pro výrobu prototypových rámu realizovaných novou technologií multifilamentního navíjení z úzkých prepregových pásek. Součástí tohoto konstrukčního řešení bude samotné výrobní zařízení, studium a návrh optimálního složení vrstev výsledného materiálu pro konkrétní aplikaci, návrh a výběr materiálu pro výrobu nenosných jader a metodika tvorby řídicího algoritmu dle navržené CAD geometrie. Výsledkem práce bude praktická aplikace výše uvedených konstrukčních metod, postupů a technologií do výroby kompozitního rámu nekonvenčního tvaru. Konkrétně se bude jednat o testování a návrh uzavřeného rámu pro využití v konstrukci opěradla automobilové sedačky a rámu otevřeného tvaru jako část podvozku dětského vozítka.

Struktura dané práce, kapitol a jednotlivých kroků je sestavena na bázi logického diagramu zobrazeného níže.



Obr. Vývojový diagram logické struktury práce

1 Současné materiály v konstrukci technických řešení

Oblasti vývoje a inovací konstrukčních řešení, produktů či výrobních metod zaměřených na vlákniny vytvrzené materiály, jejichž aplikovatelnost byla dle [5][6][7] predikována a cílena výhradně pro letectví a kosmonautiku, zažívá v současné době významný rozmach i v komerčním průmyslu. Trend kombinací materiálů výrazně ovlivňuje také konstrukce panelových sestav dopravních prostředků u prvků jako okna, dveře, výztužné rámy atd. Dle Potěšila [8] nové trendy jednoznačně ukazují, že klasické kovové konstrukce těchto prvků budou postupně nahrazeny materiály kompozitními, které budou do původních konstrukcí implementovány. Oproti klasickým metodám značně vzrůstá míra využití CAD a FEM metod, požadavky na kvalitu, vývoj nových technologií, robotizace a automatizace technologií. Vystávají požadavky na stále více efektivní využití materiálů, další optimalizace v oblasti tuhosti, pevnosti a dlouhodobé stability i v široké škále klimatického zatížení.

Jak uvádí Malinkov [9] hmotnost vozidla snižená o 100 kg dokáže uspořit od 0.25 po 0.5 l/100 km paliva, což odpovídá snížení emisí CO₂ od 3.5 do 8.4 g/km. Při porovnání kovových a kompozitních dílů či materiálů, především z hlediska efektivního využití materiálu a úspory hmotnosti, jsou kompozity vhodnější. Kovové materiály ovšem mají stále nižší cenu, jednoznačně vyšší možnost recyklace a technologického zpracování. Změnou kovového materiálu za kompozitní je dle Harryho [10] možné uspořit přibližně 40 až 60 % hmotnosti. Nejpevnější a nejlehčí díly přitom získáme dle Allena [11] výrobou uplatňující technologie dlouhých a zarovnaných vláken. Jedním z hlavních kritérií současných dopravních prostředků je bezpochyby jejich bezpečnost. Dle statistik Policie České republiky plyne skutečnost, že nejčastější příčinou vážných dopravních nehod je nesprávný způsob jízdy [12][13]. Vlastní průběh nehod je v naprosté většině případů způsoben jízdou po nesprávné straně vozovky (mikrospánek, vjetí do protisměru či neopatrné předjíždění), nedání přednosti v jízdě či neopatrné vjíždění na krajnici. Z rozboru statistických dat vyjde, že tento nepříznivý vývoj je třeba přičíst na vrub následkům nehod především na silnicích v extravilánu (mimo obec), což bezprostředně souvisí s vyššími rychlostmi na těchto komunikacích. I přes nesporné kvality současných automobilů a moderních bezpečnostních systémů nelze v těchto případech zabránit vzniku nehod. Světoví výrobci jsou si tohoto trendu vážně vědomi a z toho důvodu se hlavní deformační zóny vozidel umísťují především do přední části vozidla pro minimalizaci účinku čelního a bočního nárazu. I v této oblasti nacházejí své uplatnění kompozitní materiály, které při správné konstrukci dokáží absorbovat velké množství deformační energie. V porovnání s klasickými konvenčními deformačními členy z kovů, založenými na plastické deformaci, mohou, jak uvádí Nedělka [14], Hormann [15] či Růžička [16], vhodně zkonstruované kompozitní deformační elementy vykazovat nejen nižší hmotnost, ale i výrazně vyšší měrnou absorbovanou energii. Děje se tak díky řízenému využívání zcela jiných mechanismů postupné destrukce kompozitních materiálů (Obr. 1). Při vhodném návrhu je možno docílit přeměny kinetické energie na energii deformační pomocí disipaci vlivem delaminace, tj. vlivem oddělování jednotlivých vrstev s následnou disipací vlivem porušování matrice a porušování vláken. Možné hrozící situace jsou dnes standardně simulovány a testovány jako tzv. crash testy. Všechny tyto metody sdružuje v Evropě systém hodnocení Euro NCAP. Na jeho podpoře se podílejí vlády vyspělých zemí, které nejvíce pociťují následky dopravních nehod. Následky na životech, zdraví a s tím související finanční ztráty a náklady na léčení lze jistým tlakem na výrobce vozidel výrazně snížit.

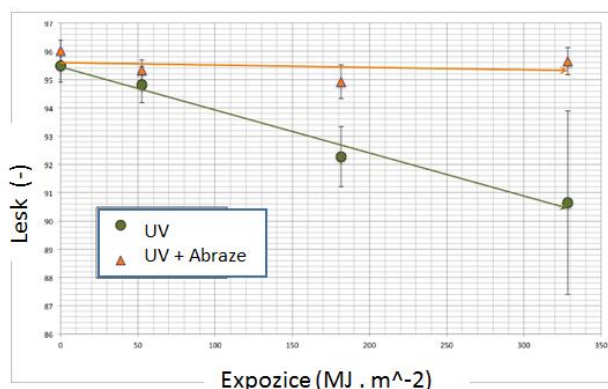
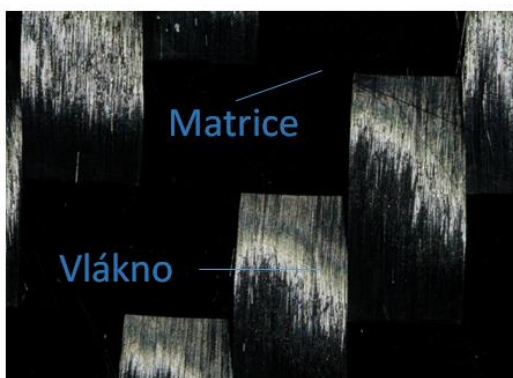


Obr. 1 Kompozitní díly jako absorbéry rázové energie při nárazu [16]

Jak již bylo zmíněno, v dnešní době postupuje vývoj kompozitních materiálů, optimalizace jejich vlastností i výrobních procesů téměř všechny průmyslové obory. Mezi nesporné výhody vytržených materiálů patří především jejich schopnost přizpůsobit své vlastnosti konkrétním potřebám. Jako kompozit lze označit materiál složený z několika členů za předpokladu, kdy každý z nich stále zachovává svou vlastní autonomii. To v praxi znamená, že jednotlivé složky nejsou nikdy vzájemně sloučeny, i když na své okolí působí jako jeden nezávislý materiál [17][18]. Obecně nejlepší uplatnění nachází dlouhoválkenné kompozity, kdy je každé individuální vlákno spojitě po celém objemu tělesa, ve své vrstvě. Pro zaručení vysoké životnosti vyrobených dílů, musí být chování materiálu velmi přesně předpovězeno i následně monitorováno. Zde nastává menší rozpor mezi výrobní a vědeckou sférou, neboť jak poukazují např. [19][20] vlastnosti a materiálová data získaná na prototypových vzorcích v laboratoři, vykazují obvykle významné statistické odchylky od reálných dílů finalizovaných sériově.

Při pohledu do historie techniky je možné nalézt téměř v každém knižním díle např. [2][3][6] první zmínky o kompozitních materiálech obvykle jako luky či chýše ze slámy, hlíny a klacíků, první hliněné cihle, kterou Izraelité vyztužili stéblovními vlákny či Egypťané bambusovými výhonky (1500 př.n.l.). Dále se bylo možné setkat se s laminovaným a lepeným dřevem, ultra silným lukem či vrstveným mečem (1800 n.l.). Méně často si ovšem uvědomíme, že i pouhé dřevo není nic jiného než Ligninová matrice vyztužená celulózovými vlákny či dokonce kosti, kde se kombinují vlastnosti vápníku, fosfátových iontů a měkkého kolagenu [22]. Během dějin vznikaly celkem zajímavé, z dnešního pohledu i lehce úsměvné objevy jako grafitová tužka (1564) a zjištění, že grafit je ve skutečnosti uhlík následovalo až r. 1779. Patent přípravy uhlíku CVD byl podán roku 1880 a až o 100 let později (1970) byla zjištěna jeho biokompatibilita a tím otevřeny dveře pro aplikace uhlíkových materiálů v medicíně [23]. První setkání s uhlíkovými vlákny ovšem sahá až do 18. století. V této době se ovšem vlákna nevyužívala pro své mechanické vlastnosti, testována byla především v elektrotechnice jako fyzikálně nový materiál [25]. Na počátku minulého století, byla zjištěna synergie skelným vláken ve spojení s pryskyřicí a tato metoda dosahuje svého vrcholu a neustále nových aplikací od roku 1970 vývojem vláken uhlíkových, borových či kevlarových. Pro své velmi specifické vlastnosti jako je především nízká hmotnost a vysoká pevnost s možností přizpůsobení anizotropie vlastností reálným podmínkám a synergie v kombinaci s polymerní matricí si materiály ihned získaly své nenahraditelné postavení [26].

Kompozitní materiály se v oblasti automobilů vyskytovaly již dlouhá léta především však u prototypů a závodních speciálů. V současné době je možné se s uhlíkovými vlákny potkat již zcela běžně napříč mnohá odvětví od částí dílů karoserií vozidel až po cyklistiku či sportovní pomůcky (lyže, pátky). Velmi překvapivou aplikací byly například výsadkové čluny při vylodění spojenců v Normandii. Oblastí, která ovšem nebyla těmto materiálům dominantní a v současné době získává výrazné postavení, je využití uhlíkových laminátů nejen jako dílů pevnostních, ale současně jako designových. Vozidlo se dnes v častých případech stalo stylingovým doplňkem svého majitele, nástrojem k prezentaci jeho osobnosti, životního stylu či společenského postavení [12]. Na kompozitní části automobilových karoserií jsou i vzhledem k jejich značně vysokým cenám, výrobci kladeny velmi přísné normy ohledně samotného vzhledu. Mnoho norem a výrobních postupů se zaměřuje na vizuální parametry [27][28] samotného kompozitu (Obr. 2) bez dodatečné povrchové úpravy jako např. metalízy což je oproti konvenčním dílům přístup zcela nový. Hodnotí se jak kvalita samotné tkaniny a její textury, tak použité povrchové krycí materiály či laky. Testují se nejen optické a světelné charakteristiky, ale i životnost při působení současného abrazivního i klimatického zatížení [27]. Kompozity v dnešní době tedy netvoří hodnotu pouze svými mechanickými vlastnostmi, ale i designem.



Obr. 2 Hodnocení kvality textury (vlevo) a optických parametrů (lesk při UV zatížení)

Z pohledu čistě vědeckého, tím prvním kdo ovšem ve své práci začal nad pojmem kompozit skutečně uvažovat (jednalo se ovšem spíše o složené těleso, bez synergického efektu, ale podstatný je směr nových úvah) byl – jak ve svých komentářích vtipnou formou poukázal Hawking [31], Sir Izaak Newton ve svých dílech jako např. [32]. Ten, jak je dobře známo na základě výsledků z Galileových pokusů, formuloval zákony sil a jejich interakce s tělesy. Zde ve svých úvahách došel až k tomu, co nazval jako “attraction of composite bodies” (my bychom dané dnes patrně označili jinak, ovšem v 17. století byla tato idea jedním z významných milníků). Nicméně, jeho úvahy vedly směrem, že každé těleso působí na jiné těleso silou, jenž je úměrná hmotě každého z nich. Na základě toho, síla mezi dvěma tělesy bude dvojnásobná, pokud celková hmotnost jednoho z těles vzroste na dvojnásobnou. A zde právě došel k v té době přelomové myšlence, že zmíněné nyní již dvojnásobně hmotné těleso, vlastně může být složeno také ze dvou těles původních [32][33]. Co je na celé ideji nejzajímavější, je její následná aplikace do klasických pohybových rovnic, vedoucí k spleťmu potvrzení zákona, že akcelerace tělesa při pádu nezáleží na jeho hmotě.

2 Kompozity v konstrukčních aplikacích

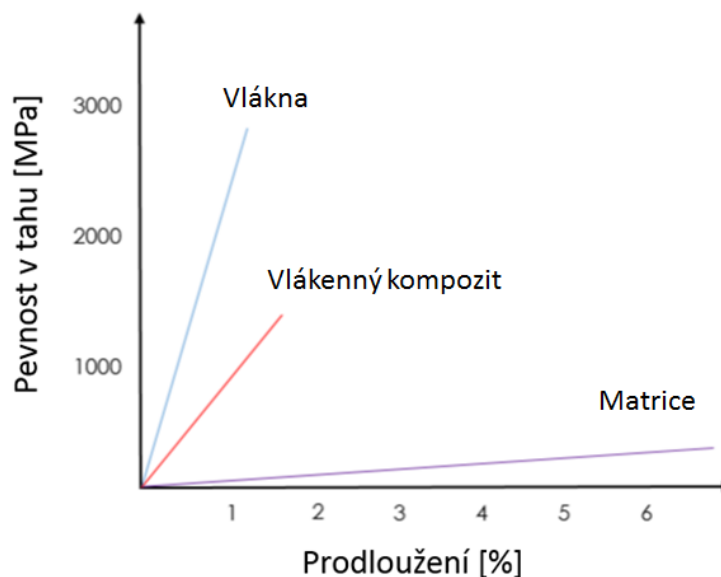
V úvodní kapitole práce byly představeny základní principy, aktuální požadavky i teoretický pohled do historie vývoje kompozitních materiálů. Jak bylo možné vidět, vývoj se časem prolíná dvěma společnými jmenovateli, jimiž jsou dopravní prostředky a vojenství. Kompozitní materiály, ovšem díky své extrémní měrné pevnosti dalším specifickým fyzikálním vlastnostem, následně našly své uplatnění i v kosmonautice (Sputnik 1957). Jako technologický milník své doby působil stíhací letoun s technologií stealth F-22 Raptor vyrobený z uhlíkových vláken a nanotrubiček a bismaleimidové a epoxidové pryskyřice (Lockheed Martin Aeronautics). Patrně největším představitelem aplikace vláken vytvrzených polymerních materiálů je dopravní letadlo Boeing 787 Dreamliner, který je z 50 % (hmotnostních) z kompozitu. Na českém trhu existuje zástupce letoun UL-39 Albi představený v roce 2016, jedná se o první český letoun vyrobený z uhlíkových prepregů autoklávovou technologií, jak zmínil a popsal Beran [35]. Největší podíl na trhu s kompozity tedy v dnešní době představují vyztužené materiály s polymerní matricí (FRP). Od původních aplikací do specificky zaměřených sektorů, se aplikace FRP rozšířila do předmětů denní potřeby jako sportovní náčiní, jízdní kola, obaly na elektroniku, nářadí a mnoho dalšího až po současný fenomén design.

Použitím kompozitních dílů namísto konvenčních materiálů je sledována především redukce hmotnosti. Tento bod ovšem není zdaleka jediným možným benefitem. Dalšími neméně významnými přednostmi jsou možnost cíleného ovlivnění vlastností a konstrukce tvarů, konvenčními technologiemi, bez dodatečných úprav (svaření, lepení) nedosažitelných. Velmi zajímavým hlediskem je únavová životnost kompozitů. Pokud je daný díl konstrukčně vhodně stanoven a během provozu dle stanovených podmínek pečlivě monitorován, únava materiálu se téměř neprojevuje. Kombinací vhodného vlákna a matrice je možné s ohledem na reálné podmínky cílit nejen mechanické, ale i fyzikální či chemické vlastnosti, jako žáruvzdornost, chemickou stabilitu a s ohledem na aplikaci v prostředí automotive, dané díly nepodléhají korozi.

2.1 Rozdělení kompozitů

Pro klasifikaci materiálu jako kompozitu je důležitá fyzikální odlišnost jednotlivých složek. Pokud by se jednalo pouze o materiál s nedefinovanými příměsemi, potom by jako kompozit bylo nutné označit téměř všechny kovy, neboť obsahují nežádoucí látky (nečistoty, plynné póry) [48]. Analogicky potom i plasty obsahují další složky, jsou to např. plniva, nadouvadla, pohlcovače záření a další. Kompozit se skládá z části pojivové nazývané matrice (kap. 2.3), jenž zajišťuje tvar a rozměry kompozitu a ostatní části zpravidla rozptýlené či rozložené v matrici tzv. disperze (kap. 2.2). Vzájemnou kombinací a vhodným poměrem i tvarovým uspořádáním těchto materiálů je možné docílit výrazně synergického efektu, kdy výsledné vlastnosti jsou výrazně vyšší, než by odpovídalo prostému poměrnému sečtení dílčích vlastností. Dle [36][37] musí být objemový podíl disperze větší než 10 % a vybrané fyzikální vlastnosti alespoň 5x vyšší. Tento fenomén je možné vidět na *Obr. 3*, kde jsou ilustrativně porovnány základní mechanické parametry výtzuže, disperze a výsledného kompozitu. Relativně nižší pevnost kompozitu, oproti samotnému vláknu se může zdát zavádějící. Je ovšem nutné si uvědomit, že laboratorní pevnost samotného vlákna je v technické aplikaci nedosažitelná a právě kombinace s polymerní matricí umožní využít daný potenciál.

Vláknenné kompozity jsou obecně materiály implementované do přírodní nebo syntetické homogenní matrice. Hlavním komponentem jsou především vlákna či složky různých materiálů a v různých poměrech. Jako vláknenná výtzuž se nejvíce používají dlouhá, různě uspořádaná diskrétní vlákna skelná, uhlíková, aramidová a nebo hybridní vlákna. Vždy hledáme či se snažíme zkombinovat požadované mechanické a fyzikální vlastnosti obou za účelem konkrétní aplikace.



Obr. 3 Poměr pevností dílčích složek a výsledného kompozitu (dle [36][40])

Pro technické účely je možné rozlišovat mezi třemi základními druhy kompozitu, definovatelných dle fyzikálního skupenství a tvaru disperze či matrice.

Kompozit prvního druhu

Materiály v této skupině se obecně vyskytují nejčastěji a obsahují pevnou fázi disperze. Rozdělují se podle tvaru a disperze:

- Vlákna – spojitá, dlouhá a krátká
- Částice – jednorozměrné (jehličky, tyčinky)
- Vrstvené (destičky)
- Izometrické (globule)

Kompozit druhého druhu

Vyznačují se disperzí z kapalně fáze, běžně ze dvou složek (dřevo jako systém trubic s mízou). Nejznámějším představitelem jsou materiály samomazných ložisek, což bývá spékání kov s disperzním olejem [38].

Kompozit třetího druhu

Poslední skupinu představuje disperze plynné fáze. Mezi tyto materiály se řadí pěnové hmoty, pěnoplasty, pěnokeramika, kovové pěny a speciální systémy z vláknových desek, plstí či rohoží.

2.2 Používaná vlákna

Dle Kořínka [40] se v České republice dříve vyráběly především skleněné tkaniny s plátňovou nebo keprovou vazbou (osnova-útek) a rohože. Pro díly mechanicky namáhané se ovšem jako vhodnější ukazují rovingové tkaniny s prameny bez zákrutů. Oproti běžným technickým materiálům jsou vlákna vhodná ke zcela jinému způsobu popisu a měření jejich délkových a hmotnostních charakteristik. Jedná se především o řádové rozdíly v poměru velikostí délky a šířky. Z toho důvodu, namísto udávání klasického objemu, hustoty, běžných metrů či měrných hmotností je používán pojem jemnost, (nebo taktéž délková hmotnost) určená z poměru hmotnosti a délky.

$$T [\text{tex}] = \frac{m [\text{g}]}{l [\text{km}]} \quad (2.1)$$

Kde m je hmotnost vláken [g] a l je délka [km]

Rovingem nazýváme svazek nekonečných textilních vláken bez zákrutu a s tloušťkou větší než $T = 68 \text{ tex}$. Pro jemnější svazky vláken je používán název filamenty. Rovingy je možné vyrábět obecně ze všech typů vysoce pevnostních vláken. Mimo běžně používané označování pomocí jemnosti filamentů, bývá též možné použít počet filamentů v tisících, který se dle [23][25] běžně pohybuje v rozmezí od 1 k - 24 k. Pokud jsou jednotlivé filamenty tvořeny z různých materiálů, nazýváme výsledné rovingy jako hybridní. Nejčastěji se používá kombinace pevnostních vláken s vlákny termoplastickými, která následně nahrazují samotnou matici. Mezi kontinuální vlákna se zařazují uhlíková, skelná, čedičová, polymerní, rostlinná, borová a aramidová.

Obecně je možné pro technické aplikace využít i vlákna přírodní (např. pavoučí R_m 1140 MPa, 31% tažnost), skelná ($E \approx 90 \text{ GPa}$, nízká tepelná vodivost), uhlíková (grafitová, až 10x vyšší tuhost a nižší tažnost než skelná, tepelná odolnost, odolnost vůči únavě, ovšem náchylná k ostrým ohybům, ovšem 2-100x dražší než skelná, elektricky vodivá), aramidová (kevlarová), silonová, keramická (teplotní odolnost, s kovovou a keramickou maticí, vydrží i tlak), kovová (laciná, těžká, zpevnění Al slitin, moderní trend kovová skla vlákna a tzv. Whiskery (tenké krystaly se šroubovou dislokací uprostřed, získávané kondenzací z par řady látek [36]), dosahující pevnosti až 20 GPa a E kolem 400 GPa [40]). Zcela zásadním parametrem u krátko vláknenné výztuže je potom tzv. kritická délka vlákna. Jedná se o parametr určující minimální délku vláken, při které je pravděpodobnost porušení vlákna rovná pravděpodobnosti jeho vytažení z matrice.

2.2.1 Uhlíková vlákna

Asi nejlépe vystihuje prvek uhlík P. L. Walker Jr. (University Pennsylvania), který své dílo nadepsal – „Carbon, an old but new material“.

Začneme-li učebnicově, uhlík je šestý prvek periodické tabulky s relativní atomovou hmotností 12. V zemské kůře je zastoupen pouhou jednou promilí, hraje ovšem neobyčejně důležitou roli. Je hlavní součástí živé hmoty, neboť tvoří základ všech organických molekul. Počet přírodních nebo syntetických sloučenin uhlíku přesahuje počet všech sloučenin všech ostatních prvků dohromady.

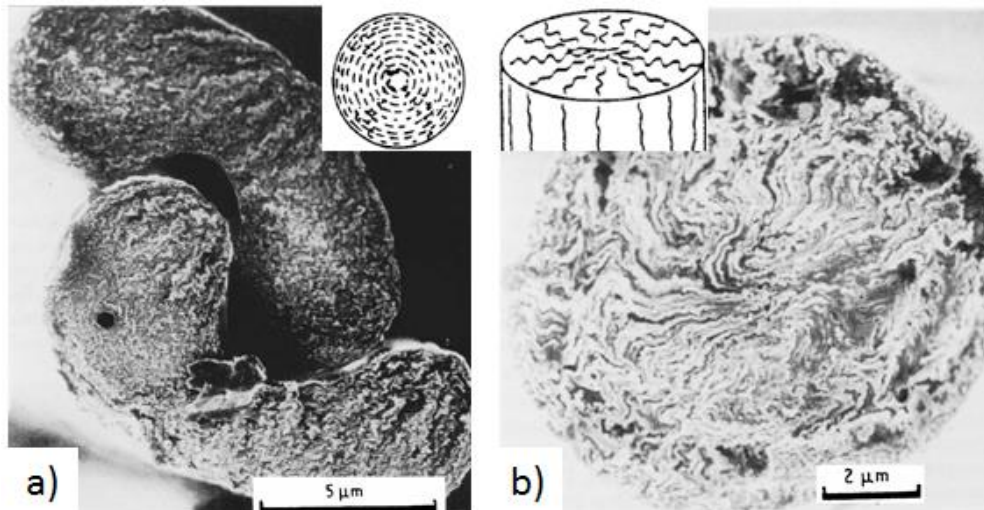
orientace grafitických lamel paralelně s osou. Tímto objevem byl plně nastartován rozmach těchto materiálů. Vlivem prudkého rozmachu letectví a kosmonautiky v 60. letech, jak ve svém díle popisuje napří. Cahn [34], se v oblasti základního výzkumu začalo značně zkoumat chování jevů při vzniku nových materiálů z organických prekurzorů jako ropa, uhlí, uhlovodík a polymery [45]. Došlo k rozvoji materiálů jako uhlíková vlákna, skelný uhlík, pyrolytický uhlík, kompozity uhlík – uhlík (uhlíková matrice).

Všechny uhlíkové materiály obsahují maximálně stopové množství cizích atomů a jsou získávány pyrolýzou organických sloučenin, s výjimkou grafitu, který se vyskytuje v přírodním stavu. Pyrolýzou se rozumí rozklad organických sloučenin jako ropa, polymery a uhlovodíky. Pyrolýza může probíhat od 200 ° až po 1600 °C (kalcinace). Dojde-li následně k měknutí, je proces nazýván koksováním. V opačném případě tedy při vytvrzení je proces nazýván karbonizací, která vede od dřevěného uhlí až ke skelnému uhlíku a uhlíkovým vláknům. Poslední stádium pyrolýzy spočívá v eliminaci reziduálních heteroatomů zastoupených především vodíkem. Pokud dochází k dalšímu zvyšování teploty, nastává proces grafitizace, při níž dochází k nárůstu velikost krystalitů a k jejich restrukturalizaci. Pyrolýza a grafitace tedy představují dvě výchozí stadia výroby uhlíkových materiálů. Na základě nastavených podmínek se ovlivňuje molekulární struktura a tím i vlastnosti výsledného materiálu [40][41][45].

Při nízkoteplotním zpracování dochází k jevům, které porušují vazby na úrovni neaktivnějších molekulárních bodů a tím způsobují vznik volných radikálů. Takto uvolněné lehké molekuly jsou uvolňovány ve formě těkavých látek. Dochází k aromatizaci a polymeraci, z čehož vyplývá přeorganizování atomů uhlíku do hexagonálních cyklů jako v molekule benzenu. Všechny tyto jevy jsou velmi složité, hlavně proto že neprobíhají postupně, ale současně. Nedojde-li k měknutí a přechodu kapalným stavem, zachovává si uhlík podobu prekurzoru a je pak jen velmi těžko grafitovatelný. V aromatických lamelách vytvořených během pyrolýzy jsou atomy uspořádány do hexagonálního, opakujícího se motivu krystalu grafitu. Karbonizací nebo koksováním se tyto lamely přemění na lamely uhlíkové s hexagonálním motivem. Přechod skrze kapalnou stav oproti tomu umožňuje vyšší mobilitu molekul. Kondenzované aromatické molekuly se začnou shlukovat do planárních lamel. Lamely se uspořádávají do paralelních vrstev a vytváří mikrosferule. Tyto anizotropní sferule představují oddělenou fázi – tzv. mezofázi. Zásadní otázkou zde je, zda orientace původních lamel umožní jejich rozšíření v makroskopickém měřítku. Pokud ano, dojde ke vzniku anizotropního uhlíku, jehož uspořádání paralelních rovin umožňuje grafitizaci. Mezofáze je základem tvorby vysocepevných uhlíkových vláken vyráběných z dehtu a některých dalších materiálů bez nutnosti použití pojidla [39][42][43][45].

Standardní uhlíková vlákna

Vlákna (Obr. 5) jsou k dispozici na cívkách s vlákny o délce několika set metrů a každý svazek je složen z 1 000 až 10 000 filamemntů o průměru 5-12 um. Standardní HT uhlíková vlákna mají pevnost v tahu mezi 3 až 4 GPa, modul pružnosti 230-300 GPa (typická vlákna mají označení T300) – výrobce Toray [46]. Nové typy těchto vláken mají obdobný modul pružnosti, ale pevnost značně vyšší (firma Toray typy T800 a T1000). Ve srovnání s čistým grafitem, vykazují vlákna nižší hustotu, což způsobuje jejich vnitřní mikropórovitost, kdy póry velikosti přibližně 1 nm jsou orientovány rovnoběžně s osou vlákna.



Obr. 5 Snímek z elektronového mikroskopu, vlákna na bázi a) PAN, b) Pitch [44]

Vlákna s vysokými mechanickými parametry

Jedná se především o modul pružnosti a odolnost v tahu současně s vysokým stupněm anizotropie. Takováto vlákna mají přibližně 2-3x vyšší E než nejlepší oceli, a více než 5x oproti slitinám na bázi Ti používaných v aeronautice. Hustotu mají necelé 2 g/cm^3 , což jim při porovnání s ostatními známými materiály jednoznačně zaručuje nejvyšší měrnou pevnost.

Mezi hi-tech materiály poslední doby se dají zařadit fullereny a nanotrubičky. Fullereny jsou útvary vzniklé složením šedesáti a více atomů uhlíku pravidelně rozmístěných ve vrcholech pěti a šestiúhelníků. Současně, je ovšem pozornost věnována uhlíkovým nanotrubičkám, které vznikají jako součást sazí, při výboji mezi uhlíkovými elektrodami. Vykazovaná mechanická pevnost je zde až 100 násobně vyšší než ocel [49]. Jednou z nejnovějších poznanych forem je uhlíková nanopěna, vytvořená při teplotách nad 10 tis $^{\circ}\text{C}$, kdy daný materiál vykazuje paramagnetické chování a své využití nachází především v medicíně [23][41].

2.2.2 Skelná vlákna

Skelná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tavením ze směsi křemenného písku při $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (oxidů Si s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, B a Pb) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K nebo metodou sol/gel, což je velmi viskózní kapalina, která se chová jako pevná látka. Jednotlivé typy skleněných vláken lze právě podle obsahu oxidu rozlišit a rozdělit. Potřebného průměru vláken se dosáhne dlužením proudu skla tekoucího platino-rhodiiovými tryskami (průměr trysky je 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Vytažená vlákna jsou postupně sduřována do pramenů a ty jsou navíjeny na bubny, ale před navinutím se musí tyto prameny smočit horkým ochranným povlakem na bázi lubrikačních vosků, který je ochrání před lámáním. Skelných vláken je obecně možné najít veliké množství v závislosti na mechanických vlastnostech jako permitivita, korozivzdornost, vyšší teplota tavení, vlákna s vyššími moduly pružnosti a teploty zvlákňování. Vlákna jsou houževnatá, odolná proti ohni a dlouhodobě snáší teploty až $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a mají značnou odolnost proti chemikáliím [48].

2.2.3 Aramidová vlákna

Předností aramidových vláken je vysoká pevnost a tuhost. Molekuly jsou vzájemně spojeny vazbami vodíkových můstků. S danými vlákny je obvykle možné se setkat pod obchodním označením Kevlar, nejčastěji u protipožárních dílů a neprůstřelných textilií. Uhlíková vlákna jsou inertní, zatímco skelná a aramidová vlákna vykazují v kyselém i alkalickém prostředí pokles pevnosti [36][40]. Aramidová vlákna jsou založena na bázi aromatických polyamidů. Získávají se zvlákněním polymerů, kdy začínají tuhnout při průchodu spřádací lázni, kde se suší a dlouží při teplotě až 400 °C.

2.2.4 Bazaltová vlákna

Prvek bazalt vzniká dekompresním tavením v horním plášti země. Tato hornina je tvořena různými složkami jako je pyroxen, magnetit, olivin a plagiokláza [48][49]. Jednou z hlavních výhod je chemická stabilita, nízká tloušťka a značná mechanická pevnost. Ve srovnání se skelnými jsou bazaltová vlákna stabilnější v silně alkalickém prostředí, ovšem v prostředí silně kyselém mají vlákna nižší stabilitu.

2.3 Matrice

Druhým stavebním a nosným prvkem kompozitu je, jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly matrice. Matrice primárně představuje úlohu pojiva, zajišťuje pozici vláken a chrání je před vlivy okolí. Nezastupitelná role matrice nastává při defektu vláken, kdy díky přenosu sil na mezifázovém rozhraní přeneše síly na vlákna sousední a následně zpátky na původní, lokálně poškozené, čímž získáváme požadovaný synergický efekt. Bez přítomnosti matrice by sousední vlákna žádné jiné síly nepřenášela.

V technické praxi se rozlišují matrice na bázi:

- Přírodní (např. biopryskyřice)
- Polymerní (Plastic matrix composites PMC)
- Keramická (CMC)
- Uhlíková (Extrémní teploty, brzdné systémy letadel, hrany křídel raketoplánů)
- Kovová (MMC)
- Skelná

Z toho jsou v reálných případech nejčastěji používané polymerní matrice [50]:

- Polyesterové: Výhody jsou nízké náklady a schopnost transparence; nevýhody provozní teploty pod 77 °C, křehkost a vysokou hodnotu smršťování až o 8 % při vytvrzování.
- Fenolické: Výhodou je nízká cena a vysoká mechanická pevnost; nevýhody vysoký obsah pórů. Vznačují nenákladným zpracováním, dobrou odolností vůči kyselinám a vysokým teplotám (až 230 °C). Také mají vysokou odolnost vůči ohni a při ohřevu neuvolňují velké množství toxických látek.
- Epoxidové: Mezi výhody patří vysoká mechanická pevnost a dobré přilnavé vlastnosti na kovy a sklo; Nevýhodou jsou vysoké náklady a obtíže při zpracování.

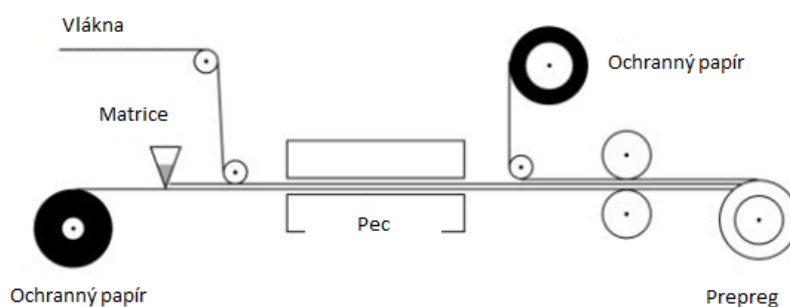
Pro výrobu kompozitů s matricí z tepelně tvrditelných pryskyřic se nejčastěji používají epoxidové pryskyřice (asi 90 % z celkové produkce). To je způsobeno několika důvody: Má výrazně vyšší pevnost, nízkou viskozitu a nízkou tekutost, což dobře zasytí vlákna a uchrání jejich požadovanou

pozici a z hlediska výrobního má nižší těžkavost a smrštivost což snižuje napětí ve spojení matrice s vlákny a použitelnost až do 180 °C. Epoxidy mají vynikající mechanické a elektrické vlastnosti a jsou nejčastěji používány s kvalitními výztužemi, například s uhlíkovými vlákny. Velkou předností je cena, odolnost proti vodě, roztoků alkálií a některým rozpouštědlům [38][51][54], proto se hodí pro použití s kvalitními uhlíkovými vlákny.

Termoplasty používané pro výrobu matric lze rozdělit na amorfnní a semikrystalické. Výhodou oproti teplem tvrditelným pryskyřicím je jejich vyšší houževnatost. To je způsobeno tím, že jednotlivé řetězce matrice po sobě mohou v omezené míře klouzat. Dalšími výhodami je rychlost zpracování, poněvadž odpadají časy potřebné na vytvrzení, možnost spojování svařováním a v neposlední řadě příznivé chování ve vlhkém prostředí a za tepla, kdy se neuvolňují toxické látky (to stejné platí i při výrobě). Uhlíková vlákna také výrazně zlepšují creepové chování materiálu, a to obzvláště u amorfnních plastů. Nevýhodou je zatím nepřiliš rozvinutá technologie pro povrchovou úpravu vláken zlepšující vazbu mezi vláknem a matricí tzv. sizing [41][56].

2.4 Prepregy

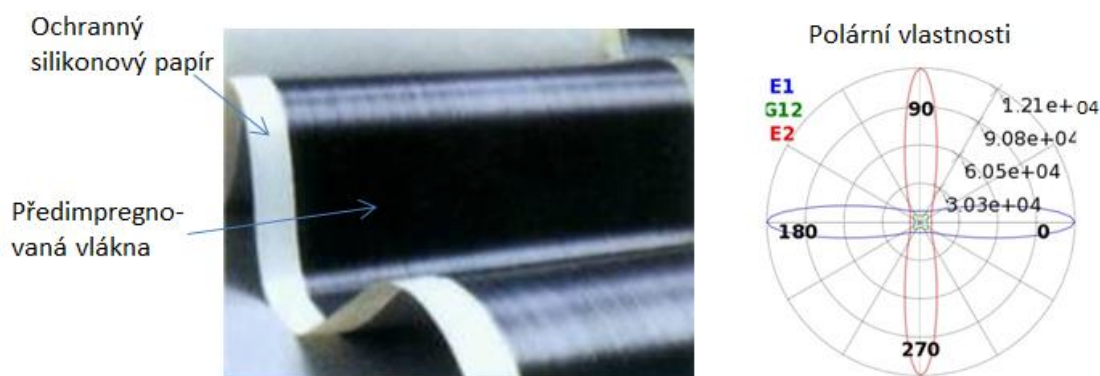
V současné době se problematice zjednodušování a zefektivnění návrhu kompozitních dílů věnuje neustále více firem, výrobců i výzkumných institucí jak uvádí [8][60][65]. Hledají se především rentabilní technologické procesy pro výrobu pevnostních dílů na odlehčené konstrukce či jako náhrady kovových výztuh. Ve světě kompozitů se již delší dobu používají přednasyčené tkaniny všeobecně známé pod názvem prepreg. Prepregy jsou polotovary určené k výrobě kompozitů, jejichž hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi, nechází se zde vyvážený objemový poměr vláken (30 % vláken) a matrice (Obr. 6). Hlavní výhodou prepregů je vysoký podíl vláknové výztuže, stejnoměrnost a hladkost hotových dílů, které souvisí s předem definovatelným a přesným uložením výztuže. Pokud se prepreg využívá ve větším množství, dají se nástřihy připravit strojně, např. pomocí řezacího plotru.



Obr. 6 Princip výroby jednosměrného prepregu [53]

Tato prepregová vlákna mají nezastupitelnou pozici, mezi dlouhovláknými kompozity. Jedná se o předimpregnované textilie, nebo bloky s jednosměrně orientovanými vlákny [41]. Jejich aplikace se může zdát velmi podobná klasickým vláknům, nicméně z výrobního a konstrukčního hlediska jsou patrná výrazná specifika. Dle [18], se jedná o kompozit tzv. prvního stupně, kdy je disperze z pevné fáze. V případě UD prepregu se jedná o tloušťku 0,2 mm. Při porovnání podélného a příčného Youngova modulu, dostáváme pro podélný modul hodnoty řádově vyšší.

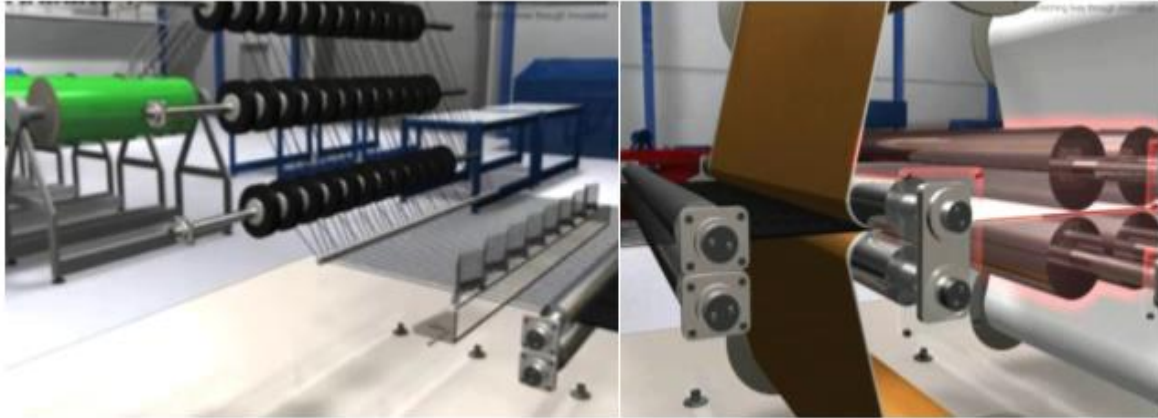
Jednosměrné prepregové pásy bývají obvykle impregnovány termosetovou matricí a vzhledem ke své výrazné lepivosti (při kladných teplotách) musí být jednotlivé vrstvy separovány ochranným silikonovým papírem (Obr. 7). Obvyklá šíře rolí dosahuje až 130 cm v délkách reálně omezených pouze velikostí role. Na základě použité pryskyřice (termoset či reaktoplast) je výchozí materiál obvykle nutné uchovávat v mrazícím zařízení. Při výrobě dílu je materiál ručně či strojně vrstven při proměnlivé orientaci jednotlivých UD vrstev. Následuje proces vytvrzení ve vakuu či za zvýšeného tlaku a teploty [22]. Na trhu jsou současně i vícevrstvé prepregy, u kterých jsou jednosměrně vyztužené vrstvy vzájemně vůči sobě potočeny (obvykle pod úhly 0° , $+45^\circ$, -45° a 90°) a spojeny prošitím polyesterovou nití obchodně ozn. Cotech® a Pyrofil® [40]. Přínosům a podstatě daného uspořádání vrstev se z mechanického hlediska ve své práci velmi podrobně věnuje Petrů [71].



Obr. 7. Prepregová folie jednosměrná: a) Základní materiál b) Mechanické vlastnosti v závislosti na úhlu zatížení

Podrobnou studii a popisem matric využívaných pro prepregy se ve své práci zabýval Sigmund [56]. Existují tři hlavní typy matrice používané pro prepregy: epoxidové, fenolové a bismaleimidové. V průběhu výroby kompozitu rozlišujeme tři základní fáze matrice - pryskyřice. Tzv. „**A-stav**“, který představuje nevytvrzenou pryskyřici, tzv. „**B-stav**“ při kterém dochází k polymeraci pryskyřice (prepreg) a tzv. „**C-stav**“, což je konečná polymerizovaná matrice (kompozit). B-stav je přechodový stupeň polymerace mezi nevytvrzenou pryskyřicí a konečnou polymerizovanou matricí. Matrice v B-stavu je již částečně, ale velmi řídké zasíťována [39].

Při výrobě prepregu (Obr. 8) se daná disperze nasytí ponořením do tekuté pryskyřice. Během metody zvané horké tavení (Hot Melt) je tkanina impregnována pryskyřicí za pomoci tepla a tlaku. První etapa zahrnuje protahování tenkou vrstvou teplé pryskyřice a umístění papírového podkladu. Druhá etapa je nanášení výtzuže současně s pryskyřicí [60] a následný návin na jádro. Druhý způsob výroby prepregu je rozpouštědlový způsob tzv. Solvent Dip Process. Podstatou této metody je namáčení výtzuže ve formě tkaniny v lázni rozpuštěné pryskyřice a následné odpaření rozpouštědla.



Obr. 8. Výroba prepregu: úprava jednosměrného vlákna před impregnací a impregnace výztuže (Hot-melt systém, Výrobce Hunstman [60])

V České republice se v současné době prepregy nevyrábí, pouze zpracovávají. Hlavní světové společnosti, které se na výrobě prepregů podílejí:

- HEXCEL prepregy pro průmyslové aplikace,
- TenCate Advanced Composites (USA) výrobce kompozitů, které jsou široce používány v leteckém průmyslu,
- Prepreg-ACM CJSC (Moskva) vyrábí prepregy pro polymerní kompozity, které mají vysoce kvalitní minerální a uhlíková vlákna,
- SGL Group (Německo),
- Delta-Tech a Delta-Preg (Itálie),
- Axiom Materials (USA).

Všechny prepregové materiály musí být vytvrzovány za důkladně řízeného času, tlaku a teploty. Pro zajištění kvality, by pro každý vyrobený díl měly tyto hodnoty být důkladně archivovány [61]. Obvyklým postupem doporučeným od výrobce je zvýšený tlak, teplota 72-115 °C, výdrž na teplotě 1-12 hod a následně pozvolné ochlazení až na 48 °C .

2.5 Konvenční principy výroby

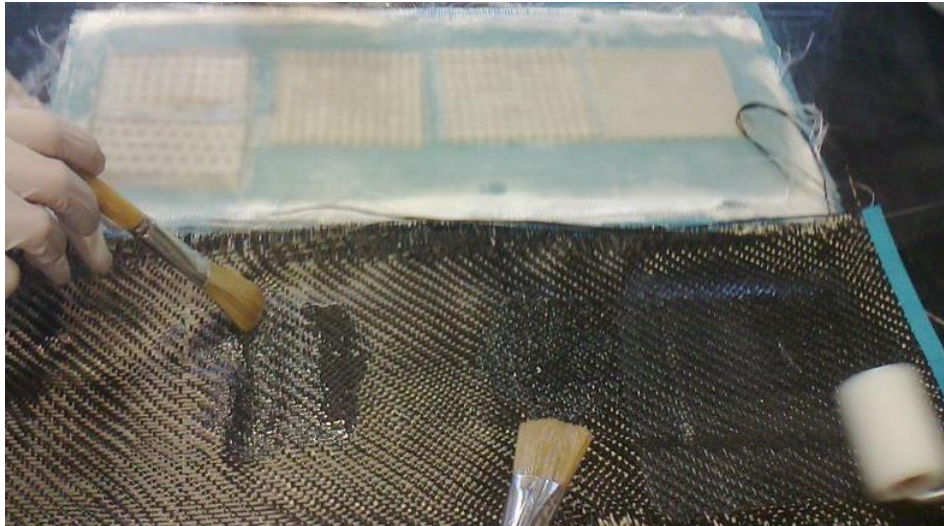
Technologie výroby kompozitních výrobků z uhlíkových vláken a polymerních pojiv je velmi široká. Výsledné vlastnosti kompozitních dílů jsou dány nejen vlastnostmi vláken a matrice, ale významný vliv má především rozmístění a orientace vláken. Přesto, že pouhé rozptýlení vláken v matrici by bylo výrobně nejjednodušší, u vláken dlouhých a uspořádaných je dosahováno výrazně lepších vlastností. Vlákna navíc nemusejí být pouze jednoho druhu např. uhlíková, pro dosažení optimálních vlastností jsou možné kombinace s vlákny skleněnými či aramidovými, kdy je možné docílit jak snížení ceny, tak současné zvýšení rázové pevnosti.

Mezi hlavními skupinami výroby kompozitů se rozlišují tzv. suché a mokré technologie.

- Pod pojmem mokré, je označována metoda kdy vlákna do dané polohy, např. do formy, kolem jádra atd. jsou umístěna suchá, ale následně jsou sycena pryskyřicí v tekutém stavu.

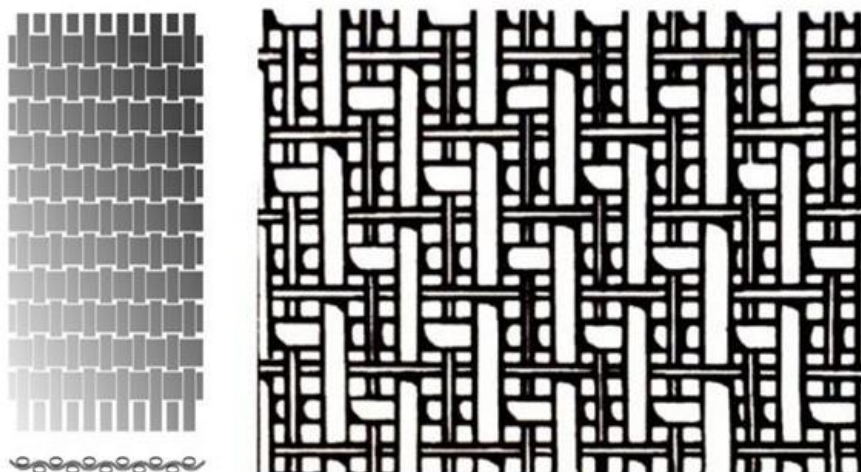
- Druhou metodou, na kterou je zaměřena představená práce je výroba za sucha, kdy daný díl vyrábíme již přímo z vláken pryskyřicí předsycených a není proto nutné dodatečné prosování.

Mezi přední metody výroby kompozitů z dlouhých vláken se řadí pultruze, lisování předimpregnovaných pásů, stále velmi častá ruční laminace, vakuové formování nebo navíjení.



Obr. 9 Ruční syčení skelných a uhlíkových tkanin na tvarové formě „negativu“

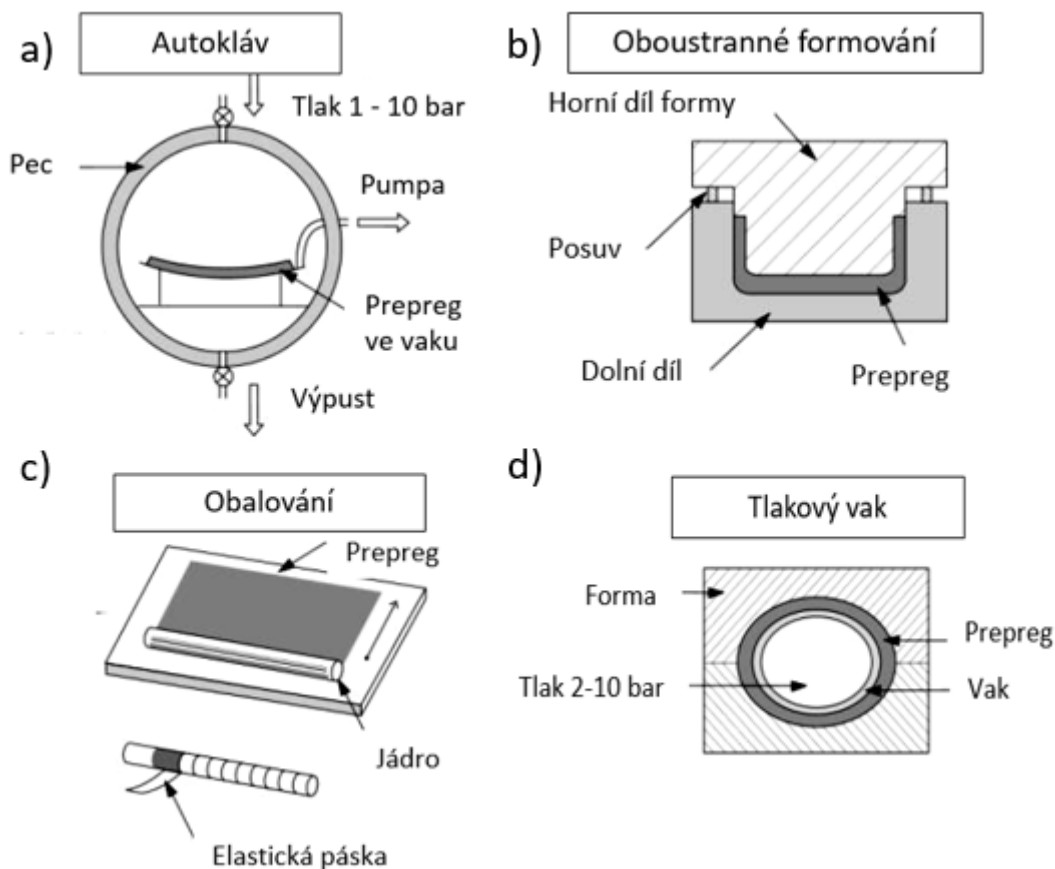
Formou nazýváme tvarový díl, kolem nebo na němž se nachází kompozitní materiál. Formy mohou být samec i samice. Pokud se materiál vkládá do formy, jedná se o formu samičku (Obr. 9). Pokud je materiál ovíjen kolem, jedná se o formu samce.



Obr. 10 Modely uspořádání vláken - plátnová vazba (vlevo) a tkanina s keprovou vazbou (vpravo)

Mají-li všechna vlákna stejný směr, označujeme vlákenný kompozit jako jednoosý - 1D. Potřebujeme-li zpevnit matici pro víceosé namáhání, užíváme planární, často tkané kompozity - 2D (Obr. 10).

Při použití předimpregnovaných materiálů, uvedených v kap. 2.4, odpadá nutnost dodatečné saturace již umístěných vláken pryskyřicí. Prepregy se po vytvarování na požadovaný tvar konečného výrobku ve většině případů vytvrzují ohřevem, pro epoxidové pryskyřice obvykle na teplotu 100 – 180 °C [56]. Lze je použít i v kombinaci s termoplastickou matricí, jejíž výroba je rychlejší, ovšem obtížnější neboť zpracování vyžaduje vyšší teploty a síly, což je způsobeno především vyšší tuhostí prepregu. Možná je i výroba na vstřikovacích lisech a další. Typické způsoby zpracování ukazuje Obr. 11.



Obr. 11 Konvenční metody výroby prepregových kompozitů (upraveno dle [41])

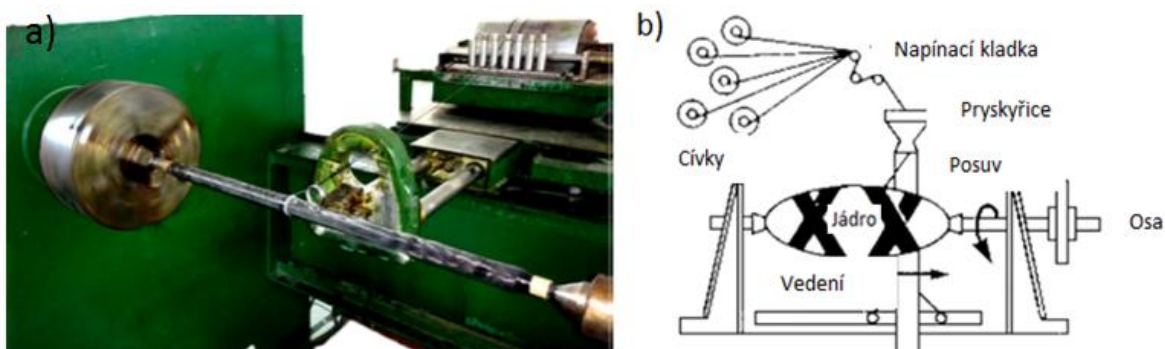
Základní skupiny běžně vyráběných dílů z prepregových polotovarů jsou:

- Konstrukční díly vyšší kvality – dopravní prostředky, větrná energie, letectví
- Tvrzení a lisování za tepla – sportovní náčiní
- Vytvrzování v peci – rybářské pruty, golfové hole, tyče
- Obalování – stožáry, stěžně

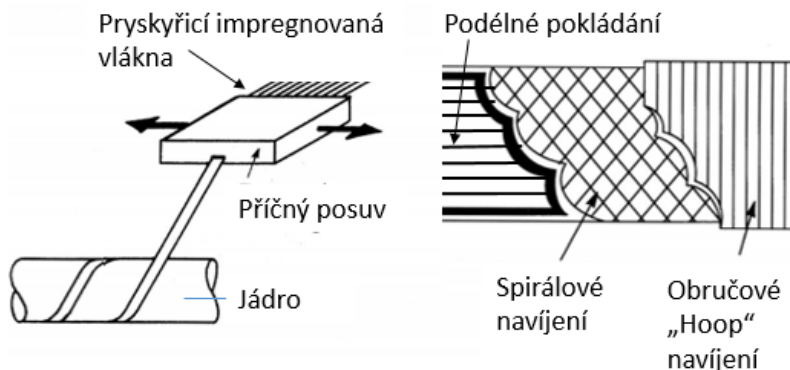
Finální vytvrzování prepregových kompozitů probíhá obvykle v autoklávech. Metoda autoklávu je vylepšenou technologií vakuového lisování, vytvrzování probíhá v uzavřené nádobě s definovaným tlakem a teplotou. Navrstvené nástřihy prepregu na formu bývají ještě před vložením do autoklávu zavakuovány. Tato technologie je dle [62] vhodná pro výrobu malých a středně velkých kusů a především pro menší či malosériovou produkci [63].

2.5.1 Metody tvorby dílů kruhových průřezů

Pro výrobu dlouhovlákněných kompozitů, současným pozicováním vláken z několika rovingů, existují tři hlavní směry způsobu výroby. Metodou první je ovíjení, kdy svazek vláken procházející ovíjecí hlavou umístěnou na naprogramované automatizované ruce je navíjen na nenosné rotující jádro, jak je zobrazeno na Obr. 12. Navíjení je výrobním procesem, jenž nabízí vysoký stupeň automatizace, schopnost tvorby kompozitů s vysokým objemovým podílem vláken (~70 %) a relativně vysokou procesní rychlostí [10]. Základními elementy tradičního navíjení jsou jádro, hlava, podélný suport a cívky. Během rotace jádra, jsou vlákna tažena z cívek a současně se celá hlava pohybuje paralelně s osou jádra. Vlákna lze kolem jádra navíjet ve spirálových, obvodových a polárních vzorech dle Obr. 13.



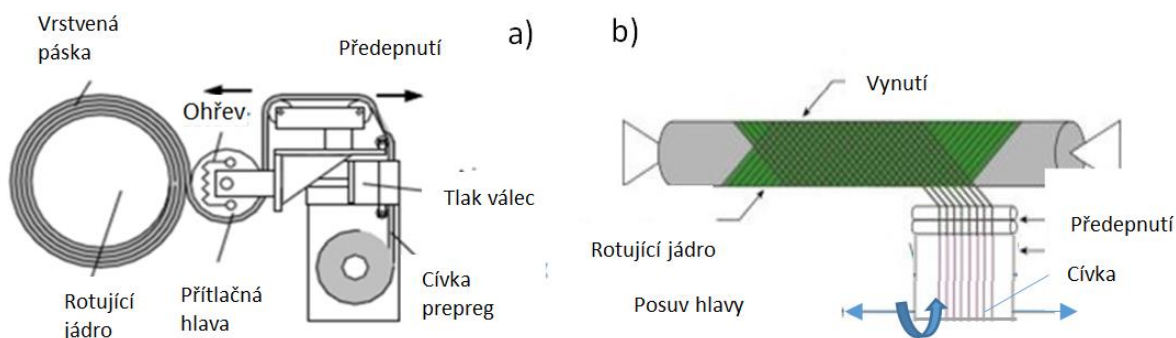
Obr. 12. Mokrě navíjení vlákněných rovingů a) Přímá tyč na upraveném soustruhu [64] b) Oválná nádoba [10]



Obr. 13 Způsob a základní možnosti ovíjení vlákně (upraveno dle [50])

Druhou možností je tzv. obalování, jímž je označováno vrstvení předimpregnovaných UD pásů či tkanin kolem jádra. Částečně konsolidovaná vlákna bývají vzhledem k zaručení optimálních a neměnných parametrů obvykle kupována od průmyslového dodavatele. Daná metoda (Obr. 14) je svým principem limitována pro výrobu rovných tyčí neměnných, obvykle kruhových průřezů.

Např. Tariq [64] se ve své práci zabýval studiem, výrobou a testováním tímto způsobem navinutých hřídelů. Jako hlavní problém u vyrobených dílů zmínil výraznou citlivost materiálových vlastností na často proměnlivé procesní veličiny výroby a nekonstantní klimatické podmínky, jenž způsobují nemalé změny mechanických parametrů. Je pravdou, že právě materiál jako např. prepreg je na dané výkyvy výrazně citlivý již ve fázi ukládání, ještě před samotným vytvrzováním.



Obr. 14. Navíjení předimpregnovaných vláken a) Obalování širokou tkaninou b) Šroubové ovíjení jednosměrnou páskou

Poslední ze skupiny těchto metod označuje tzv. Pultruzi, při které jsou suchá, kontinuální vlákna tažena skrze vanu s pryskyřicí a následně tvarovanou hlavou. Výchozí matricí je obvykle termosetová pryskyřice v kombinaci s plnivem, katalyzátorem či pigmenty [55][62]. Touto cestou jsou vyráběny především tyče definovaných průřezů. Z toho vyplývá již zmíněný problém současných metod, které jsou limitovány výrobou pouze přímých tyčí, jenž musí osu rotace lineární po celé délce. Využitím pultruze je sice možné s využitím radiální formy vyrobít i mírně zahnuté tyče, nicméně pro pokrytí všech současných konstrukčních potřeb, je pouze mírně zahnutá tyč konstantního průřezu nedostatečná.

2.5.2 Porovnání „Dry & Wet“ metod

Hlavní výhodou využití předimpregnovaných vláken namísto klasických filamentů je zjednodušení technologií jako následné sycení a vytvrzování ve formě. Nevýhodou je výrazně vyšší cena prepregovaných vláken a požadavek na vysoké, ideálně konstantní předepnutí vláken během výroby kompozitu a velká citlivost na technologické i klimatické parametry během výrobního procesu.

Tabulka 1 Porovnání výroby ze suchých a předimpregnovaných vláken

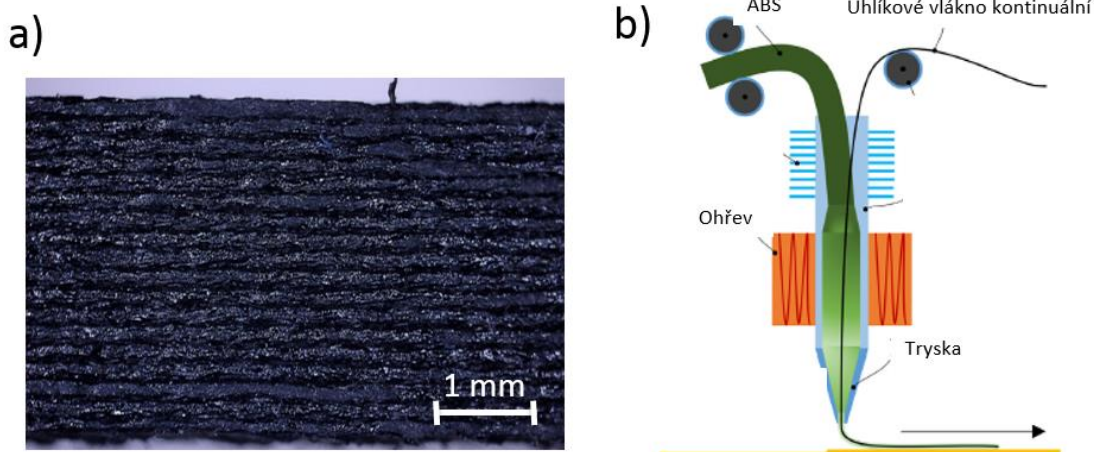
Suchá vlákna - "mokrý výroba"	Prepregy - "suchá výroba"
Pryskyřice - ruční řízení a kontrola složení	Pryskyřice - dodáno s procentuální přesností
Epoxid působí jako mazivo způsobující prokluzování vláken, možné výrazné změny od zamýšlené pozice	Lepkavost pomáhá předcházet prokluzování vláken a umožňuje vláknům zůstat v těsné blízkosti
Přebytečná pryskyřice musí být odstraněna a vyhozena	Téměř žádný odpad, dle statistik o 15% nižší spotřeba materiálů
Zdravotní rizika, nutná ochrana pracovníka. Nutná velmi dobrá ventilace	Pracovníci zdravější prostředí, méně stresu
Mnoho litrů vody použito jako kapalná rozpouštědla pro vyčištění	Možnost navynutí tlustších dílů, pryskyřice není vymačkávána
Technologicky obtížnější výrobní proces	Prokázán možný rychlejší výrobní takt, více efektivního času, méně příprav a čištění
Nižší pořizovací náklady surovin	Výrazně dražší základní materiál
Flexibilita kombinací vláken a pryskyřic	Prepregy standardně uhlíkové
Složité příprava pryskyřice a formy	Jednodušší tvarové formy méně citlivé na kvalitu povrchu

2.5.3 3D-tisk z vyztužených materiálů

Při výčtu metod používaných pro výrobu kompozitních dílů, je již v dnešní době neopomenutelným trendem, především pro výrobu prototypových dílů, využití „fused deposition modelling“ (FDM) nebo obecně jen 3D tisku. 3D tisk přitahuje zájem vědecké, výrobní a dokonce i veřejné komunity, díky svému potenciálu umožnit nízkonákladové, vysoce flexibilní, nízkoobjemové výrobní procesy [68]. Tento fenomén posledních dekád se rychle rozšiřuje, v dnešních dnech především v důsledku stále se snižujících nákladů na stroje a potřebné spotřební materiály. Největší nevýhodou však i nadále zůstává diametrálně nižší pevnost tištěných plastových částí, zejména ve směru kolmo k položeným vrstvám. Pevnost takto vytvořených dílů dosahuje pouze řádově nižších hodnot oproti procesům konvenčním, jako např. vstřikováním. Proto je v posledních letech nový trend zlepšit vlastnosti materiálu přidáním výztuže vláken.

V práci Mori [65] je možné číst o výrobě a testování pevnosti v tahu a ohybu tištěných ABS vzorků s výztuží z uhlíkových mikrovláken. Dále existuje nezpochybnitelná závislost mechanických vlastností na parametrech, jako je tloušťka vrstvy, orientace, šířka rastru a pórovitost. Přidáním nasekaného nanovlákná do ABS dochází ke zvýšení pevnosti o 20 %. Tuto pomyslnou sérii testů dokončil Spackman [66], jenž na základě provedených zkoušek deklaroval, že materiál se zarovnanými vlákny má značně vyšší modul pružnosti a maximální tahovou pevnost než je tomu u vláken orientovaných náhodně.

Skutečně zajímavý výzkum v této oblasti provedla Nanya Li [67], jenž studovala tisk nekonečných vláken současně s polymerem, vzájemně spojených až v tiskové hlavě (Obr. 15). Podle Mori [65] a Whitwama [68] má do budoucna tisk termoplastu vyztuženého vlákny potenciál nahradit základní hliníkové slitiny používané v průmyslových aplikacích.



Obr. 15. Tisk vyztuženého polymeru a) mikrostruktura ABS před-syceného mikrovláknem b) proces tisku s kontinuálním vláknem (upraveno dle [68])

2.6 Recyklace

Vzhledem k velkému množství dostupných vláken i materiálů matric, existuje současně i mnoho způsobů recyklace. Obecně rozlišujeme chemické a mechanické procesy. U mechanických se setkáme s drcením, broušením, vysušováním či extruzí. Takto vyrobené většinou prášky jsou

ovšem využívány především jako pomocné materiály pro stavbu forem, či jako mikro nebo nanočástice do dalších kompozitních dílů. Pokud bychom ovšem hledali aplikace plně využívající kompozitní recyklát, není vzhledem ke špatným výsledným mechanickým vlastnostem potenciál aplikací významnější než například pro pouhé zahradní lavice či plotové laťky.

Druhou možností je recyklace chemická, kde je ovšem zásadním problémem nákladnost, technologická složitost, nečistota daného procesu i velká spotřeba pomocných surovin. Poslední a nejefektivnější možností je energetické využití jako paliva. Při porovnání s ostatními fosilními palivy se výhřevnost rovná zhruba polovině výhřevnosti uhlí. Spalování, v literatuře poněkud ikonicky označované jako totální energetická recyklace, se především do budoucna s ohledem na zanedbatelné náklady, významnou objemovou redukcí, dostupné technologie filtrování splodin a žádný odpadní materiál jeví jako nejvýhodnější varianta.

2.7 Závěr kapitoly Kompozity v konstrukci

V dané kapitole byly představeny hlavní technologie a materiály, používané při výrobě kompozitních dílů. Technologií navrženou pro další testování a využití pro výrobu prototypových rámových dílů bude metoda navíjení. Materiálem zvoleným pro výrobu je prepreg výrobce Hexel - HEXPLY M10 38 %. Daný polotovár se sestává z vysoce pevných uhlíkových vláken s jednosměrnou orientací předem impregnovanou epoxidovou pryskyřicí. Uhlíková výztuž má jmenovitou plošnou hmotnost 150 g / cm^2 , jmenovitou hustotu vláken $180 \text{ [g m}^{-3}\text{]}$. Obsah použité epoxidové pryskyřice 38 %, s měrnou hmotností $242 \text{ [g m}^{-2}\text{]}$. Doporučený cyklus vytvrzování trvá 60 minut při $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Podle prvních provedených měření a dle Lepoittevína [69] odpovídá konečná tloušťka po polymeraci přibližně 85 % tloušťky původního polotovaru.

3 Základní materiál – předimpregnovaná vlákna

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole 2.1, kompozitem je nazýván materiál složený z více fází, jež bývají cíleným ovlivněním svých vlastností zaměřeny pro plnění specifických požadavků. V našem případě jednosměrného (UD) uhlíkového vlákna a polymerní matrice se jedná o kompozit prvního druhu, jež má disperzi z pevné fáze.

Mechanické vlastnosti

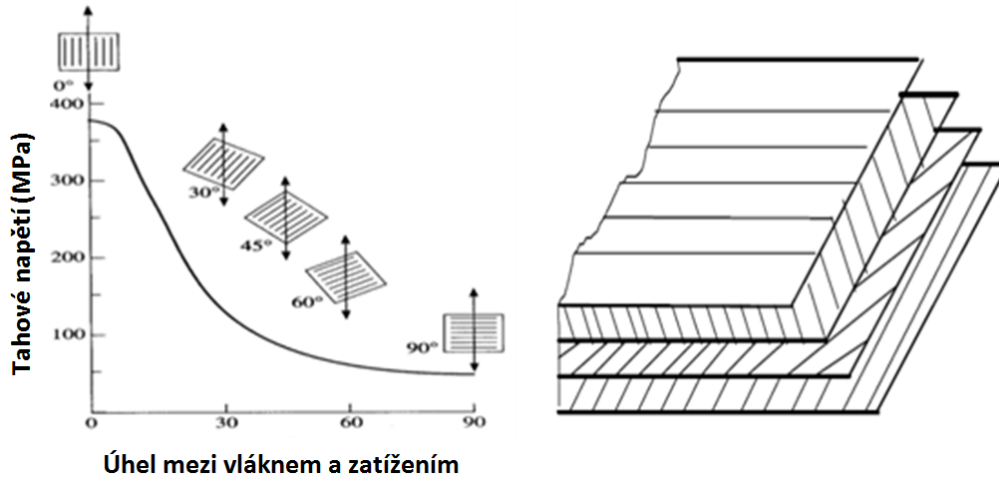
Jak plyne z charakteristik kompozitu, jsou vlákna schopna přenášet především axiální zatížení (*Obr. 16*) a z tohoto důvodu dostáváme výraznou orthotropii vlastností. Pro popis vztahů mezi deformacemi a napětím je nutné použít tenzorové vyjádření. Typickým příkladem anizotropie u kompozitních materiálů je izotropní materiál, který má vlastnosti různé podle směru třech vzájemně kolmých rovin. Jako zcela nejcharakterističtější pro kompozitní materiály je ovšem příčná izotropie, dosažená díky jednoosému uspořádání vláken s rovinou izotropie kolmou na směr vláken.

Maximální napětí neboli poměrná pevnost do přetržení vlákna je běžně nazývána pevností v tahu. Obecná definice napětí je vyjádřena vztahem (3.1). Pod pojmem napětí σ [Pa] rozumíme absolutní sílu F [N] přepočítanou na plochu průřezu vzorku S [m^2]. Z důvodu obtížně stanovitelného průřezu vláken, se absolutní síla F [N] přepočítává na jemnost vzorku T [tex] stanoveného dle (2.1), kdy dostáváme poměrnou pevnost vlákna f_p [N tex^{-1}] (3.2).

$$\sigma = \frac{F \text{ [N]}}{S \text{ [m}^2\text{]}} \text{ [Pa]} \quad (3.1)$$

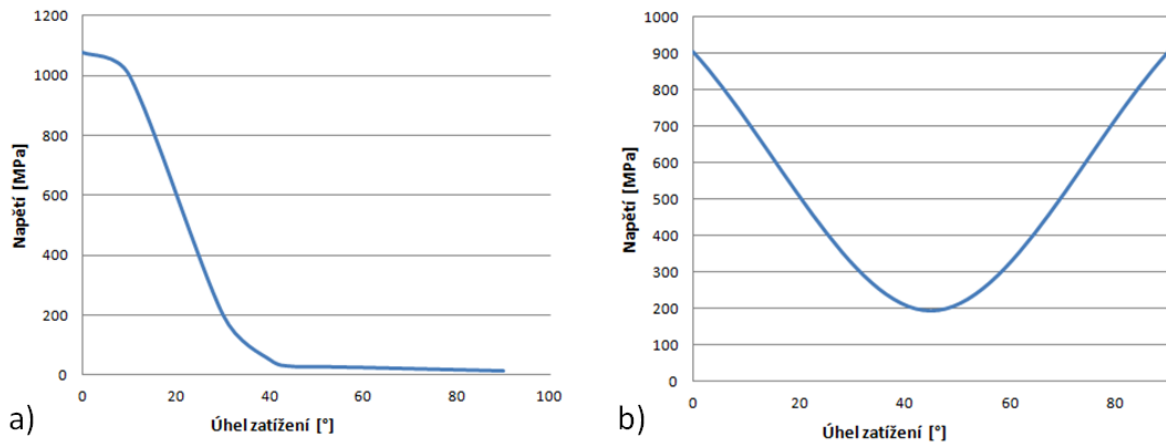
Při vyjádření napětí pro vláknenné textilie popisujeme relativní pevnost podle vztahu:

$$f = \frac{F \text{ [N]}}{T \text{ [tex]}} \text{ [N tex}^{-1}\text{]} \quad (3.2)$$



Obr. 16 Teoretický model ortotropních vlastností jednosměrného prepregového kompozitu a možnosti prokládání vrstev ([18][22])

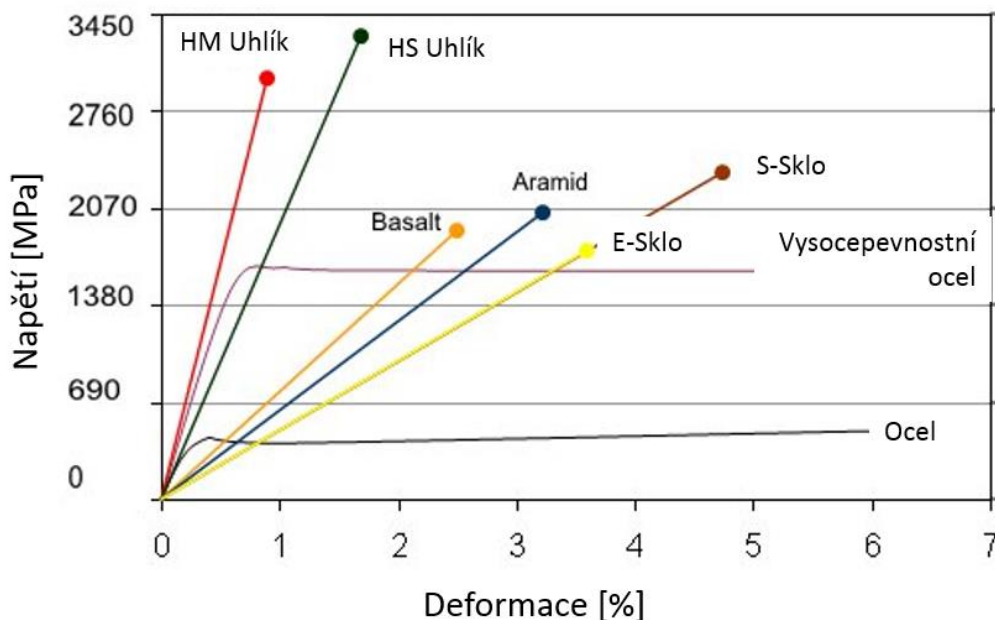
Na Obr. 17 níže, je porovnání jednoosého tahového zatížení pro dvouvrstvý prepregový laminát s uspořádáním vrstev [0,0] a [90,0], při proměnlivém úhlu zatížení v intervalu $\langle 0, 90^\circ \rangle$.



Obr. 17 Experimentální průběh pevnosti 1D uhlíkového kompozitu s vlákny: a) V jednom směru b) Vzájemně normálními, v závislosti na úhlu zatížení

3.1.1 Základní fyzikální parametry kompozitů

Vláknenná výztuž je nezbytnou součástí FRP materiálů. Právě vlákna přenáší síly ve finálních konstrukčních objektech. Tato vlákna musí mít výborné mechanické vlastnosti, ale zároveň musí být schopna čelit vnějším teplotním, chemickým a dalším vlivům, v čemž často svými vlastnostmi napomáhá i matrice. Na následujícím Obr. 18 jsou zobrazeny pevnostní charakteristiky nejčastěji se vyskytujících konstrukčních materiálů a vláken v FRP systémech.



Obr. 18 Maximální napětí pro jednotlivé konstrukční materiály (dle [70])

Pevnost v tahu

Youngův modul je možné určit dle Voigtova modelu. Tento model je ovšem omezen na elastickou část deformace. Pro možnost určení porušení kompozitu je ovšem nutné splňovat následující předpoklady. Těmi bude především předpoklad, že všechna vlákna mají stejný příčný průřez. Což by se u vláken ve filamentech dalo uvažovat. Dále stejnou mez pevnosti v tahu, což by taktéž při současných technologiích mělo být zaručeno, ovšem co není možné zaručit je rovnoměrnost distribuce vláken po průřezu a jejich stejnoměrné natažení.

Za předpokladu kdy deformace všech složek i celého kompozitu jsou stejné, je dle [18] možné rozlišit možné případy kdy:

- Vlákna i matrice se stejnou velikostí deformací při lomu: Málo častý případ. Představiteli této skupiny mohou být vysocepevná skelná vlákna a tuhé epoxidové pryskyřice, které obě praskají přibližně při 5% deformaci.
- Matrice tažnější než vlákna, v praxi nejčastější případ. Reprezentovat můžeme například kovovou maticí a uhlíkovými vlákny. Během již vzniklého porušení vláken, v matici stále dochází pouze k plastické deformaci. Při této kombinaci často může nastat situace, kdy vyšší objem vláken sníží výslednou tuhost.

- Vlákna tažnější než matrice: Zde je možné příkladem uvést beton vyztužený armaturou, případně cement s kovovými vlákny. Matrice se zde tedy logicky poruší jako první a napětí je dále neneseno vlákny.

Příčná mez pevnosti v tahu

Jak lze očekávat, mez pevnosti v tahu ve směru kolmém na směr vláken je mnohem menší než v podélném. Ovšem, je dokonce ještě menší než mez pevnosti samotné matrice, což je způsobeno lokální koncentrací napětí na rozhraní vláken matrice. Dále představené výpočtové modely vychází z předpokladu, že cílem práce je konstrukce rámových dílů z dlouhovláknenných kompozitů kdy uvažujeme, že žádné z vláken nekončí uvnitř kompozitu, ale prochází od začátku až do konce.

Hlavním rozdílem vláknenného kompozitu oproti samotnému lanu, či svazku je fakt, že vlákna jsou obklopena matricí. Žádaný synergický efekt tedy přichází v okamžiku, kdy vlákno v jednom místě praskne. Zatížení je nyní přeneseno z místa před porušením smykovými (adhezními) silami do matrice a za místem porušení vlákna opět zpátky. Tedy i porušené vlákno může dále přenášet dané zatížení. Výše zmíněná kritická délka vlákna je délka potřebná k upevnění vlákna v matrici, která zabezpečí přenesení maximální síly, tj pevnosti vlákna. Smykové napětí na rozhraní vlákno matrice je závislé na charakteru matrice, vlákna a za účelem zlepšení daných vlastností, se provádějí různé modifikace povrchu jako např. sizing, přidání částic.

Je-li matrice elastická, maximální smykové napětí je rovno napětí adheznímu τ_a , vznikajícímu na rozhraní matrice a vlákna o poloměru r . Kritická délka může být určena dle (3.3).

$$l_{kr} = \frac{\sigma_{fu}}{\tau_a} \cdot \frac{r}{2} \quad (3.3)$$

Je-li matrice plastická, pro kritickou délku l_{kr} dostáváme vztah téměř totožný (3.4) pouze τ_k bývá oproti adheznímu nižší.

$$l_{kr} = \frac{\sigma_{fu}}{\tau_k} \cdot \frac{r}{2} \quad (3.4)$$

Pro reálnou matrici uvažujeme nižší z těchto dvou hodnot. Je-li však matrice výrazně poddajnější, při protahování se kolem vlákna smrští a začne ho stlačovat.

3.2 Analytické výpočetní modely

Obecně jak se lze podrobněji dočíst např. v [18][22][36][40][77], je nutné rozlišit mezi tzv. multikomponentními systémy, jako jsou např. vláknenné svazky, či pletená lana a kompozity. Kompozitem se nazývá struktura, u níž dostáváme synergický efekt a neplatí zde "směšovací pravidlo" (ROM - Rule of mixtures). Vlastnosti kompozitu tedy nemohou být vypočteny jako pouhý součet součinů dílčích vlastností jednotlivých komponent ve směsi.

Objemový podíl disperze (v našem případě vláken) je definován jako:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (3.5)$$

kde V_f označuje objem vláken a V_c celkový objem kompozitu.

Zcela analogicky potom podíl matrice V_m je možné; vyjádřit jako:

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (3.6)$$

kde V_m je objem matrice.

Prostým součtem těchto podílů (3.5) a (3.6), se logicky musíme dostat na 1.

Matrice tedy vyplňuje prostor kolem vláken a přenáší vnější zatížení styčným povrchem vlákna. Adheze matrice a vláken podstatně ovlivňuje vlastnosti výsledného kompozitu. Nedokonalá adheze zpravidla vede k vytahování vláken a následnému lomu kompozitu.

Dle směšovacího pravidla [18], je možné odhadnout podélný modul pro jednosměrné prepregy na základě rovnice (3.7) kde E je Youngův modul odpovídající jednosměrnému quazi statickému napětí, v_i je objemový podíl a index L vyjadřuje podélný směr, m matrici a f značí vlákno.

$$E_L = E_f v_f + E_m v_m \quad (3.7)$$

Jelikož pro možnosti matematického popisu fyzikálních vlastností zmíněných materiálů je zapotřebí mnoho často neznámých parametrů, je nutné některé parametry vhodně verifikovat s analytickými modely. Danou problematikou se do hloubky zabývají specializované knihy či publikace [22], [36].

Výchozím bodem jsou ovšem fenomenologické modely založené na teorii Voigtga či Reusse. Dané principy jsou následně rozšířeny o korekční faktory [71], homogenizované modely např. Mori-Tanaka, či pružně elastický model Hashin. Jelikož je ovšem daná práce z oboru konstrukce, pro popis fundamentálního principu budou níže zmíněny pouze základní výchozí modely.

3.2.1 Podélný Voigtův model

V tomto případě, rozlišujeme směr rovnoběžný s podélnými vlákny označovaný jako L . Dále se jedná o dva směry k němu kolmé nazývané příčné a značeny T a S . Silové poměry ve vláknech i matrice mohou být určeny za následujících podmínek kdy: Vlákná dosahují celé délky kompozitu a jsou uspořádány v jednom směru a působí na ně tahové napětí. Zatěžovací síla působící ve směru vláken protáhne vlákna ε_f stejně jako matrici ε_m , tzn. uvažujeme jejich paralelní zapojení.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f + \varepsilon_m \quad (3.8)$$

a samotná výsledná síla v kompozitu síla P_c [N] je dle (3.9):

$$P_c = P_f + P_m \quad (3.9)$$

Při hlubším uvážení ovšem zjistíme, že stejná deformace obou složek není možná, neboť by nebylo v rovnováze napětí na rozhraní vlákna a matrice. Z toho důvodu se dle [18] tento model rozšíří o princip minimální elastické energie, spojené se skutečným rozdělením napětí v kompozitu.

Druhým problémem je, že Voigtovy předpoklady by byly platné pouze tehdy, pokud by Poissonovy konstanty vláken a matrice byli stejné. V opačném případě, by v kompozitu docházelo ke vzniku příčných napětí. Z toho důvodu se používá rovnice na bázi modulů pružnosti ve smyku vláken σ_i , a objemového zastoupení dané složky v_i , nevyžadující znalost Poissonovy konstanty (3.10).

$$\sigma_c = \sigma_m \times v_m + \sigma_f \times v_f \quad (3.10)$$

Jako důsledky tohoto modelu lze označit možnost vyjádření dílčích Youngových modulů z Hookova zákona ve vazbě na napětí a deformaci (3.11).

$$\frac{E_f}{E_m} = \frac{\sigma_f}{\sigma_m} \quad (3.11)$$

Existuje přímá úměra mezi napětím složek kompozitu a jejich tuhostí. Distribuce zatěžovací síly mezi vlákna a matici závisí na poměru Youngových modulů a objemovém podílu vláken (3.12). Obvykle používáme vlákna s mnohem vyšším Youngovým modulem, než je tomu u matrice a z toho důvodu vlákna nesou většinu zatížení.

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{\frac{E_f}{E_m}}{\frac{E_f}{E_m} + \frac{V_m}{V_f}} \quad (3.12)$$

3.2.2 Příčný Reussův model

Jako příčný, označujeme směr normálový na směr procházejících vláken. Na rozdíl od podélného modelu, zde se vlákna musí posuzovat jako soustava sériová.

Analýza při tomto druhu zatížení je velmi náročná už jenom vzhledem k neustálým změnám v poměru jednotlivých složek. Aby bylo možné tento fakt nějak řešit, idealizujeme model na pravidelné střídání vrstev disperze a matrice, dle Daďourka [18] tzv. hypotetický kompozit (3.13). Je ovšem nutné si uvědomit, že v tomto případě nemá disperze tvar vláken, ale desek.

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_f t_f}{t_c} + \frac{\varepsilon_m t_m}{t_c} \quad (3.13)$$

Kde t_c je celková tloušťka kompozitu, t_f je tloušťka vláken a tloušťka matrice t_m . Zcela analogické značení, je použito pro relativní prodloužení v příčném směru.

Při sériovém zapojení, kde platí klasická reologická teorie jako například u pružin, je možné použít vztah rovnosti sil P_i [N] viz. (3.14).

$$P_c = P_f = P_m \quad (3.14)$$

Kdy je současně vzhledem k rovnosti příčných průřezů možné stanovit vztahy napětí (3.15).

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (3.15)$$

V porovnání s podélným Youngovým modulem, je příčný výrazně nižší.

3.3 Přenos napětí

Základní princip efektivity kompozitu, či obecně lehčích materiálů je dle odborných knih či publikací např. [22][36][75][76] možné stanovit, pokud vycházíme z Hookova zákona (3.16) kdy:

$$E \varepsilon = \sigma \rightarrow \Delta l = \frac{F l}{E S} \quad (3.16)$$

Kde l je délka idealizované tyče a E Younguv modul pro daný materiál.

Následně stačí stanovit závislost hmotnosti tyče (3.17):

$$m = \rho S l \quad (3.17)$$

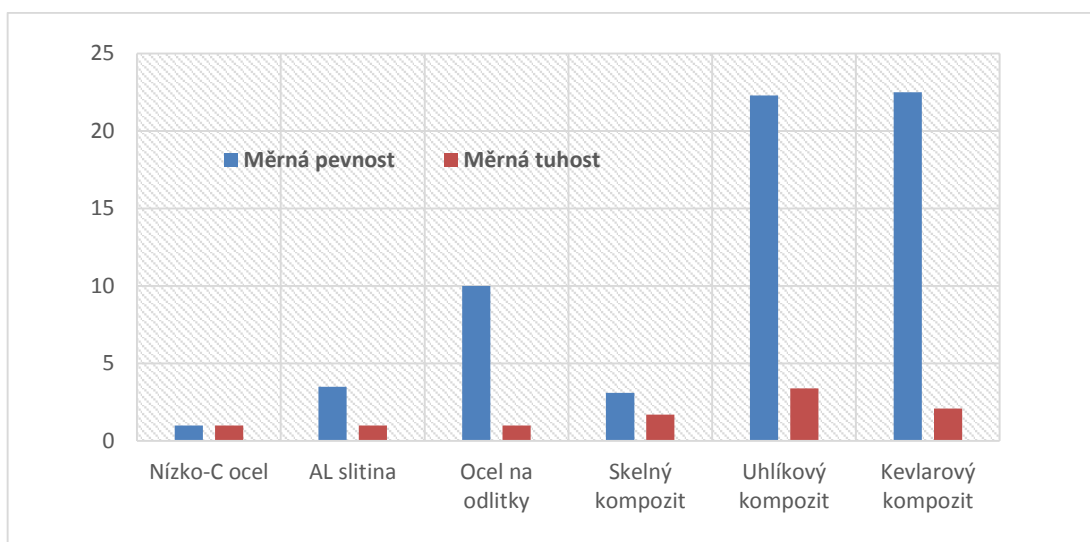
Kde zapojíme proměnnou ρ – hustotu.

Dostáváme dvě nové proměnné měrný modul E^* a měrnou pevnost σ^*

$$E^* = \frac{E}{\rho} \quad (3.18)$$

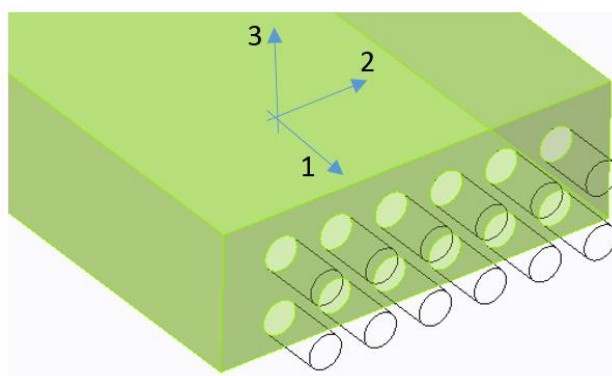
$$\sigma^* = \frac{Rm}{\rho} \quad (3.19)$$

Z čehož vyplyne závislost na hustotě. Zatímco samotná pevnost materiálů může být stejná či podobná při uvážení měrné hodnoty, již získáváme výrazné rozdíly [76]. Při zavedení pomyslného poměru u nízko uhlíkové oceli rovnému 1, je na grafu (Obr. 19) níže možné vidět trend závislosti měrné pevnosti a tuhosti.



Obr. 19 Porovnání měrné pevnosti a tuhosti konstrukčních materiálů

Pro další vztahy bude používána indexace $E_{\parallel\varepsilon_{\parallel}}$ vyjadřující směr rovnoběžný ke směru vláken a příčný $E_{\perp\varepsilon_{\perp}}$. Daná symbolika se obvykle mírně odlišuje z materiálového a mechanického hlediska. Nicméně, jasná analogie smyslu značení materiálových os je na Obr. 20 níže. Symbolika 123 bývá například v metodě konečných prvků zcela analogicky zaměněna za XYZ.



Obr. 20 Jednosměrně vyztužený kompozit – souřadný systém

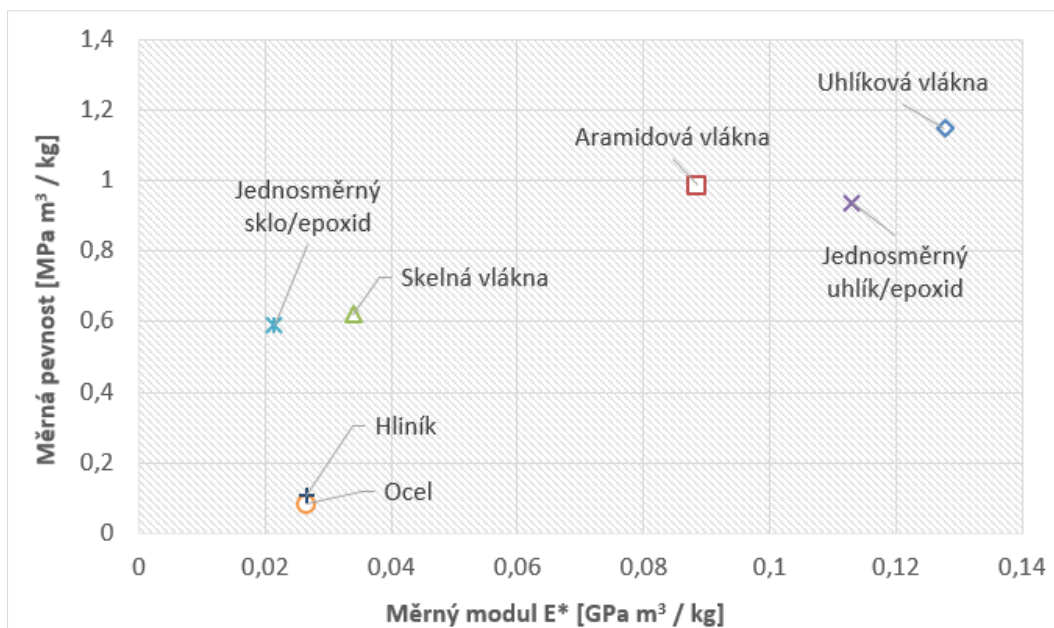
Měrná pevnost a tuhost ovšem není jediné měřítko efektivity materiálu. Mezi dalšími důkazy je možné uvážit vzpěr, kdy dle klasické Eulerovy formulace zavádíme novou sílu F_{kr} , což je limitní síla při vzpěru [36][72].

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.20)$$

Při uvážení kruhového průřezu dostaneme závislost hmotnosti:

$$m = \frac{2L^2 \sqrt{F_{kr}}}{\sqrt{\pi}} \frac{\rho}{E^{1/2}} \quad (3.21)$$

Zde logicky vyvstává závislost hustoty a modulu pružnosti. Při vynesení měrné pevnosti a měrného modulu pružnosti do grafické podoby, obdržíme pro základní přehled vypovídající graf (Obr. 21).



Obr. 21 Měrné pevnostní parametry běžných materiálů

Síla, kterou při zatížení přenáší celý kompozit, je dle (3.9) ekvivalentní součtu jednotlivých složek síly ve vláknech F_f a síly přenášené matricí F_m či analogicky (3.26):

$$\sigma_{\parallel} S = \sigma_f S_f + \sigma_m S_m \quad (3.22)$$

Současně také, prodloužení vláken i matrice musí být stejná:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (3.23)$$

Z čehož, po dosazení do Hookova zákona:

$$E_{\parallel} \varepsilon_{\parallel} S = (E_f S_f + E_m S_m) \varepsilon_{\parallel} \quad (3.24)$$

Na základě tohoto předpokladu jak již bylo zmíněno v kapitole výpočtových modelů dle Voiga a Reusse celkovou pevnost kompozitu určují především vlákna, jejichž mechanické vlastnosti jsou výrazně vyšší než matrice (viz. kap. 1, Obr. 2) [73].

Výsledná pravidla pro odhad modulu pružnosti směsi dostáváme po dosazení poměrných objemových obsahů φ_i .

$$E_{\parallel} = \varphi_f E_f + \varphi_m E_m \approx \varphi_f E_f \quad (3.25)$$

Tabulka 3.1 Mechanické parametry vláken, kompozitů a konvenčních kovových materiálů

	E (GPa)	σ (Mpa)	E^* (Gpa m ³ / kg)	σ^* (MPa m ³ / kg)
Uhlíková vlákna	230	2067	0,1278	1,148
Aramidová vlákna	124	1379	0,08857	0,985
Skelná vlákna	85	1550	0,034	0,62
Jednosměrný uhlík/epoxid	181	1500	0,1131	0,9377
Jednosměrný sklo/epoxid	38,6	1062	0,02144	0,59
Ocel	206,84	648,1	0,02652	0,08309
Hliník	68,9	275,8	0,02652	0,1061

3.4 Makromechanické vlastnosti

Efektivní návrh a konstrukce kompozitních dílů, jsou v dnešní době založeny především na znalosti rozložení napětí a deformací v laminátu. Tyto hodnoty jsou bezpodmínečně nutné pro výpočtové modely, optimalizační algoritmy či teorie porušení. Vzhledem k tomu, že není možné uvážit všechny drobné odchylky v materiálu jako rozptýl průměru vláken, nedokonalou saturaci či póry, se pro výpočty uvažuje materiál jako ideálně homogenní, nikoliv ovšem izotropní. Tuhost ve směru vláken je, jak již bylo zmíněno, řádově větší než ve směru na vlákna kolmém. Na základě toho, je logicky nutné materiál popsat více parametry než jen izotropní materiál, kdy postačuje hustota, pevnost a základní inženýrské konstanty.

Stress – složka napětí ve směru vláken je označena jako normálové napětí, složka ve směru kolmém na jejich směr potom jako smykové, obvykle u dlouhvláknenných kompozitů rovné pro oba směry tzn. σ_{xy} i σ_{xz} .

Strain – jedná se vlastně o popis vnitřních deformací tělesa, způsobených externími silami. Hledání napětí v tělese, tedy především závisí na nalezení jeho přesných deformací, neboť pro napětí existují 3 rovnice rovnováhy – jedna pro každý směr.

Modul pružnosti – pro elastické těleso jsou napětí a deformace v daném bodě provázány skrze Hookův zákon. Z 15 neznámých parametrů je 6 napětí, 6 deformací a 3 posuny.

Je-li jednoose zatěžována krychle z anizotropního materiálu, zatížení způsobí změny jak v délkách tak jejich úhlech. V ortotropních materiálech však existují tři vzájemně kolmé osy, zvané osy souměrnosti, podél nichž se jednotlivé vlastnosti skokově liší. Ve starší literatuře je možné nalézt označení přirozené osy materiálu [74]. Pro UD kompozity jsou tyto rovnoběžné a kolmé ke směru vláknenné výztuže. Při základních výpočtech kompozitů uvažujeme pouze malé deformace a chování tzv. lineárně elastického materiálu.

Stav napětí pozorovaného tělesa v libovolném bodě je možné obecně popsat 9 složkami tenzoru napětí σ_{ij} se sdruženým tenzorem deformace ε_{ij} . Takto je tedy možné zapsat obecný lineární vztah hookeova zákona, kdy složky tenzoru čtvrtého řádu E_{ijkl} se nazývají moduly pružnosti.

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{ij} \quad (3.26)$$

Na základě vztahů z Hookova zákona plyne, že každá složka tenzoru napětí je dána devíti složkami tenzoru deformace. Toto by znamenalo, že tenzor E_{ijkl} by obsahoval 81 modulů pružnosti. Díky pravidlům symetrie se ovšem dle [22][36] počet jeho složek pro anizotropní materiály bez os souměrnosti sníží.

První snížení je možné na základě souměrnosti tenzoru deformace čímž nastane redukce na 54 složek. Druhé snížení je možné docílit analogicky na základě symetrie tenzoru napětí, díky čemuž je počet opět zredukován na 36. Poslední snížení je dle [74][77] založeno na termodynamické úvaze o hustotě elastické energie U v závislosti na deformaci ε_{ij} . Poté:

$$\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij} \quad (3.27)$$

kdy po dosazení členů dle základního tvaru Hookova zákona a parciální derivaci dostáváme:

$$\frac{U}{\partial \varepsilon_{kl}} \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} \right) = E_{ijkl} \quad (3.28)$$

dle [36] [74][75][80], je možné z tohoto tvaru provést záměnu indexů, čímž vznikne (3.29) a jelikož při parciální derivaci nezáleží na pořadí, jsou si oba prvky rovny, což povede k redukci nezávislých modulů na výsledných 21.

$$\frac{U}{\partial \varepsilon_{ij}} \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{kl}} \right) = E_{klij} \quad (3.29)$$

Jelikož dle [74][76] není z žádného pohledu nutné využívat i nadále čtyř indexovou symboliku, je pro ortotropní materiál jakým dané UD vrstvy jsou možné použít výhodnější zápis HZ ve tvaru Q_{ij} prezentuje matici tuhosti obsahující 9 nezávislých složek. Nadchází tedy aplikace Hookova zákona pro obecný typ materiálu v pravoúhlém souřadném kartézském koordinačním systému pro tzv. tuhostní matici (matice 6x6 s konstantami C). V literatuře je možné pro C_{ij} najít název matice tuhosti (3.30), či elastické moduly, pro S_{ij} potom elastické konstanty či matice poddajnosti (3.31). Směry 1 a 2 jsou pevně dány koincidencí se směrem základních os materiálu, což případě UD vláknenné výtuzě samotný směr vláken.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Inverzí matice tuhosti pro obecný anizotropní materiál vznikne tzv. matice poddajnosti.

$$\alpha = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (3.33)$$

Na základě výše uvedených bodů mohou být deformace ve směru tloušťky ε_z zanedbány, čímž je redukován počet složek deformace laminátu na ε_x , ε_y a γ_{xy} .

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (3.34)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (3.35)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} - \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (3.36)$$

Na základě toho, je možné vztahy mezi deformacemi a složkami posuvu přepsat pomocí deformací ve střední ploše a její křivosti [74][75].

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

kde první člen vyjadřuje deformace střední roviny:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

a druhý člen křivost střední roviny:

$$\begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

Ve vrstveném kompozitu pracujeme se systémem ekvivalentních sil a momentů působících v příčném průřezu. Výsledné síly N_x , N_y a N_{xy} je možné získat integrací skrze tloušťku h na intervalu $\langle -h/2; h/2 \rangle$. Obdobně i výsledné momenty M_x , M_y a M_{xy} jsou integrací součinu složky napětí a ramene síly od středové roviny.

Aplikací klasické laminátové teorii možné určit jaké budou síly pro jednotkové zatížení v deformaci (idea že v případě dokonalé laminace je deformace po vrstvách stejná). Avšak napětí je různé a navíc po vrstvách nespojité. Dále je nutné určit posouvající síly a momenty na průřezu a výsledkem je, že je to vlastně prostý součet dílčích matic tuhosti škálovaný průřezovou charakteristikou každé vrstvy. Jelikož kompozit je složený z n ortotropních vrstev, je možné síly a momenty ve 2D průřezu střední plochy získat jako součet příspěvků od dílčích vrstev (3.40), jak lze v detailním odvození po dílčích částech nalézt v [22][36] a [71]-[76].

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} d_z \right] \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z d_z \right] \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z d_z \right] \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 d_z \right] \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}$$

S využitím 3 nově definovaných matic ABD, lze vztah přepsat do podoby (3.41):

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} d_z \right] \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z d_z \right] \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z d_z \right] \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 d_z \right] \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}$$

Kdy A je matice tahové tuhosti:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{C}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (3.42)$$

Matice B je matice vazebné tuhosti:

$$B_{ij} = 1/2 \sum_{k=1}^n (\bar{C}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (3.43)$$

A matice D je maticí ohybové tuhosti:

$$D_{ij} = 1/3 \sum_{k=1}^n (\bar{C}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (3.44)$$

3.4.1 Tlustostěnný laminát

V klasické aplikaci Hookova zákona v obecném tvaru, pro vrstvený materiál v Kartézském souřadném systému získáváme tedy matici ABD, jak již bylo zmíněno výše. Tato matice tedy prezentuje obecný materiálový bod. Při výpočtu pomocí moderních systémů, ovšem standardně počítáme jako laminovanou desku a z toho důvodu je možné dodatečně zavést matici H (3.48), jenž k dané matici ABD přidá ještě dva diagonální prvky G_{23} a G_{31} . Tím je možné uvažovat i příčnou deformaci po tloušťce desky. Pokud tedy deska není dostatečně tenká nebo je výrazně ohýbaná, mohou se do celkové tuhosti projevit stříhové účinky na průřezu (v klasické teorii se s nimi nepočítá). Její výpočet vychází z klasické teorie laminátu a také je nutné stanovit korekční faktor závislý na reálných rozměrech a velikosti mechanických veličin. Podobný princip je možné nalézt například u teorie křivých prutů při zavádění smykových účinků na tlustostěnný průřez prutu, či Midlinově teorii tlustostěnné desky. Při uvážení této formulace, získáváme formulaci soustavy matic ABDH s velikostí 8x8. Vzniká kinematický vztah pro desku (například Riesner-midlin [75][76][77]) ve Voigtově notaci pro kompatibilitu s inženýrským zápisem matice tuhosti. Výsledná deformace se skládá z protažení a natočení-tak jak je známo například z Euler-Bernoulliho nosníku. Dále je možné určit dílčí matice tuhosti (3x3) a orientaci vláken pro transformaci T [76]. I když výsledná matice dosahuje rozměru 8x8, transformuje se pouze po dílčích maticích 3x3. Je ovšem nutné si uvědomit, že řešené matice (8x8) a (6x6) váží různé veličiny. Matice poddajnosti C (6x6) popisuje materiálový bod a Matice tuhosti L (8x8) je pro tlustostěnnou desku. Dle Šejnohy [75] váže matice 8x8 výslednice napětí a zobecněná přetvoření. Jedná se o analogii prutu, kde normálová síla, momenty a posouvající síla jsou také integrované výslednice napětí přes plochu.

Obecně mohou být teorie laminovaných desek rozděleny do následujících šesti kategorií: klasické teorie laminace; teorie smykové deformace prvního řádu; vyšší teorie smykové deformace; teorie po vrstvách; globální-lokální teorie desek vyšších řádů; a teorii 3D elasticity založená na principech kontinua.

Podle Wanga [84] ovšem přístup dle Reissnera [77] či Midlina [78], klasická teorie laminátu ani smykové deformace desek prvního řádu, neumí dostatečně přesně popsat příčné napětí především na rozhraních jednotlivých vrstev. V inženýrské praxi jsou dle Levinsona [79], Aydogdua [80] a Touratiera [81] hodně používány vyšší teorie smykových deformací (Plate shear stress accounting theory, Kirchhof-Love). Jelikož dané principy neumí plně zohlednit smykové napětí, jsou často dané teorie nedostatečné pro specifické aplikace na pokročilých strukturách. Dalším bodem je teorie The layerwise theory [82] (patrně není český ekvivalent překladu). Daný model je schopen získat přesné výsledky posunutí a namáhání a je platný pro všechny druhy inženýrských konstrukcí od desek až po dvojité zakřivené skořepiny.

Poslední zmíněná je 3D teorie elasticity založené na kontinuu navržená dle Wanga [84]. V současné době je tedy stále požadavek na vznik nových, sofistikovanějších modifikací teorií výpočtu na kompozitních desek. Například Nedri a kol. [83] představili upravenou hyperbolickou smykovou teorii deformací založenou na předpokladu, že příčné posuny se skládají z ohybových a smykových komponent, kde ohybové síly nepřispívají ke smykovým silám a podobně, smykové součásti nepřispívají k ohybovým momentům. Tato teorie může poskytnout přesné výsledky především pro dynamické analýzy. Obvyklá nomenklatura obvykle použitá ve všech teoriích uvažuje rovinu X-Y shodnou se střední rovinou vrstvené desky a osa Z je souřadnicí tloušťky desky.

Základní schema teorií vrstvených kompozitních desek, kde je předpoklad konstantní deformace napříč celou tloušťkou desky může být dle [81] vyjádřena jako příčná smykové funkce $f(z)$:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} + f(z) \left[k_x(x, y) + \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \right] \quad (3.45)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} + f(z) \left[k_x(x, y) + \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \right]$$

$$u(x, y, z) = w(x, y)$$

Třetí člen v této rovnici prezentuje smykové deformace vznikající příčně ve směru tloušťky vrstveného materiálu. S tímto předpokladem pracují i některé FE nástroje, rozšířením tvaru základní matice a další smykové členy, jak bylo zmíněno výše. Otázkou s přihlédnutím k literatuře [73]-[84] ovšem zůstává, zda je vlastně v případě tlusté stěny správně stále počítat metodou určenou pro skořepiny a zda již nevyužít teorii jinou např. pro solidy. Názory na dané téma se ovšem liší a patrně není možné stanovit jasnou odpověď, případně geometrickou charakteristiku, kdy už by se striktně musela použít jedna či druhá metoda.

Jak bylo zjištěno, pokročilé komerčně dostupné konečně prvkové výpočtové aplikace stříhový příspěvek pravděpodobně zahrnují často automaticky [85][86]. Danými důvody by mohlo být jednoduše:

- důvod praktický - průměrný uživatel se nemusí věnovat studiu pokročilé teorie
- Shear-locking u lineárních prvků (tj. parazitní stříhová energie, která se navenek projevuje umělým navýšením tuhosti řešeného modelu), modely a výpočty jsou proto vždy lehce naddimenzované, což je stav obecně příznivější než při poddimenzování.

Z toho důvodu, tedy výsledný zápis HZ dle (3.16) dostáváme ve tvaru (3.46):

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} = [C] \begin{Bmatrix} \{\varepsilon\} \\ \{\kappa\} \\ \{\gamma\} \end{Bmatrix} \quad (3.46)$$

Kde člen navíc $\{\gamma\}$ reprezentuje již zmíněné příčné deformace, které ve standardní teorii tenkých desek nejsou uvažovány.

$$\begin{Bmatrix} \{\varepsilon\} \\ \{\kappa\} \\ \{\gamma\} \end{Bmatrix} = [S] \begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (3.47)$$

$$C = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [0] \\ [B] & [D] & [0] \\ [0] & [0] & [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

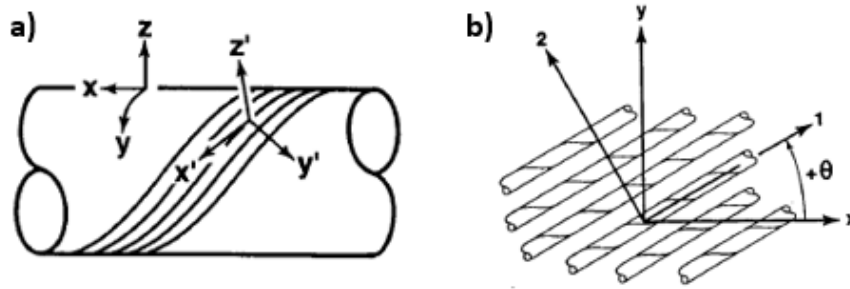
3.5 Transformace napětí

Vztahy pro napětí a deformace v předchozí kapitole jsou definovány pro souřadný systém, který je obvykle totožný s přirozeným systémem součásti. V případě válcové skořepiny Obr. 22, je přirozený souřadný systém x, y, z zatímco souřadný systém materiálu je x', y', z' . Navíjecí úhel θ je definován jako (3.49) a

(3.50)

$$\cos(y', y) = \cos \alpha \quad (3.49)$$

$$z' = z \quad (3.50)$$



Obr. 22 Transformace souřadných systémů o navíjecí úhel (mechanika)

Jelikož výsledná synergie kompozitu je založena především na kombinaci vlastností jednotlivých vrstev, je nutné uvážit i jejich jednotlivá natočení kolem středové osy – obecnému souřadnému systému. Poté je možné zapsat vztah transformace jednotlivých vrstev X a Y pod úhlem θ vůči materiálovým osám L a T globálního souřadného systému [74][76].

$$\begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \left(\frac{1}{2}\right)\gamma_{LT} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \left(\frac{1}{2}\right)\gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.52)$$

Transformační matice mezi danými souřadnými systémy je následně dána maticí T:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2 \sin\theta \cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2 \sin\theta \cos\theta \\ -\sin\theta \cos\theta & \sin\theta \cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad (3.53)$$

či jejím inverzím tvarem pro přepočít:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{pmatrix} \quad (3.54)$$

Kdy tvar inverzní transformační matice:

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2 \sin\theta \cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2 \sin\theta \cos\theta \\ \sin\theta \cos\theta & -\sin\theta \cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad (3.55)$$

Transformační rovnice napětí mezi systémy XY a 12 bude tedy dána dle (3.56) :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2 \sin\theta \cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2 \sin\theta \cos\theta \\ \sin\theta \cos\theta & -\sin\theta \cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Stejně tak při aplikaci transformace na deformaci obdržíme (3.57). Zde je možné vidět při použití tenzoru definovaném pomocí smykového napětí (ekvivalent poloviny inženýrského smyku), existuje pro napětí i deformaci stejná transformační matice.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2 \sin\theta \cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2 \sin\theta \cos\theta \\ \sin\theta \cos\theta & -\sin\theta \cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Posledím bodem, vzhledem k tomu že laminát má různé úhly, je nutné dílčí matice transformovat. Transformují se ovšem po jednotlivých maticích 3x3 a matice 2x2 transformovat netřeba, neboť vlastnosti příčného průřezu se nemění. Při aplikaci daného přístupu pro daný UD materiál vrstvený pod různými úhly, získáme pro každou vrstvu výsledné tuhostní koeficienty:

$$\bar{C}_{11} = \cos^4\theta C_{11} + 2\cos\theta^2\sin\theta^2(C_{12} + 2C_{66}) + \sin^4\theta C_{22} \quad (3.58)$$

$$\bar{C}_{12} = \cos\theta^2\sin\theta^2(C_{11} + C_{22} - 4C_{66}) + (\sin\theta^4 + \cos\theta^4)C_{12}$$

$$\bar{C}_{13} = \cos\theta^2 C_{13} + \sin\theta^2 C_{23}$$

$$\bar{C}_{16} = \cos\theta \sin\theta [\cos\theta^2(C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) + \sin\theta^2(C_{12} - C_{22} + 2C_{66})]$$

$$\bar{C}_{22} = \sin^4\theta C_{11} + 2\cos\theta^2\sin\theta^2(C_{12} + 2C_{66}) + \cos\theta^4 C_{22}$$

$$\bar{C}_{23} = \sin\theta^2 C_{13} + \cos\theta^2 C_{23}$$

$$\bar{C}_{26} = \cos\theta \sin\theta [\sin\theta^2(C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) + \cos\theta^2(C_{12} - C_{22} + 2C_{66})]$$

$$\bar{C}_{33} = C_{33}$$

$$\bar{C}_{36} = \sin\theta \cos\theta (C_{13} - C_{23})$$

$$\bar{C}_{44} = \cos\theta^2 C_{44} + \sin\theta^2 C_{55}$$

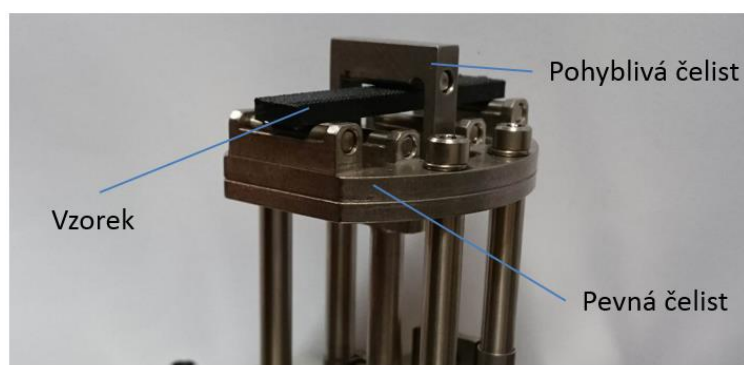
$$\bar{C}_{45} = \sin\theta \cos\theta (C_{55} - C_{44})$$

$$\bar{C}_{55} = \sin\theta^2 C_{44} + \cos\theta^2 C_{55}$$

$$\bar{C}_{66} = \cos\theta^2\sin\theta^2(C_{11} - 2C_{12} + C_{22}) + (\sin\theta^2 - \cos\theta^2)^2 C_{66}$$

3.6 Základní test mechanických parametrů

Jako základní experimentální metoda vhodná pro rychlé avšak komplexní a přesné popsání základních statických, ale i dynamických charakteristik daného materiálu, je tříbodý test [89] v provedení na Dynamicko Mechanickém Analyzátoru (DMA) [39], zobrazeném na Obr. 23. Podstatou testu je pro vrstvené ploché vzorky obdélníkového tvaru v autoklávu lisované ze zvoleného prepregového materiálu stanovit modul pružnosti a jeho závislost na frekvenci zatěžování tzv. fundamentální a ztrátový modul. Tyto hodnoty obecně nevyovídají tolik např. o pevnosti materiálu, ale na jejich základě je možné velmi precizně popsat a predikovat trendy chování budoucího dílu v reálných podmínkách. Nevýhodou s ohledem na navíjené kompozity je, že daná metoda není aplikovatelná právě v případě vyráběných kruhových či oválných trubek, ale pouze pro ploché hranoly.

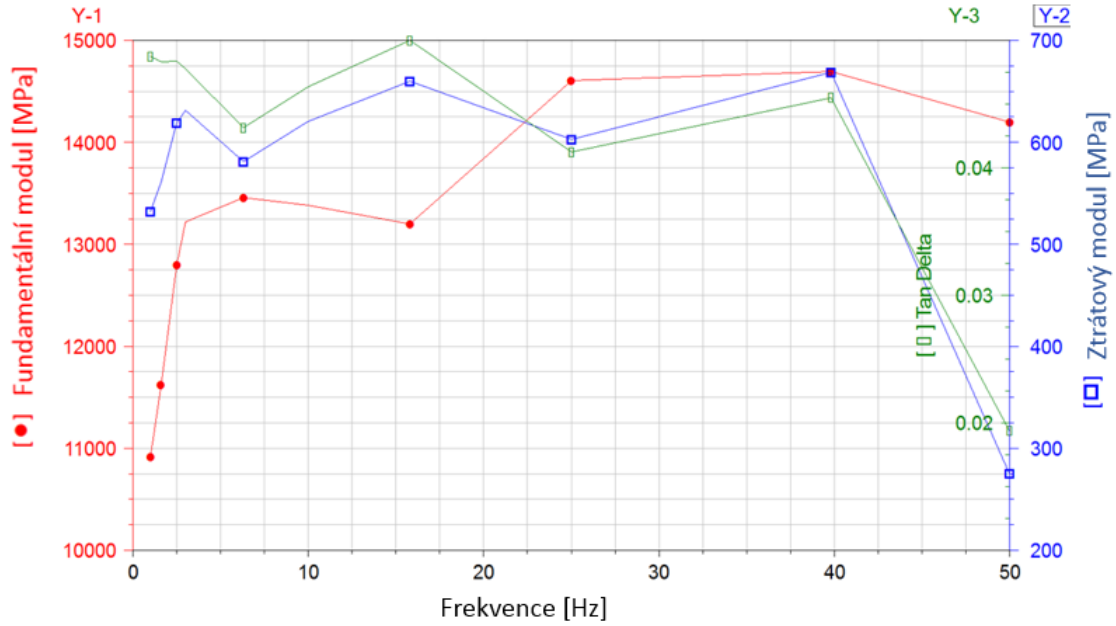


Obr. 23 Tříbodý ohyb prepregového vzorku na dynamicko mechanickém analyzátoru

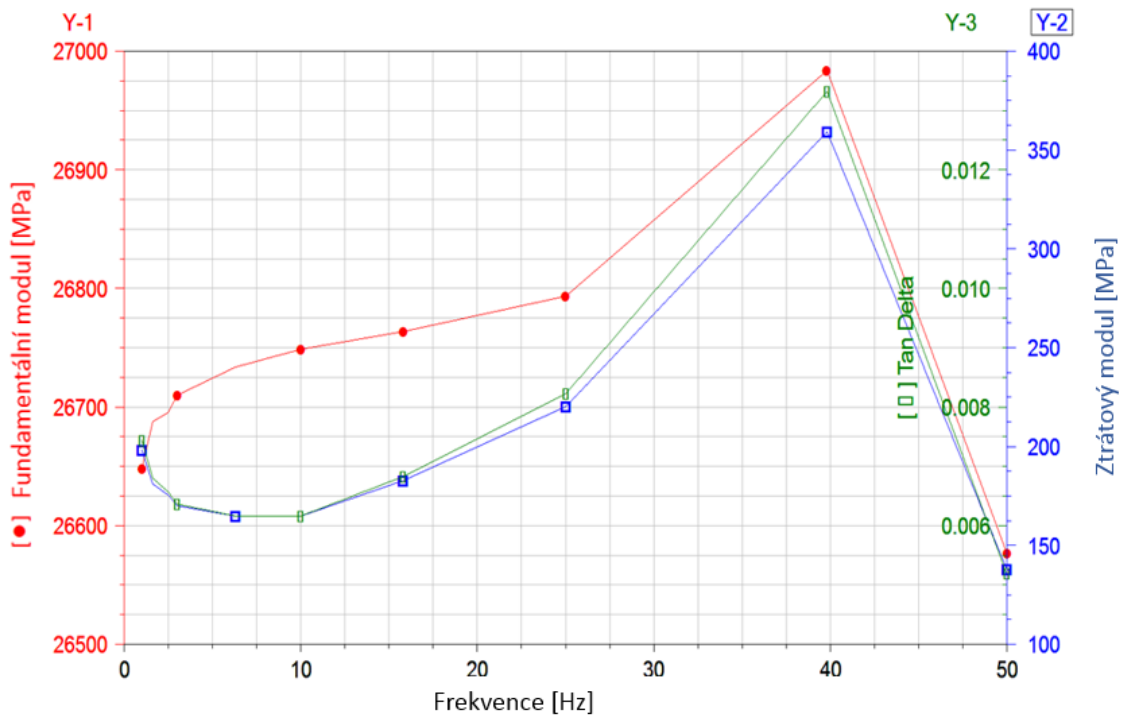
Vytvořený experiment spočívá v různé amplitudě frekvence s konstantní deformací. K vyhodnocení viskoelastické odezvy materiálu na základě změn v hodnotě paměťového a ztrátového modulu, vzájemně závislých ztrátovou tangentou δ [89]. V experimentálním zařízení DMA je amplituda definována jako maximální množství oscilačního pohybu v mikrometrech (jedna polovina z hodnoty špička-špička). Podle [67][89] by pro kompozitní vzorky měla amplituda 10 až 50 μm zaručit dobré výsledky a současně je doporučeno používat logaritmicky rozložené „sweep“ frekvence (např. 10, 5, 2, 1) namísto klasického diskrétního či lineárního rozložení (např. 9, 7, 5, 3). Jednalo se o dva vzorky z testovaného materiálu, první jednosměrný tzn. úhel 4 vrstev roven 0/0/0/0 a druhý obsahoval vrstvy střídavé 45/-45/45/-45. Na Obr. 24 a Obr. 25 je možné vidět jednotlivé závislosti, konkrétně paměťový a ztrátový modul, včetně vzájemné tangenty takto vzniklého trojúhelníku v závislosti na frekvenci zatěžování s konstantní hodnotou deformace 15 μm a povolené variaci působící síly až o 125 % dle (5.3).

$$F_S = F_T \times K \times A \quad (3.59)$$

Kde F_S je statická síla [N], F_T povolená variace aktuální sledované síly [-], K tuhost [N/m] a A amplituda [m].



Obr. 24 Stanovená závislost modulů 0/0/0/0 prepregového kompozitu na zatěžovací frekvenci



Obr. 25 Stanovená závislost modulů 45/-45/45/-45 prepregového kompozitu na zatěžovací frekvenci

3.7 Závěr kapitoly o mechanických vlastnostech

V uvedené kapitole byl představen ucelený popis základních přístupů, teorií a výpočtových modelů použitých při odhadu a určení inženýrských konstant nutných pro návrh kompozitního dílu. Zmíněny byly klasické výpočetní modely a poměrně rozsáhle byla odvozena variace Hookova

zákona na vrstveném laminátu. Na základě autorova postřehu byla doplněna méně obvyklá kapitola o deformaci tlustostěnných desek. Dané téma je velmi důležité a nabízí stále velký prostor, mnoho teoretických vědeckých prací by se mohlo více zabírat pouze danou otázkou.

Při studiu odborných publikací, knih či manuálů výpočetních aplikací, velmi často vídáme zcela obecné tvary klasické rovnice odvozené v kap. 3.4. Při snaze o verifikaci použitých postupů, uvedených výpočtů či modelových situací ověřit, bylo ovšem zjištěno, že dané výpočty často nevycházejí přesně tak, jak by dle dotyčných autorů měly vyjít. Z toho důvodu byl daný problém studován hlouběji a popsán v kap 3.4.1. Doporučením je tedy možné zmínit nutnost rozlišení mezi výpočtem tenkostěnné skořepiny a tlustostěnné desky, kdy do hry vstupují především vyšší tuhosti způsobené deformací po směru tloušťky. Zde vyvstává odůvodněná domněnka, že mnoho autorů slepě důvěřuje softwarovým nástrojům jako black boxům a jejich výsledky neodpovídají teorii, kterou výpočty podkládají. Přitom právě volba dané teorie a přístupu může u výpočtu pokročilé struktury výrazně ovlivnit výsledek. Dané tvrzení je názorně demonstrováno v kap. 5.2.4 na příkladu tahové zkoušky.

V závěru třetí kapitoly byly otestovány první zjednodušené vzorky vyrobené z daného prepregového materiálu. Provedeným testem byla dynamická analýza ve třibodém ohybu, na jejímž základě byly zjištěny hodnoty fundamentálního a ztrátového modulu pružnosti v závislosti na frekvenci zatěžování.

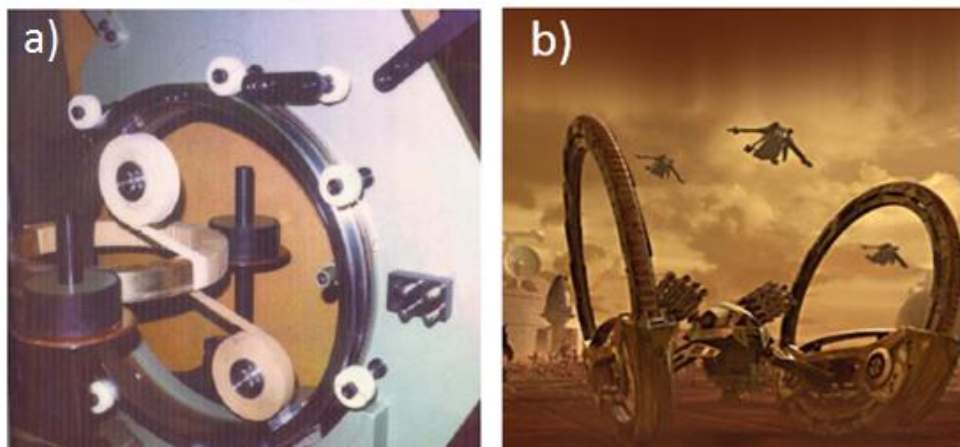
4 Konstrukce zařízení pro výrobu kompozitních rámu

Nosným konstrukčním tématem práce je návrh ovíjecího mechanismu optimalizovaného pro předimpregnovaná vlákna. Pro výrobu kompozitního rámu je nutné využít informace získané v předchozích kapitolách o používaných procesech, materiálech a možnostech jejich konstrukčního návrhu.

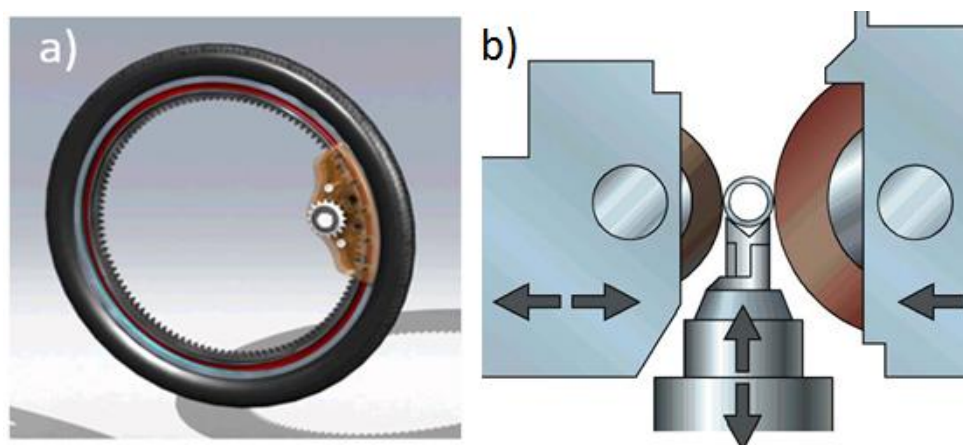
Jak bylo zmíněno v kap. 2.5.1, je pro výrobu tenkostěnných kompozitních dílů tvaru trubek standardně využíváno metod obalování, ovíjení či případně pultruze. Jakýmsi původcem, ze kterého ovšem metody vychází, jsou bezesporu metody využívané v textilním inženýrství pro tzv. oplétání. Textilní oplétání umí vyřešit jeden v dnešní době poměrně složitý úkol a to výrobu dílů zakřivených jako hadic, lan, špagátů atd. [54]. Toto je dáno především elastickými vlastnostmi materiálů, se kterými se pracovalo. Pro výrobu tvarově složitějších dílů pevných, je tedy dle Aizada [93] nutné využít určitý stupeň automatizace a elastické chování použitých materiálů, jenž by reagovalo na změnu geometrie, nahradit stupni volnosti dodanými výrobnímu a upínacímu zařízení.

Jako výchozí a nejvhodnější konstrukční řešení je v tomto případě využití tzv. centerless technologií. Pravděpodobně první metoda pro výrobu tzv. centerless navíjení byla použita pro toroidní cívky (Obr. 26a). S ideou rotace bez pevného středu se je historicky možné setkat dokonce i ve světě filmu – Obr. 26b. Další možnosti využití obvodového upnutí dílu je v dopravě či obrábění (Obr. 27). Další, kdo bohužel danou myšlenkou předběhl svojí dobu byl F. Porche, který již v roce 1905 sestrojil elektromobil s elektrickými motory o výkonu 2,2 kW přímo v předních kolech. Ve vozidle nebyly žádné převody, samo kolo tvořilo rotor a jeho osa stator. Jak uvádí ve svých úvahách Zelený [90], je ovšem jasné, že v době přebytku levného benzínu a emisí

jako neznámého pojmu nemohl soutěžit s levným spalovacím systémem, proto je toto řešení až do dnešních dob téměř neznámé.



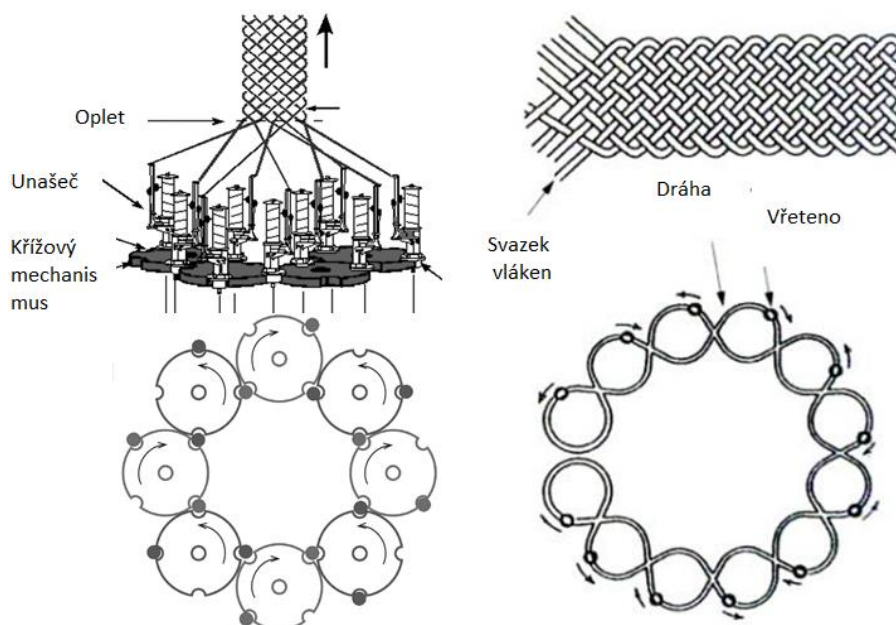
Obr. 26 a) Navíjení toroidních cívek, b) Vesmírná vize „centerless“ (J. Lucas, cca 1970)



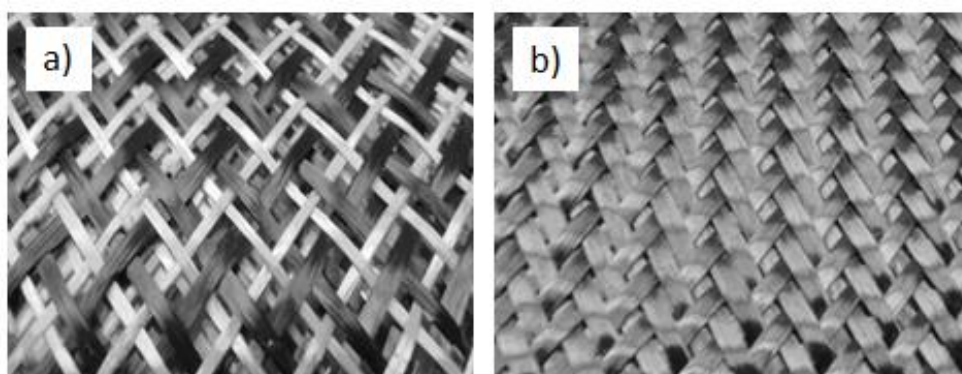
Obr. 27 a) Centerless koncept elektrokola (autor neznámý), b) Broušení rotačních dílů ([KMT Grinding](#))

4.1 Oplétací mechanismy

Více než 100 let je v průmyslu využívána metoda zvaná oplétání, založená na alespoň třech vlákných pramencích. Do roku 1990 ovšem byla tato technologie využívána pouze pro aplikace měkkých nevyztužujících vláken. Výraznou změnu přineslo vynalezení infuzní technologie tvorby kompozitu. Oplétání je možné od této doby využít pro výrobu komplexních kompozitních dílů ovíjením rotujících jader (Obr. 28) [30]. V technické literatuře patrně zcela jednoduše nenalezneme správnou definici, co je ovíjení a co oplétání. *Dle zkušenosti autora by se o oplétání mělo jednat, dochází-li současně k zákrutům svazků vláken, v opačném případě mluvíme pouze o obalování či navíjení.* Na Obr. 29 níže, je možné vidět rozdílnou strukturu vazby vláken typickou pro jednotlivé popisované metody. Oplétané kompozity, jsou dle Lavalu [91] v dnešní době využívány především v high-tech aplikacích jako absorbery rázů, vysocepevnostní díly a rámy, lopatky vrtulí letadel a elektráren.



Obr. 28 Schéma a princip oplétacího mechanismu [54]



Obr. 29 Teoretický rozdíl struktury vzniklé při: a) Navíjení b) Uzavřeném oplétání [30]

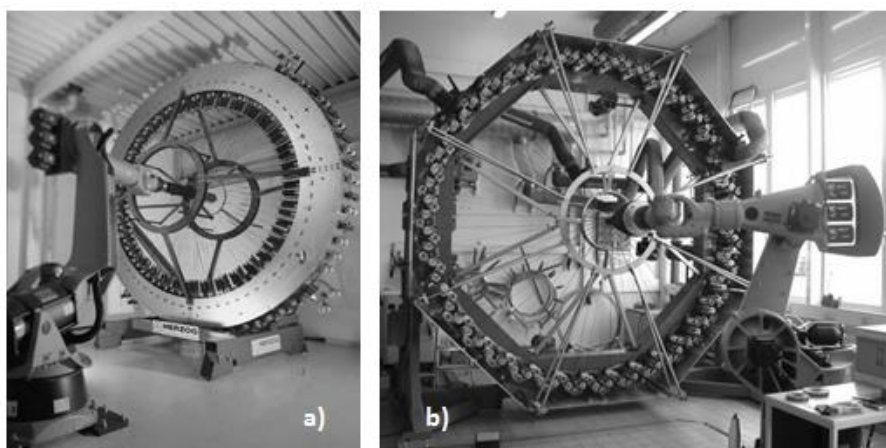
4.2 Současné trendy v oplétání a navíjení

Jedním z důležitých parametrů v procesu oplétání je tzv. navíjecí úhel, viz obrázek. Hodnota tohoto úhlu se bude při konstantních otáčkách jádra snižovat s narůstající rychlostí odtahu. Toto je možné si ověřit v článku od Pereiry [92], kde byl zjištěn ideálně lineární pokles úhlu opletení s rostoucí rychlostí. Mezi důležité poznatky především s ohledem na tvar mechanismu je nutné zařadit i to, že lze docílit kvalitního opletu i s nerovnoměrným rozdělením cívek. Současně, vlivem pohybu křížových mechanismů (Obr. 30) není vzdálenost od držáku cívek a bodu navíjení nikdy konstantní, proto se využívá pružinového brzdného mechanismu pro zajištění konstantního předepnutí vláken.

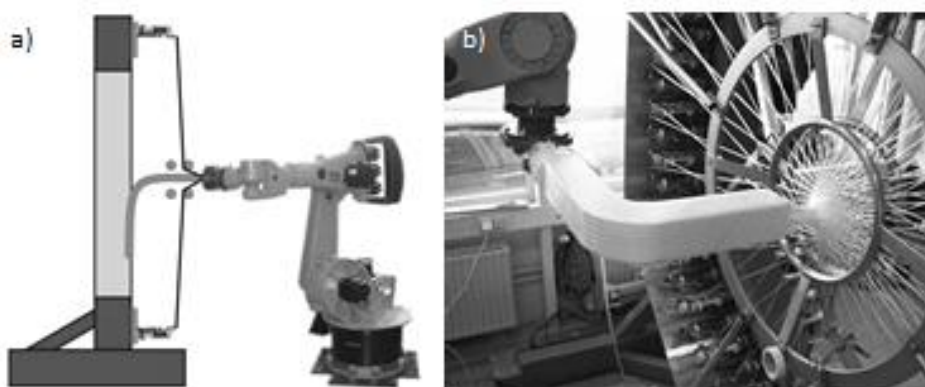
Klasické oplétací stroje



Obr. 30 Konvenční oplétací zařízení: a) výrobce „Herzog“ starší typ b) Zařízení univerzity UMimho, c) Oplétač lan využívaných v offshore stavitelství a dopravě



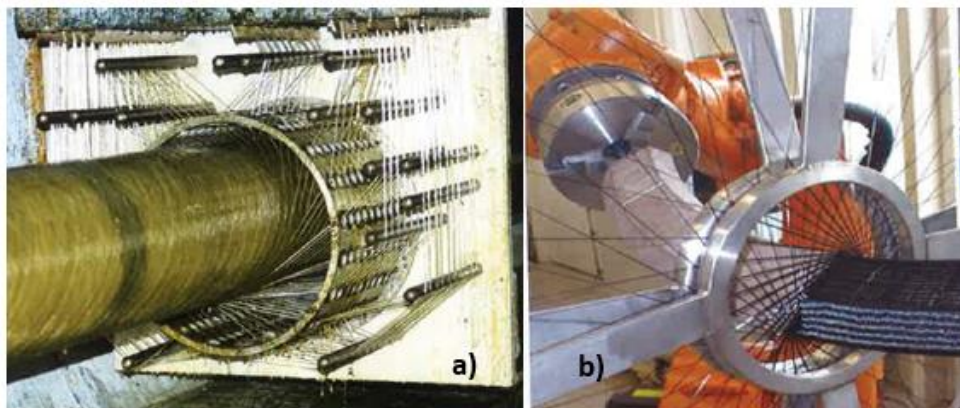
Obr. 31 Radiální oplétací stroj pro tvarovaná jádra: a) Výrobce „Herzog“ b) Jeden z prvních preformovacích přístrojů pro kompozity [30]



Obr. 32 Navíjení 2D tvarů „wet technologií“ a) Schematický princip b) Reálný návin [64]

Na Obr. 33 níže je ovin přímé trubky z více cívek, použitelný především pro stavební průmysl. Zajímavostí této metody je přímé sycení vláken během ovinu, kdy je na daném obrázku možné

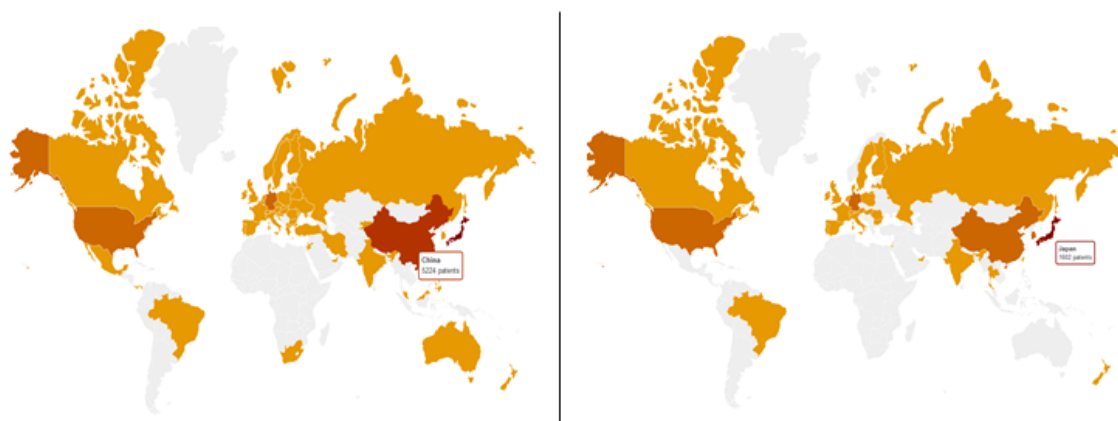
vidět část vany, která pod navíjenou trubkou zachytává okapávající epoxidovou pryskyřici. V druhé části obrázku je oplétací stroj (prezentovaný na *Composite_Expo_2018*), jenž díky využití robotického ramene umí i nepřímé mírně zahnuté 3D tvary s proměnlivými průřezy, dokonce i kuželovitost.



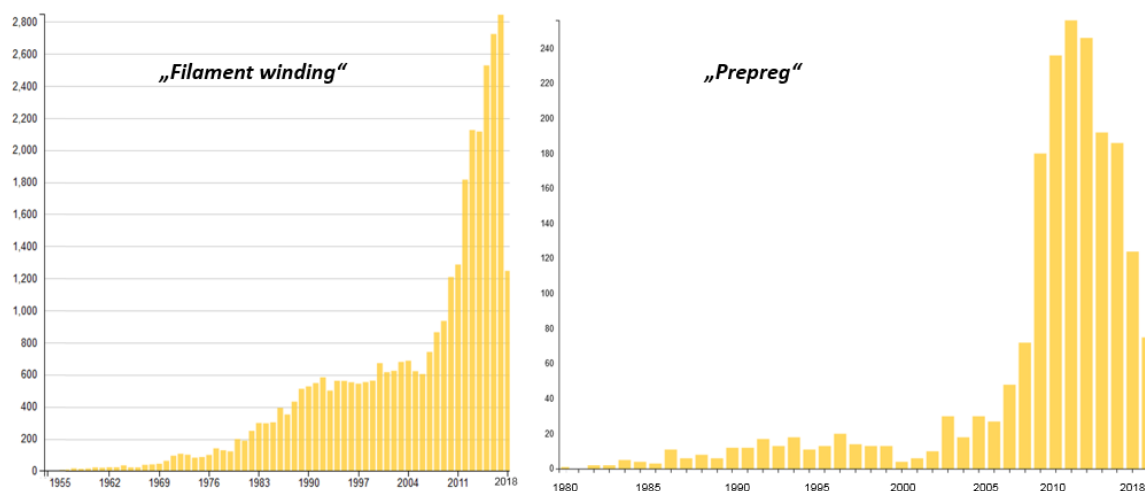
Obr. 33 Metody návínů trubek a) Mokrý ovíjení [epital.ru] b) Oplétání s fixací jádra robotem [Stevik.ru]

4.2.1 Průzkum patentů a nejnovějších výrobních metod v průmyslu

Při průzkumu aktuálně podaných patentů v oblasti vlákenných kompozitů a předimpregnovaných vláken, je na Obr. 34 pro rok 2017 jasně vidět trend několika světových lídrů. Pro ilustraci je přiložena statistika Obr. 35, pro keyword: „filament winding“ (Čína 5 224) a pro „prepreg“ (Japonsko 1 602). Je ovšem nutné podotknout, že mnoho patentů je v době psaní práce stále v řízení a výčet za poslední období proto ještě není konečný. Tím by mohl být způsoben i napohled patrný pokles výstupů v posledních přibližně 2 letech.

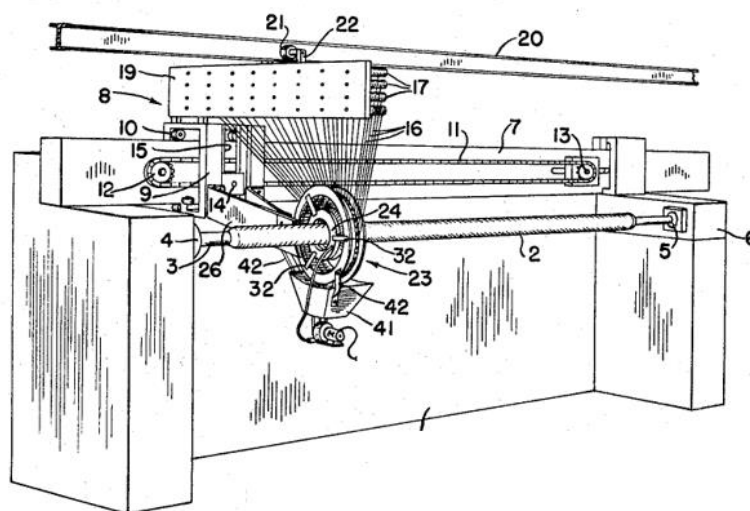


Obr. 34 Oblasti dle podaných patentů za rok 2017 na klíčové slovo a) filament winding b) prepreg



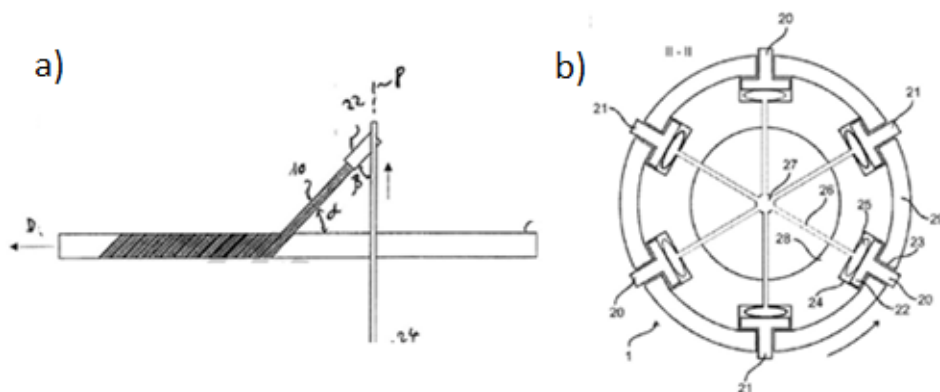
Obr. 35 Celosvětový trend v počtu podaných patentů na daná klíčová slova

Patrně první patent, využívající centerless technologii k zarovnanému omotávání vláken, je od McCleana z roku 1968, nazvaný aparát pro navíjení dílů (Obr. 36). Ve své práci se McClean zabýval především problémem prosycení filamentů, při navíjení velkého počtu vláken. Taktéž, jako jeden z prvních autorů použil pro řízené vedení vláken a jejich rovnoměrné umístění několik vodících kroužků.



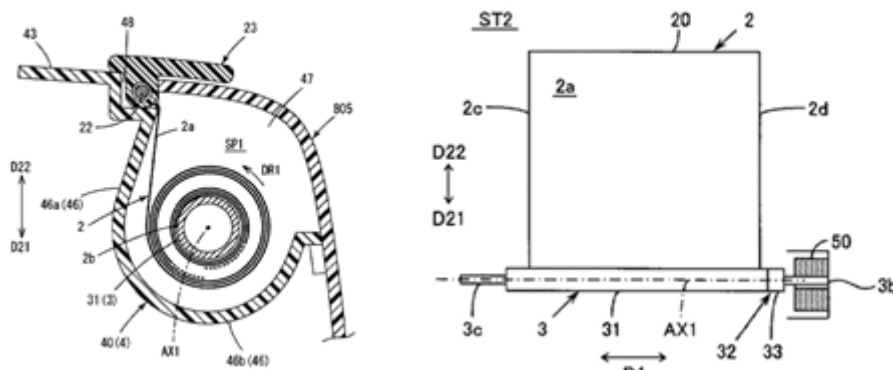
Obr. 36 Patent centerless navíjení US3378427A, W.G. McClean

Dalším aktuálním patentem je (US2018161647A1) zmiňující především výhody dosažené navíjením tenké pásky Obr. 37a, namísto široké role i pro rovné trubky. Ovíjení „centerless“ způsobem s několika oběžnými cívkami a s pneumatickým upínáním a středěním navíjeného jádra, Obr. 37b (US2018179019A1).



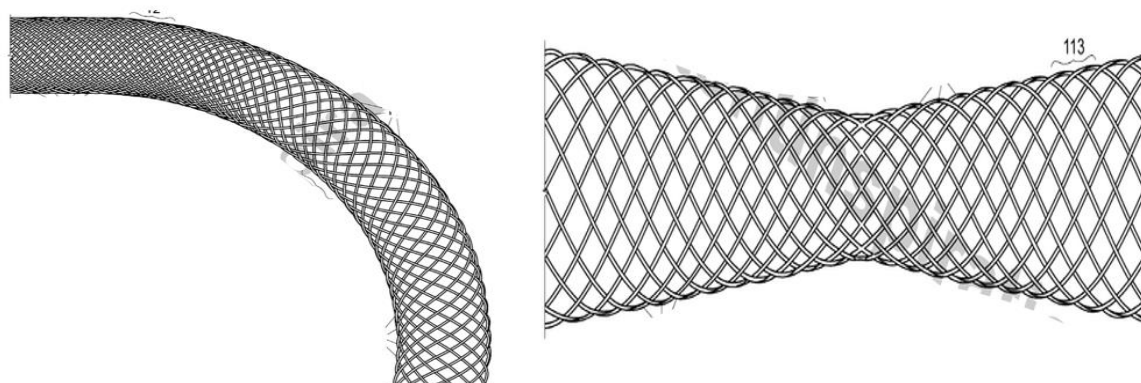
Obr. 37 Centerless navíjení a) výhody tenké pásky, b) pneumatické upínání a středění jádra

Patent US2018154740A1 (Obr. 38) se zabývá návinem jedné široké prepregové pásky, jedná se tedy vlastně o technologii obalování, omezené na přímé tvary. Jako možná modifikace dané metody byl patent KR101671151B1 z roku 2017, obalující i nekruhové tvary. Z autorovy zkušenosti je ovšem především pro zmíněné rovnostěnné tvary zmínit výrazně zhoršené mechanické parametry způsobené nedokonalým vypnutím vláken na nekonkávní stěně.



Obr. 38 Obalování širokou prepregovou fólií

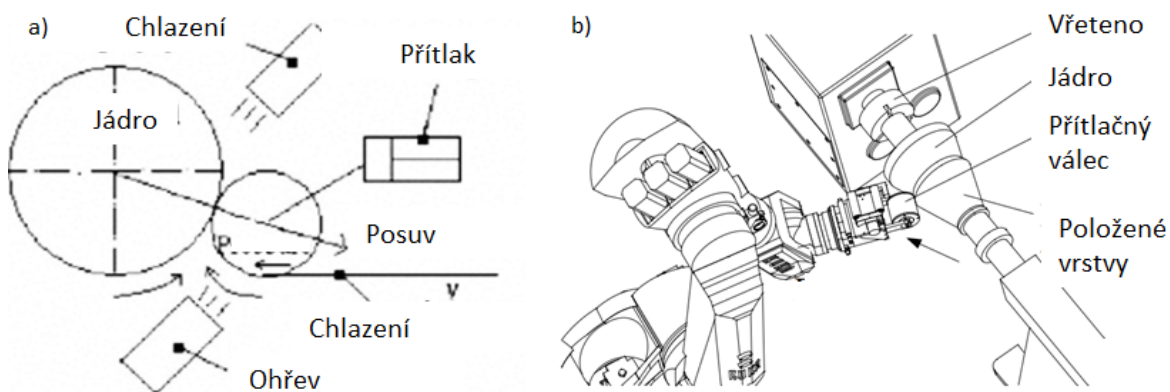
Posledním z uvedených patentů bude (US2016305052A1) využívající tenké předimpregnované filamenty pro navíjení profilů s proměnlivým průřezem a zakřivenou tvořící trajektorii, jak je možné vidět na Obr. 39. Technologie ovšem není více popsána a otázkou je reálná aplikovatelnost.



Obr. 39 Kompozity s proměnlivých průřezem a tvarem

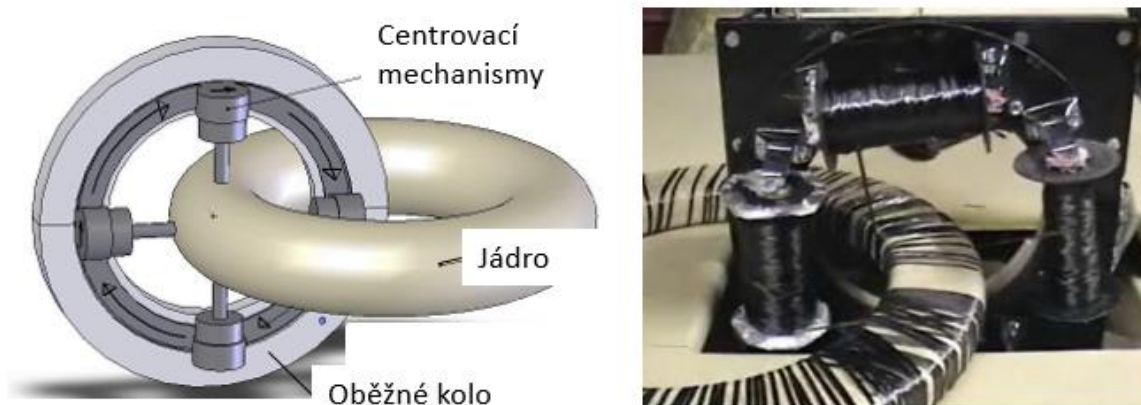
4.2.2 Nejnovější výrobní metody

Při výrobě kompozitu je nutné 100% pokrytí bez mezer či prázdných míst, kde by vznikala výrazně zeslabená místa obsahující pouze pryskyřici. Dle Xiadonga [95] je počet odvíjených cívek, úhel vláken, rychlost jádra a posuv základními parametry určujícími vlastnosti budoucího kompozitu. Asi nejpokročilejší současné technologie nepracují pouze s jádry proměnného průřezu, ale díky možnosti upnutí jádra robotem, je možné vyrábět i komplikovanější prostorově zakřivené tvary (Obr. 40). Proces ovíjení je však pro podobné aplikace již plně automaticky řízen.



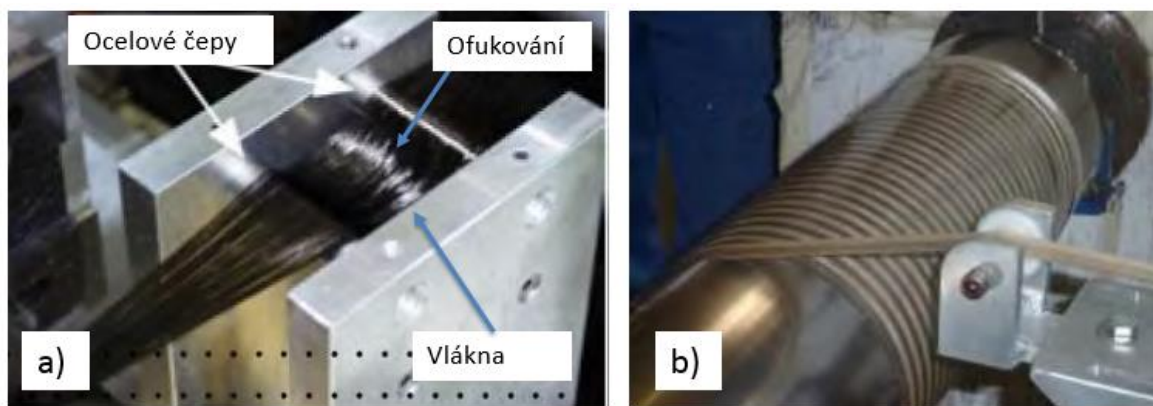
Obr. 40 Způsoby obalování předimpregnovanou páskou a) 2D průřez, b) Složitý tvar Xiadong [95]

Do „objemu a technické úrovně“ se zcela vymykajících práci představil Allen [11], který se pokusil navinutou jednotlivé znaky ve tvaru nápisu „LOTUS“. Je tedy zřejmé, že se zaměřil jak na přímé i výrazně zakřivené tvary a dokonce jeden uzavřený (Obr. 41). Veškerá manipulace a navíjení složitých částí bylo ovšem založeno na pouhém ručním polohování jádra.



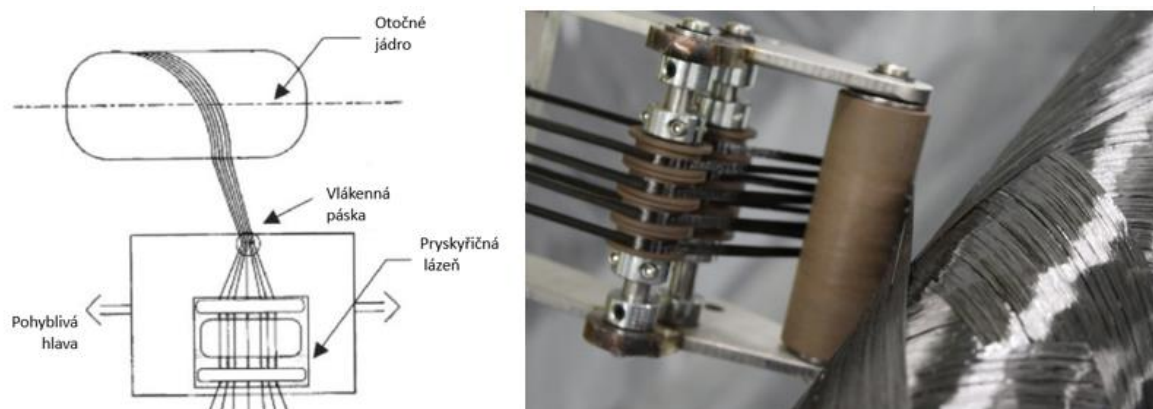
Obr. 41 Allenův navíjecí mechanismus – uzavřené jádro [11]

Aplikací, již není možné opomenout je Harry [10], který navíjel válcová jádra klasickým způsobem a jednou širokou páskou. Zajímavým počinem ovšem bylo rozptřeni vláknenného filamentu pomocí vzduchových trysek mezi dvěma válcovými čepy s rychlostí ofuku 20 m/s. Tímto způsobem byl daný filament z 5 mm rozšířen na 20 mm (Obr. 42).



Obr. 42 a) Harryho mechanismus ofukování vláken b) Šroubového ovíjení [10]

Lehce pozměněnou variantu mokrého návínou použil Campbell [96], jenž při navíjení tlakových nádob vlákenné filamenty máčel v pryskyřičné lázni těsně před jejich navinutím zakomponované přímo do pohyblivé hlavy Obr. 43. Pro zabránění předčasné konsolidaci pryskyřice a tím například nedokonalé spojení vrstev, byl daný díl ofukován horkým vzduchem z indukční spirály.



Obr. 43 Navíjení a) Prosyčených vláken [96] b) Prepregů s přitlačným válcem [DJI-Innovations]

Jako poslední ze zmíněných studií je velmi originální práce Blazejewského [97], který studuje a popisuje chování a vlastnosti základních textur vznikajících při návínou z dlouhovláknenných kompozitů. Během navíjení kruhových průřezů vznikají různé základní vzory textury povrchu. Vzor této mozaiky, stejně jako ostatní parametry návínou (navíjecí úhel, tloušťka, úhel vlečení), je významným pro budoucí vlastnosti dílu. Ve své práci se na příkladu vinutých tlakových lahví věnuje jak charakteru a hustotě navíjené tzv. mozaiky, tak vzniklým pórům, dutinám, deformacím, jejich tvaru, šíření a výsledných fyzikálních vlastnostem. Práce popisuje celkem 8 základních struktur mozaiky zobrazených na

Obr. 44. Velmi zásadním zjištěním je korelace textury a meze únavy či podíl dutin. Práce se aktuálně bohužel nenachází v elektronické podobě, ani ve světovém jazyce.

Označení struktury vzorku								
	N _r 1	N _r 8	N _r 6	N _r 4	N _r 7	N _r 3	N _r 5	N _r 2
Poč. proložení [-]	128	240	336	416	480	528	560	576
Podíl dutin [%]	1,9	4,3	4,2	5,6	7,1	8,8	8,7	7,9
Tl. stěny [mm]	4,22	4,25	4,24	4,27	4,26	4,30	4,32	4,32
Obj. deformace [cm ³]	410	416	412	408	424	412	416	425
Hmot. podíl vlánka [%]	75,5	77,1	76,9	76,8	76,3	76,1	76,7	77,1

Obr. 44 Porovnání vlastností navinutého dílu s různou charakteristickou „mozaikou“ (dle [97])

4.3 Nenosná jádra

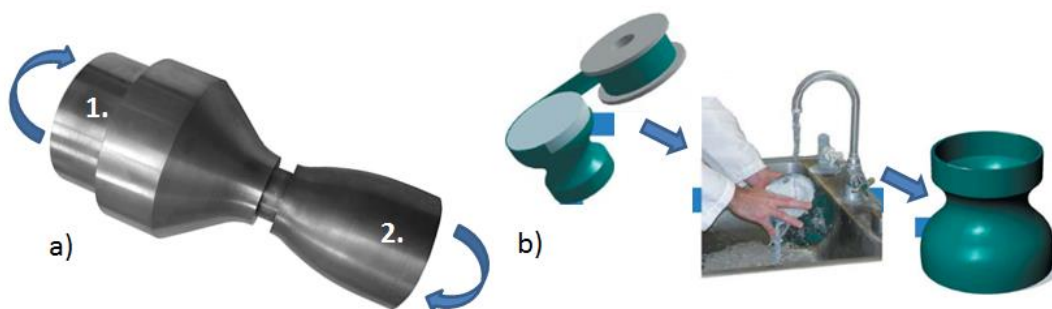
Jádra slouží pro finální kompozitní díl jako pouhá tvarová šablona. Pro finální mechanické vlastnosti jsou jejich mechanické parametry zanedbatelné, ve zcela ideálním případě by jádro mohlo být z výsledného dílu odebráno či odstraněno. Ve strojírenské praxi bychom mohli nalézt analogii například v technologii vytavitelných modelů. Pro danou aplikaci výroby kompozitního rámu, ovšem nic z výše uvedeného není možné, neboť celý kompozitní díl má mít uzavřený tvar a dodatečně odstranit vnitřní jádro je tedy nereálné.

4.3.1 Materiály

Před výběrem vhodného materiálu jádra, je nutné uvážit otázky [30][63][73][91]. Je jádro schopné přenést zatížení, odolnost v tlaku a při zvýšených teplotách? Je možná demontáž jádra nebo může jádro zůstat jako součást kompozitu či neškodí vzájemná interakce požadovaným vlastnostem? Umí jádro v kombinaci s kompozitem vytvořit např. sendvičovou strukturu?

Pevná vyjímatelná jádra

Jedná se o jádra primárně navržená s ohledem na možnost jejich vyjmutí z hotového kompozitního dílu. Tato skutečnost už zásadně ovlivňuje výsledný tvar daného dílu a pro uvažované zahnuté rámové díly je tedy nevhodná. Jelikož se ovšem jedná o technologii u dané výroby vinutých dílů předně využívanou, je zmíněn alespoň její základní princip. Obvykle se jedná o tvary kuželové, možno i kombinované křivosti, dělitelné (Obr. 45). Další možnosti jsou formy dřevěné, kdy je možné docílit úspory nákladů. Dřevěné materiály by potřebné teploty i tlak měly vydržet.



Obr. 45 a) Vyjímatelné dělitelné kovové jádro b) Vodou rozpustné - Aquacore™

Písková jádra

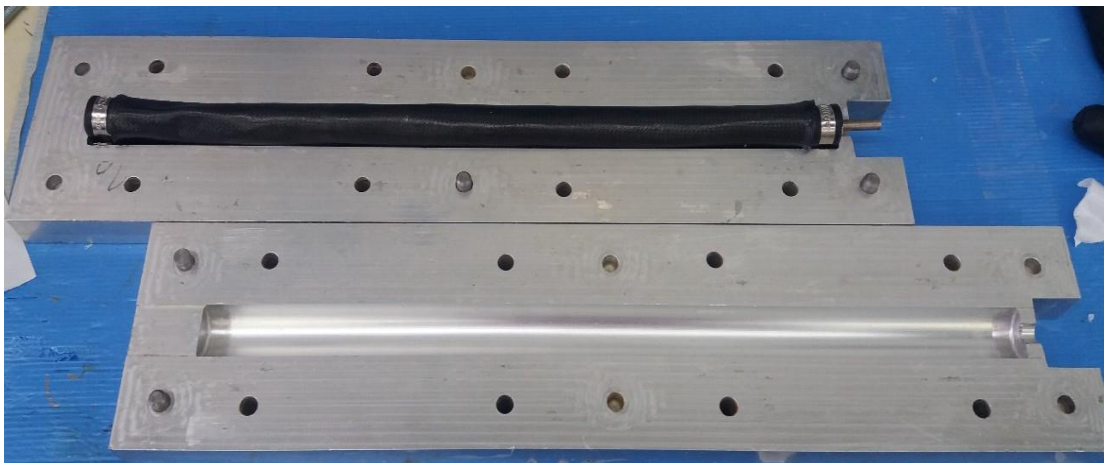
Jádra na bázi písku s pojivem, tato technologie je známá především z odlévání kovů. Je ovšem možné najít i kombinace písku a pojiva, vhodné pro technologie kompozitů, problémem je průnik matrice a písku, proto je nutné použít separační fólie. Často však vlivem křehkosti dojde při navíjení či manipulaci k poškození jádra a tím obvykle zničení zcelého dílu.

Rozpuštěné materiály jádra

Aquacore™ - Jedná se o mikrobalonky rozpuštěné v pojivu, po vytvrzení formy a následně kompozitu je jádro rozpuštěno vodou Obr. 45b [52]. Tento materiál, např. od pískových forem, má tu výhodu, že je možné jeho obrábění a má výbornou slučitelnost s běžnými epoxydovými pryskyřicemi. Mezi výhody patří jeho totální chemická inertnost, což umožňuje výrobu jader i v klasické či mikrovlnné troubě. Jako nejčastější materiál je vzhledem k vlastnostem využíváno extrudovaných polyuretanových pěn. Tato metoda je ovšem především k ceně potřebné formy finančně nákladná a vhodná tedy spíše pro větší série výrobků.

Nafukovací jádro

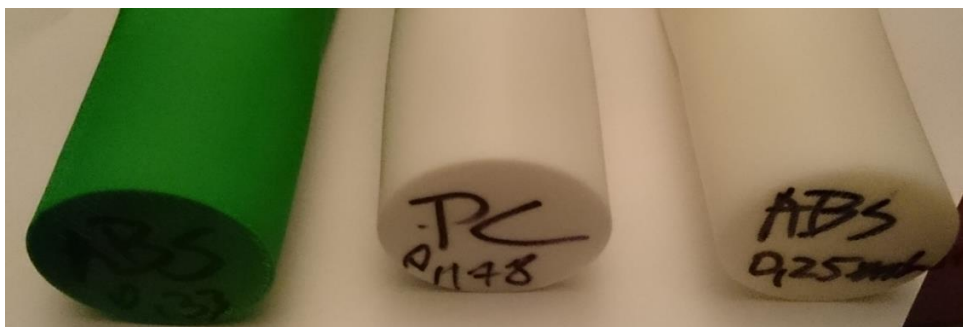
Velmi zajímavou aplikací kombinace elastické membrány s vnitřním přetlakem a klasické formy se zabýval Janošík [38]. Jednalo se o konstrukci částí rámu jízdního kola, jejichž výroba je celkově značně složitá a nákladná. Do formy vkládal prepreg navinutý na nylonové vzduchové polštáře, které jsou následně umístěny do formy a pomocí ventilku nafouknuty (Obr. 46). Jako zásadní body této metody bylo uvedeno dodržení optimálního přetlaku v nylonovém jádře, doby ohřevu (až na 155 °C - což je pro prepregy již velmi vysoká teplota) a následně pozvolného chlazení. Pomocí této technologie jsou vyráběny i zakřivené profily.



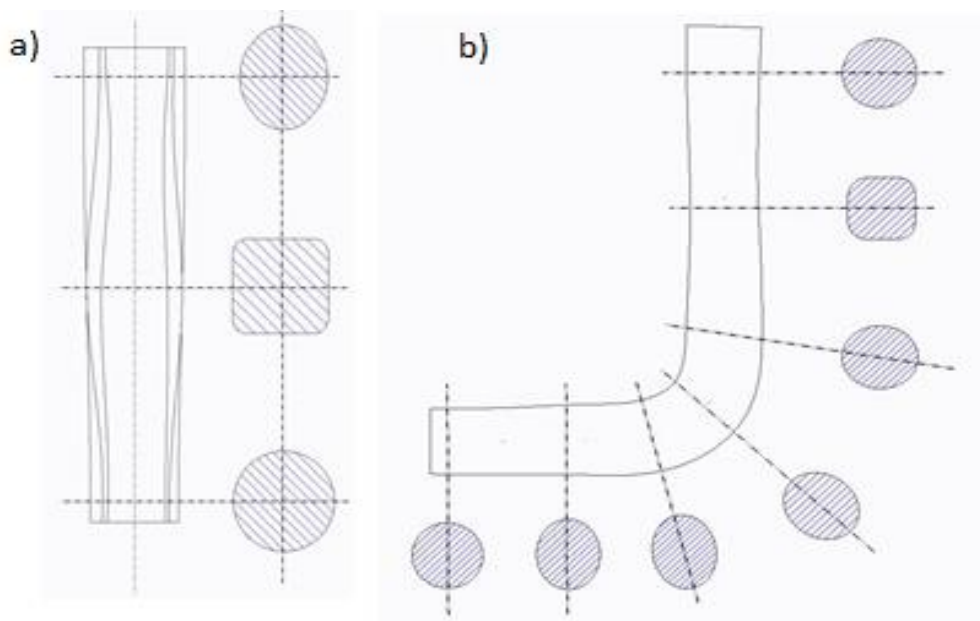
Obr. 46 Nylonové jádro s ventilkem umístěné ve formě [38]

Tištěná jádra

Velmi slibným způsobem ověřeným v rámci práce, o němž se nepodařilo najít informace v žádné dostupné literatuře ani patentech, je jako nenosné jádro daného kompozitu použít 3D-tištěný díl s vnitřní voštinou (Obr. 47). Hlavní výhodou tohoto způsobu, je velmi rychlá výroba téměř neomezených tvarů (Obr. 48) za zcela minimální výrobní cenu, při porovnání s konvenční výrobou jader například frézováním, odlitím atd. Nevýhodou bude časová náročnost tiskové operace a nutnost výběru vhodného materiálu s ohledem na tepelnou stabilitu při vytvrzování. Uvedená metoda byla otestována na několika dílech a zdá se vhodná především pro prototypovou a kusovou výrobu, či testovací náviny tvarově komplikovaných dílů.



Obr. 47 Použité materiály k 3D tisku, ABS a PC



Obr. 48 Testované tvary průřezu jádra a jejich přechodů a) Přímá b) Zahnutá

4.3.2 Vypěňovací systémy

Možnou alternativou klasickým pevným, či dočasným jádrům mohou být jádra z pěn, které mají dostatečnou pevnost a tepelnou odolnost pro zajištění tvaru při vytvrzení. Na druhou stranu musí být jejich hustota tak nízká, že výrazněji neovlivní hmotnost kompozitu. Principem výroby takového nenosného jádra je jeho vypěnění do formy.

Formy na odlité pěny

Pro výrobu formy pro tekuté vypěňovací systémy je možné využití tzv. umělého dřeva. Jedná se o speciální plastový kompozit, jehož vlastnosti propůjčují materiálu mimořádně dobrou obrobiteľnost, při vhodném zpracování a broušení výbornou kvalitu povrchu. Nejsou nasákové pryskyřici ani ji nešpiní a současně zaručují rozměrovou stabilitu i pevnost. Materiál je nejčastěji dostupný pod obchodním názvem Ebaboard. Jeho vlastnosti jsou ovšem vyváženy velmi vysokou cenou, která jeho použití omezuje především pro formy velmi přesných dílů nejčastěji ručně laminovaných a vytvrzených v autoklávu.

Nalezenou značně ekonomicky vhodnější variantou jsou tzv. MDF materiály (Medium Density Fibreboard). MDF se vyrábí z dřevěných vláken pomocí sekaček, které docílí rozštěpení původní suroviny a poté se v tzv. defibrátoru rozmělní na vláknitou hmotu, spojí syntetickým lepidlem, za použití teploty a tlaku [98]. Nejdůležitější vlastností je homogenita v celém průřezu desky, která umožňuje kvalitní zpracování povrchu frézováním a lakováním, což je hlavním benefitem a důvodem jejich výběru [113]. Použité polotvrdé dřevovláknité desky se vyrábějí suchým způsobem výroby s obvyklou hustotou od 400 do 900 kg/m³. Výroba HDF (High Density Fibreboard) desek využívá poznatků získaných při výrobě celulózy a papíru [102]. Při porovnání s klasickým "frézovacím" umělým dřevem jako např. výše uvedený Ebaboard, je možné se s velmi podobnými mechanickými vlastnostmi dostat na přibližně čtvrtinovou cenu. Desky pro formu byly zhotoveny ze střední třídy daného materiálu o hustotě 730 kg/m³.

PUR pěny - IPITHERM

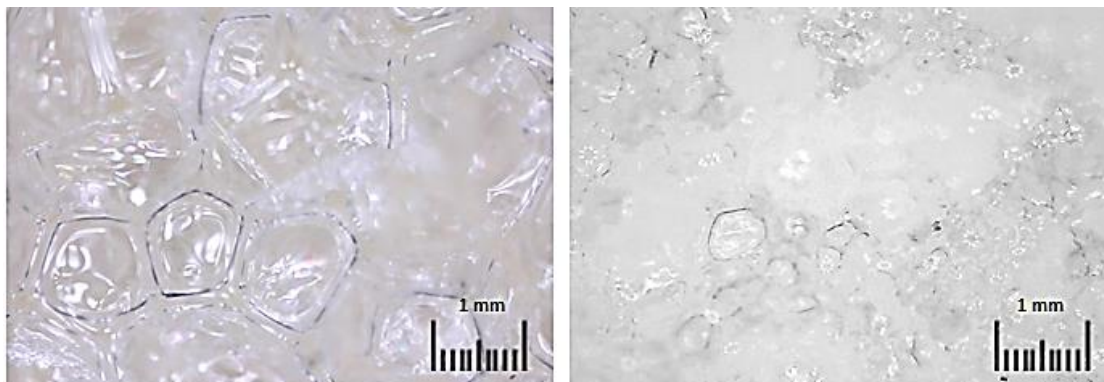
Vypěňovací dvousložkové polyuretanové systémy jsou známé pod obchodním názvem IPITHERM s označením G-0-35R. Výrobce udaný poměr míchání je 1:1,35 hmotnostně, či 1:1,2 objemově. Použitá pěna by měla být s objemovou hmotností přibližně 50-60 kg/m³. Dle technických listů výrobce [63] je startovací čas reakce 35 s, čas síťování 120 s a čas do zatuhnutí 200 s. V reálném případě se ovšem s ohledem na viditelně rozpoznatelné probíhající „kynutí“ směsi dá hovořit spíše o delší době. Ohledně mechanických vlastností, je možné v normě CSN 645443 nalézt pevnost přibližně 0,15 MPa.

Epoxidová pěna – RESOLTECH

Tento systém má ve volném prostoru koeficient roztažnosti 4, umožňující výrobu 250 kg/m³ epoxidové pěny [100]. Pomalá, řízená pěnivá reakce umožňuje výrobu bez použití speciálních směšovacích strojů. Dokonalá kompatibilita s prepregy a epoxidovými pryskyřicemi i při polymeraci. Proces začíná přibližně 2 minuty od rozmíchání složek. Pěna získaná při pokojové teplotě je tvrdá a díl je možno uvolnit přibližně po 24 hodinách. Použitý epoxid 2080 M25 byl s tužidlem 2085 M smíchán v poměru 100 : 30.

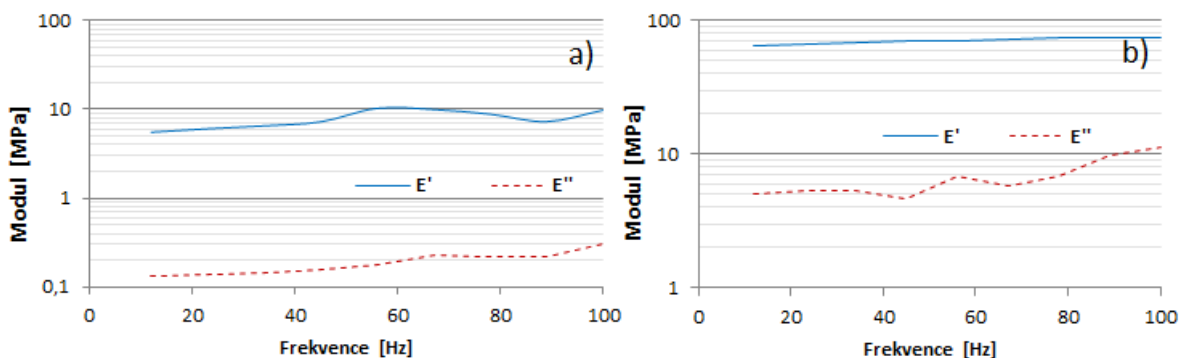
4.3.3 Vlastnosti použitých pěn

Již během výroby bylo znatelné značně odlišné chování obou materiálů, jak je možné pozorovat i na mikrostruktuře na Obr. 49. Zatímco PUR systém je velmi rychle reagující a silně expanzní reakcí, epoxidová pěna vzniká velmi pomalu a téměř 24 hod po odlití je stále měkká a lepkavá.



Obr. 49 Mikrostruktura daných pěn a) PUR b) Epoxy

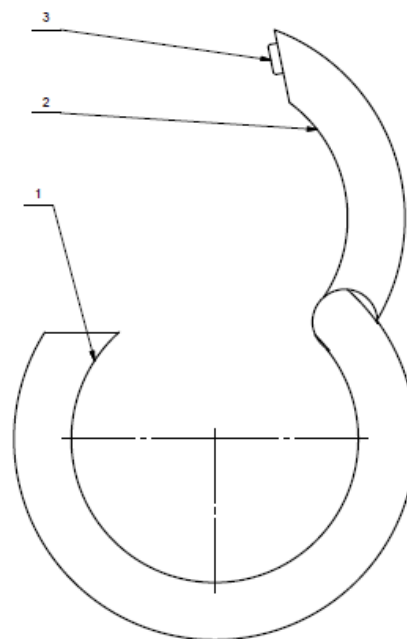
Použité pěny byly otestovány ve tříbodém ohybu při dynamickém namáhání. Na Obr. 50 níže je možné vidět závislost fundamentálního E' a ztrátového modulu pružnosti E'' na zatěžovací frekvenci. Je znatelné, že epoxidový systém dosahuje násobně vyšší hodnoty než PUR varianta. Tento vztah bylo možné očekávat již dle expanze směsi během výroby, kdy epoxid zvětší svůj objem přibližně 4x, zatímco PUR pěna až osmi násobně. Dané moduly, bylo vhodné určit s ohledem na posouzení vlivu mechanických parametrů jádra, na celkovou tuhost a stabilitu výsledného rámu. Zatímco vliv PUR pěny je zcela zanedbatelný, tuhost přidaná dílu od jádra epoxidového, by již například přenosové charakteristiky mohla ovlivnit významněji.



Obr. 50 Dynamické vlastnosti pěn a) PUR b) Epoxy

4.4 Průvlačné kroužky

Důležitým dílem, který navádí vlákna z výrobního zařízení na navíjený rám, jsou průvlačné kroužky. Jelikož je cílem práce navinout i rám uzavřeného tvaru, bylo nutné navrhnout kroužek s možností jeho otevření, pro možnost vyndání či odebrání hotového rámu z navíjecí hlavy. Na Obr. 51 níže je možné vidět sestavu kroužku se zobrazeným principem otevření. Kroužek je založen na jednoduchém čepu a magnetické aretaci.



Obr. 51 Konstrukce otevíracího kroužku pro vložení uzavřených rámu

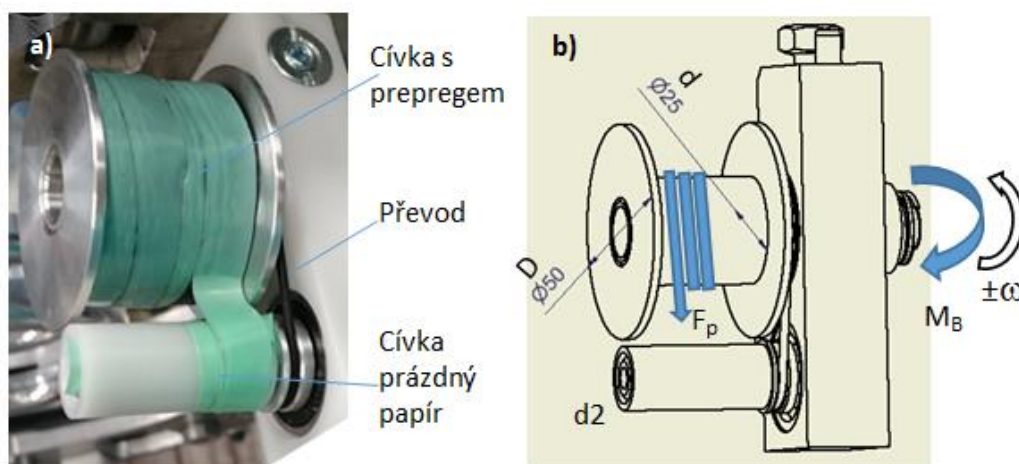
4.5 Konstrukce – držák cívek

Při navíjení, obalování či oplétání čistými vlákny, postačuje obvykle jedna cívka, z níž je vlákno tahem způsobeným rotací oběžné hlavy či jádra postupně odmotáváno. Brzděním cívky je následně možné regulovat požadované předpětí v navíjených vláknech, jež je mimořádně důležité pro přesné zarovnání vláken a rovnoměrné prosycení jak je možné detailněji nalézt např. v [30][70][93][94][96]. Lze dokonce nalézt patent podaný společností Toyota, ustavující *Zařízení na navíjení vláken*, obsahující řídicí jednotku, která řídí pnutí ve vláknech pro zajištění optimálního návinnu (US2018236735A1U, 2018).

Výrazným benefitem využití prepregového materiálu namísto klasických vláken je absence nutnosti sycení a vytvrzení ve formě, což tento materiál předurčuje k prototypové či malosériové výrobě. Nevýhodnou je vyšší cena předsyceného materiálu a jeho celkem atypické chování. Více než jako vlákna se totiž chová jako oboustranná lepicí páska, která sama sebe dokáže přichytit v nerozebratelný zákrut. Z toho důvodu jsou prepregové vrstvy odděleny silikonovým papírem, který je během procesu navíjení nutné separovat. Dokonce i napnutá páska má stále tendenci sama sebe zakrucovat a z toho důvodu je pásku třeba zatížit dodatečnou silou předpětí a pásek držet stále rovně, aby nedošlo k vzájemnému slepení vláken. Z toho hlediska vyplývá požadavek na výrazně vyšší tuhost všech použitých zařízení. S ohledem na mechanické parametry kompozitu je tedy při výrobě nutné jednotlivé vrstvy vzájemně separovat. K tomuto účelu se používá krycí silikonový papír, který je ovšem během výrobního procesu nutné od součásti odvádět a uskladňovat. Z toho důvodu byl navržen mechanismus (Obr. 52), kde jsou oba držáky cívek propojeny řemenovým převodem s konstantním poměrem a nastavitelným frikčním členem zajišťujícím požadované předpětí.

$$D_1 = 2 d_2 \Rightarrow i = 2 \quad (4.1)$$

Problémem u takto navrženého mechanismu je ovšem měnící se průměr obou cívek a tím vlastní převodový poměr celého mechanismu. Tento problém, nám mimo jiné způsobí problémy s požadavkem na konstantní předpětí v navíjeném vlákně po celou dobu navíjení. Pro ideální stav předpětí by tedy mělo platit (4.1), což znamená, že síla předpětí vlákna by nebyla závislá na aktuálním stavu poloměru odvinutí.



Obr. 52 Odvíjení mechanismus vlákna a navíjecí převod pro ochranný papír

$$F_p d_1 \neq F_p D_1 \quad (4.2)$$

$$\frac{d_1}{D_1} = 2 \rightarrow F_p \neq \text{konst.} \rightarrow F_{pd} = 2 F_p D \quad (4.3)$$

Kde F_p je síla předpětí navíjených vláken, d_1 je malý průměr prázdné cívky a D_1 velký průměr plné cívky a M_B potom brzdny moment, jímž působí přitlačný třecí mechanismus.

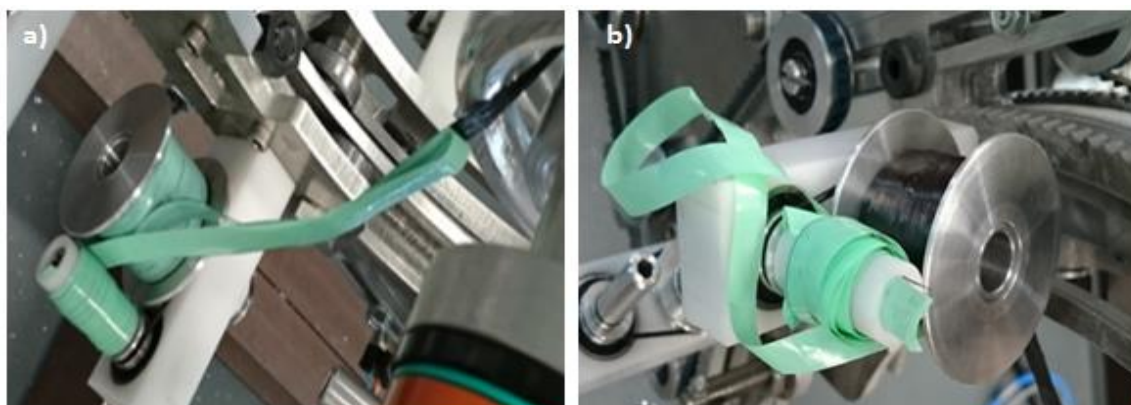
Pro odhad délky návinu použitého materiálu je možné použít diferenciální rovnici spirály z materiálu o známé tloušťce. Jak je ovšem možné najít v obecné teorii návrhu vynutých pružin [71], pro podobný případ dostatečně postačí odhad ze středního průměru d_{cm} . Tento vztah nám poví, jaká délka a v kolika vrstvách se vejde na jeden průřez. Následně, dle aktuální šíře navíjené prepregového pásu je možné stanovit celkovou délku.

$$O_{cm} n_i = d_{1m} \pi n_i = \frac{d_1 + D_1}{2} \pi n_i = \frac{d_1 + D_1}{2} \pi \frac{D_c - d_c}{2t} = L \quad (4.4)$$

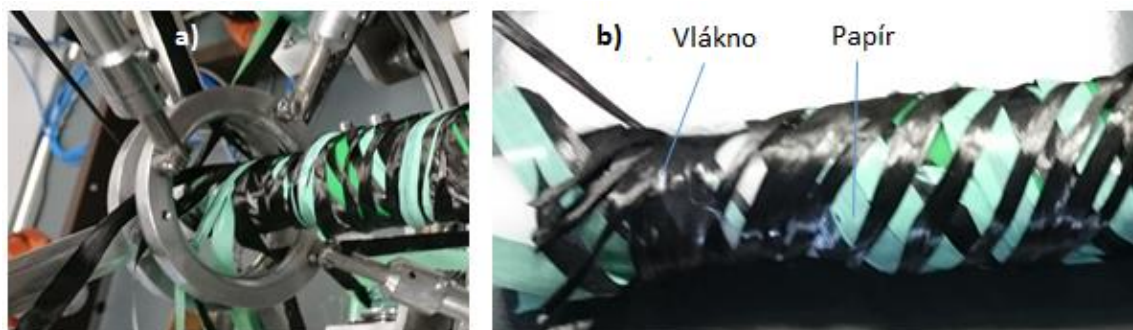
Kdy O_{cm} je obvod na středním poloměru d_{cm} , n_i je počet vrstev, t je tloušťka jedné vrstvy a L celková délka pro jeden průřez.

Odmotáváním pásky prepregu a navíjením krycího papíru se tedy neustále mění vzájemný převodový poměr cívek. Při výrobním procesu dochází k postupnému uvolňování odvinutého krycího materiálu ze sběrné cívky. Tento silikonový papír následně nevhodně překáží v pracovním prostoru rotujícího mechanismu a současně vlivem těsných kontaktů celého mechanismu kol

hlavy hrozí vzájemné zachycení. Na Obr. 53 a Obr. 54 níže, je zřetelně vidět jak tento problém v čase (v závislosti na odmotaném vláknu) při prototypových testech vzniká.

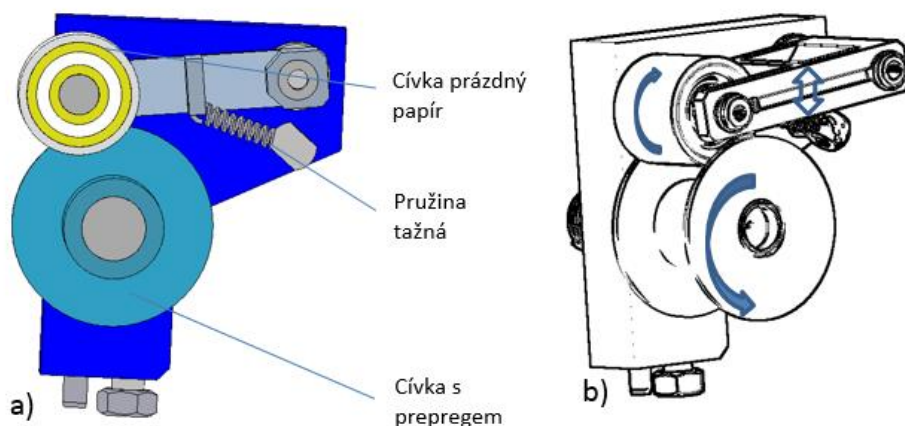


Obr. 53 Mechanismus a) Počínající uvolňování pásky b) Zacuchání pásky vlivem výrazné změny převodu navíjecího mechanismu

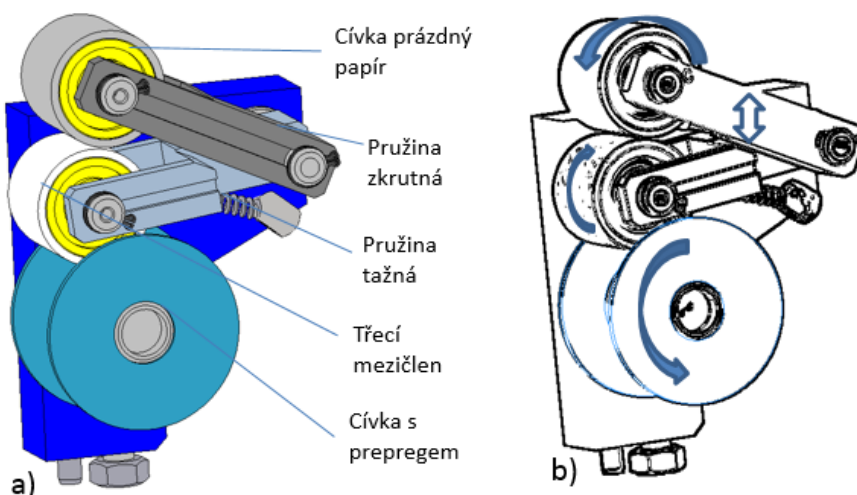


Obr. 54 Zničení celého opletu zamotáním krycího papíru

Bylo tedy nutné navrhnout odvíjecí mechanismus, který bude průběžně reagovat na variabilní geometrii. Jak je možné vidět na konstrukčním návrhu Obr. 55 u varianty s přímým třecím převodem se cívka s navíjeným krycím papírem stává současně i členem převodu. Tento způsob, který využívá povrch vláken a papíru, vyžaduje vzhledem k relativně nízkému koeficientu tření mezi papírem a prepregem vysoké přítláčné síly tažné pružiny. Jako možnou alternativou se jeví možnost přidání třecího mezičlenu jako například měkká pryž, která má lepší přilnavé vlastnosti k oběma zmíněným materiálům. V daném případě tedy vzniká kontakt pouze mezi vláknem a pryžovým válcem a následně mezi pryžovým válcem a papírem navinutým na cívce, jak je možné vidět na Obr. 56.



Obr. 55 Navržené konstrukční řešení přímým třecím převodem



Obr. 56 Optimalizované konstrukční řešení s třecím mezičlánkem

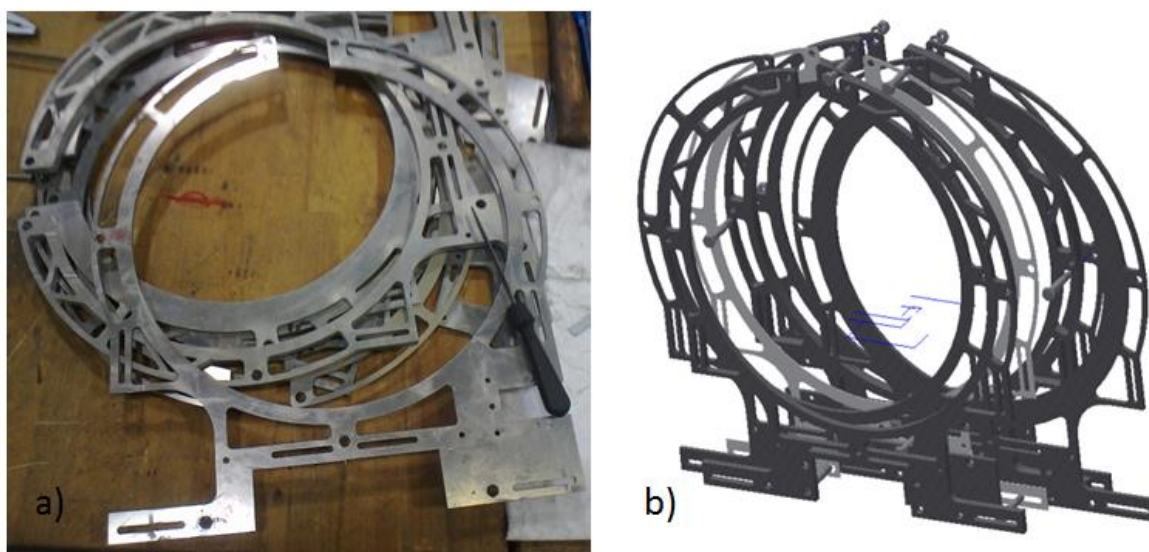
4.6 Konstrukce – navíjecí hlava

Navíjení je proces výroby kompozitů, jenž zachovává kontinuální vlákna vzájemně zarovnána po celé délce vyráběné součásti. Touto metodou vyrobené kompozity jsou nazývány jako pokročilé [42][56][58]. Koncept navíjecí hlavy je modifikovaný prototyp v současné době nejnovější technologie používané k navíjení vláken, určené pro výrobu rámců uzavřených tvarů. V této práci je prepregová páska šíře 5mm tažena z cívek umístěných na otočných kolech skrze tvarové kroužky na nenosné jádro variabilního průřezu. Trajektorie, pohyb a naklápění hlavy je pomocí matematického algoritmu optimalizována a řízena dle tvaru geometrie uzavřeného rámu. Změnu navíjecího úhlu a tím parametrů kompozitu je možné přímo ovlivnit změnou rychlosti posuvu hlavy a rotace oběžných kol, jak je více rozebráno v kap. 6.2.

Optimalizovaný konstrukční návrh výrobního zařízení ovíjecí hlavy, vychází z původní patentované technologie TUL [8][21] určené pro výrobu kompozitů tzv. mokrou cestou. Principem původní metody je, jak již bylo zmíněno v kap. 4.2, tvorba návinu suchých vláknenných filamentů současně z několika cívek na nenosné jádro v několika vrstvách a pod různými úhly. Následně, je takto

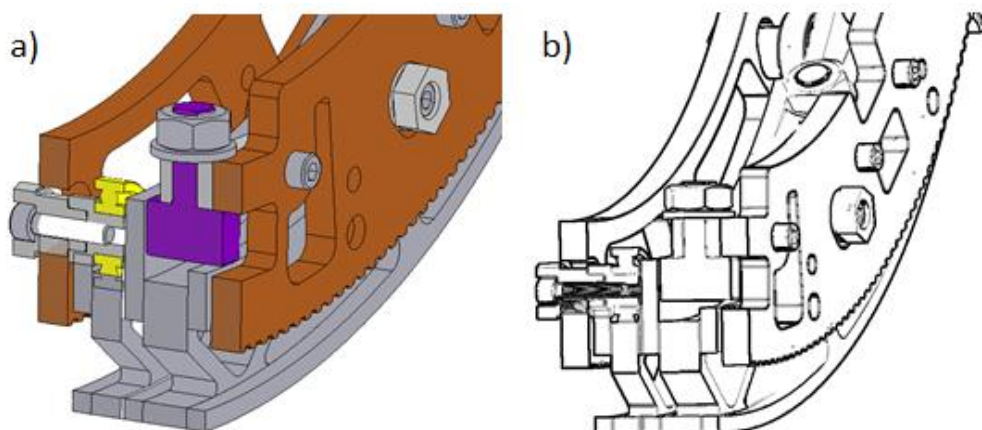
ovinutá součást v přesné tvarové formě zalita pryskyřicí, vlákna jsou zasyčena a vytvrzena. Zde je tedy zásadní problém nutnosti druhé technologicky optimalizované formy, jejíž návrh a výroba předurčují danou technologii pro větší objemy produkce.

Základním rozdílem nově navrženého ovíjecího mechanismu bude použití prepregových pásek, při práci s nimiž dostáváme vlivem lepivosti a nutného předepnutí mnohonásobně vyšší síly a reakce v celém zařízení. Největší účinek sil je promítnut do axiálního směru, pro který původní technologie neměla žádné specifické opatření, proto bylo nutné navrhnout nové výrazně zesílené díly nosného rámu a oběžných kol. Výsledný CAD model a výroba jednotlivých lamel, nosné sendvičové části zařízení, je na Obr. 57.



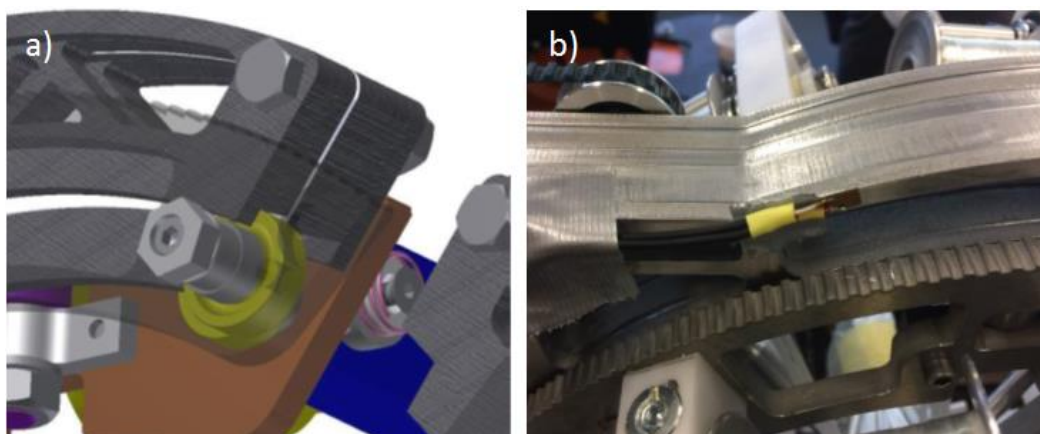
Obr. 57 Lamelový základní rám ovíjecího mechanismu a) Výroba b) Model

Navíjecí hlava je konstruována na bázi kruhového rámu a několika oběžných kol ve tvaru písmene C. Základní rám tvoří vodící drážky pro ložiska, ve kterých oběžná kola obíhají v definovaných kruhových drahách. Jak bylo zmíněno cívky s vysokopevnostními vlákny skrze hliníkové kroužky (kap. 4.4) ovíjí jádro rámu, které je roboticky taženo jejich středem. Vzhledem k velkému množství cívek a vznikajícím třecím silám, které jsou dány třením a lepivostí vláken a umocněny brzdícím mechanismem v odvíječi cívky, který zajišťuje nutné předepnutí vlákna je celá konstrukce zatížena poměrně velkou silou. Vlivem těchto axiálních sil, které jsou z oběžných kol prostřednictvím ložisek přenášena na základní rám, je daný rám výrazně deformován. Jelikož u původních vláken byla axiální síla zanedbatelná, byla zachytávána pouze radiálním kuličkovým ložiskem (Obr. 58 žluté). V rámci vyztužení a zesílení optimalizovaného dílu, byly přidány nové oběžné dráhy a ložiska zachytávající daná axiální namáhání (Obr. 58 fialové).



Obr. 58 Oběžné dráhy pro radiální a axiální ložiska

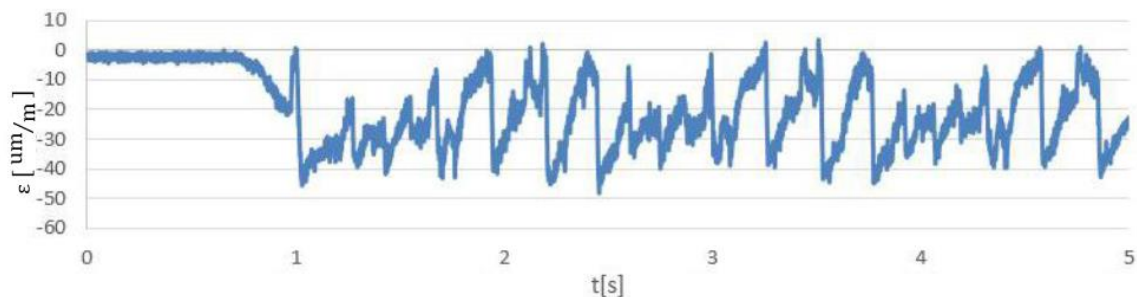
Z hlediska kinematického je rychlost otáčení oběžných kol 36 RPM a každé z kol se točí v jiném směru. K problému dále dochází v okamžiku, kdy ložisko v C části rámu opouští drážku a znovu se do ní vrací. V tomto okamžiku nastává výrazný ráz, daný jak deformací od působících zatížení tak drobnými konstrukčními i montážními nepřesnostmi.



Obr. 59 Oběžná kola: a) Místo přerušení dráhy a nárazu ložisek b) Místo měření deformace rámu

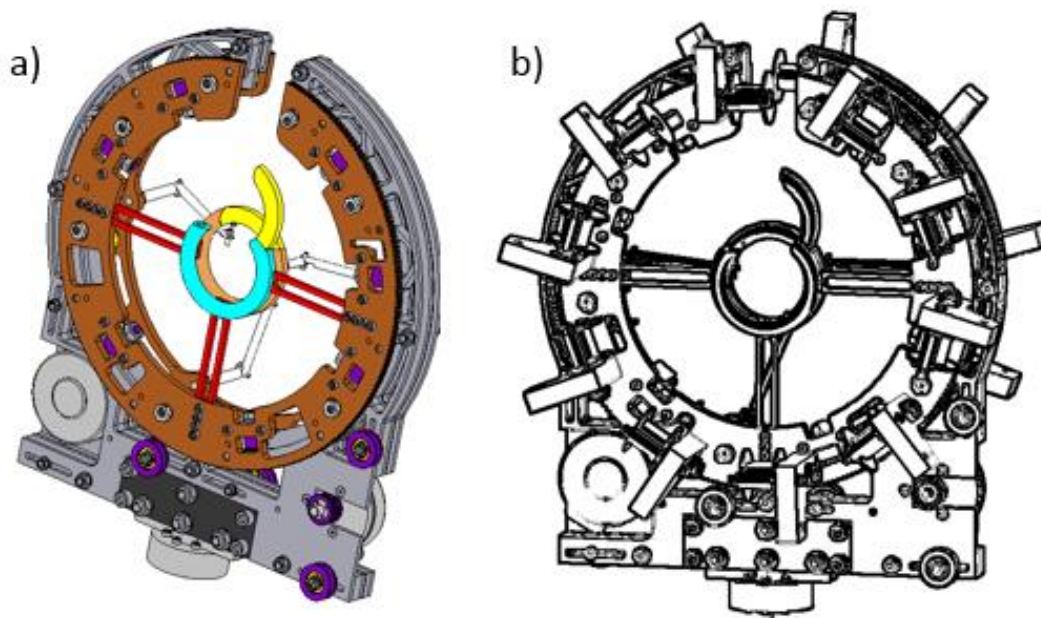
Na základě znalosti působících sil je možná predikce chování celé konstrukce během procesu. Rám je zatížen cyklickým ohybovým momentem, rázy a výraznými vibracemi způsobenými nárazy ložisek s frekvencí 0,2 Hz. Největší deformace logicky nastává v otevřené části těsně na koncích ramen, koncentrace napětí potom u kořene ramen – oblast naproti otevření „C“ profilu. Deformace byla měřena pomocí tenzometru, umístěného v místě maximálního napětí jak je zobrazeno na Obr. 59. Použitý tenzometr 3/120LY41 s citlivostí $\pm 0,2\%$, se jmenovitým odporem 120 Ω . Na základě naměřené deformace je s využitím Hookova zákona možné spočítat hodnoty napětí.

Graf níže (Obr. 60) zobrazuje časový průběh relativní deformace v místě přilepení tenzometru, dle simulace tedy v místech s největší velikostí deformace. Vzhledem k jednosměrnému smyslu zatížení, jsou ramena deformována jedním směrem a pro tlak zobrazené hodnoty záporné. Průměrná hodnota tlakové deformace je 22 μm . Vzhledem k vertikální pozici hlavy během procesu, spodní rameno nese celou tíhu rotujících kol.

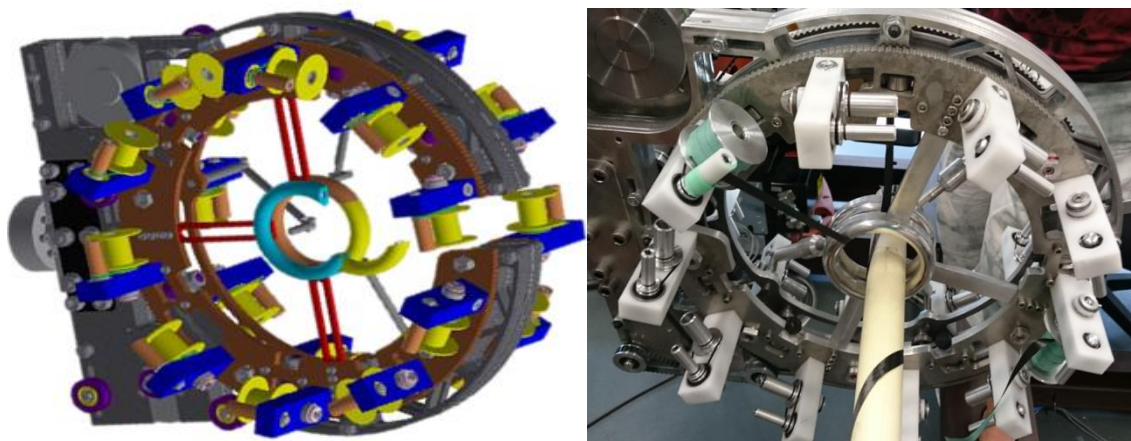


Obr. 60 Časový průběh deformací na nosném rámu

Na Obr. 61 níže je CAD model sestavy ovíjecí hlavy s průvlačnými kroužky a osazený držáky cívkového mechanismu. Na Obr. 62 je potom finální podoba navrženého, optimalizovaného a vyrobeného zařízení.



Obr. 61 a) Základní rám s oběžným kolem (oranžové) b) Rám osazený držáky cívek (koncept)



Obr. 62 Výsledná ovíjecí hlava a) CAD model sestavy b) První test

4.7 Závěr kapitoly – konstrukce zařízení k ovíjení

Tématem dané kapitoly byl průzkum známých řešení a návrh vlastního navíjecího mechanismu včetně periferií. V počátku kapitoly, byly představeny současné způsoby textilního oplétání a obalování dílů válcových tvarů. Následně provedeným patentovým průzkumem, byl zjištěno velký rozmach a nárůst patentů v dané aplikaci, tedy navíjení prepregů. Tento fakt potvrzuje i výraznou aktuálnost tématu disertační práce.

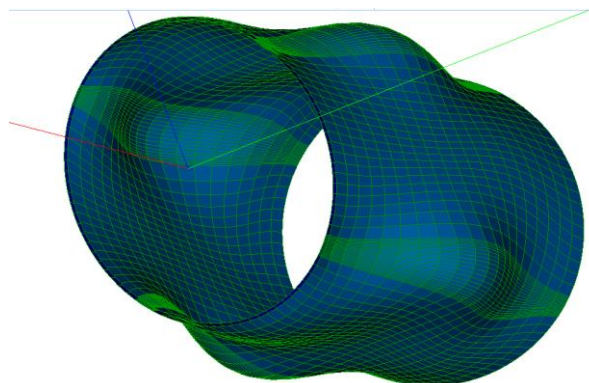
Nedílnou součástí konstrukce kompozitního rámu je i návrh nenosného jádra, které bude ovinuto prepregovými páskami. V kapitole byly popsány základní materiály i principy, jako vyjímatelná kovová a dřevěná jádra či vodou rozpustné materiály. Byla také navržena a otestována zcela nová, ve světě nenalezená metoda výroby jader s využitím 3D tisku z několika materiálů. Jako poslední zmíněná varianta konstrukce jádra byly testovány vypěňovací systémy, na bázi polyuretanu a epoxidu. Na základě provedených mechanických testů byl z daných pěn pro výrobu prototypů vybrán epoxidový vypěňovací systém Resoltech.

Třetí částí kapitoly byl návrh dílčích částí a celkové sestavy finálního optimalizovaného zařízení ovíjecí hlavy, vycházející z původního patentu TUL. Vzhledem k použití jiného materiálu, byla nutná zcela nová sendvičová konstrukce, s výrazně vyšší celkovou tuhostí a přidáním ložisek i oběžných drah, pro zachytávání axiálních sil, jejíž pevnost a celkové deformace byly experimentálně monitorovány. Za účelem výroby uzavřeného rá byly také navrženy otevírací průvlačné kroužky. Posledním výrazným konstrukčním zásahem byly mechanismy odmotávání cívek, kdy bylo nutné vyřešit navíjení krycího silikového papíru, při současném problému proměnného převodového poměru, způsobeného odmotáváním pásky. Daný problém byl vyřešen přidáním třecí vazby, inspirované obdobnými principy používanými v konstrukci textilních strojů.

5 Výpočty, experimenty a optimalizace kompozitních struktur

Jedním ze současných klíčů jak docílit redukce nákladů, zvýšení kvality a efektivní využití kompozitního materiálu, je využití moderních CAE technologií [10][11][14][22]. Bez pokročilých výpočetních systémů, již vzhledem ke komplexnosti a požadavkům na finální díly již prakticky není možná realizace efektivního návrhu.

Pro prvotní mechanický výpočet vytvořené geometrie trubky s proměnlivým průřezem a budoucí výpočty celého kompozitního, bylo plánováno využít numerickou Open Source platformu – Code_Aster [101]. Výhodou podobného software je především možnost tvorby vlastního kódu a jasné zadávání všech vlastností, včetně okrajových podmínek k vytvořeným geometrickým skupinám. V době psaní této práce ovšem dané kódy, především pro výpočty ve zmiňované oblasti procházejí velkou transformací a kombinacemi jazykových lokalizací z francouzštiny do angličtiny, což zapříčinilo vzájemnou nekompatibilitu nalezených příkazů, skriptů, pluginů a jednotlivých verzí s preprocesorem Salome. Výrazně též chybí vazba na zkušenosti z odborné literatury a modely verifikované experimenty. V budoucích letech však, jak si autor dovoluji predikovat, se tato sada nástrojů stane výrazným hráčem na poli FEM programů, stejně jako to dokázal jeho sesterský Open-Foam využívaný pro simulace částic - proudění. Z toho důvodu, si tato práce zaslouží alespoň formou přílohy (Příloha_1) zobrazit zdrojové kódy prvních pokusů o definici ortogonálního materiálu v tomto slibném prostředí. S ohledem na uvedené zkušenosti, se pro další práci jako nejvhodnější variantou jeví využití komerčního pre-procesoru určeného pro kompozitní materiály, konkrétně ACP Ansys Inc.



Obr. 63 Síťovaný model v programu Salome (preprocesor pro Code_Aster; CAE Linux)

5.1 Aplikace FE pro kompozity

Metoda konečných prvků (FEM) je mocný nástroj, bez něhož dnes není možné efektivně navrhnout kompozitní součásti. Předpověď mechanického chování kompozitů je velmi složitý problém, jelikož proces zahrnuje orientaci vláken, rozhraní vrstev, soudržné síly, pravděpodobnosti porušení atd. Numerická analýza umožňuje odvodit různé deformační energie uložené v materiálových směrech složek a vrstvách kompozitních materiálů [19][102]. Pokročilé metody by mohly dokonce popsat celý proces poškození od jeho zahájení až po úplné selhání kompozitní struktury [20]. Nezodpovězenou otázkou, na kterou jak zmínil např. i Gruber [103] není možné nalézt jasnou odpověď, je jak přesná by měla daná simulace kompozitního dílu být. Uvážíme-li již prvopočáteční vnesenou chybu ve vstupních materiálových a okrajových

podmínkách a odlišnost mezi modelem a reálným dílem, může mít následné precizní vyhlazování sítě, optimalizace výpočtu, variace formulací a teorémů, detekce integračních bodů, parametry kritérií porušení může mít další, často časově velmi náročné zpřesňování modelu zásadní smysl?

Metoda konečných prvků obecně umožňuje přibližné numerické řešení diskretizovaných úloh s definovanými okrajovými podmínkami. Dle Zienkiewicz [86] jsou možnosti využití a praktické aplikace výpočtů pomocí konečných prvků neomezené a v mnohém zastoupí experimentální problémy, především s ohledem na přesnost, nízké náklady a univerzálnost.

Těleso je definováno třemi posuvy, šesti přetvořeními a šesti napětími. Uvedený systém rovnic musí být doplněn okrajovými podmínkami - geometrické a silové. V daném místě a směru na povrchu je možné předepsat vždy pouze jednu z uvedených podmínek. Geometrické okrajové podmínky vyjadřují zadání posuvů na části povrchu tělesa Ω . Tyto posuvy jsou předem známy (z charakteru uložení tělesa, známých posuvů okolních těles apod.), označme je u , v , w [104]. Geometrické rovnice jsou vztahy vytvářející vazbu mezi složkami posuvů a přetvoření, tedy složky tenzoru deformace. Chceme-li popsat deformaci celého tělesa, musíme pro každý bod tělesa popsat polohu též po deformaci. Tyto rovnice se pro případ malých deformací nazývají Cauchyho rovnice [105].

Diskretizace spočívá v rozdělení sledované plochy či objemu na výpočetní síť složenou z konečného množství prvků a uzlů. Na jejich tvaru, počtu a stupni polynomu popisu daného prvku potom závisí přesnost celého výpočtu. V oblasti numerických výpočtů označujeme úlohu jako konvergentní, pokud lze získat libovolně přesné řešení [75] [86] [87]. Požadovaný počet iterací říká, kolikrát se má pokusit o přepočítání výsledků. Kriterium „zastavení“ naopak říká kdy zastavit přepočítání úlohy. Procesor porovnává maximální hodnoty zadané veličiny ze dvou po sobě jdoucích výpočtových kroků a je-li tento rozdíl v procentech nižší, než zadaná hodnota, zastaví přepočty výsledků a prohlásí poslední výpočtový krok za platný. Tento přepočítání slouží k zjištění, zda metoda konvergovala či nikoliv. Příliš volná konvergenční kritéria mohou vést k nepřesným výsledkům, a naopak příliš těsná kritéria mohou vést k neopodstatněnému zvýšení výpočtové náročnosti nutné k dosažení zbytečně přesných výsledků dle [86]. Především pro tenké desky a skořepiny (obvykle používané pro modelování kompozitů) nemusí být splněny tzv. podmínky spojitosti, obvykle vyžadované u standardních modelů a řešení přesto konverguje. Pokud by ovšem nebyla splněna ani podmínka úplnosti, řešení zkonvertuje k výsledku chybnému. Dané metody se následně mohou ověřit pomocí tzv. patch testů na prvku zatíženém předepsanými posuvy, které odpovídají stavu konstantní deformace na idealizovaném prvku.

Implicitní a explicitní algoritmus MKP

Termín implicitní, resp. explicitní konečné prvky se vztahuje ke způsobu časové integrace pohybové rovnice. Algoritmus samotného sestavování pohybové rovnice je s metodou jejího následného řešení úzce svázán a je možné hovořit o různých variantách algoritmu MKP.

U implicitního algoritmu je schéma nepodmíněně stabilní, to znamená, že stabilita řešení nezávisí na délce kroku Δt [85]. Naopak u Explicitního algoritmu [105] jsou posuvy v čase t_{n+1} získávány z pohybové rovnice, psané vždy pro předchozí časový okamžik t_n . Daný algoritmus je tedy stabilní pouze podmíněně při dodržení dostatečně malé délky časového kroku.

$$\Delta t < \Delta t_c \quad (5.1)$$

kde Δt_c je kritická délka časového kroku. Závisí na velikosti elementů v dané síti a rychlosti šíření napěťových vln ve vyšetřovaném prostředí. Velikost kritické délky časového kroku je možno určit z Courantova kritéria [87][105], která má následující tvar:

$$\Delta t_c = \frac{h}{\sqrt{E/\rho}} \quad (5.2)$$

kde h je charakteristický rozměr nejmenšího prvku sítě, E je modul pružnosti v tahu a ρ je hustota materiálu. Fyzikálně lze kritickou hodnotu časového kroku definovat jako dobu průchodu napěťové vlny nejmenším prvkem sítě.

Ze srovnání vlastností obou typů algoritmů vyplývá vhodnost explicitního algoritmu v případech simulace velmi rychlých dějů. Nejdůležitější aplikace explicitních konečných prvků v oblasti výpočtové simulace bariérových zkoušek automobilů, dynamické únosnosti leteckých konstrukcí, důsledků explozí či průstřelů ocelových konstrukcí a podobných dějů. Prakticky vždy jsou tyto procesy spojeny s velkými materiálovými i geometrickými nelinearitami.

Jednotlivé modely MKP [87] obecně souvisí s variačními principy mechaniky včetně principu virtuálních prací (virtuálních posuvů, virtuálních sil), které taktéž udávají základy většiny přibližných metod mechaniky. Z principu virtuálních posuvů se následně odvozuje Lagrangeův variační princip, z principu virtuálních sil potom Castiglianův variační princip.

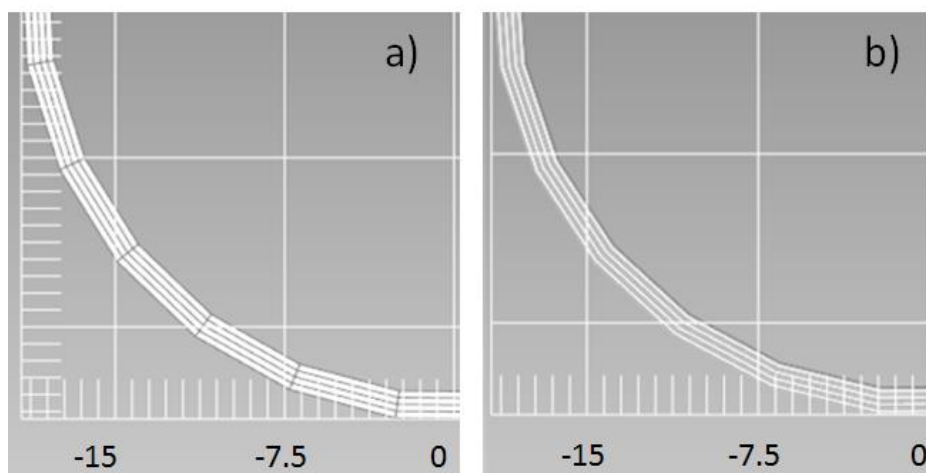
Lagrangeův princip lze vyjádřit tak, že ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, který dává potenciální energii systému minimální hodnotu. Potenciální energie celého systému je potom rovna potenciální energii deformace (energie napjatosti tělesa) a potenciální energii vnějších sil. Přípustný stav je definován po částech spojitými derivacemi v celé řešené oblasti. Energetické přístupy jsou aktuální především v souvislosti s numerickými metodami. Přístup energetický, popř. variační, je také označován jako tzv. slabá formulace [105]. Tento obecný princip se v oblasti MKP využívá především ke konstrukci specifických prvků a pravděpodobnostní variantě MKP [104].

Castiglianův variační princip potom tzv. rovnovážný model, který je založen na aproximaci podle napětí. Je tedy vázán na virtuální síly a produktem je matice poddajnosti. Jelikož algoritmus silové metody je dosti komplikovaný, přechází se dle Šejnohy [87] zpravidla k inverzní matici poddajnosti a tím na deformační variantu řešení využívané v naprostě většině FE systémů.

Kontakt

V případě modelování interakce řešeného kompozitního dílu s jinými tělesy, se jedná o tzv. kontaktní úlohu. Kontaktní problém je v zásadě nelineární, jelikož před okamžikem kontaktu neexistuje žádná kinematická podmínka (pouze silová a ta je často nulová), ale během kontaktu skokově vzniká kinematická vazba, která zabrání vzájemné penetraci kontaktních ploch. Správné nastavení kontaktu je z hlediska nastavení úlohy jednou z nejpodstatnějších, ale i nejtěžších věcí. Existuje mnoho různých formulací (Lagrange, Augmented, Penalty atd.) a kombinací určujících prvků (určení integračních bodů, kontaktní tuhost, povolená penetrace, symetričnost). Velkým problémem je, že každá kombinace daných parametrů sice dá „nějaký“ výsledek, ovšem často zcela nesmyslný. Proto je mimořádně nutné postup přísně verifikovat a je požadována velmi pokročilá znalost dané oblasti modelování [85][106][107] i jednotlivých formulací teoretické mechaniky. Současně pravděpodobně neexistuje globálně platné pravidlo a každá nastalá situace musí být tedy posouzena zcela individuálně. Jelikož o principu kontaktu vrstvených shellů, solidů a jejich vzájemné interakci by se dala napsat celá kniha, je u řešených úloh zmíněn použitý přístup, který byl autorem vyhodnocen jako nejvhodnější. Současně byly u modelu mezivrstvy mezi jednotlivými laminy považovány za ideální - to znamená standardní mechanické parametry použité matrice popsané kohezními prvky, bez uvážení například delaminace či jiných mezifázových a interlaminárních poruch.

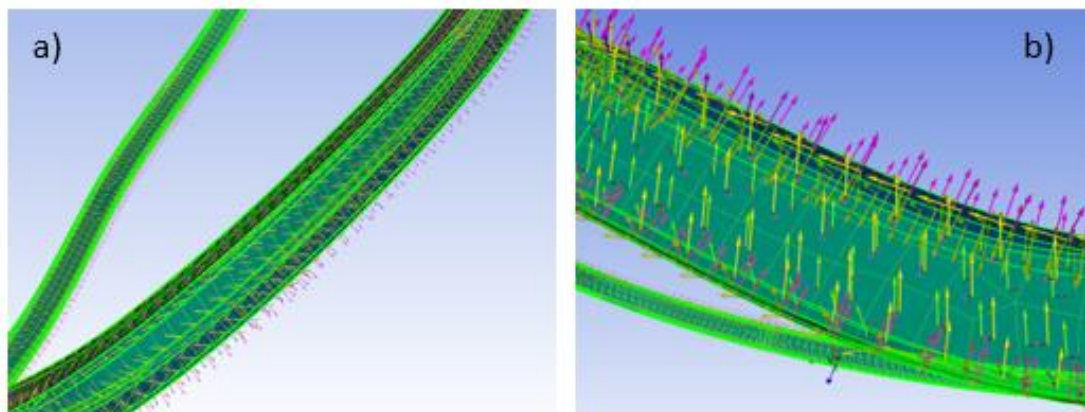
Jak již bylo zmíněno v kap. 3.4, jednou z otázek při modelování kompozitu je volba mezi tlustostěnnou deskou a skořepinou. Vizualizace prvků, sestavených dle daných přístupů je zobrazena na Obr. 64. První z uvedených, Midlinova teorie tlustých desek se oproti deskám tenkým odlišuje v chování normál vůči střednicové rovině. Ty sice i po deformaci zůstávají přímé, ovšem již nejsou kolmé ke střednici dané desky. Daný model se zdá vhodný zejména z hlediska následného post-procesingu, detekce interlaminární poruchy, delaminace, kritéria selhání apod.



Obr. 64 Příklad modelu navinuté části rámu: a) Tlustostěnná deska b) Vrstvená skořepina - shell

Skořepina potom, jako těleso s obecně zakřivenou střednicovou plochou vyžaduje dostatečně přesnou aproximaci geometrického tvaru (Obr. 65). Tu je možné zajistit jemnou sítí rovinných stěnodeskových prvků se šesti deformačními parametry v uzlu dle, které po částech kopírují tvar skořepiny [104]. Kromě rovinných prvků se rovněž používá stěnodeskových prvků s možností zakřivení střednicové plochy – např. osmiuzlový izoparametrický prvek, rozšířený o ohybové členy

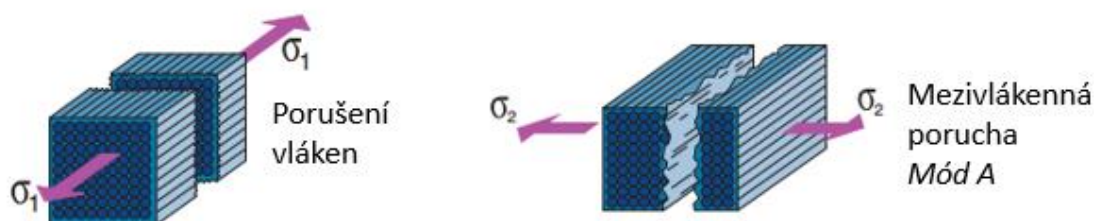
v prvcích matice tuhosti. V komerčních systémech MKP se proto obvykle nerozlišuje mezi stěnodeskovým a skořepinovým prvkem – tentýž typ může být použit v obou případech. V případě skořepiny je však třeba mít na paměti, že tenkostěnný charakter problému v mnoha případech vede k porušení předpokladů o linearitě a vyžaduje tedy nelineární algoritmus řešení (velké změny geometrie, ztráta stability). Dle vysvětlení Šejnohy [75] stěnodeskové prvky, pracující s vektorem obsahující parametry ryzí deformace, nevystihují přemístění prvku jako přemístění tuhého tělesa. Skořepinové prvky jsou lepší zejména z hlediska dosažení konvergence během řešení, zejména pro kontaktní úkoly. Pro kontakt mezi solid a shell elementy může být této výhody ovšem dosaženo pouze pokročilou, časově náročnou a velmi přesně definovanou formulací kontaktu.



Obr. 65 Vrstvený model kompozitu s vyznačením normálových směrů v advanced composite preprocesoru a) Tvar rámu b) Detail směrů a normálových vektorů

5.2 Testování pevnosti v tahu

Nejdůležitější úlohou při výrobě a návrhu kompozitů je dle Lavala [91] správné předpovězení rozložení napětí. Pokud dokážeme určit napětí ve vrstvách, je následně s využitím vhodných kritérií možné stanovit pevnost jednotlivých vrstev. Napětí v nejslabší vrstvě, kde dojde prvnímú porušení, obvykle nebývá mezi pevnosti celého laminátu. Jako základní mechanická zkouška u konstrukčních materiálů i kompozitů, je především z hlediska jednoznačnosti získaných dat, jejich interpretace a možnosti porovnání využívána tahová zkouška. Mezi její nevýhody by se dal zmínit fakt, že se jedná o zkoušku destruktivní (Obr. 66) a při porovnání testování kompozitů s např. oceli také zkoušku složitou a značně nákladnější.



Obr. 66 Mechanismy porušení kompozitu při zatížení tahem

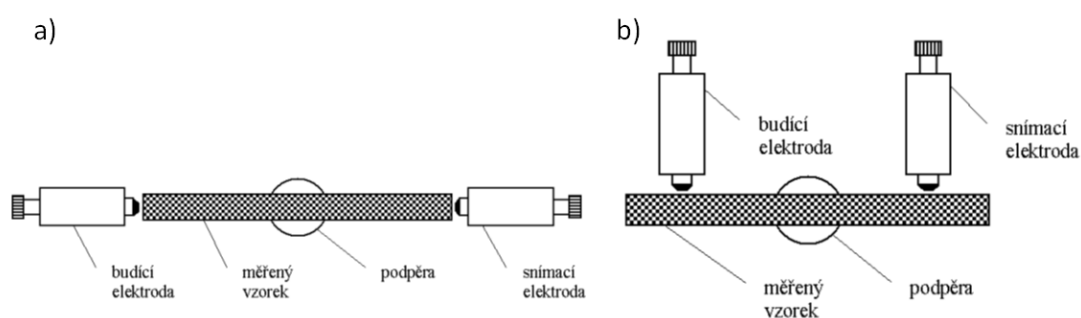
Principem a zároveň kritickým bodem, je upnutí obou konců testované části do čelistí a zatěžováním tahovou silou. Během zatěžování je zaznamenána jak velikost síly, tak celková deformace. U běžných konstrukčních materiálů s uvažovanou anisotropií mechanických vlastností

existuje analogie, kdy tahová zkouška a stanovení mechanických parametrů je provedeno pro zkušební tyčinku (těleso) definovaného kruhového či obdélníkového průřezu a na základě těchto výsledků dostáváme mechanické parametry daného materiálu a následuje jen přepočtení na reálnou součást, s ohledem na technologické a geometrické parametry.

Oproti tomu u kompozitů neplatí jednoduchá komutativní úvaha, kdybychom změřili jednu vrstvu a s ohledem na počet a uspořádání přičetli další. Tento úkaz není dán pouze výraznou anisotropií ve směru vláken, či útku a osnovy, ale též vznikajícím synergickým efektem při kombinaci vláken různých směrů a matrice a současně vzájemným adhezním a tečným napětím. Nastíněným problémem při testování tahových vlastností kompozitů, je možnost jejich upnutí. Přesto že např. ploché kompozitní destičky upneme do plochých čelistí relativně snadno, je stále nutné být obezřetní na vznikající tlakové napětí v upínacích čelistech, aby nedošlo k příčnému oddělení vláken a matrice či delaminaci jednotlivých vrstev. Mnohem větší problém nastává při testování tvarových kompozitních dílů průřezu např. oválu či kruhu (často se též setkáváme pouze s mezikružím, tedy dutým skořepinovým materiálem a např. vnitřní textilní či pěnovou výplní). Materiál je vlivem anizotropie vlastností schopen přenášet velická napětí ve směru vláken, problémem je přenést napětí příčná a vůbec největším problémem je tzv. tvarová pevnost, která oproti podélnému zatížení dosahuje řádově nižší hodnoty. Požadované napětí, které by teoreticky testovaný kompozitní díl upevnilo, jej pravděpodobně dříve rozdrťí, případně dojde k delaminaci po vrstvách. Dále např. dle [108][109][110] dochází např. u profilovaných vzorků v zakřivených částech ke koncentracím napětí a významnému poklesu pevnosti v tahu. Při testování nesmí především z hlediska velmi malé tažnosti daných materiálů docházet k prokluzu v čelistech, deformaci vzorku ani k dalším nepřesnostem měření.

Vyhnálek se v práci [111] cílené na tahové vlastnosti pokoušel řešit metodu upnutím s vyložkováním pomocí vloženého smirkového papíru, dosažené hodnoty se zde však nedostaly přes 500 N, což neodpovídá ani desetině očekávané pevnosti. Odzkoušeno bylo i použití velurové tkaniny s lepidlem a následným upnutím do hydraulických čelistí. Výsledkem tohoto pokusu se však hodnota síly při vyklouznutí zvýšila jen přibližně dvojnásobně (1 100 N). Posledním zmíněným pokusem bylo dle standardních postupů tyče upevnit do tvarovaných přípravků. Těmito přípravky byly zvoleny ocelové trubky, do kterých byly tyče zality pomocí epoxidové pryskyřice. Tento pokus, i když byl patrně nejúspěšnější, ztroskotal na neúspěšných pokusech o vytvoření soustředné a souosé vazby mezi upnutými částmi. Z toho důvodu tedy docházelo k nerovnoměrnému zatížení materiálu a jeho porušení v důsledku jiných, než čistě tahových zatížení. Pro porovnávání modulů pružnosti v tahu je nutné uvést nalezenou závislost, kdy s přibývajícím obsahem karbonových vláken stoupá hodnota modulu pružnosti až do bodu fyzikálního maxima a poté dojde k prudkému poklesu díky zhoršenému prosycení a ztráty vazeb disperze a matrice. Dalším, kdo se zabýval testováním kompozitní tyče jako celku, byl Tariq [64], který oboustranně upnutou na nenosné jádro navinutou tyč testoval na krut. Ve své práci předložil logické závislosti na úhlu náviny, reprezentované podílem krouticího momentu a navíjecího úhlu, otázkou však zůstává vypovídající hodnota daného nástroje mimo úhly ležící uprostřed daného intervalu (0, 90°), kdy při přiblížení úhlu k těmto dvěma bodům, by dané hodnoty dostávaly skokově extrémní hodnoty. V práci ovšem vůbec nezmiňuje, zcela zásadní parametr a tím je způsob upnutí a vyvození zatěžujícího momentu, jenž má na působící napětí v jednotlivých vrstvách zásadní vliv.

Další možností stanovení mechanických vlastností, je použití stanovení frekvencí vlastních kmitů procházejících deskou [113]. Dle Vozkové [112] se v této oblasti nejčastěji využívají teorie podle Lagrangea, Euler-Bernoulliho, Rayleigha a Timošenska (Obr. 67). Ve všech případech se jedná o kmitání tenkého deskového nosníku. Teorie Lagrangeho je základem pro podélné kmitání. Teorie Euler-Bernoulliho je výchozí pro příčné kmitání a Rayleigh s Timošenkem tuto metodu doplnili o korekce. Na základě této metody lze z rezonančního spektra frekvencí podélných mechanických kmitů určit podélný modul a Poissonovu konstantu. Na základě spektra kmitů příčných, je dále možné získat smykový modul. Jak uvádí [114][115][116] je výhodou této metody velká přesnost výsledků, relativní nenáročnost experimentu a její nedestruktivnost. V reálu je tento experiment postaven na bázi budících elektrod se střídavým napětím o amplitudě 400 V a rozsahu budící frekvence 10 - 100 kHz. Testovaný vodivý vzorek se uzemní a působením budící elektrody a vznikající elektrostatische síly, vznikají ve vzorku mechanické kmity. Na jedné straně dochází tedy k buzení, na straně druhé ke snímání polohy což je možné vyjádřit jako změnu elektrické kapacity mezi elektrodou a vzorkem. Každé těleso, dosahuje při určitých specifických frekvencích maximální amplitudy, tzv. rezonanční frekvence, jenž jsou závislé především na mechanických vlastnostech daného materiálu, geometrii a v neposlední řadě na okrajové podmínce upnutí.



Obr. 67 Schéma měření rezonančních frekvencí a) podélných b) příčných kmitů [112]

Jako alternativní varianta aplikovatelná pro izotropní materiál je dle Puchenger [102] vzorek zavěšený z obou konců na uhlíkových vláknech tak, že vlákno má vždy jednu oporu pevnou, obtočí se kolem daného profilu a vrací se zpátky do piezometrického budiče, kde je upnut. Na jedné straně takto dochází k pozvolnému pootáčení a tím buzení kmitů, na straně druhé s určitou prodlevou dostáváme na piezometrickém snímači signál přenesený. Dá se tedy říci, že stanovujeme přenosovou charakteristiku testovaného členu. Využití této metody je ovšem zatím omezeno na čistě izotropní materiály.

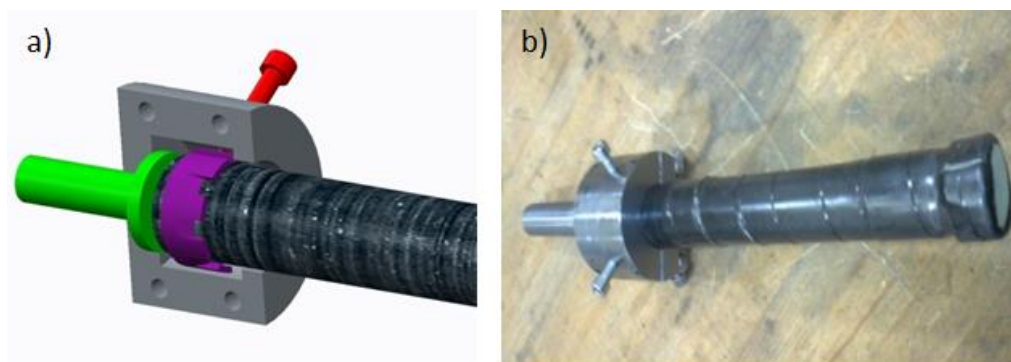
5.2.1 Lepení

Základní možností spojení kompozitní tyče a kovové příruby vhodné k upnutí je lepení. Pro výpočet lepené plochy, vycházíme z představy přenosu tečného napětí prostřednictvím povrchu lepené válcové plochy. Pro zajištění adhezního spojení je možné využít profesionální dvousložková lepidla nebo dle [111] pryskyřici. Jak již bylo řečeno, reálná omezení představují především technologické a konstrukční požadavky na zajištění soustřednosti a sousostnosti upnutí v čelistech a současně testovaným vzorkem. I přes tento fakt, se ovšem dají tímto způsobem dosáhnout z testovaných metod nejvyšší síly do uvolnění. Dalším problémem je, především při použití lepidel

značná finanční nákladnost. Jako zcela ideální je v tomto případě spojení chemické, kdy především na základě vzniku materiálových eutektik a difundace na rozhraní jednotlivých prvků a fází, dostáváme velmi vysoké pevnosti. Tato varianta je ovšem použitelná pouze u kovových kompozitů.

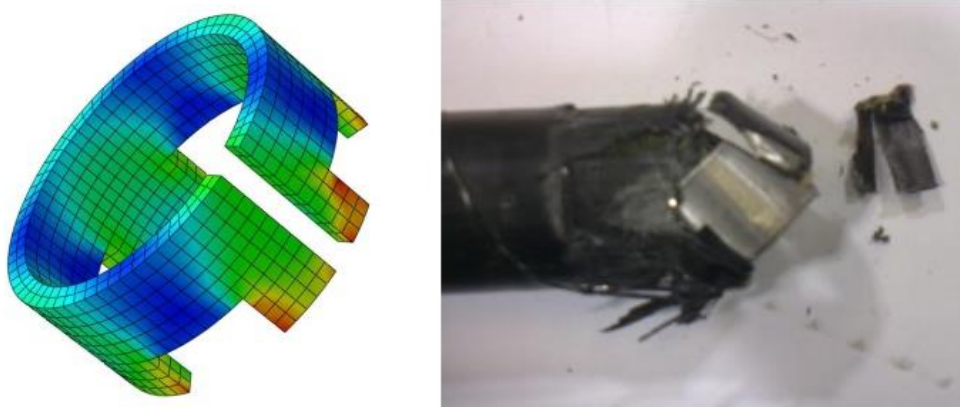
5.2.2 Idea_1 - Korunka

Principem této metody bylo již při výrobě zakomponovat do obou konců kompozitní trubky ocelovou přírubu, jejíž parametry fyzikálně umožní celou komponentu upnout (Obr. 68). Při předpokládané hodnotě zatížení 70 kN by měrný tlak v kontaktním místě výstupků korunky dosahoval 370 MPa, což je hodnota, kterou by použitý ocelový materiál měl vydržet.



Obr. 68 Upnutí kompozitní tyče pomocí „upínací korunky“ a) CAD model b) Obrázek sestaveného dílu

Celý koncept bylo nutné nejdříve ověřit pomocí MKP. Jednalo se především o mechanickou kontrolu vzniklých napětí a kontaktních tlaků na jednotlivých dílech a korunce pomocí kontaktního MKP modelu, kdy daný koncept by měl zatížení zvládnout.



Obr. 69 a) Kontaktní napětí přenesené na korunku (Legenda: červeně Re oceli 400MP)
b) Neúspěšný experiment vytržená korunka při 30 kN

Upnutí s využitím vložené ocelové korunky čelně opřené o tělo upínací čelisti se ovšem během testu ukázalo jako nevhodné. Svedení pramenů vláken mezi výřezy kroužku vedlo již při zhruba 30 kN k jejich nerovnoměrnému zatížení, což mělo za následek nerovnoměrné silové působení a vzniklou unilaterální deformaci se současným vytržením kroužku z vláken (Obr. 69).

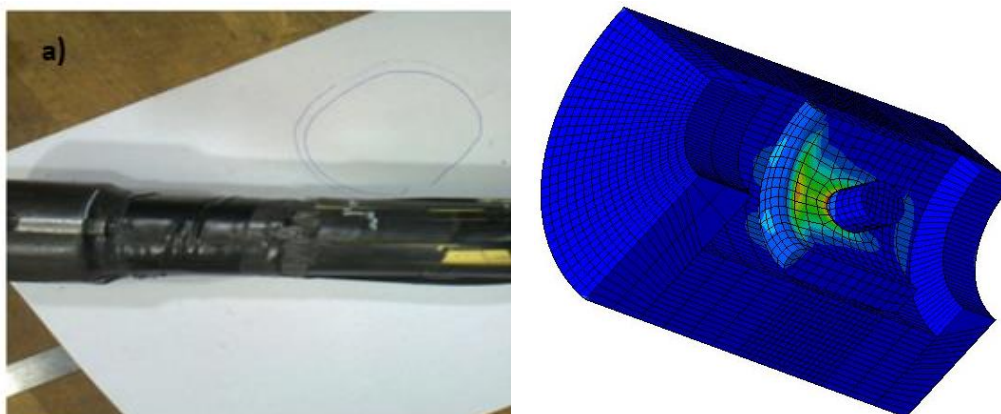
5.2.3 Idea_2 - Kroužek

Na základě poznatků z předchozího testu bylo nutné sestavit zařízení, kde budou vlákna spojitě rozložena po celé ploše kroužku bez jejich nerovnoměrného svedení do několika pramenů. Současně bylo zamezeno přímému kontaktu přidavného kroužku a upínací čelisti, čehož je možné docílit doplněním mezičlánu - ocelových kolíků (Obr. 70). Prvním předvýpočtem bylo ověření fyzikální proveditelnosti návrhu - pojistných kolíků na stříh.



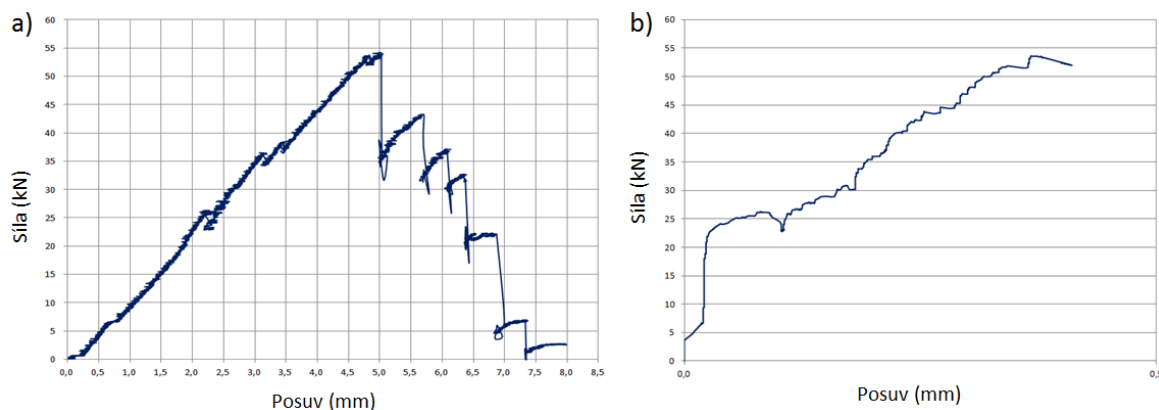
Obr. 70 Model upnutí do kroužku s kolíky a připravená trubka se zataveným kroužkem

Po základě pevnostní kontroli jednotlivých dílů, bylo nutné posoudit celou sestavu pomocí numerického modelu. Jednalo se především o kontrolu deformace uložení kolíků a celkové napětí v kroužku (Obr. 71). Simulace byla řešena pouze pro jednu čtvrtinu s využitím rovinné symetrie.



Obr. 71 a) Tyč po provedení tahové zkoušky b) Numerický model napětí v upínací části, upínacím kroužku a střížném kolíku (Legenda: červeně R_e oceli 400MPa)

Nejvyšší hodnota napětí vznikla na okraji otvoru v kroužku a čelisti, kde bylo pomocí kolíku přenášeno 1/4 z celkového napětí. Lokálně bylo v tomto místě dosaženo 900 MPa, ovšem vzhledem k elastickým deformacím a lokálnímu zpevnění v materiálu je možné očekávat hodnotu nižší, bez tak vysoké lokální koncentrace. Na povrchu těla kolíku vzniká nejvyšší smykové napětí 600 MPa, jenž by ocel v pseudostatickém zatížení měla vydržet. Na Obr. 72 je výsledný tahový diagram z čelistí a extenzometru upevněném na zkušební tělese. Použitý extenzometr, založený na principu posuvného inkrementálního snímače s rozlišovací schopností 0,001 mm, byl upevněn pomocí elastických kroužků.

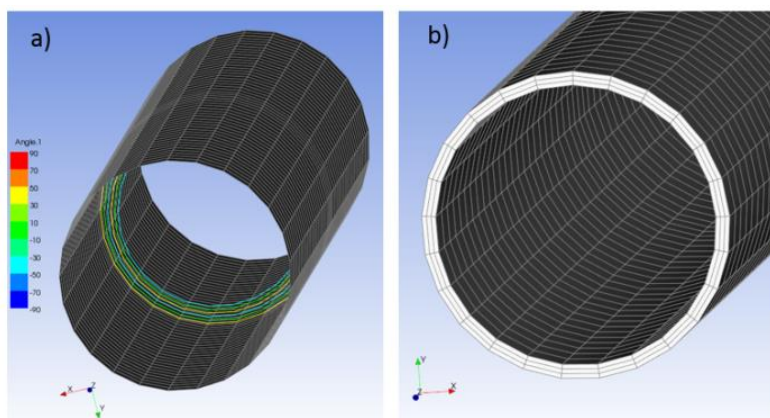


Obr. 72 Diagram tahové zkoušky kompozitní tyče měřený na: a) upínací čelisti b) extenzometru umístěném na trubce

5.2.4 Numerické ověření

Jak již bylo zmíněno problém testování kompozitních dílů na tah, je obecně umocněn extrémní pevností ve směru vláken a tvarovou křehkostí tenkostěnného profilu. Z toho důvodu je dle zkušebních standardů testování E pro kompozit, přesné pouze v malém rozsahu. Z toho důvody byly provedené experimenty určené pro porovnání s výpočtem pro verifikaci matematického a materiálového modelu pouze v řádu mm, kdy nezanese chyby způsobené delaminacemi, porušením atd [108] [110].

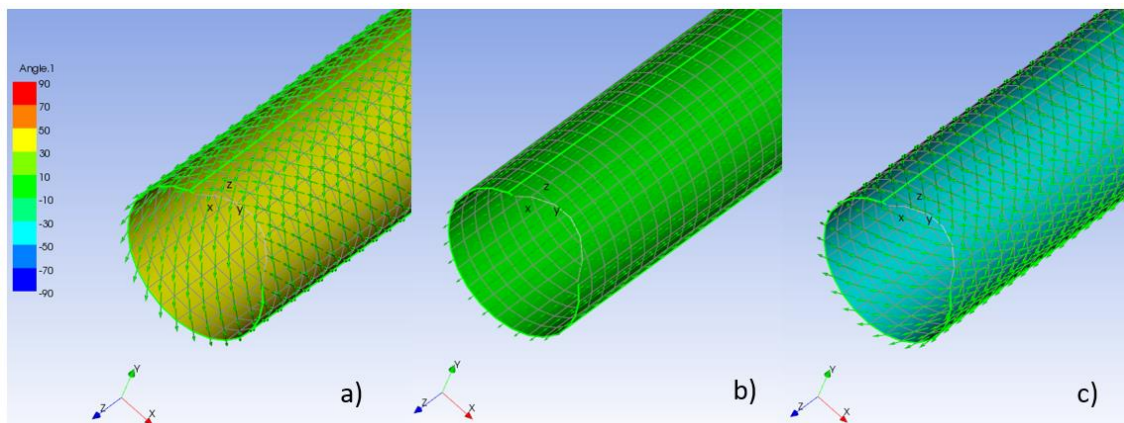
S ohledem na skutečnosti a domněnky zmíněné v závěru kap. 3 byl model kompozitu sestaven dvěma způsoby. Prvním způsobem je vrstvený shell (Obr. 73a). Tato metoda se dá považovat za jednodušší z pohledu na konvergenci řešení. Nevýhodou oproti tomu je větší náročnost nastavení periferií modelu jako kontakty, mezivrstvé rozhraní atd. Druhou možností je solid model, který obsahuje jednotlivé vrstvy s fyzicky reálnou tloušťkou a parametry (Obr. 73b). Tento názor je ovšem založen na výsledcích autora a dají se najít jak souhlasné tak protichůdné názory, upřednostňující např. výpočty pouze skořepinou.



Obr. 73 Dva základní přístupy použité při vytváření vrstvených modelů: a) Shell b) Solid

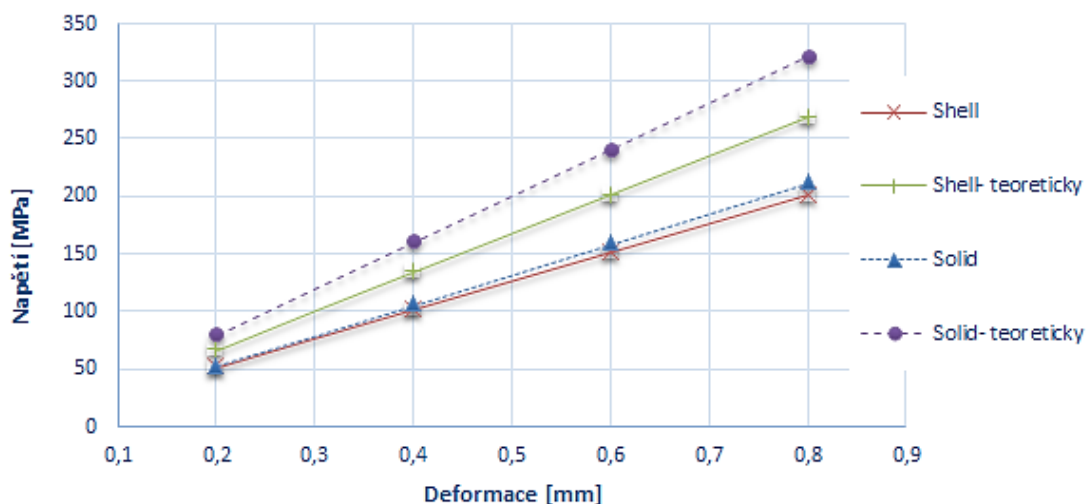
Pro řešení byly vybrány všechny elementy sítě. Souřadný systém vláken (Obr. 74) byl řízen pomocí směrových vůlců dle globálního UCS a Z osou (nulovou) direkcí ve směru osy rotace trubky.

Koncové hrany trubky byly vzdáleně zafixovány pro všechny 3 posuvy z jedné strany a s jedním DOF s definovaným posuvem rozděleným do 4 časových kroků ve směru Z. Jako nejvhodnější způsob k určení celkové síly, bylo její stanovení výpočtem reakce v pevné podpoře. Následně, na základě známého průřezu bylo možné stanovit tahové napětí.



Obr. 74 Zobrazení referenčních směrových vektorů jednotlivých vrstev

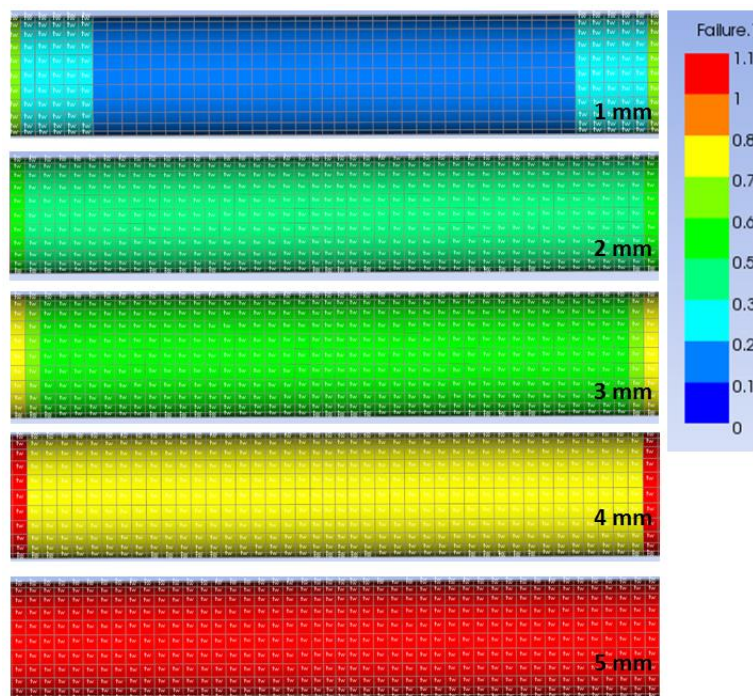
Na Obr. 75. je možné vidět porovnání výsledků pro zmíněné Solid – Shell modely, kde je zřetelná vyšší tuhost solidu, založena na principu tlusté desky a její příčné deformaci po tloušťce. Zajímavým pohledem je porovnání reálného a “teoretického” modelu, kdy model teoretický označuje mechanické vlastnosti dílu udávané výrobcem, zatímco reálný je založen na materiálovém modelu nafitovaném dle reálných testů.



Obr. 75 Ověření tahových vlastností při malé deformaci

Model, provedený pouze na vlastnostech deklarovaných výrobcem, byl významně odlišný od dat následně nalezených experimentem. To může být způsobeno především nepřesnostmi a problémy vzniklými již od výroby od technologických nepřesností (teplota, tlak), po mastnotu, nedokonalé prosycení atd [118]. Proto je nutné dodatečně vyladit materiálové modely dle experimentu.

Posledním krokem daného úkolu bylo pomocí kritérií porušení [109][115][117], konkrétně dle Pucka a Tsai-wu ověřit aplikovatelnost numerického modelu, pro celý rozsah zatěžování kompozitu, jako při reálném testu. Při porovnání *Obr. 76* níže a výsledky experimentu *Obr. 72* je možné pozorovat pro danou úlohu velmi dobrou shodu.

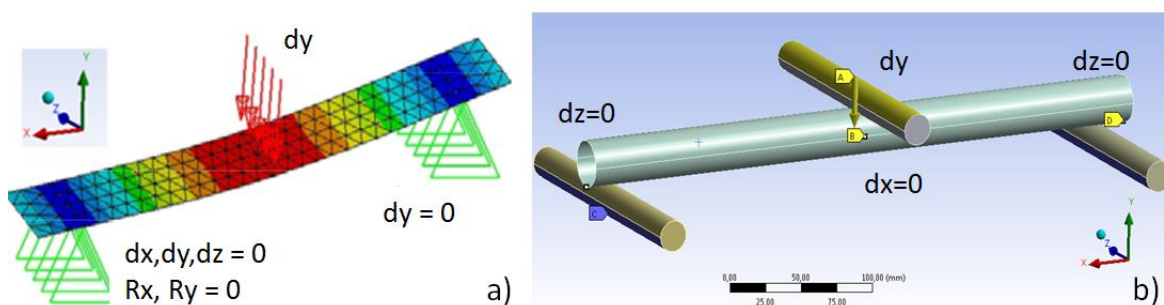


Obr. 76 Kriteria porušení dle Tsai-Hill a Puck pro deformaci v celém rozsahu dle experimentu

5.3 Ohybové zatížení

Na úloze tříbodového ohybu, je dále posouzen sestavený matematický a materiálový model dané struktury. Studium experimentálního a modelového popisu se hluboce věnovali Camanho [120] a Azzam [121]. Vhodné je také stanovit, zda je pro popis dílu vyrobeného danou technologií pro simulaci ohybového namáhání vhodnější shell či solid prvek a taktéž posoudit dosažitelnou přesnost daného materiálového modelu.

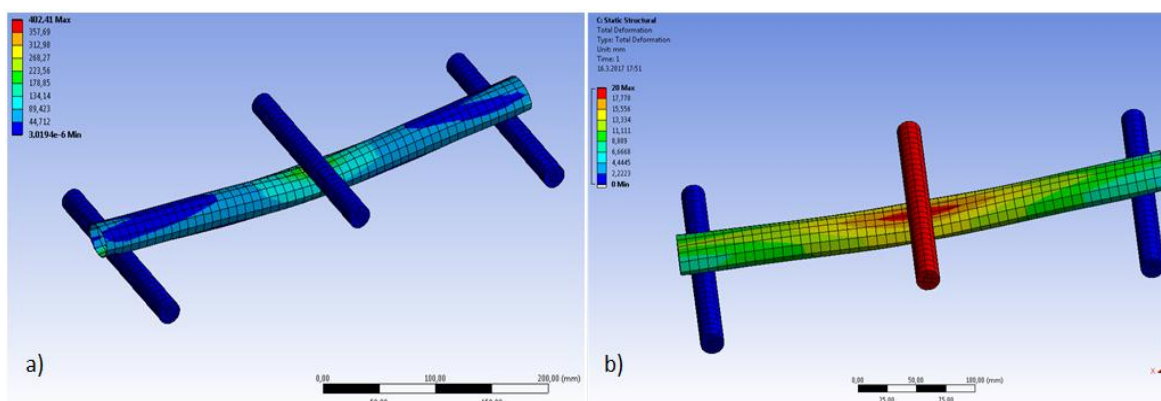
Vzhledem k tomu, že modelování kontaktu jako v našem případě je mezi vrstveným shellem a pevným prvkem velmi problematické. Je možné nalézt různé zjednodušení, např. Gruber [103] vytvořil a zjednodušil statický model bez použití jakéhokoli kontaktu. Okrajové podmínky byly aplikovány právě na uzly, jak je vidět na *Obr. 77*.



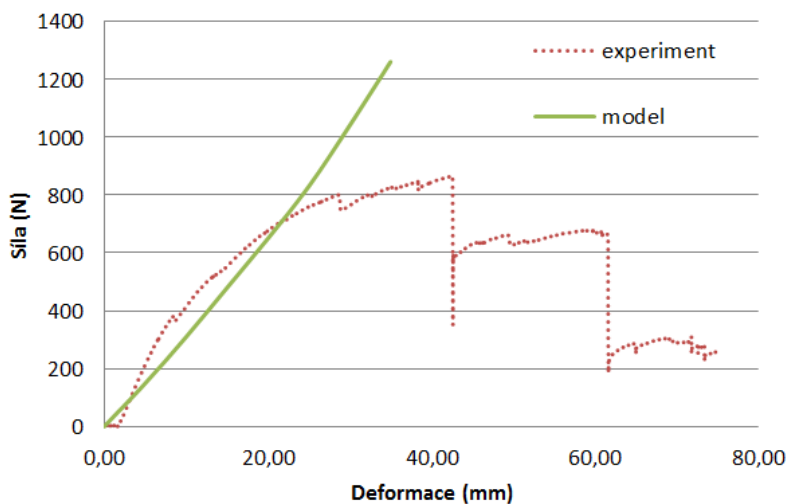
Obr. 77 Model ohybové zkoušky: a) Zjednodušený podle [103] b) Plně definovaný kontaktní model

V daném případě byl model řešen jako plnohodnotná kontaktní úloha Obr. 77. Zkoušená část byla položena na dvě pevné podpěry. Podle Sönerlind [107] je lepší použít pevnou vazbu na úrovni domény než na hranici. Pak není nutné vyřešit mnoho nul ve vnitřních oblastech matic těchto domén. Byla nastavena třecí opěra s asymetrickým chováním (Obr. 78).

S ohledem na formulaci kontaktu byla pro kombinaci solidových podpor a shell trubky použita Full penalty formulace s uzlově-normální detekcí integračních bodů. Výchozí normálová tuhost $1e-002$ může být dodatečně upravena během výpočtu. Nejjednodušší způsob, jak vyřešit problém s původně nedokonalě zavazbeným modelem, bylo přidání pružin pro první time stepy výpočtu. Konstanta pružiny je tedy závislá na parametru zatížení, takže pružina působí pouze na začátku simulace, kdy ještě shellový díl není třecími silami přitlačen k podpěrám [106].



Obr. 78 Výsledky provedené simulace pro vrstvenou vrstvu a) Ekvivalentní napětí b) Směrový posuv



Obr. 79 Porovnání výsledků modelové simulace a experimentu ohybové zkoušky

5.4 Přenos vibrací a možnosti tlumení

Stejně důležité jako znát základní mechanické vlastnosti, je znát taktéž chování daných materiálů z hlediska přenosu vibrací. Tlumením či změnou charakteru přenosu vibrací je obvykle snaha o zlepšení parametrů výrobku, jako především jeho životnost z hlediska vyvarování se jeho používání v rezonančních frekvencích. Hledaná závislost byla přenosová funkce, modální

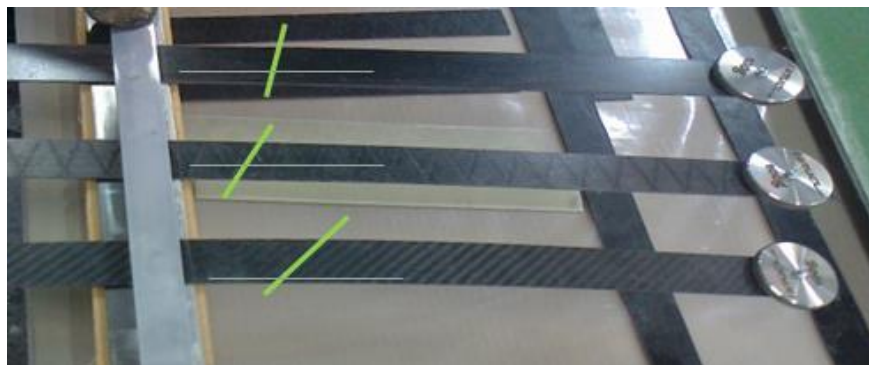
charakteristika a strukturní tlumení v závislosti na úhlu jednotlivých vrstev, jejichž počet kombinací je téměř neomezený.

Standardně prováděné mechanické testy, obvykle založené na statickém zatížení, jsou pomalé a nákladné. Jako nedestruktivní alternativa klasickému tahovému testu může být metoda založená na využití rezonančních frekvencí, jak uvádí např. Wang, Vozková, Gibson či Zou [20][112][114][115]. Testování spočívá ve vibračním buzení tělesa z jedné strany a měřením ze strany druhé nebo rovnocenná alternativa s pevným upnutím a buzením pomocí modálního kladívka, jak je popsáno v následující kapitole. Na základě tvaru přenosové funkce je možné stanovit modul pružnosti i Poissonovy konstanty. Jak se ve své práci důkladně zabývala Vozková [112], která důkladně popsala rozbor a aplikaci teorie dle Lagrange, Euler-Bernoulliho, Rayleigha a Timoshenka pro tenkostěnné nosníky, jejichž užití má velký potenciál pro rychlé a dostatečně přesné poskytnutí elastických a viskoelastických vlastností materiálu. Jak uvádí Gibson [114] empirický vztah pro nalezení modálních frekvencí plochého, vetknutého nosníku je (5.3).

$$f_n = \frac{(\lambda_n L)^2}{2\pi^2} \left(\frac{EI}{\rho A} \right)^2 \quad (5.3)$$

Kde frekvence f_n je kmitočet n -tého modu [Hz], E modul pružnosti materiálu, I moment setrvačnosti nosníku vzhledem k jeho neutrální ose, ρ hustota materiálu, A plocha příčného průřezu, λ_n vlastní hodnota n -tého modu jenž závisí na okrajových podmínkách a L je délka nosníku.

Modální testy jsou obvykle založeny na měření frekvencí jednotlivých modů, jejich tvarů a tlumicího faktoru [88][114]. Při porovnání ocelových a kompozitních materiálů je možné říci, že tlumení kovových materiálů je relativně malé, což vyúsťuje ve výrazné amplitudy vibrací. Tlumení v materiálech vyztužených vlákny je řádově vyšší a výrazně závisí na skladbě materiálu. Na rozdíl od kovových konstrukčních materiálů, které jsou charakteristické svou isotropií, u materiálů kompozitních jsou moduly pružnosti pro příslušné osy vždy závislé na orientaci všech vrstev tvořících laminát, jak je možné vidět na Obr. 80. Lepoitevin [69] taktéž zdůraznil, že tlumicí schopnosti skelného kompozitu jsou téměř 5x větší, než pro stejný hliníkový díl, je ovšem otázkou, co si zde představit pod pojmem stejný, neboť je otázkou zda porovnáваме objem, hmotnost či tuhost. Proto je častou nepřesností některých výrobců či autorů snaha porovnávat dané materiály.



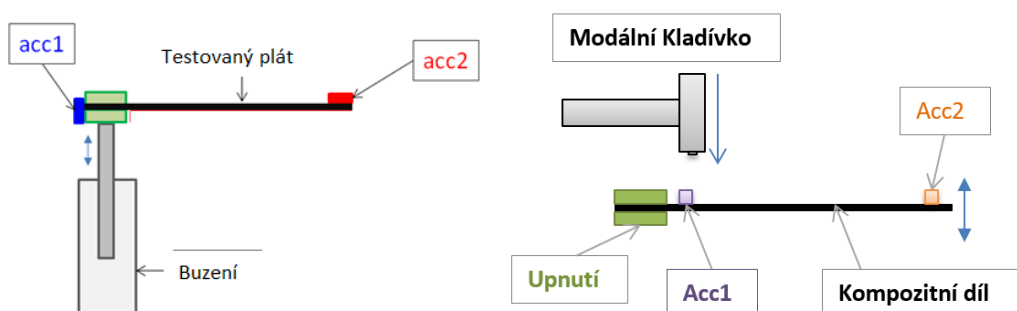
Obr. 80 Ohybová tuhost v závislosti na orientaci vrstev 3 vrstvého kompozitu

Laminované díly byly testovány mnoha autory jako např. [19][20][112][114]. Je dokázáno, že smykové deformace a vlastnosti mají významný vliv na jednotlivé módy. Tlumící schopnost je potom možné vyjádřit jako modální ztrátový faktor η spočítaný dle (5.4) pro každý mód samostatně stanovené dle poloviny šíře pásma při poklesu o 3 dB.

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_n} \quad (5.4)$$

5.4.1 Experimentální určení přenosových charakteristik kompozitního materiálu

Pro nalezení přenosových charakteristik experimentální cestou je možné využít dva základní způsoby. Prvním z nich je, jak uváděl Petřík [122], jednostranné upnutí do čelistí buzených řízeným signálem (Obr. 81). Z hlediska buzení je vhodné využití hydraulického systému především s ohledem plynulou regulaci rychlosti, absorpci rázů a pohyb bez „skoků“, které jsou typické například u pneumatických systémů vlivem stlačitelnosti použitého média. Druhou možností je potom využití tzv. modální kladívka, které budí impulzem se širokým spektrem a následně je možné sledovat odezvu. Podle analyzované dynamické odezvy, tyto způsoby mohou být dále rozděleny na modální analýzu, frekvenční doménu, časovou doménu a impedanční doménu [115]. Dle [112] jsou buzení a odezva zpracovány pomocí analyzátoru signálu. Tlumící charakteristiky tohoto nosníku jsou odvozeny Fourierovou transformací z odezvy vstupního signálu experimentu na analyticky zjištěnou odezvu s využitím Ritzovy metody.



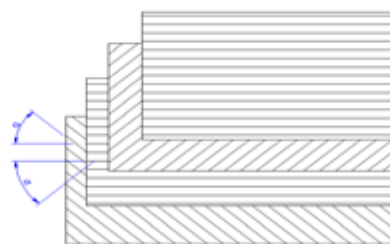
Obr. 81 Buzení řízeným signálem (vlevo) a modální test kladívkem (vpravo)

Základním požadovaným výstupem je potom tzv. přenosová funkce PSD (5.5), která udává, jaká část celkového přeneseného výkonu je nesena danou frekvencí.

$$H(f) = \frac{\text{OUTPUT}}{\text{INPUT}} = \sqrt{\frac{\text{PSD}_2(f)}{\text{PSD}_1(f)}} = \frac{\text{acc}_2(f)}{\text{acc}_1(f)} \quad (5.5)$$

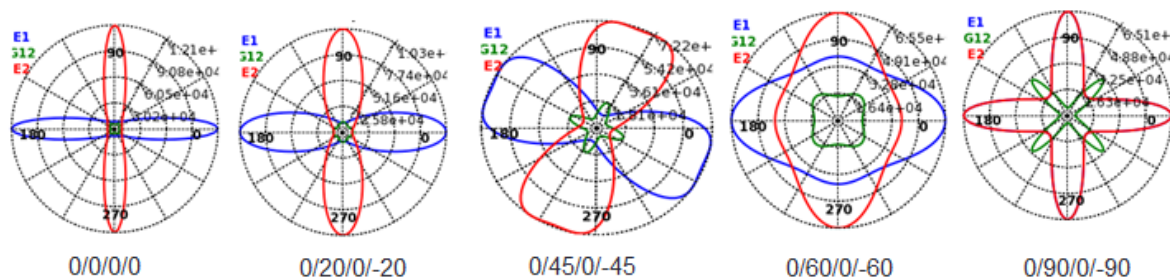
Experiment

Úkolem experimentu bylo posouzení vlivu orientace jednotlivých vrstev na celkovou přenosovou funkci. Vzorky o velikosti 120x40_0,52 mm (Obr. 82) byly vyrobeny z jednosměrného prepregu a následně vytvrzeny při 150 °C po dobu 20 min.



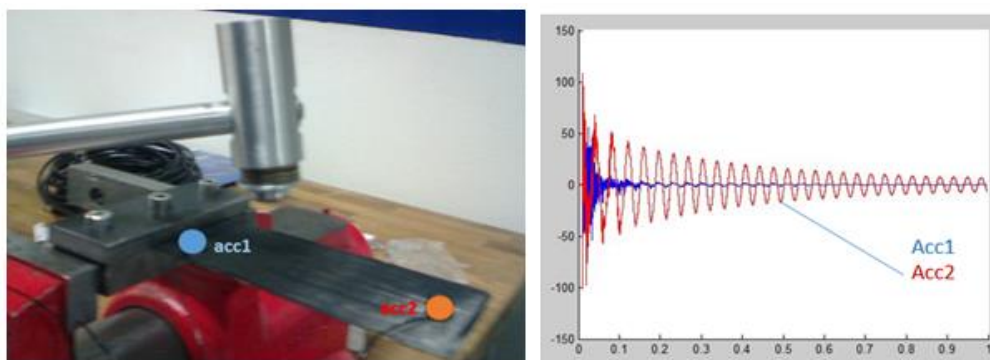
Vzorek č.	Úhel vrstev - α°			
1	0	0	0	0
2	0	20	0	-20
3	0	45	0	-45
4	0	60	0	-60
5	0	90	0	-90

Obr. 82 Rozložení vrstev vyrobených vzorků



Obr. 83 Vypočtené mechanické vlastnosti testovaného vzorku v závislosti na orientaci vrstev

Kompozitní plát, byl pevně přimontován k dokonale zbrošeným čelistem a uchycen třemi šrouby, pro zajištění bezchybné upnutí a zamezení nežádoucím vibracím (Obr. 84). Akcelerometr A_{cc1} byl pomocí vosku přilepen co nejbližší upínacím čelistem a akcelerometr A_{cc2} umístěn na volném konci. Použitý akcelerometr s hmotností 1,2 g měřícím rozsahem 400 G a při vzorkovací frekvenci 5000 Hz. Budící síla a její časová odezva převedená do frekvenčního spektra je nazývána přenosovou funkcí. V tomto případě nezávisí na způsobu buzení.



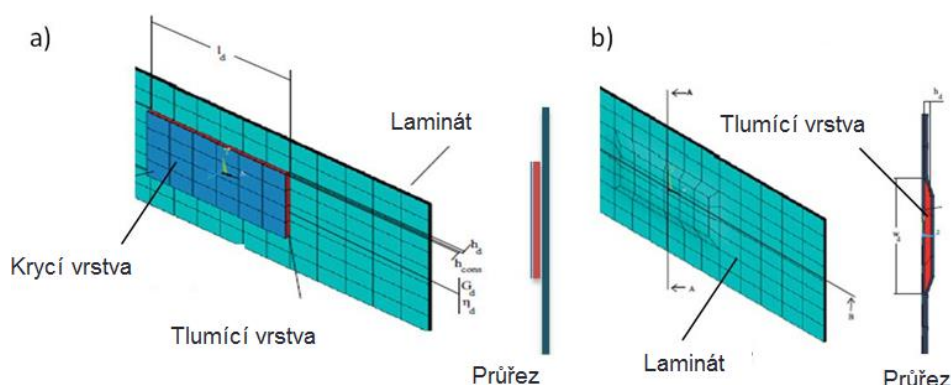
Obr. 84 Experiment měření přenosové funkce na kompozitním plátu (vlevo) a odezva zrychlení na vzorku 0/60/0/-60

5.4.2 Tlumení a možnosti navýšení tlumení kompozitu

Schopnost materiálu tlumit je základní vlastnost, jíž je nutné znát s ohledem na konstrukci zařízení. Materiály s vyšší schopností tlumení dokáží potlačit resonance a přenos vibrací. Podle Bertheloma [116] je velikost tlumení kompozitu dána různými faktory jako např. viskoelastické chování matrice, rozhraní vlákno a matrice, dále na orientaci vrstev, ale i vrstvicích sekvencích, což znamená, že zde neplatí jednoduché komutativní pravidlo, které je při výpočtech základních

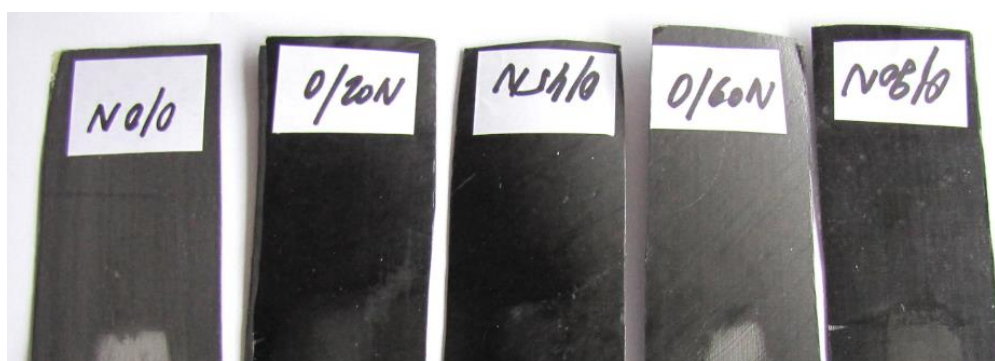
parametrů jako modul pružnosti atd. běžně uvažováno. Což je možné připsat rozdílnému smykovému napětí, na jejich rozhraní, neboť napětí v každé vrstvě a z toho vyplývajícím rozhraní je závislé na orientaci. Dále se vyskytuje tlumení způsobené třením, disipací energie v místech defektů matrice, viskoplastické tlumení při vysokých napětích a termoelastické, jenž popisuje vztah mezi elastickými deformacemi matrice při jejím ohřevu.

Velmi významnou kapitolou je dále tlumení kompozitu přidáním viskoelastické vrstvy [123][124][125]. Jedná se o dvě základní možnosti, první kdy je dle doporučení neoprenová vrstva ukryta uvnitř mezi jednotlivými vrstvami kompozitu v druhém případě spolu a krycí akrylovou vrstvou na povrchu, jak je vidět na Obr. 85. Další z testovaných možností bylo jako elastické vrstvy využití gumového povlaku z jedné strany ve 4 vrstvách celkem tl. 0,8 mm.



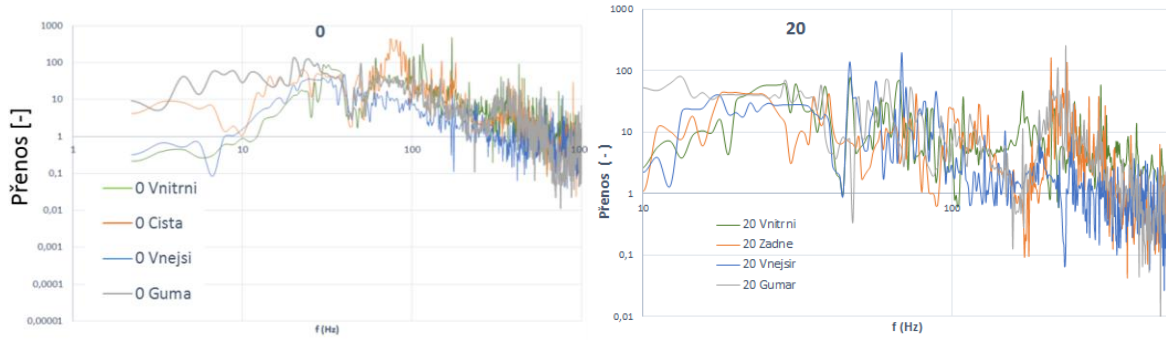
Obr. 85 Způsoby umístění neoprenových tlumících vrstev (dle [69])

Základní vyrobené vzorky (Obr. 86) dle kap. 5.4.1 mají hmotnost: $5,34 \pm 0,15$ g při použití vnitřní tlumící vrstvy 6 g, s vnější tlumící neoprenovou a akrylovou krycí vrstvou 6,34 g a vzorky jednostranně pogumované 6,8 g.

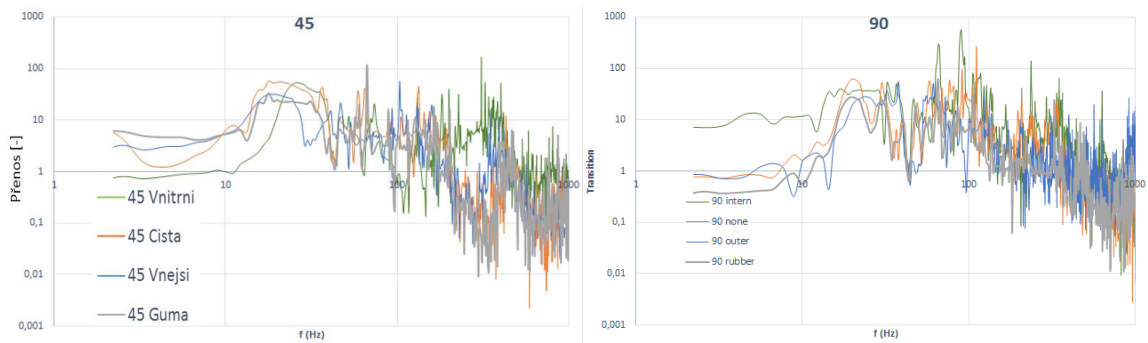


Obr. 86 Vyrobené vzorky s vnitřní neoprenovou strukturou rozděleny dle úhlu vrstev

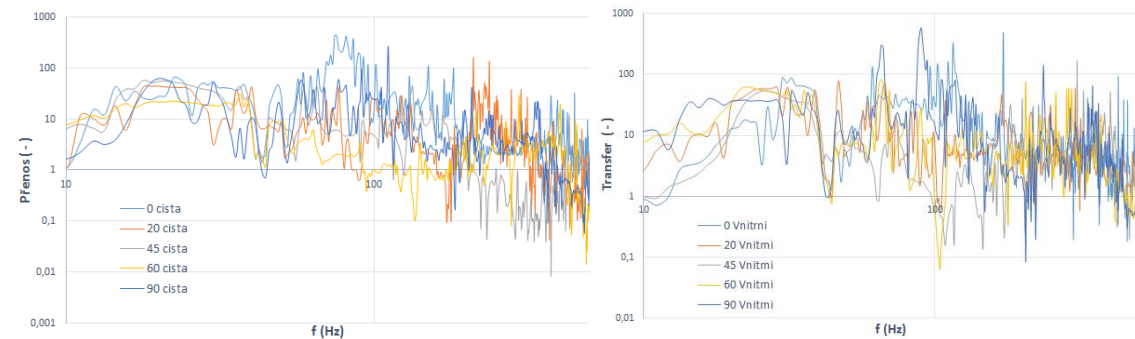
S použitím laboratorního software Dewesoft a zpracováním dat v prostředí Matlab byly stanoveny přenosové charakteristiky pro kombinace konstantních vrstev a tlumících materiálů, z nichž vybrané jsou na Obr. 87, Obr. 88, Obr. 89. Detailní grafy všech individuálně použitých materiálů a kombinací vrstev obsahuje **Příloha_3**.



Obr. 87 Přenos pro jednotlivé tlumící prvky při konstantním postavení vrstev 0 a 20 °



Obr. 88 Přenos pro jednotlivé tlumící prvky při konstantním postavení vrstev 45 a 90 °



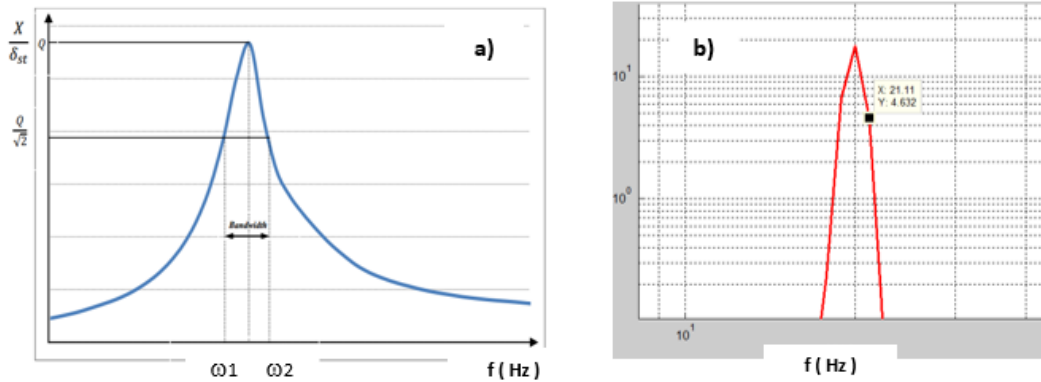
Obr. 89 Přenos pro čistý kompozit a kompozit vnitřně tlumený neoprenovými vlákny

Strukturální tlumení materiálu

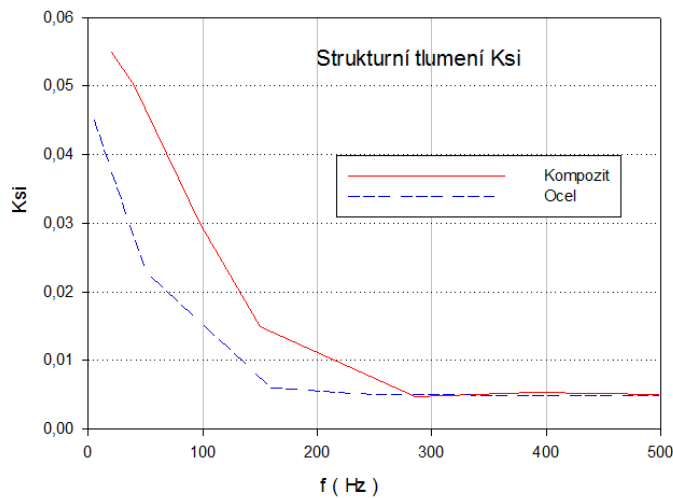
Koeficient tlumení ξ (5.6) (V literatuře a manuálech některých CAE SW často jako KSI).

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (5.6)$$

Validace byla v daném případě provedena na frekvenční charakteristice pomocí tzv. ztrátového faktoru (Loss factor). Ztrátový faktor je dán jako $\eta = 2\xi$, kdy ξ je strukturální tlumení materiálu při resonanci (Obr. 90). Velikost ztrátového faktoru (Obr. 91) je možno určit dvěma způsoby a to jako dynamické tlumení, nebo ze závislosti útlumu v čase.



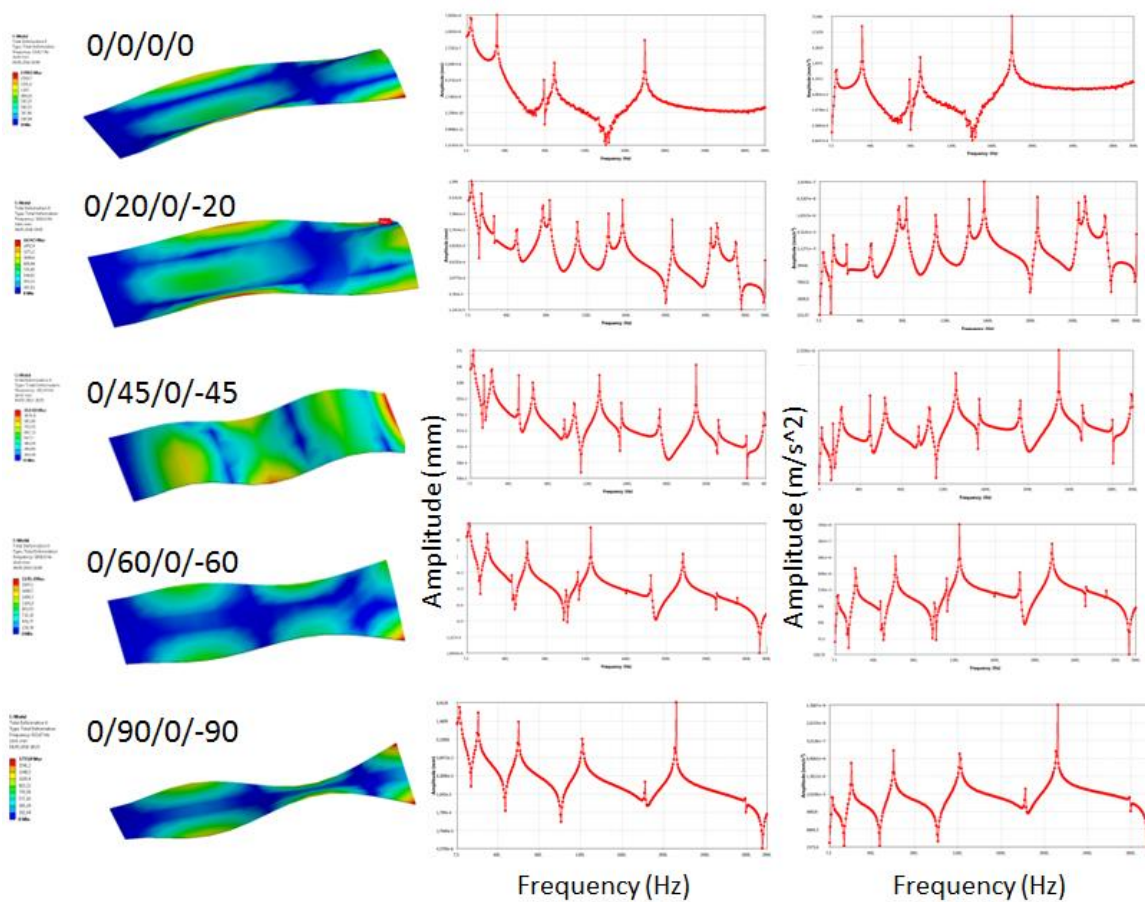
Obr. 90 a) Princip [122] b) Příklad odečtu pásma frekvencí při rezonanci



Obr. 91 Výsledné strukturní tlumení kompozitu v porovnání se stejně velkým ocelovým plátem

5.4.3 Numerické určení přenosových charakteristik kompozitního materiálu

Základní etapou řešení problematiky kmitání mechanických soustav je návrh vhodného výpočtového modelu dané soustavy. Chování zvolené mechanické soustavy popisují rovnice pohybu, kterých počet odpovídá počtu stupňům volnosti. Řešením pohybových rovnic dostáváme závislost polohy, rychlosti a zrychlení v čase a dle parametrů jednotlivých diskretních prvků tvořících výpočtový model. S ohledem na adekvátnost použitého modelu z hlediska přesnosti výsledků řešení a jejich aplikovatelnosti v praxi platí obecná zásada, že s rostoucí budící frekvencí rostou celkové nároky na složitost modelu, roste počet uvažovaných diskretních prvků.



Obr. 92 Změna charakteru 4. módu natočením dvou vrstev a amplituda polohy a zrychlení v rozsahu 1-3 kHz

Problematika numerického modelování vrstvených anizotropních materiálů je důkladněji zmíněna v kap. 3. Na základě CAD modelu a okrajových podmínek ekvivalentních experimentu bylo možné vytvořit numerický model. Jednalo se o vrstvený orthotropní shell v prostředí preprocesoru ACP Sw Ansys. Simulace byla rozdělena na dvě samostatné části a to modální analýzu a frekvenční odezvu. Výpočty modálních parametrů kompozitů se historicky důkladně zabývali např. Cawly & Adams [6], kteří porovnávali síť 6x6 a 5x5 s výsledkem v nalezených rozdílech frekvencí jednotlivých modů nepřesahující 2 %. Ve svých pracích poukázali na poměrně přesnou predikci a možnost cíleného ovlivnění vlastností a posunu rezonančních pásem změnou orientace vrstev.

Metoda konečných prvků, kterou byl problém řešen, umožňuje odvodit energii napjatosti pro úhly jednotlivých vrstev. Současně může být energie dissipovaná tlumením materiálu a kompozitní struktury získána jako funkce tlumícího koeficientu ve vztahu k energiím pro jednotlivé úhly vrstev [115][57][82]. Na Obr. 92 je potom možné vidět trend změny tvaru 4. módu při zvyšování úhlu dvou ze 4 celkových vrstev, kde je vidět změna z ohybového módu na torzní a odpovídající přenosovou funkci pro výchylku a zrychlení. Na Obr. 92 je frekvenční odezva na spektrum buzení 1-3000 Hz.

5.4.4 Porovnání výsledků z experimentu a výpočtu

Experiment je rychlý způsob jak nalézt základní rezonanční frekvence a přenosovou charakteristiku. Následně, především na základě zkušeností, je možné určit, které mody jsou skutečně významné a které například pouze jen postranní pásma atd. Numerický model nám dá představu o tvaru jednotlivých modů, nicméně jejich skutečnou velikost je nutné ověřit. V tabulce níže je porovnání výsledků experimentu a modelu, pro materiál s orientací 0/45/0/-45°. Obecně se dá hovořit o relativně dobré shodě, nicméně odchylky jsou výraznější především v nižších frekvencích, kde se mohly projevit výrobní a tvarové nepřesnosti, přidaná hmota akcelerometrů a teoretické vlastnosti materiálu.

Tabulka 5.1 Přehled a porovnání nalezených hodnot vlastních frekvencí

Model [Hz]	35	143	222	640	1061	1314	1536	1925	2295	2988
Experiment [Hz]	29	144	173	648	1012	1237	1429	1894	2241	3107
Odchylka	17%	-1%	22%	-1%	5%	6%	7%	2%	2%	-4%

5.5 Parametrické modely návinu obecně zakřivených dílů

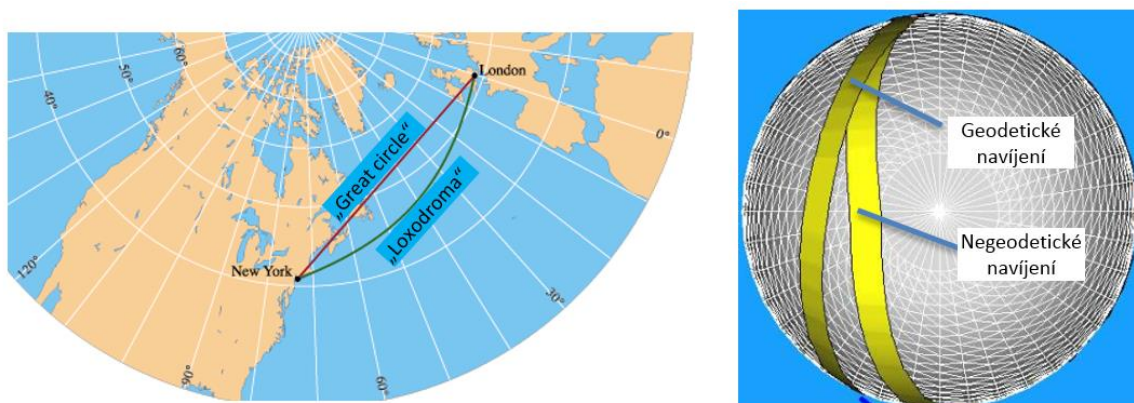
Jak vychází z podstaty kompozitu a jak bylo demonstrováno v předchozích kapitolách práce, u kompozitního dílu, má zcela zásadní vliv na výsledné vlastnosti úhel pokládky vláken. Navíjecí úhel 0° odpovídá podélné orientaci vláken, tj. směrový tečný vektor je v každém okamžiku rovnoběžný s osou rotace. Navíjecí úhel 90° potom odpovídá obvodovému (používán název „Hoop“) navíjení.

Méně známým prvkem, především v oblasti návrhu budoucí struktury, je teoreticky uvažovaný způsob pokládky vláken. Prvním z nich je tzv. geodetické navíjení, odvozené od vědy specializující se na měření velikosti a tvaru země. Geodetická cesta je nejkratší cestou mezi dvěma místy na povrchu země. V matematickém významu je geodetická cesta nejkratší cestou přes kulový povrch mezi dvěma body. Geodetická dráha je jedinou cestou, kterou může vlákno pevně protáhnout mezi dvěma body na kouli, aniž by se spoléhalo na tření a aby se zabránilo sklouznutí. Jak je obecně známé a možné vidět na Obr. 93, Zemský povrch je zakřivený, z toho důvodu je nutné využívat tzv. zakřivenou geodesiku. Pojem „Great circle“ je jakýkoli kruh, který objíždí Zemi a prochází jejím středem, tedy vždy rozděluje zemi na poloviny. Nejkratší vzdálenost mezi dvěma body na Zemi leží vždy mezi body velkého kruhu. Druhým možným způsobem měření je tzv. Loxodroma. Schema daných principů je na Obr. 93 a více o dané problematice možné najít v [126].

Z toho důvodu ovšem existují i metody tzv. Negeodetického vinutí a metoda výpočtu dráhy navíjených vláken, která do výpočtu zakomponuje také tření mezi vláknem a jádrem k výpočtu odklonu od geodetické dráhy [127][128][129]. Takovou křivkou je Loxodroma, jedná se o oblouk, který protíná všechny meridiány délky ve stejném úhlu, měřeno ve vztahu k pravému nebo magnetickému severu.

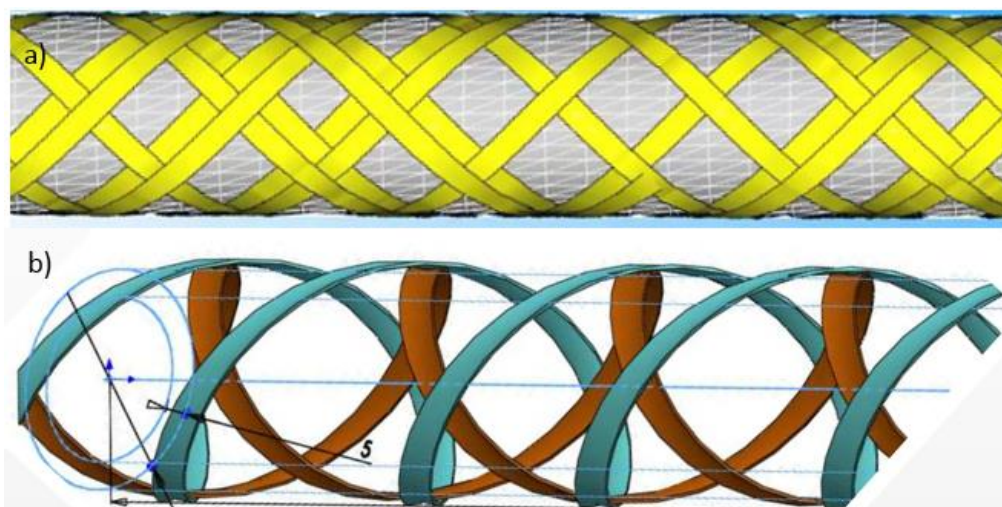
Hodnota udávající jak moc se může vlákno odchýlit od geodetické dráhy, závisí na velikosti tření mezi vláknem a jádrem. Velmi lepivá předimpregnovaná vlákna a gumové jádro budou značně odlišná od ideální geodetické dráhy. Nicméně kluzké filamenty (vlákna lubrikovaná) na hladkém

jádra (leštěná ocel) by měla následovat cestu, která je velmi podobná ideální geodetické, v opačném případě budou vlákna sklouzávat.



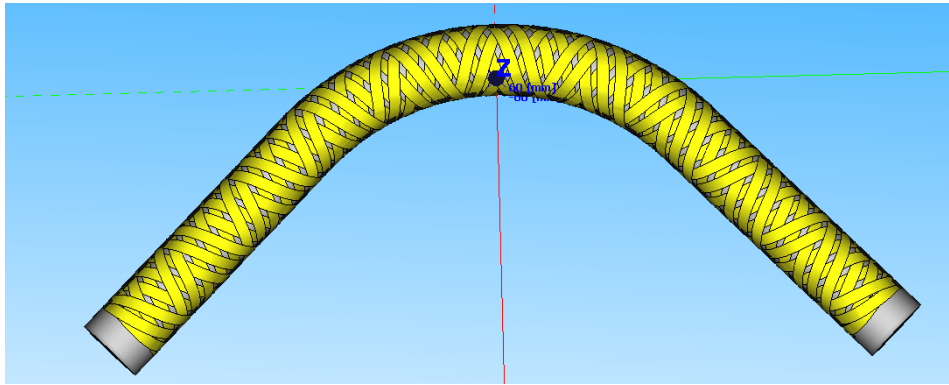
Obr. 93 Zobrazení vzdálenosti na prostorově zakřivených plochách a) geografické odměření vzdálenosti na Zemi [126] b) Dva možné způsoby využívané pro simulace návinu [127]

Na Obr. 94 níže je zobrazena parametrická interpretace rovnice navinutí v komerčním CAD softwaru [71] a specializovaném modeláři CADWIND. Výhodou použití parametrických modelářů je možnost simulací navinutých struktur, na kterých je možné např. díky barevnému rozlišení směrových vektorů, posoudit parametry vzniklého návinu.



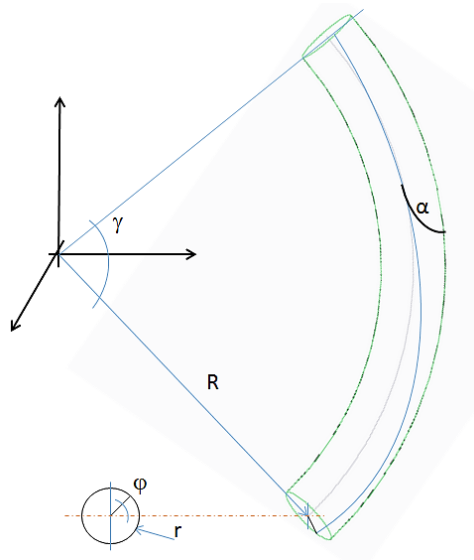
Obr. 94 Parametrický model vynutí pásu kolem jádra: a) Ovin vytvořený pomocí Sw Windcad b) Přímým zadáním rovnic do komerčního Sw Catia [71]

Nevyhnutelným problémem vznikajícím při navíjení jader zakřivených tvarů jsou rozdíly úhlu vinutí na vnější a vnitřní straně ovíjeného dílu. Vzhledem k tomu, že není fyzikálně možné zajistit konstantní pokrytí na obou stranách, je nutné lokálně upravit požadovaný navíjecí úhel, stanovený výpočtem. Jak lze vidět na výsledku parametrické simulace procesu v softwaru CADWIND (Obr. 95), na vnitřním poloměru dochází k velkému zahuštění, zatímco na vnějším k výraznému prořídnutí struktury a často nedokonalému pokrytí vláknů. Cílem dané kapitoly je tedy popsat tento jev a najít optimální řešení jak zajistit konstantní mechanické parametry v celém tvaru.



Obr. 95 Parametrické zobrazení náviny kolene

Wang [131] se zabýval parametrickým popisem výrobních parametrů určujících proces navíjení komplikovaných a vícenásobně zakřivených tvarů. Principem jeho parametrické analýzy bylo rozdělení jednotlivých částí na 2D sítě. Úhel navíjení je třeba nastavit změnou bodů pro vyjímání, aby byl vzor stabilní a aby bylo dosaženo plného pokrytí. Úhel navíjení bylo nutné upravit tak, aby vzniklá „textura“ byla rovnoměrná při současném dosažení plného pokrytí. Výstupem jeho modelů byly tabulky obsahující konfigurace základních parametrů, díky kterým mohly být nalezeny jednotlivé hodnoty nastavení lokálních úhlů vinutí při průchodu zakřivenými částmi. V současné době existují dva specializované systémy (CADWIND a CADFIL), jejich využitím je možné vypočítat i velice specializované náviny T tvaru [128][129].



Obr. 96 Schema geometrických parametrů navíjeného prostorového jádra

Li [129] pro obecný popis výpočtu použil NFWP (Non-axisymmetric Filament Winding Pattern) ustavený z rovnice (5.7) jehož základní kinematické schéma je na Obr. 96.

$$T(\gamma, \varphi) = \begin{pmatrix} (R + r \cos\varphi)\cos\gamma \\ r \sin\varphi \\ (R + r \cos\varphi)\sin\gamma \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

kde $T(\gamma, \varphi)$ je vektor popisující zakřivené koleno, γ je úhel „rozevření“ kolene a φ je úhel rotace vlákna kolem jádra s průměrem r [mm].

Pro tzv. geodezickou křivost k_s obecného 3D tělesa ve volném prostoru je dle [129] s využitím Liouvillea theoremu možné využít rovnici:

$$k_s = \frac{d\alpha}{ds} + \frac{\sin\varphi}{(R + r \cos\varphi)} \cos\alpha \quad (5.8)$$

Pokud ovšem křivost položíme rovnou nule $k_s = 0$, je možné sestavit jednoduché diferenciální rovnice níže:

$$\frac{d\alpha}{ds} = -\frac{\sin\varphi}{(R + r \cos\varphi)} \cos\alpha \quad (5.9)$$

$$\frac{d\gamma}{ds} = -\frac{\cos\alpha}{(R + r \cos\varphi)} \quad (5.10)$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = -\frac{\sin\alpha}{r} \quad (5.11)$$

Kdy je po následné modifikaci možné vyjádřit výrazy jako:

$$\frac{d\gamma}{d\varphi} = -\frac{r}{(R + r \cos\varphi)} \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (5.13)$$

$$\frac{d\alpha}{d\varphi} = -\frac{r \sin\varphi}{(R + r \cos\varphi)} \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (5.12)$$

Závěrečným krokem, s použitím Clairautovy rovnice je (5.14), kdy daná konstanta C je dána počáteční hodnotou navíjecího úhlu α_0 .

Jelikož navíjený tvar není vždy konvexní, může i geodetická cesta sklouznout a dojde

$$(R + r \cos\varphi) \cos\alpha = C \quad (5.14)$$

k nedokonalému pokrytí, pokud počáteční úhel náviny α_0 nesplní kritéria stability dané dle [129][132] jako (5.15):

$$0 < \cos\alpha_0 \leq \frac{R-r}{R+r} \sqrt{\frac{R-r}{R}} \quad (5.15)$$

Nicméně, všechny uvedené vztahy popisují pouze geometrické závislosti, ale neuvažují velmi důležitý parametr, jímž je tření mezi vláknem a jádrem.

Při zavedení normálového zakřivení k_n založeném na geodetickém zakřivení, je možné určit relativní stabilitu proti skluzu λ , která pomáhá zabránit sklouznutí vláken po stranách jádra.

$$\frac{k_g}{k_n} = \lambda \quad (5.16)$$

$$k_n = \frac{\sin^2 \alpha}{r} \quad (5.17)$$

Pro zajištění optimálních technologických parametrů se doporučuje $|\lambda| \leq \mu_f$, kdy μ_f znamená koeficient tření mezi vláknem a jádrem. Z tohoto důvodu existují metody negeodetického vinutí, které do výpočtu zahrnují i tření mezi vlákny a trnem [132][128]. Pro suchá vlákna při navíjení na polyuretanové jádro je koeficient tření dle [127] přibližně 0,2 a pro vlákna prepregová 0,35.

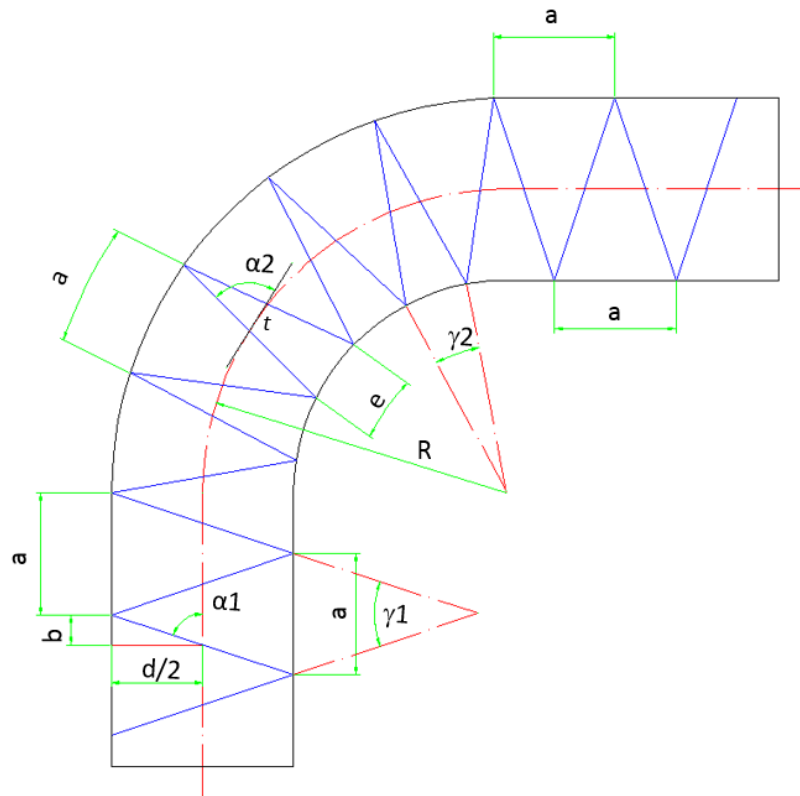
5.5.1 Návin 2D kolene

Myšlenka řešení 2D problému je založena na rozdělení přímých a zakřivených částí do jednorozměrných úseků. Délka těchto úseků na vnějším poloměru musí být konstantní, což zaručuje konstantní úhel navíjení.

Pro tento případ mohou být odvozeny základní geometrické vztahy, počínaje délkou rovného úseku a (5.18):

$$a = 4b = \frac{2d}{\operatorname{tg} \alpha_1} \quad (5.18)$$

Pro řešený případ lokální optimalizace úhlů navíjení pro 2D zakřivené koleno možné stanovit výsledný geometrický vztah mezi úhly α_1 a α_2 (Obr. 97).



Obr. 97 Výpočtové schéma úhlů a délek navíjeného 2D kolene

Následně délka úseku e (5.19) či a (5.20) závisí na délkách fundamentálních oblouků:

$$e = \frac{\pi(R - \frac{d}{2})}{180} \gamma_2 \quad (5.19)$$

$$a = \frac{\pi(R + \frac{d}{2})}{180} \gamma_1 \quad (5.20)$$

Závislost navíjecího úhlu na základních geometrických parametrech je možné následně popsat:

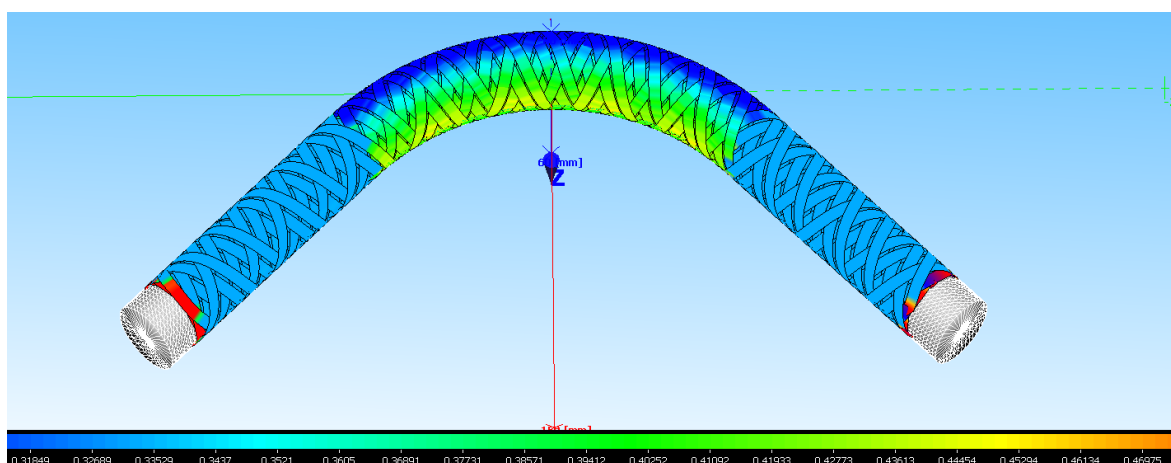
$$\frac{2d}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{\pi(R + \frac{d}{2})}{180} \gamma_1 \quad (5.21)$$

$$\gamma_1 = \frac{d}{\operatorname{tg} \alpha_1} \frac{360}{\pi(R + \frac{d}{2})} \quad (5.22)$$

Na základě těchto předpokladů při využití částečné aproximace je možné použít zjednodušený, ale pro reálné hodnoty úhlů dostatečně přesný vztah (5.23), vhodný pro stanovení hodnoty lokálního úhlu vinutí v zakřivené části jádra:

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{d \alpha_1 \cotg \alpha_1}{2R} = \alpha_1 \left(1 + \frac{d \cotg \alpha_1}{2R}\right) \quad (5.23)$$

Pravděpodobně nejlepší způsob, jak názorně ukázat popsany problém, je zobrazit výslednou tloušťku navinuté trubice (Obr. 98) na parametrickém modelu. Tmavší barvy znamenají tenčí stěnu a jasnější tlustší – tzn. vyšší hustotu vinutí.

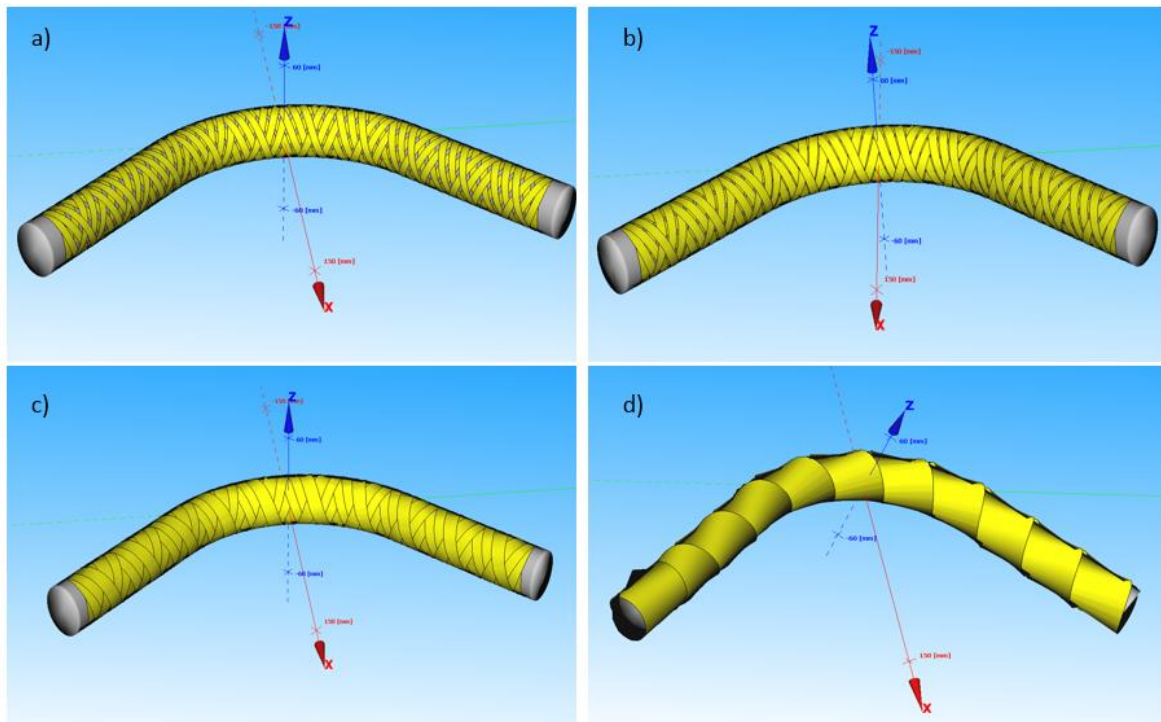


Obr. 98 Návin kolene se zobrazenou tloušťkou (světlejší nejtlustší)

Zatímco na přímých úsecích je tloušťka v důsledku konstantního úhlu návinu neměnná (s výjimkou konců, kde byla simulována smyčka a návrat), na vnějším okraji je tloušťka nižší (stejně množství pásy pokrývá větší plochu) a na vnitřním poloměru je pak tlustší, největší zahuštění vláken.

5.5.2 Šířka pásy

Dalším bodem optimalizaci, jenž není možné stanovit obecně pro všechna řešení, je šíře dané prepregové pásy. Pro danou úlohu, by sice bylo možné použít negradientní optimalizaci viz. kap. 6.2, ovšem řešení by logicky konvergovalo k pásce co nejnižší šíře. Je tedy nutné uvážit reálné podmínky, tvar dílu, počet navíjecích cívek a dle zkušenosti technologa posoudit kvalitu návinu na testovaném vzorku. Pro jasnou demonstraci daného problému, je na Obr. 99 možné vidět návin pásy konstantního množství (plošného obsahu) – o různých šířkách, na zahnuté jádro. Jak je možné vidět, změna šíře pásy zcela zásadně ovlivňuje parametry vyráběného dílu, jeho budoucí pevnost i strukturu.



Obr. 99 Vizualizace návinu při různé šíři pásky konstatního objemu

5.6 Závěr kapitoly výpočty a experimenty

Daná kapitola byla rozdělena do pěti částí. První část se věnovala teoretickému popisu metody konečných prvků, s ohledem na aplikovatelnost pro dané úlohy. Jako zcela zásadní byla označena formulace problému jako skořepinového, či solidového prvku. Dále je velmi důležitým bodem formulace kontaktu a z pohledu post processingu, kritéria porušení.

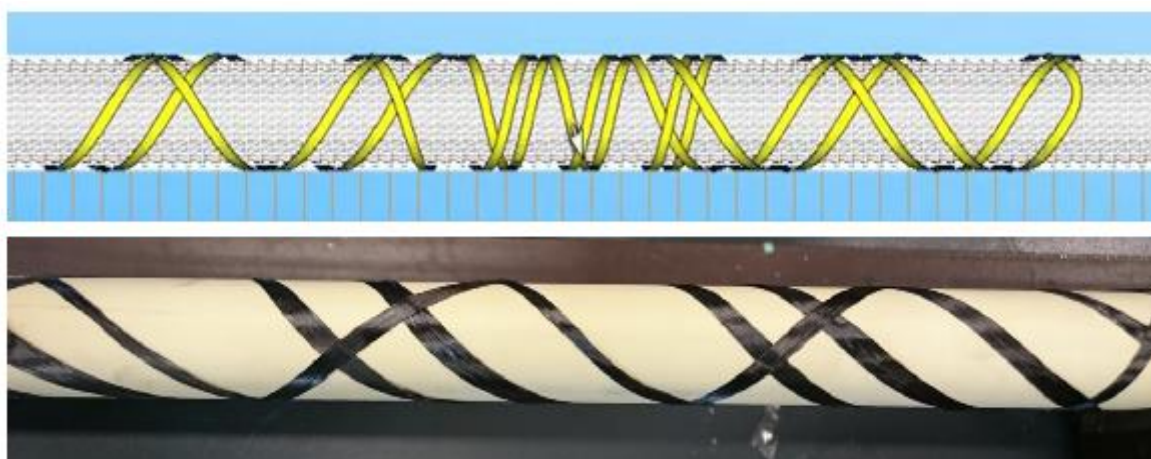
Druhou částí kapitoly bylo reálné ověření sestaveného modelu na základě experimentu simulujícím tahové namáhání. Pro stanovení tahových vlastností tyče z uhlíkového prepregového kompozitu byly po prvních nepovedených pokusech (lepení, zalití do pryskyřice) navržena dvě konstrukční řešení s implementovaným prvkem. Vzhledem ke znalosti objemového podílu vláken a tloušťce vrstev, bylo možné stanovit přibližné maximální zatížení, čímž byla oběma konceptům ověřena fyzikální proveditelnost. Jednalo se o výpočet hlavního přenášeného napětí a následně posouzení pomocí kontaktního numerického modelu. Přesto že první návrh se jevil jako, vhodný vlivem nerovnoměrného rozložení napětí ve vláknech se korunka zdeformovala a vytrhla. Proto bylo navrženo řešení s lícovaným kroužkem a kolíky. Při samotném tahovém testu je v oblasti zatížení 25 kN možné vidět okamžik částečné delaminace horní vrstvy. V oblasti nad 35 kN dochází vzhledem k výrazné rozměrové heterogenitě vláken k podélným lomům, které ovšem nemají zásadní vliv na tahovou pevnost. Finální tahové přetržení svazků vláken nastává při napětí necelých 55 kN, což přepočteno na plochu průřezu trubky udává přenášená tahové napětí přibližně 1 400 MPa. Testování tahové pevnosti tvarových kompozitních dílů je ovšem stále velmi problematické a jako mnohem jednodušší se stále jeví nepřímý výpočet pomocí údajů ze zkoušky v ohybu, případně přesný avšak na znalosti i použité technologie velmi složitý postup založený na základě rezonančních frekvencí jak uvádějí autoři [73][113][111][112].

Další částí kapitoly, byla studie chování kompozitu z hlediska přenosu vibrací. Byla nalezena očekávaná velmi vysoká závislost přenosu a orientace či skladby vrstev. Dané výsledky, jsou důležité pro reálnou možnost posunu rezonančních oblastí finálního dílu. Taktéž byla posouzena možnost úpravy kompozitu, přidávkem neoprenových vláken a pogumováním povrchu, ovšem bez významného efektu. Je tedy možné prohlásit, že v kompozitním materiálu velmi záleží na orientaci jednotlivých vrstev a jejich variací je možné nejen posunout mody, ale i změnit jejich charakter jako např. z ohybového na torzní. Obecně však u simulací kompozitů budeme mít mnohem větší chybovost než u klasických materiálů, neboť máme mnohem více faktorů, jenž není možné jednoduše zahrnout, jedná se o mastnotu, tlak, teplotu, nedokonalé vakuum, reálnou tloušťku vrstev po vytvrzení. Vše uvedené může významně pozměnit výsledné mechanické hodnoty a chování testovaného materiálu.

Poslední částí byla studie a matematicko fyzikální popis závislosti geometrických parametrů, nutných pro sestavení rovnic simulujících reálný proces navíjení. Na základě daného aparátu byl s využitím sw CADWIND sestaven parametrický model zobrazující závislost tloušťky vrstvy na úhlu návinu, při navíjení tvaru zahnutého kolene a demonstrován problém různé šířky použité prepregové pásky.

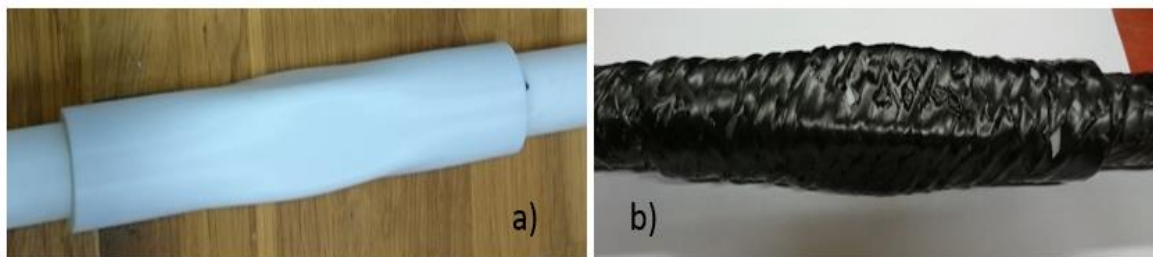
6 Tvorba a testování zjednodušených prototypových dílů

Použitý prepreg byl vyroben z jednosměrně orientovaných uhlíkových vláken s jednosměrnou orientací a epoxidové pryskyřice. Specifikace materiálu jsou v závěru kap. 3. Dle [130] bylo deklarováno, že konsolidací v autoklávu obdržíme přibližně 80 % původní tloušťky. Navineme-li tedy z 10 cívek o tloušťce 0,2 mm, měla by reálná tloušťka být přibližně 1,8 mm. Při navíjení se ovšem nejedná o pouhé vrstvení pásky jako na cívku, výsledná tloušťka je tedy přibližně 1,2 mm. Na Obr. 100 níže je parametrický model a reálná navinutá struktura, na PUR pěnovém jádře.



Obr. 100 Navíjený rám simulace (sw CADWIND) a reálný prototyp na PUR jádře

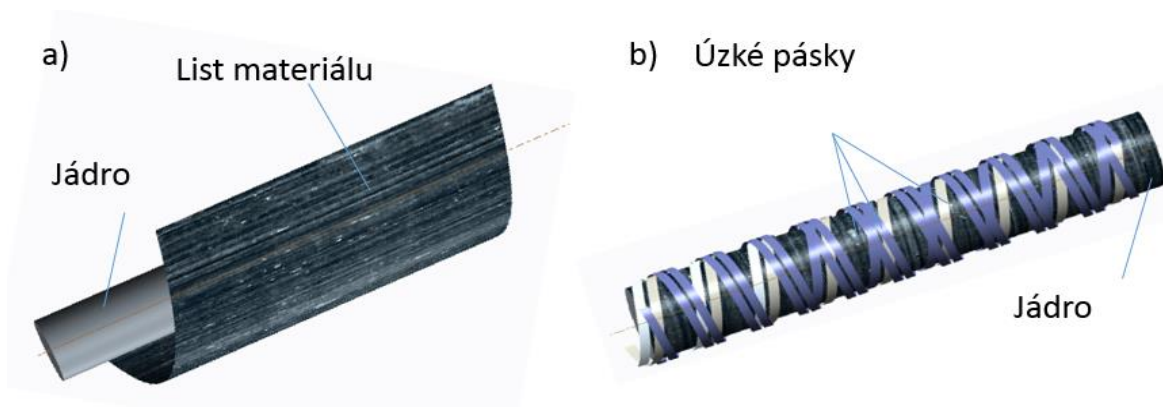
Na Obr. 101 níže je zobrazen navinutý tvar proměnlivého průřezu, na jádrech tištěných z ABS. Jak je možné vidět ve střední části (Obr. 101 b), kde není průřez oblý (konkávní) je možné pozorovat charakteristické zvlnění vláken, způsobené jejich nedokonalým natažením. Zcela stejný problém po vytvrzení dílu shledal během své práce na vyrobených vzorcích i Allen [11].



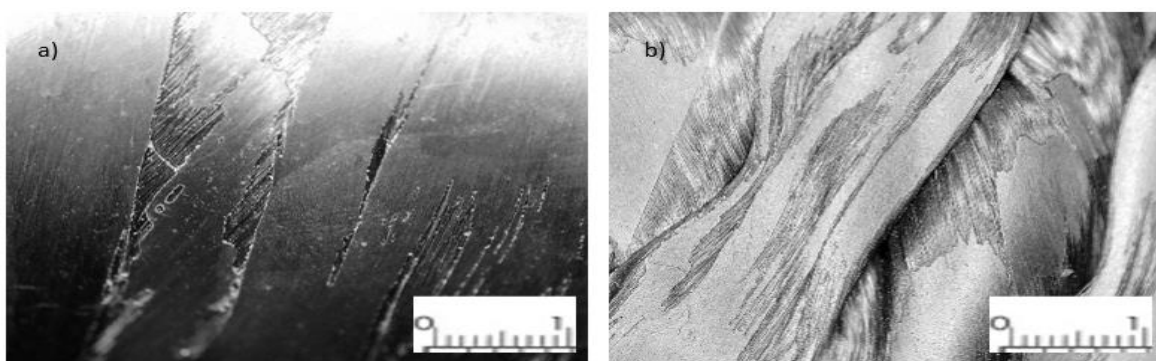
Obr. 101 První prototyp a) Tištěné jádro s nylonovými boky pro upnutí, b) Navinutá vlákna

6.1 Porovnání konvenčního obalování a navíjení prepregových pásků

Pro možnosti porovnání byla vyrobena konvenční rovná tyč, jednoduchým ručním obalením prepregovým materiálem v celé šíři, jak je možné vidět na Obr. 102 a Obr. 103 níže. Tento referenční díl je vhodné porovnat s teoreticky identickým dílem, vyrobeným ovšem navíjením z tenkých prepregových pásků.



Obr. 102 Princip výroby kompozitu z prepregu a) Obalování b) Ovíjení



Obr. 103 Struktura povrchu a) Obalené tyče b) Navinuté tyče

Jelikož mají dané dvě trubky stejné složení, strukturu, objem, hmotnost i skladbu vrstev, jak je uvedeno níže (Tabulka 2), mělo by i jejich mechanické chování být velmi podobné.

Tabulka 2 Fyzikální parametry vyrobených tyčí

	Layout [deg]	Hmotnost [g]	Tloušťka [mm]	Filamentů v 1 vrstvě	Šířka filamentu [mm]
Obalená	55/-55/55/-55	163	0,8	1	50
Vinutá	55/-55/55/-55	156	0,84	10	4

Po vyčíslení rozšířené matice tuhosti (3.48) pro daný prvek následně obdržíme (6.1):

$$C = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [0] \\ [B] & [D] & [0] \\ [0] & [0] & [H] \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 17790.1 & 20729.8 & -8.2e-09 & 9.8e10 & 4.6e-10 & -1436.8 & 0 & 0 \\ 20729.8 & 48704.7 & 2.9e-09 & 4.6e-10 & -1.9e-09 & -2809.9 & 0 & 0 \\ -8.2e-9 & 2.9e-9 & 22622.5 & -1436.8 & -2809.9 & 4.6e-10 & 0 & 0 \\ 9.8e-10 & 4.6e-10 & -1436.8 & 948.8 & 1105.5 & -4.3e-10 & 0 & 0 \\ 4.6e-10 & -1.9e-9 & -2809.9 & 1105.5 & 2597.5 & 1.5e-10 & 0 & 0 \\ -1436.8 & -2809.9 & 4.6e-10 & -4.3e-10 & 1.5e-10 & 1206.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3338.8 & -7e-11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7e-11 & 2901.1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

6.1.1 Přenos vibrací

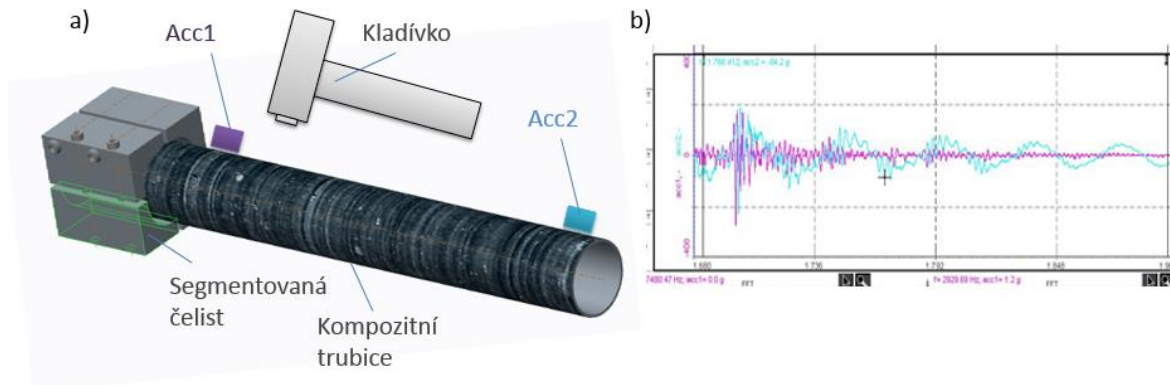
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, poloha a pozice vláken mají velký vliv na celkovou tuhost a pevnost kompozitního dílu. Při vizuálním porovnání ovinuté a obalené tyče je možné pozorovat neuspořádanější a „nehezkou“ strukturu vláken u dílu vinutého z více drobných filamentů, namísto jedné široké pásky. Reálnou představu o skutečné tuhosti a odlišnostech daných dílů ovšem poskytne modální analýza.

Hodnota vlastních frekvencí a charakteristiky materiálového tlumení nám mohou ukázat vzájemné vztahy základních mechanických parametrů obou srovnávaných dílů. Plagianakos [134] popisoval tzv. pasivní tlumení a označil jej za kritický parametr pro pružné konstrukce z hlediska únavy a aeroelastické stability. Sepahvand [135] zdůraznil, že viskoelastické vlastnosti, které mají zásadní vliv na strukturální tlumení materiálu, jsou pro polymerní matrice výrazně vyšší než u běžných konstrukčních materiálů. Nicméně zvýšení objemu matrice ve vlákny vyztužených materiálech má logicky negativní vliv na výslednou tuhost a pevnost dané konstrukce.

Volné vibrace vetknuté válcové skořepiny je vhodné popsat na základě obecné trojrozměrné teorie lineární elasticity. Nejčastěji dle Euler-Berounliho teorie dynamiky nosníku. Nicméně, lehce sofistikovanější teorie, jako často používaný "Timoshenkův nosník", vedou k mírně odlišným výsledkům, zejména u vyšších frekvencí. Tento princip byl již zmíněn v kapitole zaměřené na výpočty, kdy zanedbáváme, či uvažujeme deformace po tloušťce dílu – Midlinova deska. Celkem zajímavou závislost našel Miertovich [136], podle kterého závisí přesnost výsledku i na poměru mezi průměrem, tloušťkou stěny a délkou. Taktéž zvláštností daných kompozitních skořepin je v závislosti na skladbě výrazná dominance jedné ze vznikajících deformací tzn. buď podélného prodloužení, příčného ohýbání nebo axiálních torzních kmitů.

Experiment

Již zmíněným problémem při testování kompozitních tenkostěnných tyčí je jejich upnutí. Z toho důvodu byla vytvořena segmentovaná prizmatická čelist, složená z několika dílů, které lineárně aproximovali vnější obvod tyče. Budící impuls byl proveden modálním kladívkem. Akcelerometr Acc1 byl v blízkosti čelistí přilepený voskem a druhý akcelerometr Acc2 byl přilepený na volném konci trubky, jak je možné vidět na Obr. 104. K odhadu výkonové spektrální hustoty Obr. 105 na základě diskrétní Fourierovy transformace byl použit Welchův průměrovaný odhad překrývání oken. Na Obr. 106 je potom výsledná přenosová funkce pro jednotlivé trubky.

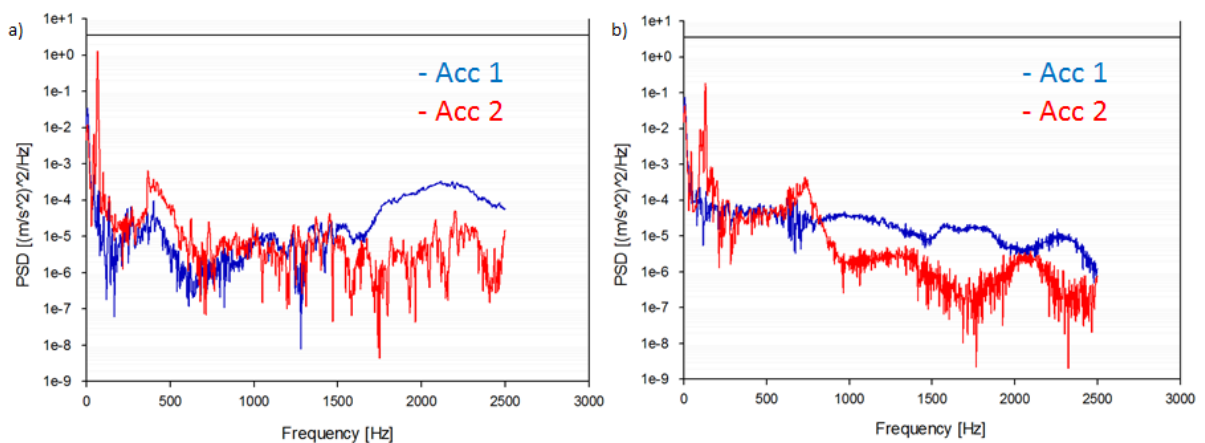


Obr. 104 Provedený experiment a) Schema b) Odezva akcelerometrů

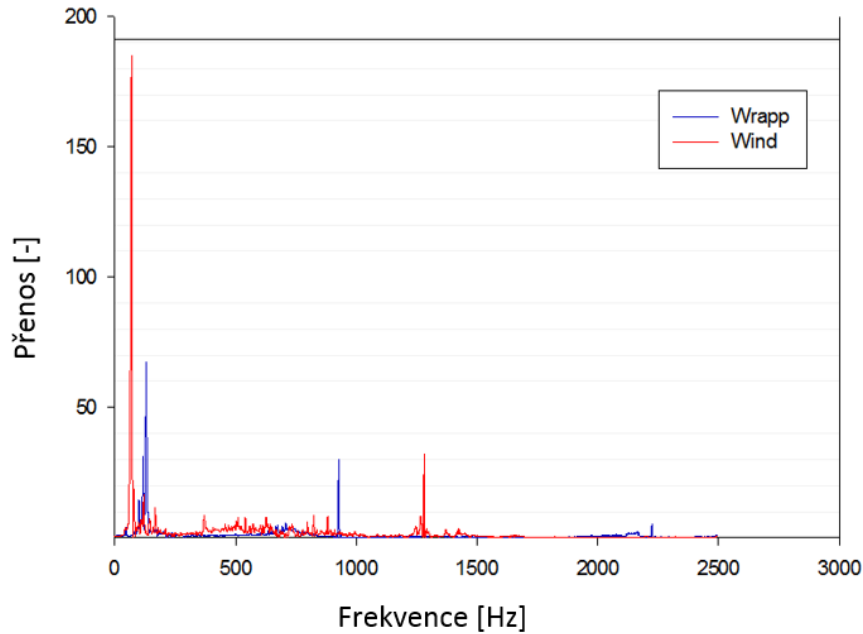
Experimentální data byla měřena s maximální frekvencí 2 000 Hz, kdy podle Shannon-Kotelnikovy věty a tzv. Nyquistovy podmínky (6.2) byla výpočetní vzorkovací frekvence 5 000 Hz.

$$f_{\text{samp}} \geq 2f_{\text{max}} \quad (6.2)$$

Kde f_{samp} [s^{-1}] je vzorkovací frekvence a f_{max} [s^{-1}] je nejvyšší frekvence obsažená v signálu.



Obr. 105 PSD funkce pro a) Obalenou b) Navinutou trubku



Obr. 106 Výsledná přenosová funkce pro dané porovnávané trubky

Numerický výpočet

Pro vetknutý nosník vystavený volným vibracím, považován za spojitý systém, ve kterém je hmotnost nosníku považována za rovnoměrně rozloženou podél osy rotace, lze rovnici pohybu napsat jako (6.3) [10].

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI(x) \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} \right] = \omega^2 m(x) Y(x) \quad (6.3)$$

Kde E je modul pružnosti materiálu nosníku, I je moment setrvačnosti průřezu nosníku, $Y(x)$ je posunutí ve směru y ve vzdálenosti x od pevného konce, ω je vlastní frekvence, m je hmotnost na jednotku délky: $m = \rho A(x)$, kdy ρ je hustota materiálu a x je vzdálenost měřená od pevného konce.

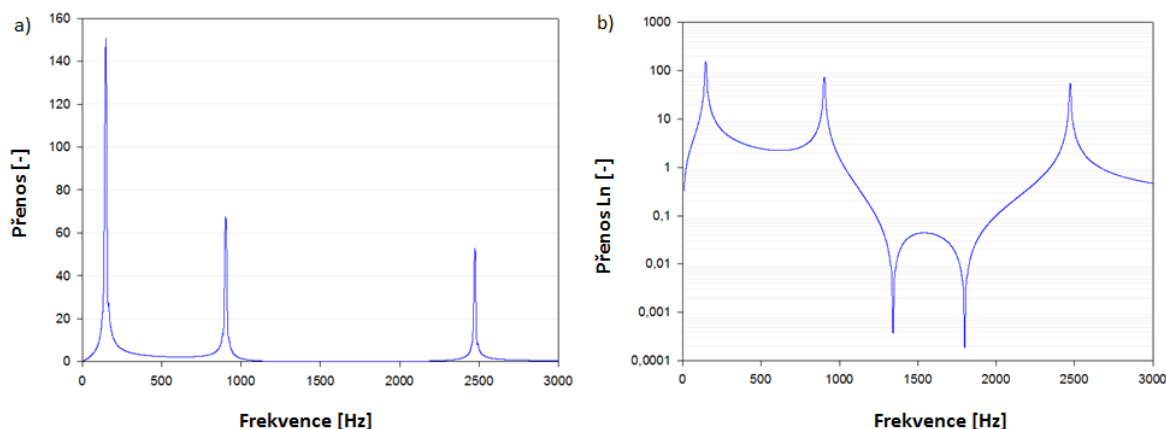
Pro daný případ konzolového nosníku jsou integrální konstanty založené na známých okrajových podmínkách na volném a upnutém místě trubky (6.4)(6.5):

$$x = 0; Y(x) = 0; \frac{dY(x)}{dx} = 0 \quad (6.4)$$

$$x = 0; \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} = 0; \frac{d^3 Y(x)}{dx^3} = 0 \quad (6.5)$$

Při tvorbě numerického modelu je v daném případě tvořen „ideální“ model, který by se měl blížit výsledkům obalené trubky, neboť v případě vinutého dílu vzniká mnoho nahodilých chyb v podobě nedokonalého zarovnání vláken, křížení či dokonce jejich zkroucení. V samotných okrajových podmínkách daného modelu ovšem není možné daný problém zakomponovat jiným způsobem, než úpravou materiálového modelu.

Prvním krokem simulace bylo sestavit modální analýzu. Druhou částí vytvořeného modelu bylo najít funkci přenosu. Toto bylo provedeno jako harmonická odezva z jedné strany vetknuté trubky. Budící síla působila na volném konci ve stanoveném intervalu 0-2500 Hz. Byla použita metoda superpozice jednotlivých módů, která uvažuje nalezené tvary módů pro výpočet výsledné reakce celé struktury. Výhodou této metody je zejména rychlejší řešení především v případech složitějších úkolů, kdy se solver zaměří do okolních pásem jednotlivých módů. Výsledkem je hladší a přesnější průběh odezvové křivky. Výsledky z modelu jsou níže na Obr. 107 a porovnání s experimentem je v Tabulka 3.



Obr. 107 Výsledná přenosová funkce určena dle FEM modelu v měřítku: a) Lineárním
 b) Logaritmickém

Tabulka 3 Výsledky simulace a experimentu

Mod č..	I.	II.	III.	IV.	V.
Model Shell [Hz]	147	908	2294	2484	3009
Model Solid [Hz]	146,9	907,3	2294,6	2492,6	3592
Exp. Obalené [Hz]	130	927	2240	-	-
Exp. Vinuté [Hz]	80	1280	-	-	-
Průběh modu [-]	Ohybový	Ohybový	Podélný	Ohybový	Torzní

V Tabulka 4 níže je posouzení citlivosti výsledku na kvalitě sítě. Bylo zjištěno, že i s násobně hustší sítí je rozdíl ve výsledku pouhé desetiny. Toto zjištění je možno podložit i výsledky Crawley [6], který se snažil porovnat sítě různých relevancí a získal výsledky, které se odlišují o méně než 2%.

Tabulka 4 Citlivost výsledku na kvalitě sítě

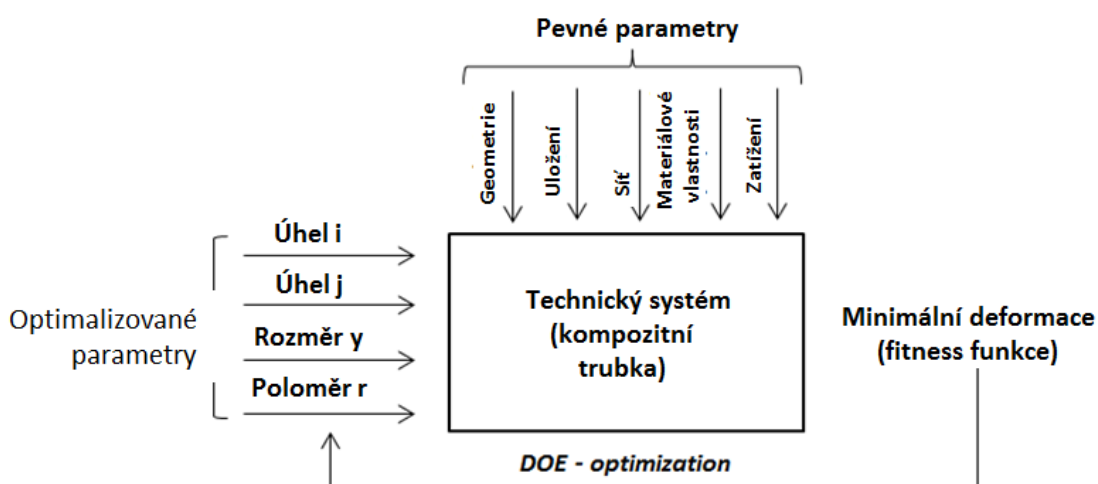
Mode	I.	II.	III.	IV.	V.	Time
Mesh:	Frequency [Hz]					<i>relatively</i>
10x30	147,2	906,0	2296,3	2487,0	3105,7	1,0
15x40	147,6	908,8	2294,3	2484,6	3009,1	1,3
20x50	148,7	912,8	2291,8	2485,6	2785,0	1,9
25x60	149,0	913,1	2289,9	2479,9	2667,8	2,7

6.2 Optimalizace návrhu

U dílů z konvenčních materiálů, je v dnešní době ve velké míře používána tzv. topologická optimalizace [83], která nám na základě okrajových podmínek pomůže navrhnout vhodnější tvar daného dílu. Jelikož u materiálů kompozitních může vzhledem k počtu vrstev a možných úhlů vláken existovat teoreticky bezpočet možných kombinací. Z tohoto důvodu je pro budoucnost důležité použití algoritmů pro negradientní vyhledávání kritériálních funkcí tzv. fitness, používaných v matematice, teorii grafů a her atd.

Parametry jako úhly jednotlivých vrstev a skladbu geometrie je nutné optimalizovat s ohledem na konkrétní zatížení součásti. Pro komplexní díly je klasický analytický přístup za účelem vyhledání optimálních parametrů obtížný. Úloha se stává stále obtížnější počtem optimalizovaných parametrů jako u kompozitu například referenčními úhly jednotlivých vrstev. Aplikovaný způsob vyhledávání optimálních parametrů (úhly jednotlivých vrstev a geometrické proporce části) by se dal zařadit pod metodu DOE (Design of Experiment). O výhodách a možnostech této metody se zmínil například Srebrenkoska [137] v úloze optimalizace kompozitních trubek či Deshmánya [138] ve studii mechanického chování kompozitů s kovovou maticí.

DOE je technika, která v daném případě na základě pokročilých numerických algoritmů vede k určení vzorkovacích bodů v dané úloze a pomocí odezvových ploch a kritériálních optimalizací. V oblasti techniky je možné nalézt mnoho oblastí použití. Společným jmenovatelem je ovšem snaha nalézt vzorkovací body SP (Sampling Points) v celkovém prostoru možných řešení co nejefektivnější cestou s co nejmenším počtem bodů. Daný algoritmus (Obr. 108) vychází z principu genetického-evolučního algoritmu, kdy se jedná o negradientní metodu řešení kritériální úlohy. Na rozdíl od gradientní funkce, jež může lehce sklouznout do lokálního extrému, dané metody pracují se stále se křížící a mutující generací SP a pro jednotlivé iterace jsou vybírány ti nejlepší kandidáti.



Obr. 108 Schéma možné optimalizační úlohy – optimální úhel vrstev a geometrie dílu

Prvním krokem výpočtu je hledání korelačních závislostí mezi jednotlivými vstupními parametry a výstupním parametrem – fitness funkcí. Celkem byl vytvořen funkční vzorek o velikosti 100 SP ustanovujících de facto první generaci dle (6.6) a (6.7), jak je možné podrobněji najít v [59][139].

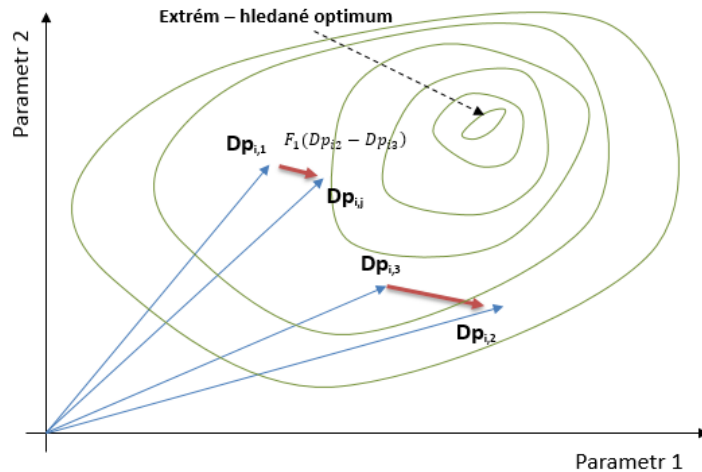
$$\text{Vzorek} = \{(type^1; Lo^1; Hi^1); (type^2; Lo^2; Hi^2) \dots (type^D; Lo^D; Hi^D)\} \quad (6.6)$$

$$Dp_{i,j} = Lo^j + rand(0,1)(Hi^j - Lo^j) \quad (6.7)$$

Kdy *type* znamená číselný formát, *Lo* a *Hi* je nejnižší a nejvyšší možná hodnota (v našem případě úhel navíjení v dané vrstvě), index *j* značí pořadové číslo aktuálního design pointu v dané generaci. Minimální a maximální hodnota pro navíjení je reálně od 10 ° do 80 °.

Takto vygenerovaná generace jednotlivých „sampling points“ je podle daného přístupu dále mutována (faktor mutace *F*).

$$v_{i,j} = Dp_{i1} + F_1(Dp_{i2} - Dp_{i3}) \quad (6.8)$$



Obr. 109 Znárodnění tvorby nového *Dp* ze tří bodů, pomocí mutace směrového vektoru

A takto mutovaná generace bodů je následně křížena (koeficient *CR*)

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & \text{if } rand_{i,j} = CR \\ Dp_{i,j} & \end{cases} \quad (6.9)$$

A posledním krokem výběru, je z takto vygenerované generace bodů x_{ij} , mutovaných do fce v_{ij} a zkřížených do u_{ij} výběr nejvhodnějších kandidátů na základě hodnoty dané fitness funkce, kdy je posouzeno, zda je vhodnější původní vygenerovaný bod (6.7) či zmutovaný a křížený jedinec (6.9) dle (6.10) jak je schematicky znázorněno na Obr. 109.

$$Dp_i^{k+1} = \begin{cases} Dp_i^k & \text{if } f(u_i^k) < f(Dp_i^k) \\ Dp_i^k & \end{cases} \quad (6.10)$$

Mezní hodnoty úhlů musí být zvoleny podle výrobní technologie, která v daném případě neumožňuje použití úhlů blízkých 0 ° nebo 90 °. Po nalezení korelačních závislostí je nutné najít

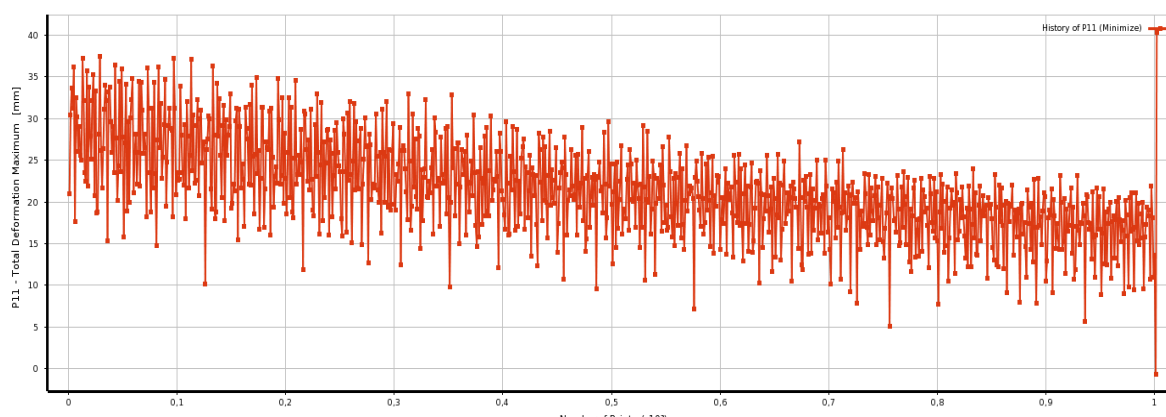
optimální řešení pomocí optimalizačního algoritmu. Z dané matice je následně možné jasně stanovit významnost jednotlivých parametrů.

Po stanovení vlivu jednotlivých vstupních parametrů na hodnotu výstupní kritériální funkce lze nalézt optimální kombinaci parametrů. Možným způsobem pro stanovení, např. maximální pevnosti dané struktury, je při konstantních okrajových podmínkách nalezení minimální hodnoty deformace. Nejlepší kandidáti byli vybráni z vygenerovaných 1000 bodů, které se přihodily k funkcím fitness v našem případě představované minimální celkovou deformací.

6.2.1 Aplikace kritériální optimalizace pro ohyb

Jak již bylo zmíněno, vlastnosti kompozitu jsou kromě fyzikálně daných parametrů jednotlivých prvků, které běžný konstruktér více neovlivní, přímo ovlivněny skladbou a jednotlivými úhly. Jejich správné určení je klíčovým faktorem při návrhu vlákniny vyztuženého dílu. Popisem těchto závislostí a přímou optimalizací dle konkrétního zatížení, se zabýval např. Métais a Mertiny. Métais [101] na konkrétním případě zkoumal nevhodnější strukturu pro výrobu toroidních tlakových nádob, zatímco Mertiny [133] studoval celkové závislosti na struktuře jednotlivých vrstev při komplexních podmínkách kombinovaných zatížení.

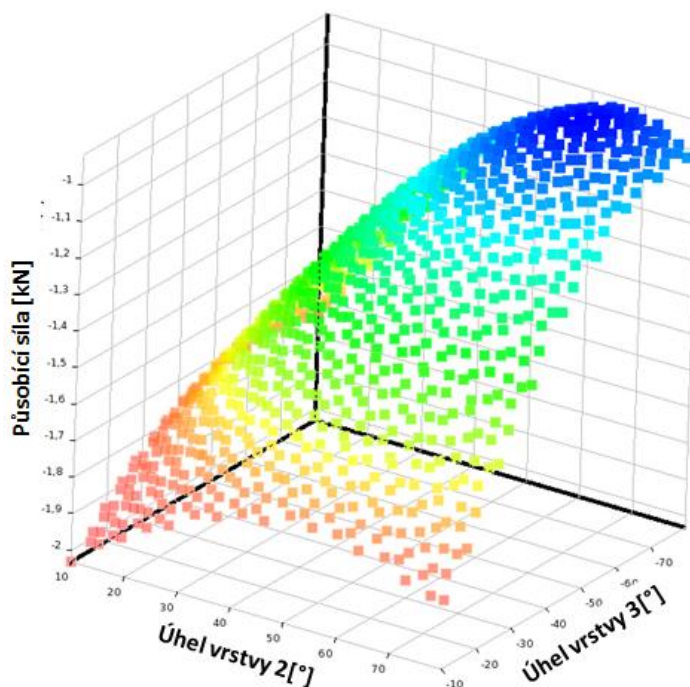
Testovaným případem s využitím výše uvedeného algoritmu bylo navrhnout a optimalizovat co nejpevnější, lokálně zahuštěnou kompozitní trubku pro definované podmínky tří-bodého zatížení, dle kap. 5. Řešení se skládalo z několika generací v celkovém počtu 100 návrhových bodů. Zadané parametry kritériální funkce byly úhel druhé a třetí vrstvy kompozitu, jako optimalizovaný parametr potom velikost působící síly. Čím vyšší síla je při stejné deformaci vyvozena válcovým indentorem, tím tužší struktury kompozitu bylo dosaženo. Na Obr. 110 níže je možné vidět jednotlivé body průběhu výpočtu. Jelikož se nejedná o metodu gradientní, je možné pozorovat charakteristický rozptyl v hodnotě kritériální funkce, která ovšem jasně inklinuje k cílovému – tedy optimálnímu řešení. Řešení tedy neuvízne v lokálním extrému, ale je prohledána skutečně celá množina řešení.



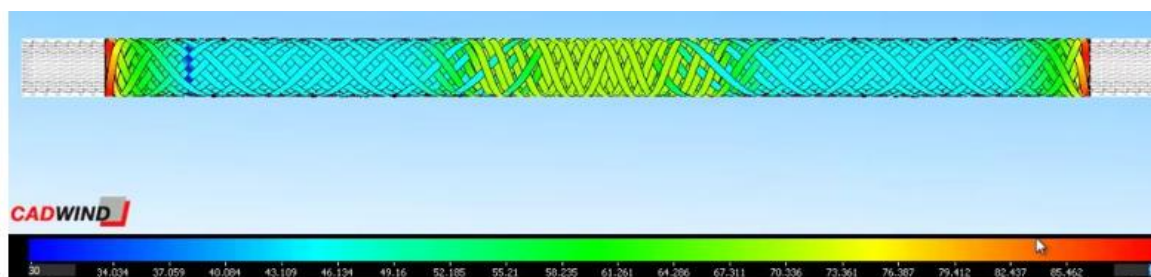
Obr. 110 Konvergence výpočtu, vedoucí k hledání lokálního optima daného problému

Na Obr. 111 níže, je formou 3D grafu zobrazena charakteristická závislost tuhosti kompozitní tyče, na úhlu dvou vrstev. Úkolem následné optimalizace bylo určení, jak široký díl tyče lokálně zahustit s kritériem minimální délka vláken ku tuhosti tyče.

Výsledný parametrizovaný 3D model sestavený v sw CADWIND je zobrazen na Obr. 112. Je tedy možné pozorovat úkaz dosažitelný pouze s dlouhvláknennými kompozity, a tím je lokální možnost přizpůsobení vlastností konkrétní aplikaci. Namísto zahušťovat celý díl, byla zahuštěna pouze středová část v optimální šíři, čímž jsou jak ušetřena vlákna ve zbytku tyče, tak zkrácena výrobní doba procesu.



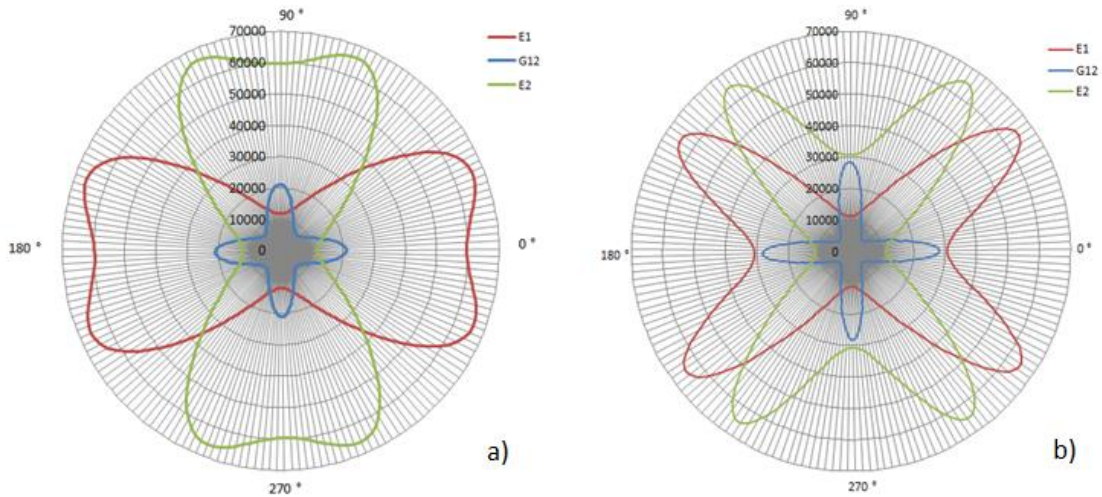
Obr. 111 Závislost ohybové tuhosti dílu, na úhlu 2. a 3. Vrstvy



Obr. 112 Parametrický model nerovnoměrně navinutých vláken a barevné rozlišení navíjecího úhlu sestavený v sw CADWIND

Vytvořené a porovnávané trubky byly navinuty z 16 tenkých pásů a obsahují celkem 4 vrstvy o celkové tloušťce 0,84 mm.

Uspořádání vláken v případě normální tyče bylo 55/-55/55/-55, a hmotnost 158 g. V případě lokálně zahuštěné tyče bylo globální rozložení 1. a 4. vrstvy také 55/-55/55/-55 zatímco ve 2. a 3. místně došlo k zahuštění ve střední části na 55/-70/70/-55, při výsledné hmotnosti 165 g. Při určení hodnot inženýrských veličin v místě běžného a lokálně zesíleného průřezu, obdržíme hodnoty E1, E2 a G12 viz Obr. 113.



Obr. 113 Polární vlastnosti a) Klasické b) Vytvrzené kompozitní tyče

Pevnost materiálu v ohybu je maximální napětí, kterému materiál vystavený ohybovému zatížení může odolat před selháním [124]. Cílem provedeného experimentu bylo studium chování dvou typů trubek v ohybovém namáhání. Aplikované kvazistatické zatížení se zvýšilo o krok 0,5 mm/s. Základní rovnice rovnováhy v bodě (x, z) je dána (6.11)

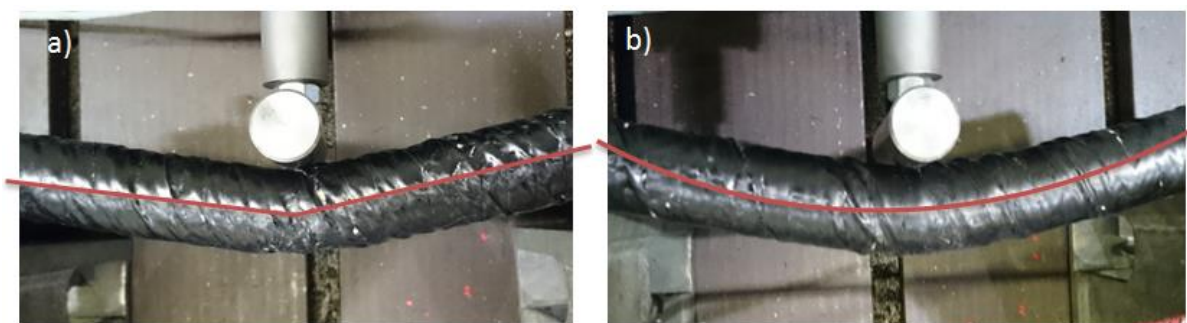
$$\frac{d\sigma}{dx} - \frac{d\tau}{dz} = 0 \quad (6.11)$$

Kde σ a τ jsou normální a smykové napětí. Vzhledem k tomu, že pro kompozit střední rovina není přesně uprostřed testovaného vzorku, musíme rozlišovat h_b měřenou od neutrální roviny ke dnu paprsku a h_t k vrcholu v rovnici (6.12).

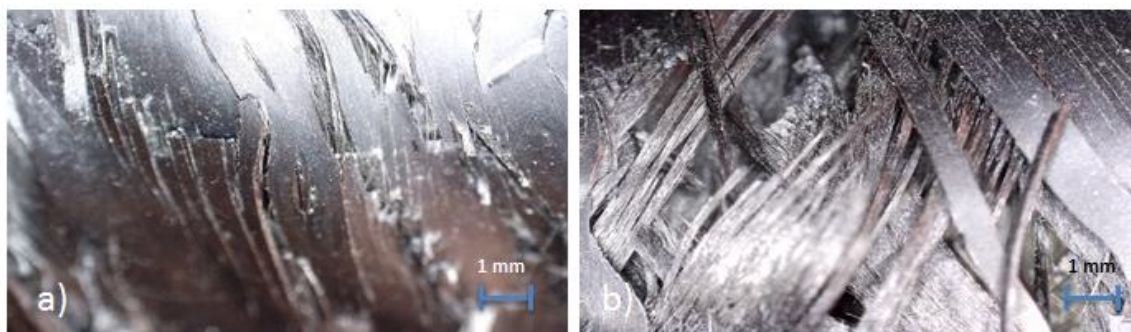
$$\int_{-h_b}^0 \sigma_T dz + \int_0^{h_t} \sigma_C dz' = 0 \quad (6.12)$$

Kde indexy T a C označují napětí a kompresi a součet $h_b + h_t$ je roven průměru zkoušené tyče.

Při provedení standardního ohybového testu, je potom na Obr. 114 možné vidět rozdílné chování obou dílů. Zatímco obyčejná tyč se ve svém středu prolomí a začne praskat, tyč lokálně vytvrzená dlouho odolává, napíná se jako luk a potom se v jednom okamžiku rozletí. Velmi odlišný je i charakter vzniklého lomu, viz Obr. 115.

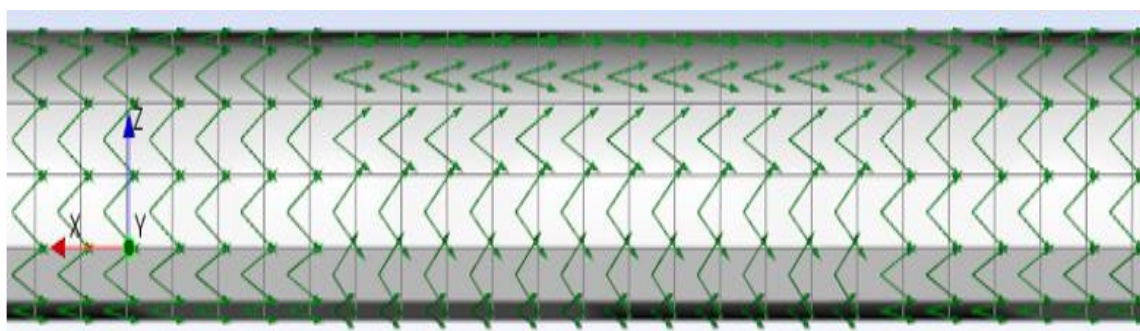


Obr. 114 Průhyb před okamžikem selhání a) Původní b) Vytvrzené trubky



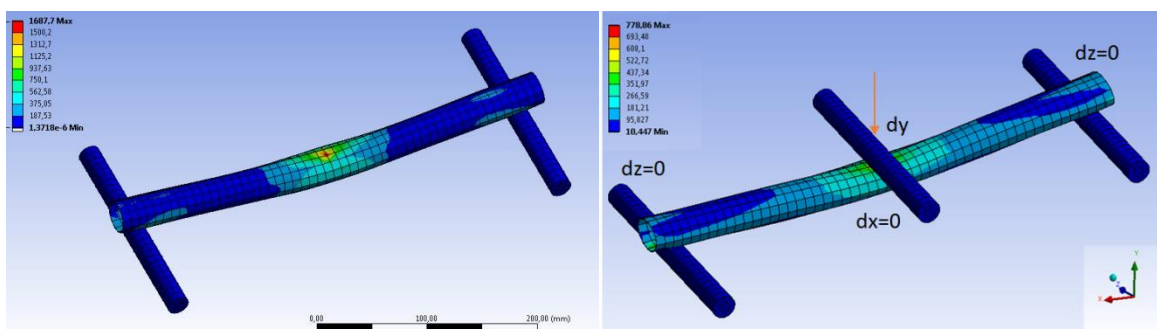
Obr. 115 Mikrosnímek výsledného lomu a) Původní b) Vyztužené trubky

Celá situace byla verifikována i pomocí FE simulace, kdy jednotlivé vrstvy představoval shellový element s několika lokálními souřadnými systémy, jak je možné vidět níže (Obr. 116). Místa možného vzniku chybových prvků (drop-off places) na rozhraní mezi jednotlivými sektory s různým návinem byla vyplněna materiálem se stejnými vlastnostmi jako hlavní kompozit. Nejjednodušším způsobem jak pro první kroky výpočtu vyřešit neurčité uložení modelu (skořepinová tyč volně ležící na pevných podpěrách) bylo do daného time-stepu přidání slabé pružiny, jenž pro daný moment doplnila chybějící okrajovou podmínku.



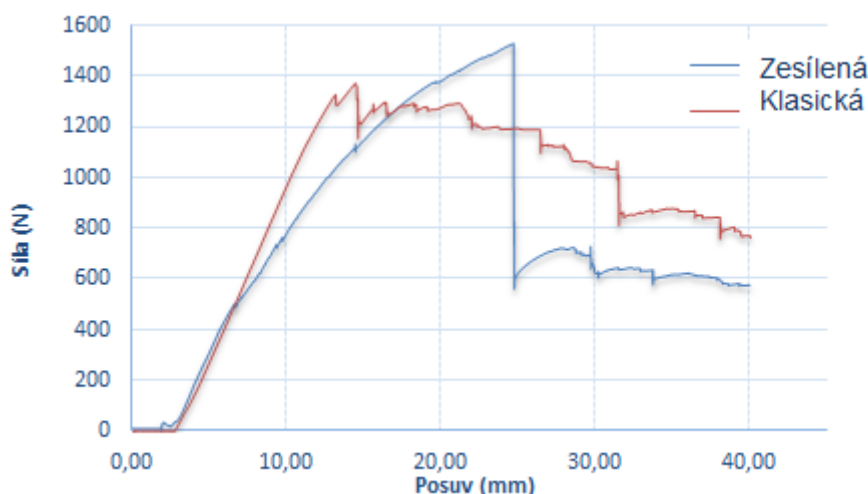
Obr. 116 Směrové vektory v lokálním zahuštění vláken na trubce

Porovnáme-li výsledné rozložení napětí v původní a vyztužené tyči, je možné pozorovat jasnou koncentraci uprostřed, zatímco ostatní vlákna nenesou nic – principiálně tedy není důvod jejich přítomnosti. V případě vyztužené tyče je na Obr. 117 vidět mnohem efektivnější využití vláknenné výztuhy.



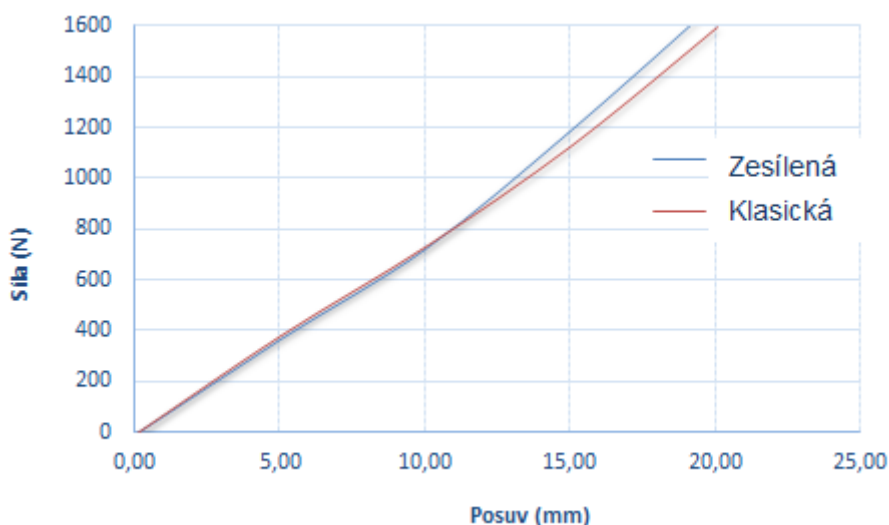
Obr. 117 Numerický model pro a) Klasickou b) Lokálně zesílenou trubku

Pokud se podíváme na reálné výsledky zatěžování (Obr. 118), je patrný již zmíněný fakt, kdy klasická tyč postupně praská, zatímco zesílená se do poslední chvíle napíná a potom náhle rozlomí (model ztratí schopnost konvergence).



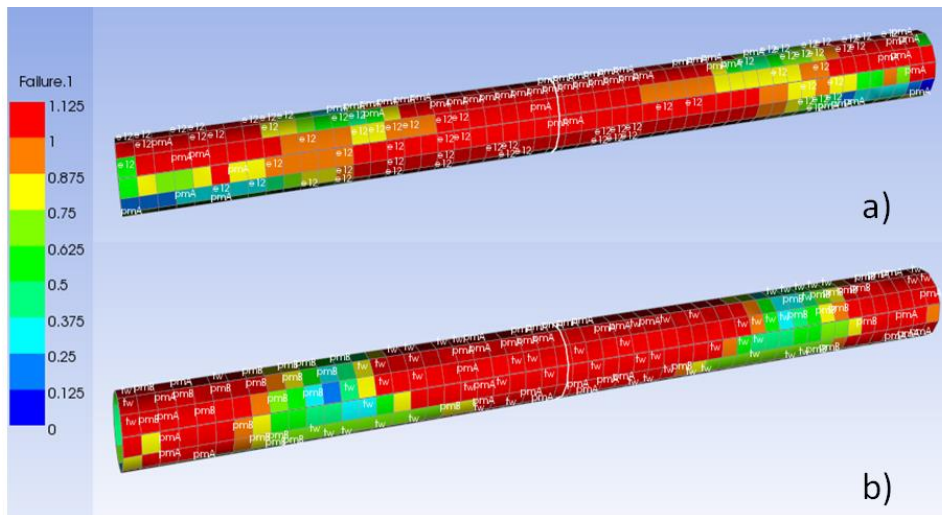
Obr. 118 Zatěžovací křivky testovaných dílů

Pomocí numerické simulace není možné predikovat jednotlivé okamžiky porušení a tím vznikající skokové oslabování struktury. Průběh simulace zatěžování dílů je možné vidět níže (Obr. 119).



Obr. 119 Numerické ověření zatížení daných tyčí

Teoretický rozdíl těchto dvou tyčí, se na základě výše uvedeného grafu může zdát zanedbatelný. Pokud ovšem použijeme vhodný nástroj, jako jsou kritéria porušení - predikující místo možného výskytu poruchy je evidentní, že v zesílené tyči je napětí mnohem lépe rozloženo, tedy kompozit je navržen efektivněji. Použitými kritérii bylo Tsai-Hill a Puckovo. Daná kritéria byla zvolena na základě studií díla Capely [143], který je aplikoval pro krut a ohyb a testoval spolehlivost pro celé spektrum navíjecího úhlu $[0/90]^s$ a $[\pm 45]^s$. Na obrázku Obr. 120 níže je možné jasně vidět, že na původní konstantně navinuté tyči jsou místa s minimálním využitím, zatímco ve středu trubky je výrazné napětí – rychlé prolomení středu trubky při experimentu.



Obr. 120 Kritéria porušení dle Tsai-wu a Puck pro a) Vyztuženou b) Původní tyč

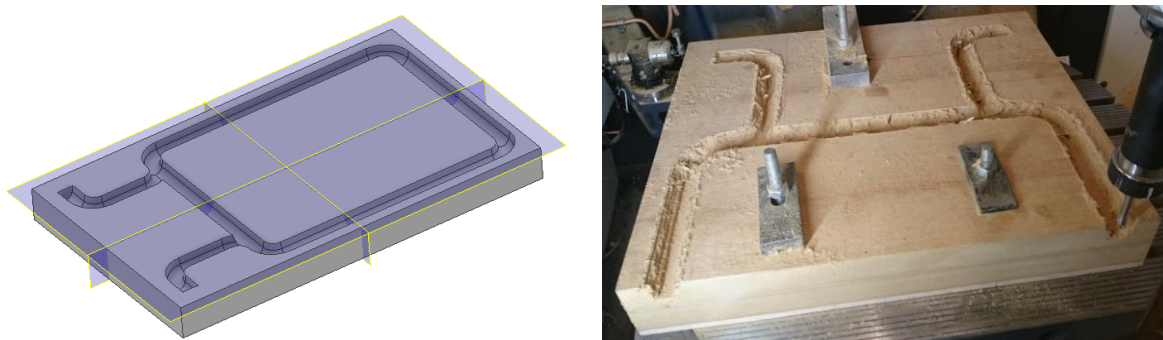
6.3 Závěr kapitoly:

V dané kapitole bylo provedeno základní testování vyrobených zjednodušených dílů, trubkového tvaru. Na základě experimentu a modelové simulace, byla porovnána konvenční metoda obalení materiálu a testovaného ovíjení prepregem. Ačkoliv by dané díly měly být teoreticky identické, z hlediska přenosu vibrací, tlumení a tedy i dynamické tuhosti je chování daných struktur značně rozdílné. Nalezené experimentální výsledky obalené trubky a numerický model jsou v relativně dobré shodě, jak je patrné z tabulky 5.1, či na Obr. 107. Při posouzení druhého případu tj. navíjené části, složené nikoliv z jedné široké pásky, ale deseti relativně úzkých segmentů jsou zjištěné hodnoty výrazně odlišné. Na základě výsledků je možné souhlasit se Zhangem [144], v dominanci ohybového módu. Dané by mohlo být způsobeno mnoha nedokonalostmi v uložení vláken, kdy v případě návinu nejsou dokonale zarovnané. Otázkou do diskuze ovšem zůstává, je-li tento lokální fenomén opravdu nežádoucí, neboť v případě celkové tuhosti struktury nelze zcela jistě hovořit o degradaci vlastností, spíše o pouhém posměnění charakteristického chování oproti teoretickému.

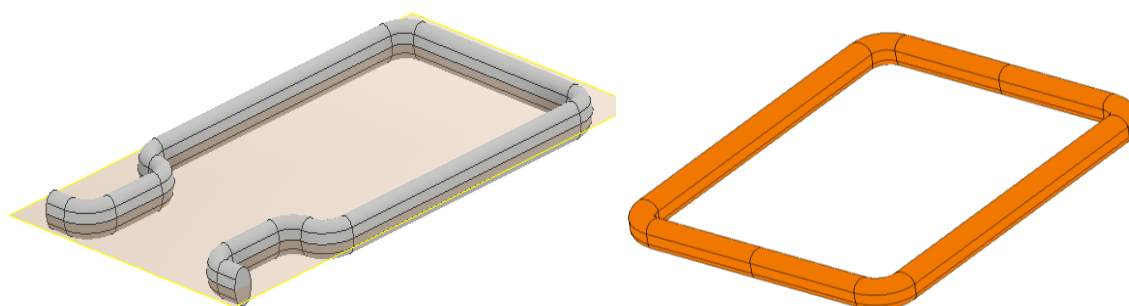
V další části kapitoly byl představen pokročilý matematický algoritmus, založený na generické optimalizaci. Praktická demonstrace byla provedena na případě tříbodového zatížení a hledání lokálního zesílení dvou vrstev daného dílu v hledané šíři. U experimentálně ověřených dílů bylo možné pozorovat výrazné zesílení dílu optimalizovaného oproti klasickému. Na základě daných výsledků, je tedy možné říci, že díky cílené lokální úpravě úhlu vinutí je možné dosáhnout úspory snížením množství vláken a jejich soustředěním pouze na potřebných místech. Výsledky ovšem odpovídají teoretickým očekáváním. Směry vláken daných úhly jednotlivých vrstev jsou obecně co nejbliže k přímému tahovému zatížení vláken. Vhodné by tedy do budoucna bylo aplikovat multikriteriální optimalizaci pro případ složitějšího namáhání.

7 Výroba prototypového rámu

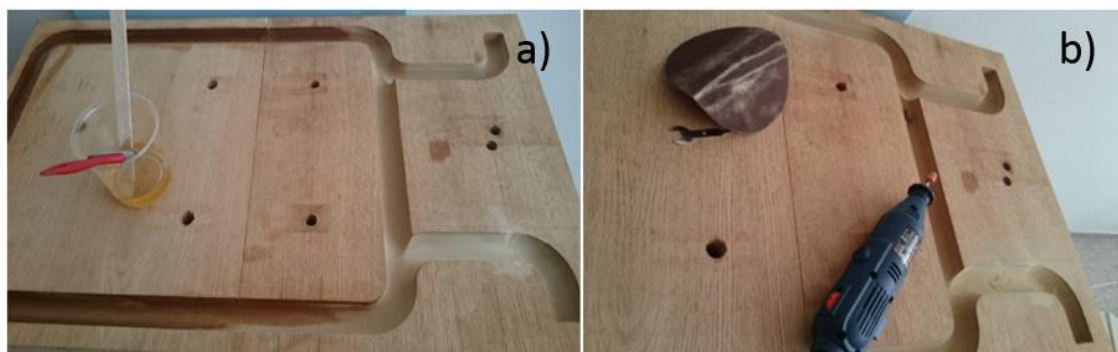
Jako testovací rám byl navržen díl, jenž při výrobě z jedné společné formy (Obr. 121) umožňuje získat dva různé rámy (Obr. 122). První z rámu otevřený, jehož použití bude jako testovací podvozek v transférovém výzkumu testovaného dětského vozítka. Daná idea vznikla při výzkumu konkrétně aplikace vysoce pevných materiálů do podvozku vozítka, kdy u zařízení používaných lidmi - v daném případě konkrétně dětmi, jsou velmi přísné nároky na bezpečnost, pevnost a současně co nejmenší hmotnost [140]. Druhý uzavřený rám by mohl být díky zavřenému tvaru a rozměrům použit do automobilové sedačky jako rám opěradla. V konstrukci automobilu je trend snižování hmotnosti a náhrada konvenčních materiálů vysoce pevnými slitinami či kompozity dobře znám. Aplikace kompozitu do autosedačky není ovšem stále vyřešena [141], jediným známým řešením je monolitová skořepinová závodní sedačka známá např. ze závodních vozidel. Uzavřený kompozitní rám, např. použitý jako opěradlo, by byl řešením zcela novým.



Obr. 121 Navržený tvar formy celého rámu a následná výroba



Obr. 122 Model otevřeného a uzavřeného jádra



Obr. 123 MDF forma a) Zatmelení mezer, vytření pryskyřicí b) Leštění a voskování

Rám z PUR - IPITHERM

Před odlitím pěny do formy (Obr. 123) je nutné stanovit vnitřní objem dutiny formy pro přesné odměření jednotlivých složek pryskyřice. Vnitřní dutina má objem 1 417 804 mm³, což znamená přibližně 1.4 litru. Na základě těchto skutečností bylo zředěno 0,32 l složky A a 0,385 l složky B. Výrobce udávaný poměr [63] je ovšem pro danou aplikaci příliš vysoký, při reakci vzniká výrazná exotermická reakce a dochází k degradaci již vzniklé struktury. Směšovací poměr proto musel být upraven snížením podílu látky Ipitherm_A. Nalezený vhodnější směšovací poměr byl stanoven 3:5. Na základě těchto zjištění bylo zředěno 0,15 l složky A a 0,25 l složky B a vypěněn polyuretanový rám (Obr. 124).



Obr. 124 Výsledný tvar vypěněného PUR jádra rámu po slepení obou polovin (nečištěný)

Rám z epoxidu - Resoltech

Vzhledem k expanzi budoucí pěny, která je ve volné formě čtyřnásobná bude tedy použito 0,35 l vypěňovací látky. Ta je složena ze dvou částí A a B, jenž se míchají v poměru 100:30 [100]. Na základě těchto údajů bylo tedy zředěno 0,27 l složky A a 0,08 l složky B a vypěněn epoxidový rám (Obr. 125).

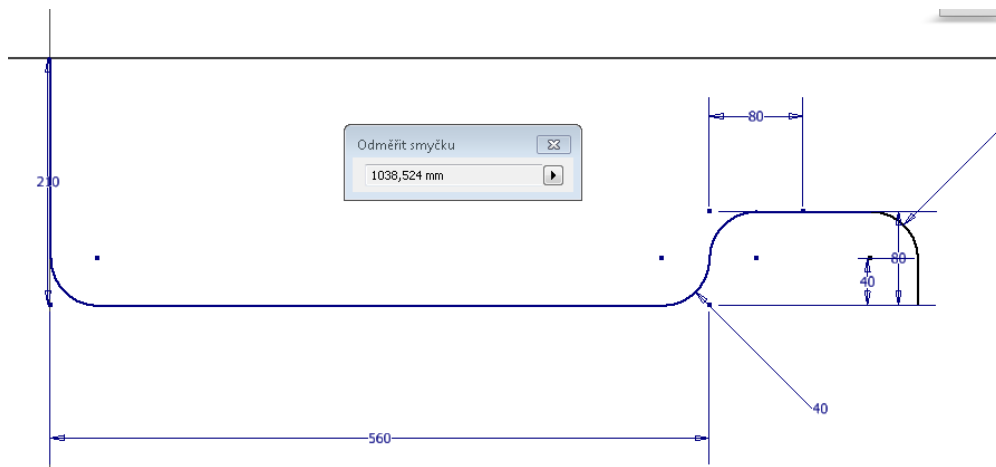


Obr. 125 Odlévání rámu z epoxidové směsi

7.1.1 Výpočet potřebné délky vlákna

Dalším nutným bodem, je vzhledem k podmínce zachování kontinuity vlákna – jeho nepřerušení po celé délce rámu, nutnost určit požadovanou délku pásky, kterou musíme umístit na cívku použitého výrobního zařízení.

Při parametrickém vyjádření trojúhelníku dané šroubovice stanou se fundamentálními parametry poloměr vepsaného válce (jádra), jehož vlákno šroubovým pohybem opisuje, počet závitů z_i a navíjecí úhel α_1 . Délka závitu šroubovice (Obr. 126) může být spočtena dle přepony pravoúhlého trojúhelníku o stranách $2\pi r$ a stoupání p určené na základě navíjecího úhlu. S ohledem na kombinované zatížení – krut a ohyb byl zvolen navíjecí úhel 55° . Na základě navíjecího úhlu a poloměru je tedy možné sestavit charakteristický trojúhelník (7.1) a na jeho základě určit potřebnou délku prepregové pásky pro navinutí (7.3).



Obr. 126 Odměření délky trajektorie v CAD systému

$$z_i = \frac{Lc}{p} = 31 \quad (7.1)$$

Kde z_i udává počet závitů, Lc celkovou délku křivky trajektorie, p výšku jednoho závitu.

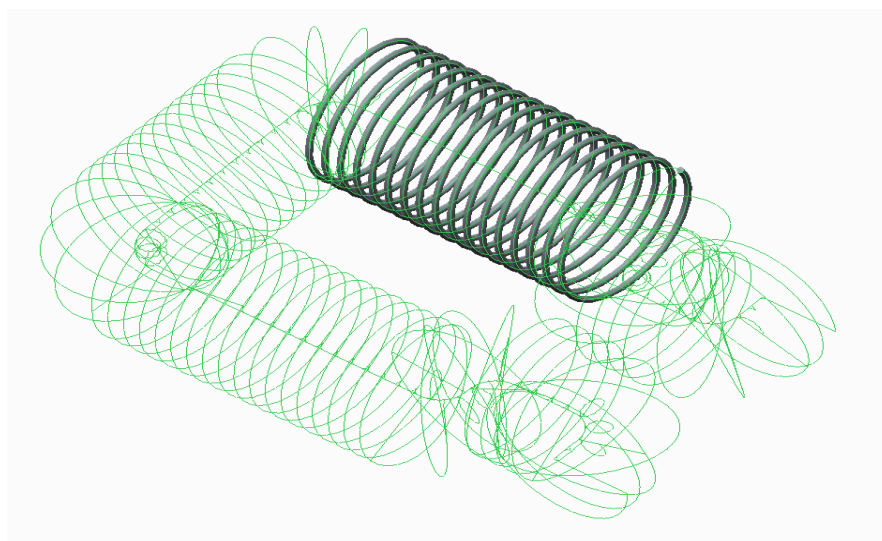
$$p = L1 \times \sin \alpha = 66,5 \text{ mm} \quad (7.2)$$

Potřebná délka navinuté pásky na cívce je tedy minimálně:

$$l_k = z_i \sqrt{(2\pi r)^2 + p^2} = 3\,596 \text{ mm} \quad (7.3)$$

Délku pásky je možné ověřit i graficky pomocí vhodného CAD softwaru. Dříve zmíněné specializované nástroje jako CADWIND ovšem neumí takto komplikovanou geometrii jádra zpracovat a zobrazí chybu „nevyrobitelné“. Dané jádro by se tedy muselo zpracovat po

jednotlivých konvenčně ovinutelných částech. Jednoduchou náhradou je ovšem tvorba šroubovitě křivky podél dané osy rámu, čímž je možná vizualizace dráhy bodu při navíjení i následné odměření délky křivky (Obr. 127). Drobnou nepřesností ovšem je, že daná křivka neopisuje daný oválný profil rámu ekvidistantně, ale kružnicí.



Obr. 127 Simulace trajektorie jedné pásky při navíjení rámu

Tabulka 5 Délka vlákna, které je možné umístit na cívku

Metoda	Délka pásky
Výpočet	5 660 mm
Odměření	5 800 mm

Na danou cívku o poloměru $d = 30$ mm a $D = 45$ mm, se vejde přibližně 5 metrů prepregových vláken, na návin jednoho rámu by mělo postačit 3,5 m.



Obr. 128 Navinuté cívky s prepregem a separačním silikonovým papírem

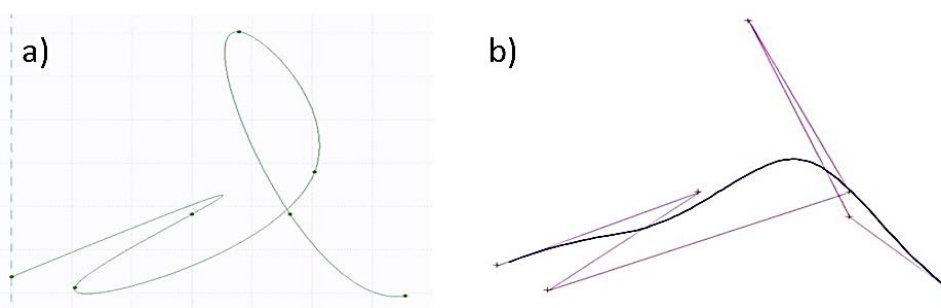
7.2 Řídící křivka tvaru jádra

Pro tvorbu řídicí křivky a následného modelu byl použit systém Creo Parametric 3. Creo CAD software vhodný pro parametrickou definici řídicí křivky, kterou je možné ovládat manuálně i přímým zadáním směrných parametrů, včetně přechodových vlastností v místech napojení a přímé kontroly řídicího polynomu.

Jedním z důležitých parametrů je spojitost přechodu jednotlivých napojení blendových částí rámu, především v místech tvarových přechodů, kde je v podobném případě nutné definovat, zda chceme zachovat tečnost ploch, rovnoběžnost tečných vektorů či navázat konstantní křivostí.

V daném případě je možné využít dvě v technické praxi používané křivky, které budou schopné vhodně reagovat na změny směrového vektoru a poloměru křivosti. Křivky je obecně možné definovat pomocí explicitního vyjádření $z = f(x, y)$ případně implicitně $F(x, y, z) = 0$. V počítačové grafice [142] je potom každá křivka definována jako rovnice množiny tvořících bodů $P(t) = [x(t); y(t); z(t)]$ či řídicím vektorem $\vec{p}(t) = [x(t); y(t); z(t)]$.

V našem případě byl koncept nejdříve testován pomocí B-Spline Obr. 129 a. Tato křivka je řízena částmi polynomiálních funkcí a jejich aproximacemi. Spline, je zjednodušeně křivka procházející zadanými body, která se stále snaží o dosažení co nejnižších hodnot poloměru křivosti v celém svém průběhu. Oproti tomu, Beziérova křivka Obr. 129 b, je jasně definována okrajovými body (i body obsahují své vlastní okrajové podmínky) a další body v průběhu křivky jsou určeny k řízení tvaru řídicího polygonu. Z toho důvodu je tato křivka jednou z nejpoužívanějších v počítačové grafice, např. při tvorbě textových fontů. Změnou stupně Beziérovky křivky je možné rozlišit mezi definicí přímek, křivek, elips, parabol i hyperbol.

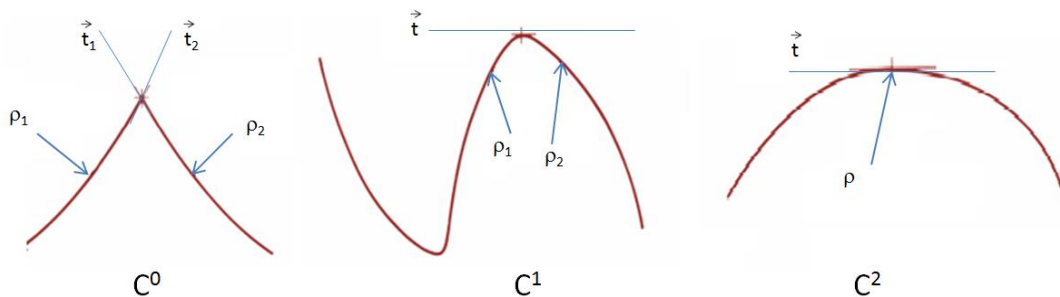


Obr. 129 Řídící body proložené křivkou a) Spline b) Bezier

Z pohledu tvorby budoucího numerického modelu a řízení trajektorie robota, není Spline schopná dostatečně reagovat na rychlé změny tvaru a současně dostatečně neumožňuje definici velmi důležitého parametru spojitosti při napojování více křivek. Parametr třídy spojitosti Obr. 130 udává tvar v místě přechodu a spojení více tvořících křivek, v našem případě tedy místo kde se rám teoreticky uzavírá. Tento parametr rozlišuje 3 stupně [87][142]:

- Spojitost C^0 znamená společný bod, dva různoběžné vektory a současně rozdílný poloměr křivosti obou křivek.
- Spojitost C^1 je charakteristická společným tečným vektorem \vec{t}_i v místě společného bodu, ovšem při rozdílném poloměru křivosti.

- Spojitost C^2 potom logicky doplňuje skupinu společného tečného vektoru a shodné hodnoty poloměrů křivosti navazujících částí křivek.



Obr. 130 Třídy spojitosti v místech napojení jednotlivých částí řídicí křivky a obrysových ploch

Export dat

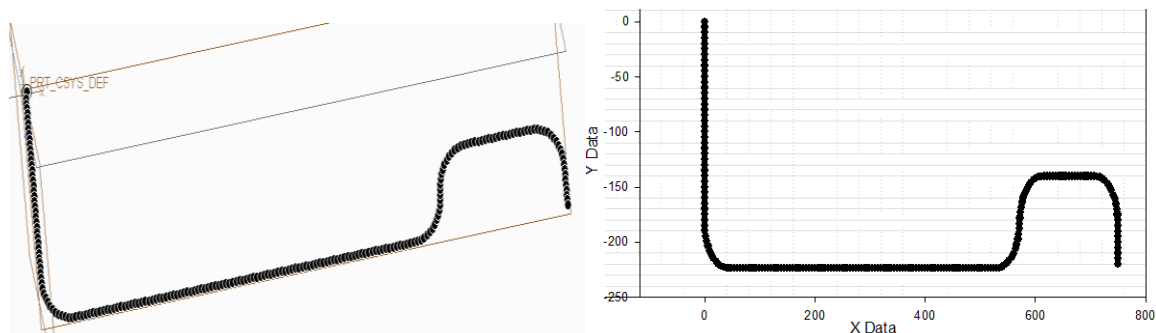
S ohledem na využití výrobní automatizace – robotické naváděcí rameno, je nutné získat pro další část procesu souřadnice bodů ustavujících trajektorii nenosného jádra rámu.

Z toho důvodu bylo analyzováno množství využití standardizovaných formátů pro přenos souboru a import dat z nich. Nutné bylo najít formát vhodný pro dostatečně přesný export souřadnic bodů řídicí křivky. Nejjednodušším způsobem rozčlenění křivky na segmenty a exportu souřadnic takto vzniklého množství bodů, by mohl být jejich pattern po dané křivce, jenž následně umožní export souřadnic do číselného, ideálně *.csv formátu. Tato funkce ovšem v konvenčních CAD systémech běžně možná (dají se ovšem najít různé uživatelské skripty). Možností by mohl být export dané množiny bodů do univerzálního CAD formátu jako např. *.step, *.iges, *.dxf a *.stl. Jelikož dxf je určeno především pro 2D návrhy a struktura stereolitografie je zbytečně složitá, jako vhodný pro převod do matematického formátu se jeví formát IGES a Step (Podrobná syntaxe v Příloha_2). Pro ilustraci přiložena souřadnice jednoho z bodů ve formátu:

- **IGES:** 4HPNT2; 116,0D0,3D1,2.853D1 – kde tzv. Hollerithův formát řetězce udává 4 platná místa obsahující název PNT2, následně kód 116 což je specifikace bodu a jeho souřadnice [0,0; 30; 28,53]
- **Step:** DATA; 7=CARTESIAN_POINT('PNT1',(0.E0,3.E1,2.853E1)); jeho čtení je intuitivnější bez nutnosti znalosti kódování jednotlivých entit, Daný řádek souboru udává bod, 7. prvek daného modelu v kartézském souřadném prostoru (3 základní roviny a 3 osy). Dále název PNT1 a souřadnice [0,0; 30; 28,53]

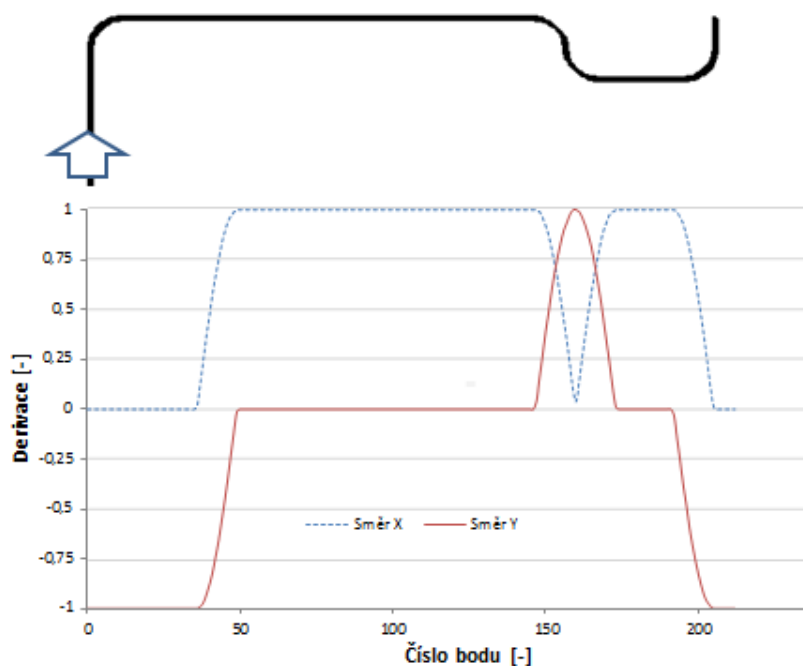
Jak je zřejmé z porovnání výše, drobnou úpravou hrubého textu a následným importem výpočetního editoru je možné z obou formátů poměrně jednoduše získat požadované souřadnice. Formát step je ovšem jednodušší a intuitivnější, proto byl zvolen pro další práci.

Na Obr. 131 níže je, pomocí bodů s konstantním odstupem, proložena křivka budoucího rámu určená pro numerickou optimalizaci trajektorie jednotlivých pracovních os robota, za účelem co nejpresnějšího polohování vláken a co nejmenší počet pracovních pohybů.



Obr. 131 Trajektorie rámu a) aproximovaná skupinou bodů b) zobrazena formou 2D grafu

Dalším krokem je jak zmiňuje Mlýnek [59] příprava trajektorie tak, aby robot pokládal nekonečná vlákna na zakřivené plochy ve správné orientaci, v různých směrech a bez překrutů. Mlýnek a kol. za tímto účelem vytvořili rekurzivní numerické algoritmy, jejichž cílem je vytvořit takovou trajektorii, při které nebude robot při pokládání vytvářet nežádoucí mezery, ani se vedle sebe pokládané pramence nebudou překrývat. Pro výpočet potřebné trajektorie, byl autorem použit výše uvedený model výše zmíněných autorů a z toho důvodu nebude daná metoda více rozebírána. Zevrubný popis je možné najít v uvedené literatuře.

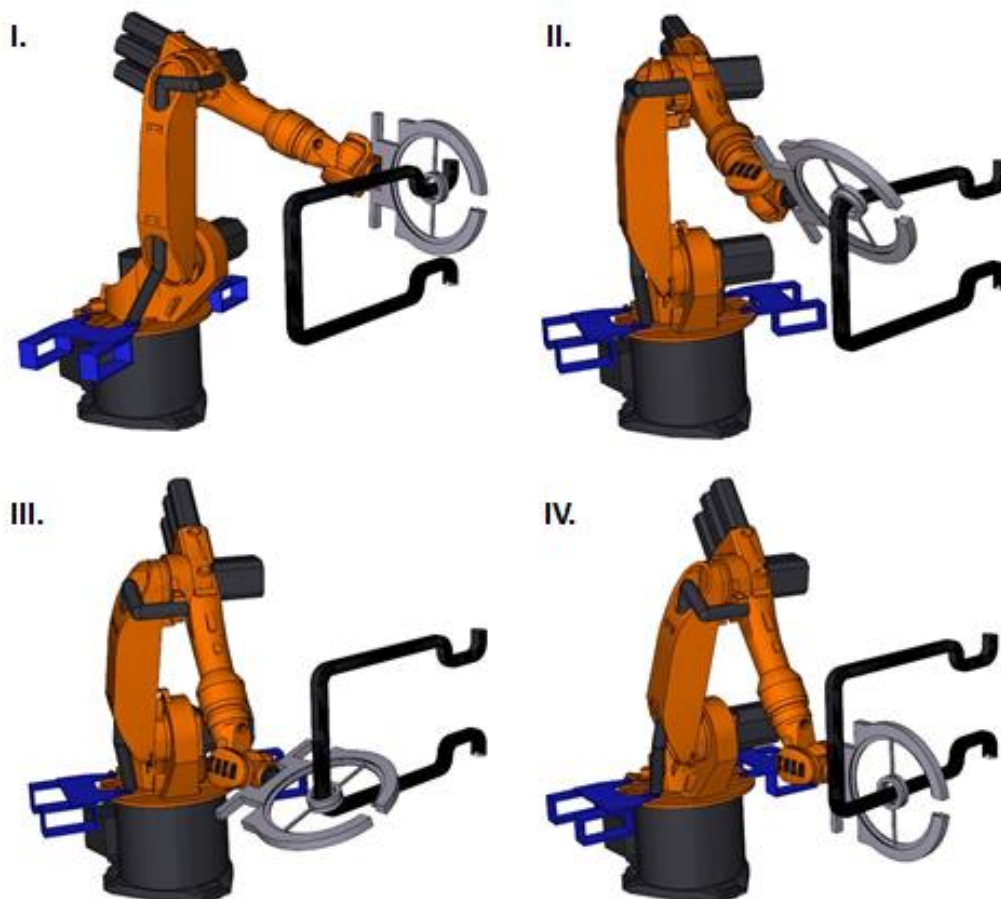


Obr. 132 Hodnota derivace v jednotlivých směrových osách navrhovaného 2D rámu

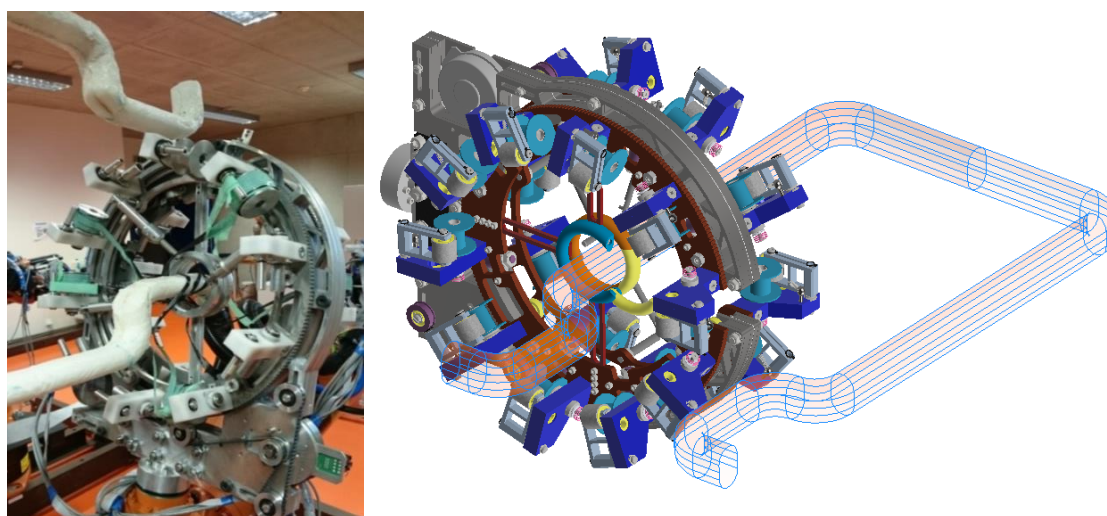
Stručně lze problém charakterizovat nenosným jádrem s průřezem o známém poloměru. Středová osa je zadána v lokálním souřadném systému CAD modelu před transformací do globálního systému robota definována pomocí diskretní množiny bodů - Obr. 131a. Důležitá je právě definice jednotkového vektoru mezi dvěma sousedními body, charakterizujícími potřebnou rotaci hlavy kolem osy. Hodnoty tvořících vektorů je možné určit na základě geometrie dílu Obr. 132. Úkolem optimalizace je následně průběh poloh průvlačných kroužků. Cílem je výpočet takové trajektorie, jenž zajišťuje postupný průchod osy rámu středem navíjecí hlavy s co nejmenší hodnotou odklonu tečného vektoru.

7.2.1 Návin otevřeného a uzavřeného rámu

Před provedením vlastní výroby na robotickém pracovišti je nutné zpracovat a vytvořit výsledný soubor instrukcí, který je importován do robotického zařízení a dále zpracován automaticky. Na Obr. 133 níže je možné vidět provedenou simulaci pro ověření správně definovaných okrajových podmínek úlohy a na Obr. 134 reálný proces navíjení daného otevřeného rámu.



Obr. 133 Simulace procesu navíjení dle optimalizovaných parametrů



Obr. 134 Simulace a reálný návin vláken kolem testovacího otevřeného PUR jádra

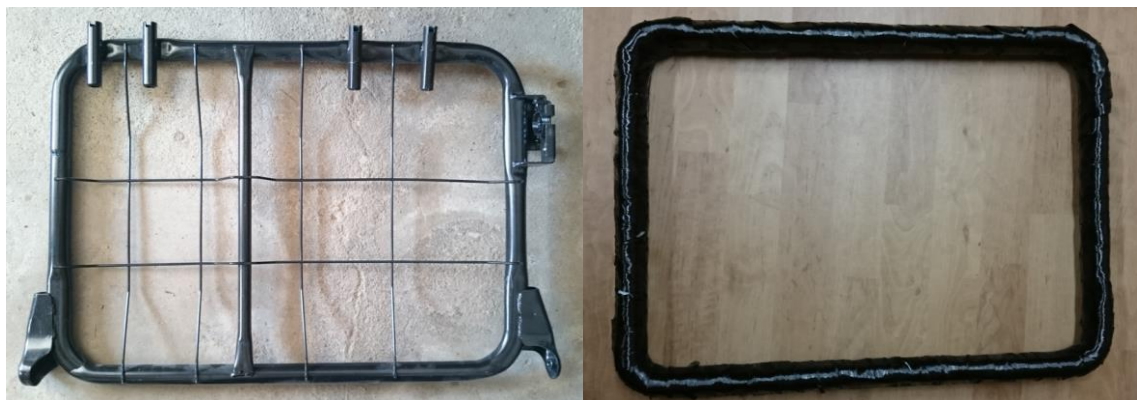
Navinuté díly byly po navinutí, před procesem vytvrzení ovinuty silikonovou gumou se zvýšenou odolností proti teplotám, pro zajištění konstantního a optimálního přitlaku po celém obvodu dílu. S ohledem na vznikající pnutí v ovinutých vrstvách a komplikovanosti dané otevřené geometrie, byl daný rám vyztužen ocelovými profily, jak je možné vidět na Obr. 135 V případě rámu uzavřeného se kroucení nijak neprojevovalo.



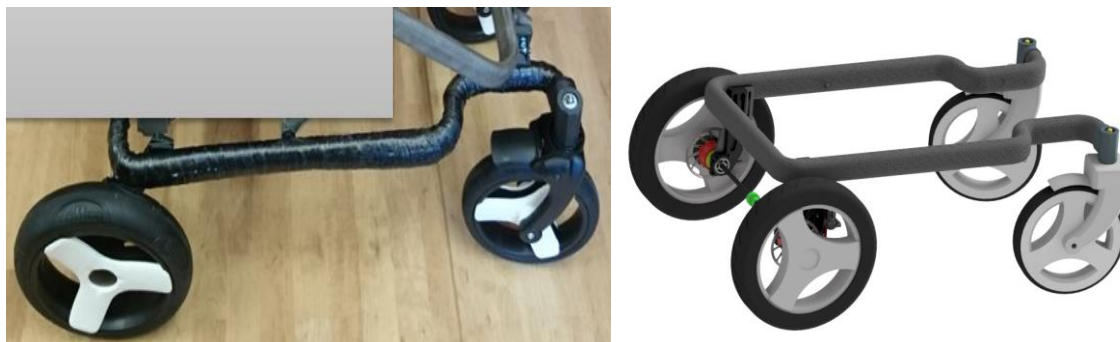
Obr. 135 Vytvrzenování otevřeného rámu s výztuhami

7.3 Možnosti aplikace vyrobených rámu

Tvar vytvořených rámových struktur byl navržen pro budoucí aplikaci v opěradle sedadla automobilové sedačky Obr. 136 a jako platforma podvozku transferově testovaného dětského vozítka Obr. 137.



Obr. 136 Tvar vnitřního rámu automobilového sedadla od konvenčního výrobce a vyrobený rám



Obr. 137 Otevřený rám ve vyvíjeném konceptu dětského vozítka (průmyslově aplikováno)

7.4 Závěr kapitoly - výroba prototypů

Během dané kapitoly byl proveden CAD návrh a výroba formy z MDF vláken. Následně se jednalo o odlití polyuretanového jádra a jeho testování. Vzhledem k nevyhovujícím vlastnostem jako výrazná křehkost a praskavost povrchu byl následně odlit rám nový epoxidový. Jak bylo zjištěno, parametry doporučené výrobcem daných vypěňovacích nemusí být v případě takto komplikovaných tvarů přesné a u součástí, konkrétně u otevřeného rámu docházelo v neuzavřené zakřivené části k popraskání. Proto bylo na úkor celkové pevnosti a doby reakce nutné upravit směšovací poměr jednotlivých složek daných systémů. Velmi významným bodem při odlití daného rámu, který znatelně ovlivní mechanické i rozměrové charakteristiky výsledného dílu, je zakrytí daného materiálu během probíhající reakce. Bylo testováno několik variant jako volná hladina, zakrytí sklem, teflonovou separační fólií, silikonovým separačním papírem, či klasickou strhávací textilií. Jako nejvhodnější variantou z hlediska výrobního i kvality výsledného dílu, se zdá být použití strhávací textilie. Zatímco PUR vypěňovací systémy je možné doporučit především pro vyplnění dutin u nenosných, tvarově jednodušších částí laminátů, epoxidové pěny mají velkou pevnost a po vytvrzení (ideálně několik dní) je možné daná jádra použít pro výrobu u velmi složitých a geometricky proměnných tvarů.

Závěrečným bodem kapitoly a cílovým bodem práce byla na základě dané metodiky a navržené konstrukce, skladby vrstev, navíjecího úhlu atd. samotná výroba prototypů rámu. Jednalo se o rám otevřený a uzavřený, které budou v poslední kapitole podrobeny testům.

8 Vlastnosti prototypového rámu

Vyrobené díly, tedy rámy otevřeného a uzavřeného tvaru (*Obr. 138*) navinuté z kompozitního materiálu, byly pro možnost porovnání s konvenčním materiálem testovány současně s ocelovými ekvivalenty, průmyslově vyrobenými z plochooválu. Byly provedeny testy pevnosti dané struktury ve tříbodém ohybu. Ocelové rámy byly totožného tvaru a co nejbližšího průřezu ovšem s vyšší hodnotou tloušťky stěny, což je dáno technologickými požadavky, kdy nebylo možné ohybově vyrobít kovový rám s nižší tloušťkou stěny než 2 mm, v opačném případě by byl nutný technologický a konstrukční návrh zcela nové ohybové matrice. Tloušťka stěny kompozitu je přibližně 1- 1,2 mm, nicméně ani v případě ekvivalentních průřezových modulů by dané porovnání stále nemělo zcela vypovídající hodnotu, neboť materiály mají stále diametrálně odlišné hustoty. Které parametry je vlastně reálné vzájemně porovnávat, je při náhradě konvenčních materiálů materiály ultralehkými jednou z nezodpovězených otázek.



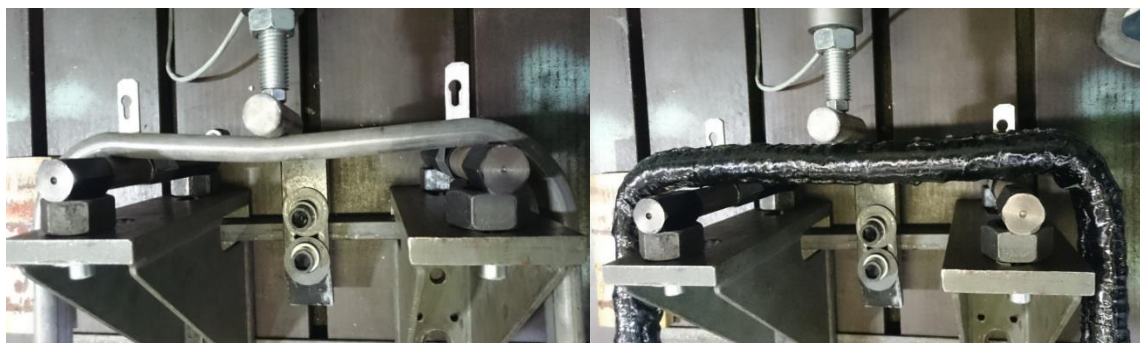
Obr. 138 Navinutý uzavřený a otevřený rám

8.1 Testování mechanických vlastností

Pro testování byl především z důvodu hladké regulace rychlosti bez záškubů použit hydraulický systém. Nastavená rychlost zatěžování byla 1 mm/s. Na Obr. 139 je možné vidět navinutý otevřený rám upevněný do testovacího mechanismu. Na Obr. 140 níže potom počátek testu provedeného na kompozitním a ocelovém dílu.

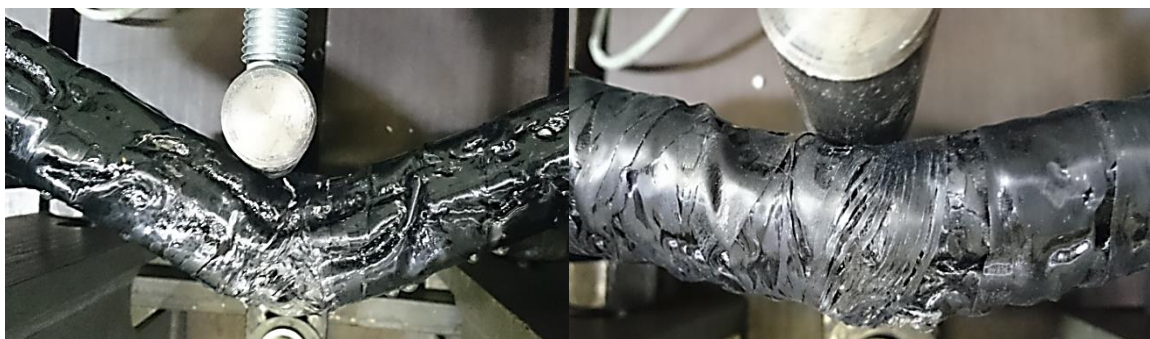


Obr. 139 Sestavení experimentu tříbodého ohybu

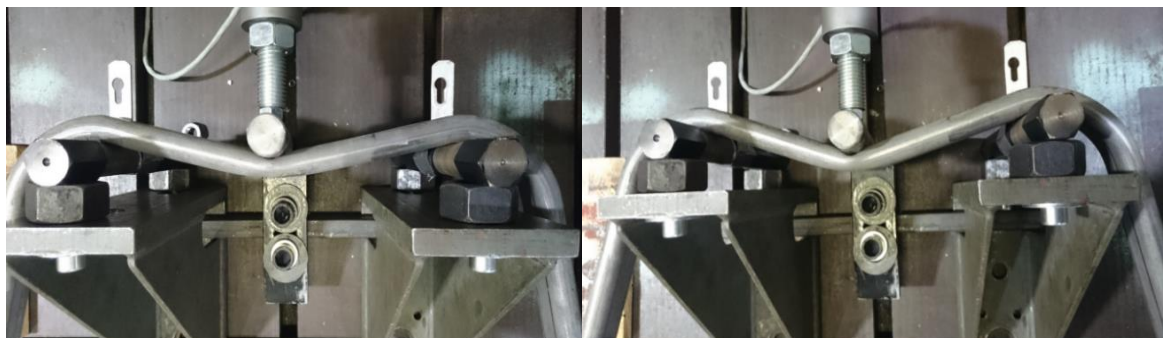


Obr. 140 Počátek ohybového experimentu a) Referenčního kovového rámu b) Kompozitního rámu

Provedené testy byly vedeny až do okamžiku celkového selhání struktury Obr. 141, případně výrazného poklesu zatěžovací síly v případě dílů ocelových Obr. 142.



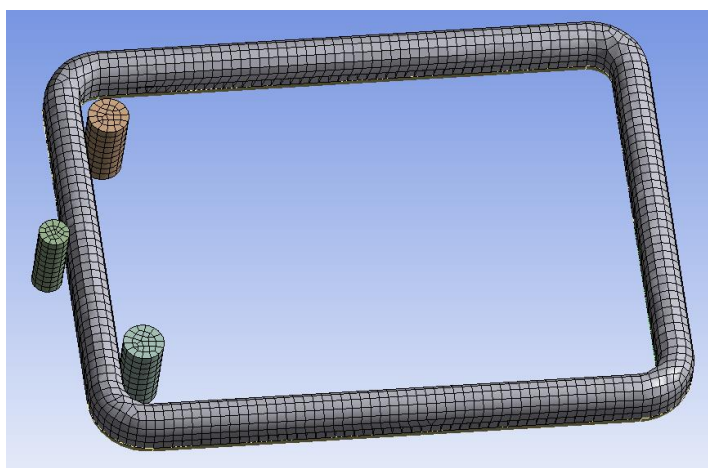
Obr. 141 Selhání testované struktury kompozitního rámu zatíženého ve směru a) Kratší b) Delší, strany daného průřezu plochooávného profilu



Obr. 142 Deformace v okamžiku maximální působící síly a) Otevřený b) Uzavřený rám

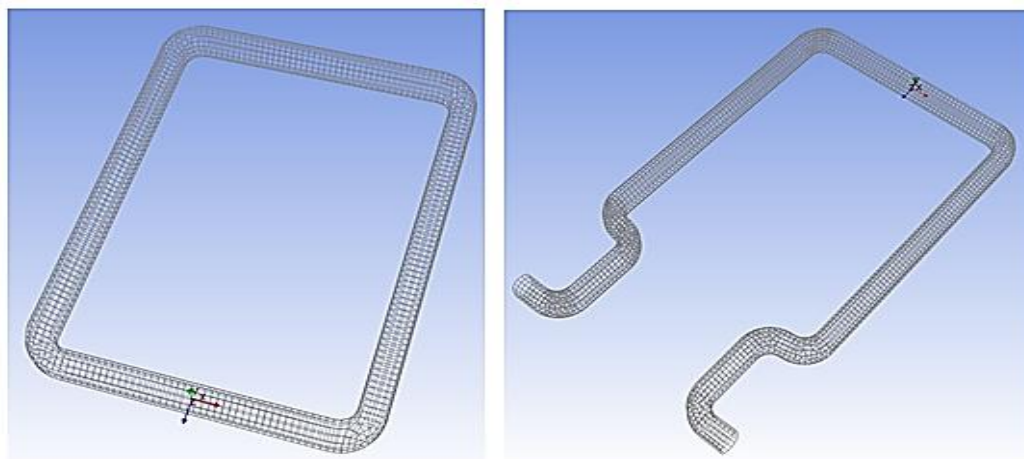
8.2 Numerická simulace

Jak již bylo zmíněno v průběhu práce, zcela klíčovým faktorem při návrhu kompozitů je využití numerického modelování. V dané kapitole je tedy nutné na základě učiněných poznatků, stanovených materiálových modelů a definic úloh vhodné ověřit finální experimenty provedené na prototypu současně pomocí modelové simulace. Princip simulace je níže na Obr. 143. Základní síť daných dílů, při jejich exportu do preprocesoru ACP, je možné nalézt na Obr. 144.



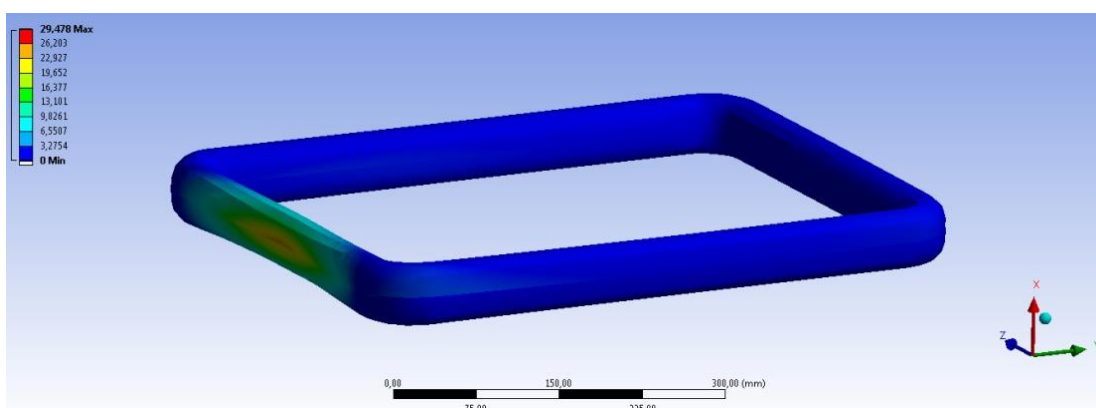
Obr. 143 Schema numerického modelu zatížení rámu

Na začátku modelové simulace vytvořená síť, je určujícím prvkem pro celý následný proces simulace kompozitu a vzhledem k definici referenčních vektorů, okrajových podmínek, kontaktních regionů atd. přímo k jednotlivým prvkům sítě, není již během výpočtu možné (vhodné) síť měnit. Speciální pozornost si zasloužily referenční body na otevřeném rámu, neboť při použití globálního koordinačního systému docházelo v místech ohybů k nahodilému rozhození a pomíchání směrových referencí. Daný problém je tedy nutné vyřešit superpozicí několika lokálníchází pro jednotlivé tvarové části.

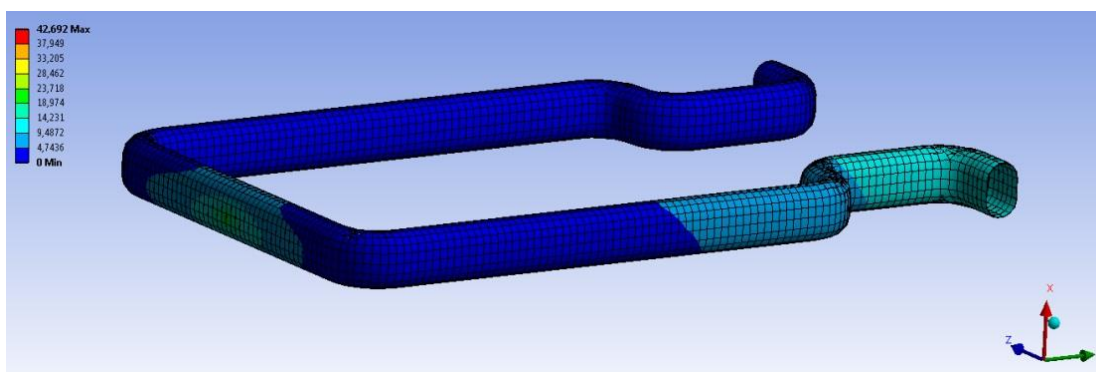


Obr. 144 Numerický model a) Otevřený b) Uzavřený rám

Na Obr. 145 a Obr. 146 níže jsou zobrazeny ukázky ze simulace zatěžování modelovaných rámců. V případě rámu uzavřeného se jednalo o velmi věrohodné prohnutí v místě zatěžování. U rámu otevřeného je potom viditelné charakteristické „rozevření“ volných nožiček.

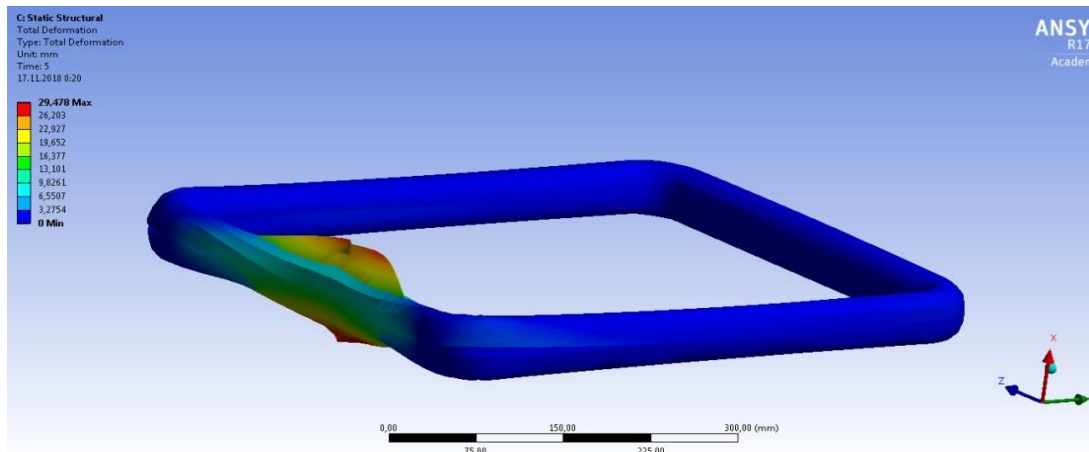


Obr. 145 Výsledek simulace pro uzavřený rám (deformace mm)



Obr. 146 Výsledek simulace pro otevřený rám (deformace mm)

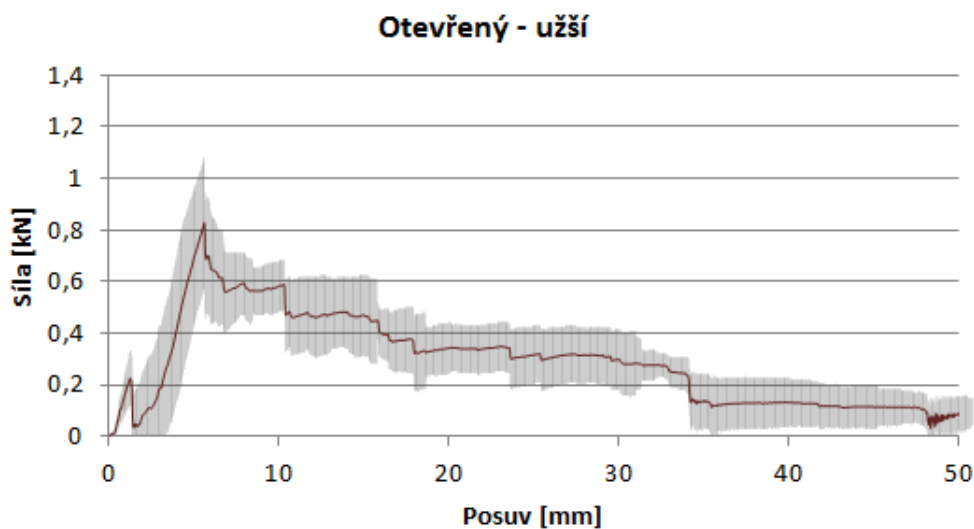
Na Obr. 147 níže je okamžik, kdy v reálném případě je součást již porušena (těsně před tím než výpočtový model ztratil konvergenci a během simulace je možné pozorovat projevuující se „nesmyslné“ deformace, kdy v následujícím kroku vznikne singularita a selhání výpočtu. Pokud bychom v daném okamžiku vyhodnotili kritéria porušení, daná část by byla v číslech vyšších než 1, tedy prakticky jisté selhání.



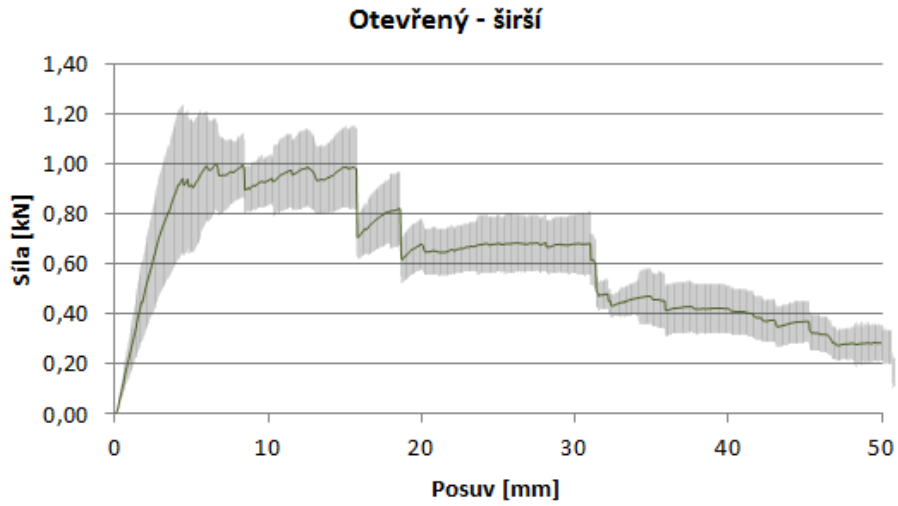
Obr. 147 Výsledek simulace pro uzavřený rám pro mezní případ zatížení

8.3 Výsledky testů rámců

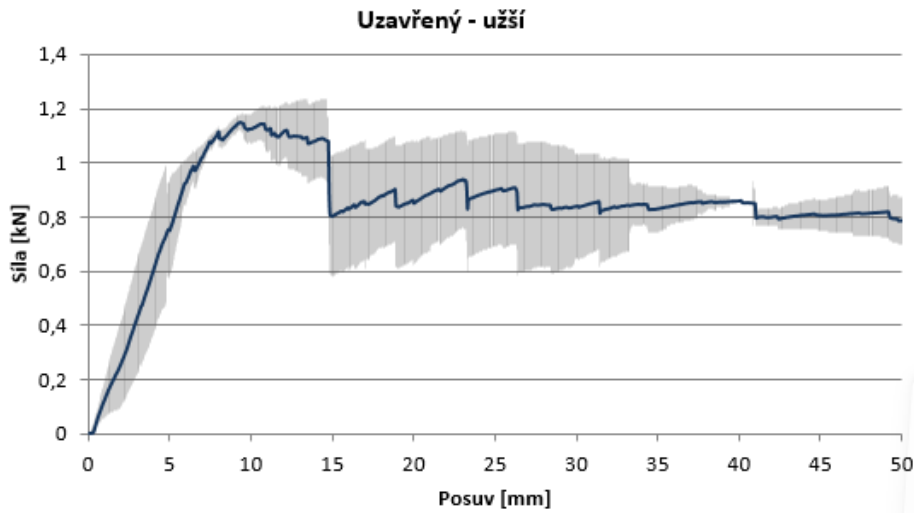
Na grafech níže Obr. 148, Obr. 149 a Obr. 150 jsou zobrazeny zatěžovací průběhy pro vybrané rámy. Jedná se o otevřený rám zatížený ve směru kratší, ale i delší osy průřezu. Dále rám uzavřený ve směru kratší osy a konečně experiment provedený na ocelových rámech v uzavřeném i otevřeném tvaru, analogicky jako v případě dílů kompozitních.



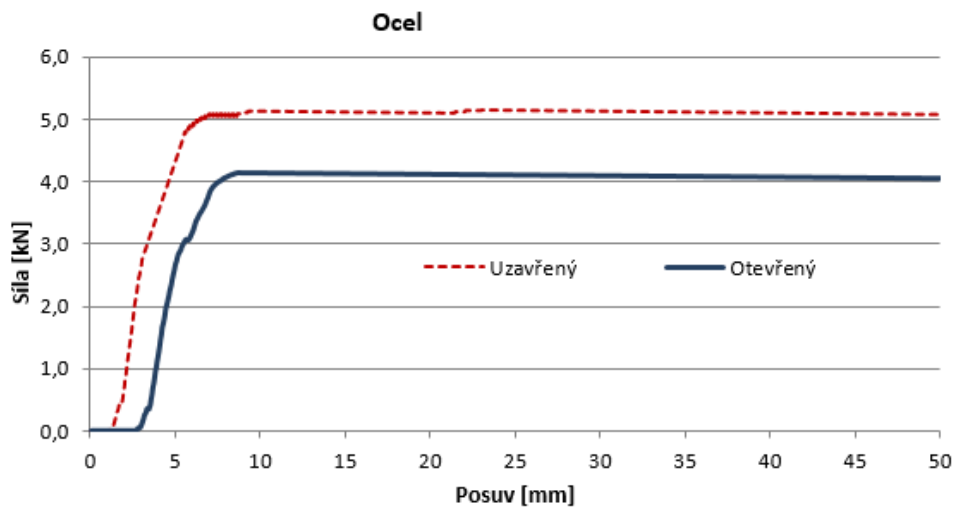
Obr. 148 Průběh ohybového testu: Otevřený kompozitní rám ve směru kratší strany



Obr. 149 Průběh ohybového testu: Otevřený kompozitní rám ve směru delší strany

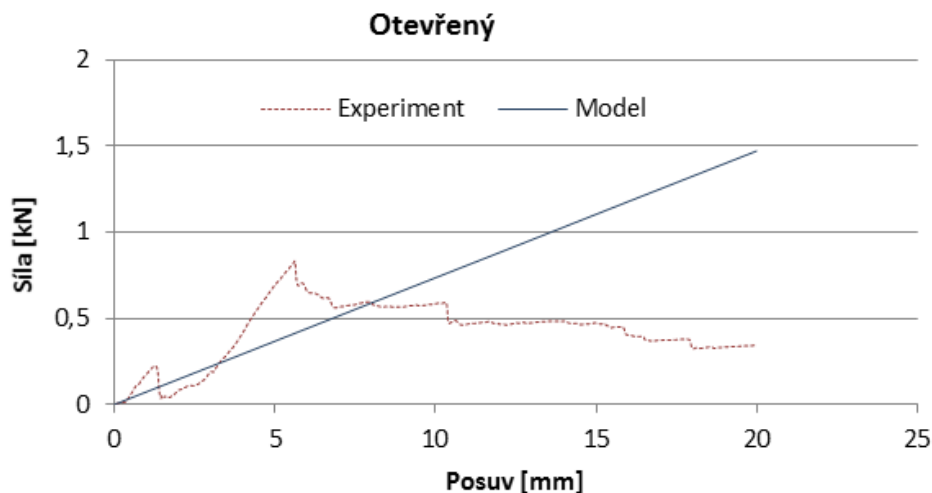


Obr. 150 Průběh ohybového testu: Uzavřený kompozitní rám ve směru kratší strany

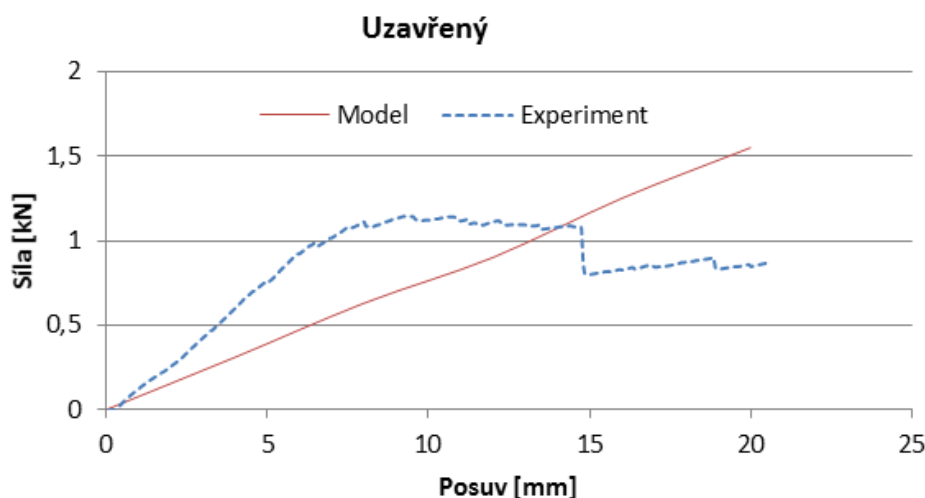


Obr. 151 Průběh ohybového testu: Referenční ocelové rámy

Posledním krokem daného experimentu je porovnání nalezených výsledků s numerickým modelem. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, pro kompozitní díly neumíme stanovit meze pevnosti, kluzu, nelinearity ani podobné charakteristiky. Daný model simulující zatěžování otevřeného Obr. 152 a uzavřeného Obr. 153 rámu má tedy zdánlivě lineární průběh. Reálné výsledky ovšem obdržíme v okamžiku aplikace kritérií porušení.



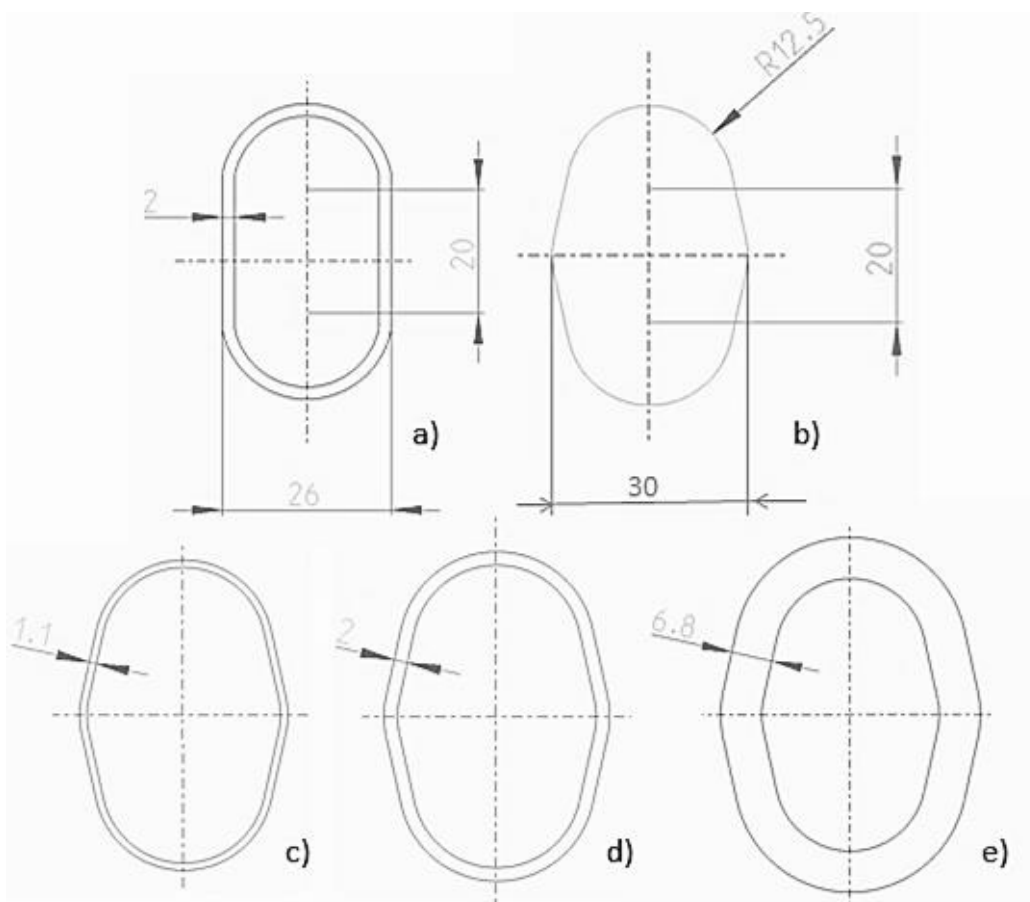
Obr. 152 Porovnání modelu a experimentu na otevřeném rámu



Obr. 153 Porovnání modelu a experimentu na uzavřeném rámu

8.4 Závěr kapitoly testování prototypových rámu

Jak již bylo zmíněno v úvodu či kap. 5.4.2, zásadním problémem je hledisko vzájemného porovnání s konvenčním, např. použitým ocelovým materiálem. Jak by zněla často slychaná věta: „Není možné míchat jablka a hrušky“. Co bychom tedy porovnáním získali, chceme díl se stejným průřezem, hmotností, tuhostí? Na obrázcích výše porovnáváme ultrapevný skořepinový rám vážící dekgamy a přibližně dvoukilový rám z ocele o tloušťce stěny 2 mm. Může mít dané porovnání tedy vůbec nějakou hodnotu? Jako možnou indicií vedoucí k odpovědi na danou otázku může být Tabulka 6 níže, kde jsou vyčísleny možné kombinace tlouštěk a hmotností daných dílů, pro lepší představu zobrazených na Obr. 154 v odpovídajícím měřítku.



Obr. 154 Porovnání průřezu kompozitu a ocelového rámu a) Ocelový rám b) Základní tvar jádra kompozitu c) Kompozit standardní tl 1,1. d) Kompozit ekvivalentní tl. 2 e) Kompozit tl. 6,8 mm

Tabulka 6 Výsledná porovnání kompozitního a ocelového rámu

	tl. [mm]	S [mm ²]	V [m ³]	m [kg /m]	Wo [mm ³]	Fmax [N]
Ocelový rám	2	243	0,00024	1,92	2 498	4 000
Kompozit základní	1,1	136	0,00014	0,24	1 421	1 550
Kompozit tloušťka	2	251	0,00025	0,45	2 632	8 300
Kompozit hmotnost	6	958	0,00096	1,72	10 472	96 700

Ačkoliv, již během reálného experimentu bylo možné pozorovat výrazně vyšší tuhost u uzavřeného rámu, v sestaveném numerickém modelu není tento rozdíl tolik markantní. Problém by mohl spočívat v nastavení kontaktu mezi rámem a podpurnými body, kdy pro otevřený rám nastává velká deformace a tedy i výrazný posun vzájemných kontaktních bodů, během jednotlivých kroků probíhajícího výpočtu. Případné rozdíly by také měly být patrnější při použití kritérií porušení, jak bylo demonstrováno na příkladu vyztužené tyče v kap. 6.2.1. Otázkou při porovnání s rámem ocelovým také zůstává výrazná změna průřezového modulu. Pro budoucí návrh je také nutné uvážit opakovatelnost daných výrobních podmínek [143] a případné životnostní testy [144].

Závěr

Disertační práce strukturovaná do osmi kapitol představila možnosti konstruování prototypových rámových dílů metodou multifilamentního navíjení prepregů. Pokud bychom se snažili přesně specifikovat obor, kam práce zapadá, odpověď může být nejasná. Role konstruktéra již není pozicována do kresliče u prkna, ale prolíná mnoho úzce souvisejících oborů, neboť jak je uvedeno již v úvodu, zažíváme století kombinovaných systémů. Jak napoví struktura práce, pro konstrukční návrh kompozitního rámu je nutná perfektní znalost použitého materiálu, jeho vlastností a možností jejich ovlivnění. Následuje experimentální a numerická mechanika i základní přehled v oblasti výrobních technologií. Dále navazuje konstrukční návrh a výroba vlastního zařízení. S využitím matematických algoritmů a parametrických rovnic implementovaných do CAD systémů následuje optimalizace struktury výsledného dílu, až po jeho výrobu. Pokud bychom tedy práci chtěli někam zařadit, mohla by být klasifikována jako aplikovaná konstrukční metodika vedoucí k vývoji vlastního rámového dílu.

V předložené práci byl proveden stručný popis kompozitních materiálů a základních výrobních technologií, za účelem představení dílčích principů. Dále byla provedena patentová rešerše současných technických novinek a průzkum dostupných komerčních řešení. Na základě daných zjištění je možné říci, že ve světě se problematikou multifilamentního navíjení pro složité tvary věnuje jen velmi málo autorů. Tento fakt by mohl být dán problémem velké lepkavosti a nesnadné manipulace s úzkou prepregovou páskou. Konvenční metody namísto několika úzkých pásek využívají obalování či formování výsledného dílu z jedné široké role, což je s ohledem na potřeby průmyslu velmi zásadně limitujícím prvkem.

Odlišností, kterou je nutné zmínit a uvážit již při návrhu konceptu kompozitního dílu, je fakt, že k navrhované konstrukci je nutné od počátku přistupovat dle zcela jiných principů. Návrh konvenčního tvářeného dílu z materiálu se známými vlastnostmi a návrh po vrstvách mnohonásobně anizotropní kompozitní součásti, se řídí zcela odlišnými pravidly a častou chybou je, že se konstruktér snaží díl tvarově a funkčně zachovat s tím, že pouze nahradí materiál, jako se například mění ocel za hliníkovou slitinu. Pro návrh kompozitního dílu je bezpodmínečně nutné vědět všechny detaily ohledně budoucího zatížení, připojení, podmínkách provozu a konstrukční návrh je v dnešní době zcela nemyslitelný bez využití numerické mechaniky a simulačních nástrojů. Z tohoto důvodu se daná práce hluboce věnuje experimentálnímu určení materiálových charakteristik a následné tvorbě včetně upřesňování nejen materiálových, ale i numerických modelů určených pro simulace daných kompozitních dílů. Pro vrstvené anizotropní materiály ovšem neexistuje jedna všeobecně platná metoda. Na základě hlubokého studia dané problematiky a následnou aplikací jednotlivých teorií, jako např. Midlinovy teorie desek, vrstvené skořepiny, tenko-tlustostěnného nosníku atd., byla na základě reálných ověření popsána aplikovatelnost daných přístupů pro aktuálně řešený případ. Dalším důležitým předpokladem při práci s kompozity je si uvědomit, že není možné prosté porovnání navrženého kompozitu s dílem například ocelovým. Každý si totiž pod daným slovem představí něco jiného. Chceme-li tedy nahradit kovový díl za kompozitní, co chceme porovnávat? Díl se zachovanou hmotností, velikostí, objemem, průřezem? Často si totiž představíme zcela totožný díl, stejného tvaru i velikosti, jen „lehčí“. Návrh dílu kompozitního se ovšem již od prvopočátku řídí zcela jinými principy a pouhá záměna materiálu, tedy neznamená optimální využití daného kompozitu. Zcela odlišné principy taktéž platí u postprocessingu, tj. při vyhodnocování výpočtem stanovených výsledků. Zatímco

konvenční materiál má pevně definované oblasti průběhu zatížení (mez kluzu, mez pevnosti), pro díl kompozitní obvykle nic podobného stanovit není možné. Testy kompozitu mající za účel stanovení základních inženýrských konstant, totiž nepracují v rozsahu deformace od zatížení po destrukci jako je běžné, ale obvykle se jedná o malé deformace v řádu milimetrů. Pro modelové určení chování navrženého kompozitního dílu tedy neexistuje nic jako prahová hodnota, kdy výpočet dojde k „mezi pevností“, tak jak je obecně známé. V daném případě je nutné podle různých deformačních kriterií, pro jednotlivé prvky diskretizovaného dílu stanovit pravděpodobnost selhání, či míru koncentrace napětí v daném místě, vrstvě či rozhraní. O daná kritéria byly názorně doplněny a ověřeny výsledky z experimentu a výpočtu u zatěžování reálných navinutých dílů v tahu a ohybu s velmi dobrou shodou.

Jako další z klíčových bodů práce byl konstrukční návrh a výroba vlastního optimalizovaného výrobního zařízení, určeného pro výrobu kompozitních rámu z vláken prepregových. Dané zařízení vychází z původního konceptu používaného TUL pro tzv. wet technologii, kdy po navinutí vláken je nutné celý díl následně saturovat pryskyřicí ve speciálně navržené formě. Daná technologie byla tedy díky velké ceně forem předurčena pouze pro sériovou a značně složitou výrobu. Vlákna předimpregnovaná tedy již obsahují pryskyřici předem a není nutné její následné dodatečné prosycování. Vlákna jsou ovíjena kolem nenosných pěnových jader, s využitím pomocných robotických zařízení, jež zajišťují požadované polohy a vzájemné pohyby v takové přesnosti a plynulosti, které není ručně ani jinými konvenčními metodami možné docílit. Práce s prepregy ovšem nepřináší pouze benefity, daná vlákna mají výraznou tvarovou paměť a lepkavost, během odvíjení tedy vzniká mnoho neblahých fenoménů jako diametrální navýšení axiálních sil, jejichž kompentaci bylo nutné rovněž začlenit do konstrukčního návrhu, pomocí přidaných oběžných drah a radiálních ložisek. Za účelem dosažení technické možnosti navíjet i rámy zcela uzavřené, byly vyrobeny otevírací hliníkové kroužky, do kterých je rám vložen a kroužek následně zajištěn. Při odvíjení pásek, je také třeba vyřešit problém odvodu krycího silikonového papíru, majícího za účel ochranu jednotlivých vrstev výchozí suroviny před slepením. Za tímto účelem, byl navržen mechanismus cívek s třecím převodem, umožňujícím plynule reagovat na měnící se převodový poměr, způsobený odvíjením pásky a tím měnící se úhlovou rychlost cívky. Na takto navrženém zařízení, bylo vyrobeno několik vzorků různých tvarů, průřezů i trajektorií a nakonec i finální prototypy otevřeného a uzavřeného rámu. Možná aplikace daných rámových dílů byla demonstrována na příkladu opěradla automobilové sedačky a podvozku dětského vozíku.

Mezi fází konstrukce daného zařízení a výrobou prototypových rámu následovala ovšem ještě vcelku rozsáhlá kapitola numerické a parametrické optimalizace návinnu. Z numerického hlediska, byl aplikován multikriteriální genetický algoritmus, který na úkolu tříbodého ohybu demonstroval návrh optimálního lokálního zesílení daného dílu, za účelem docílit co nejvyšší tuhosti se současně co nejnižší spotřebou materiálu. Daný díl byl vyroben a fyzicky porovnán s dílem neoptimalizovaným, s velmi dobrými výsledky. Je tedy možné říci, že byl popsán a aplikován algoritmus, umožňující lokálně optimalizovat díl s ohledem na reálná působící zatížení v konkrétním místě. Obdobný přístup při použití konvenčních, izotropních konstrukčních materiálů nedosažitelný. Posledním krokem před samotnou výrobou byl parametrický model procesu navíjení. Nejedná se ovšem o klasická technologická data, nýbrž otázky z oblasti konstrukce. Zcela zásadní vliv má šíře použité pásky, způsob návinnu zakřivených tvarů a s ohledem na použité materiály, geometrii, vzájemné tření atd. a určení zda se jedná o navíjení geodetické, nebo tzv. „non-geodetic“ (český ekvivalent se sice nabízí, ale není používán).

Jak bylo v závěrečných kapitolách demonstrováno, porovnáme-li klasický vinutý kompozit prosycený až následně po výrobním procesu ve formě (tzv. wet metoda) a díl navinutý z prepregu, je možné pozorovat odlišnosti v mechanickém chování, i když by dané díly měly být teoreticky identické. Rozdíly jsou především v dynamické tuhosti, která je s přibývajícím rychlostí zatěžování výrazně proměnlivá. Jako největší nedostatek navinutého prepregu by měla být označena kvalita povrchu, která je výrazně hrubá a laicky řečeno nevzhledná. Tento fakt by mohl stát i za problémem odlišnosti daných dílů, kdy nedokonale zarovnaná místa kroucená vlákna by mohla mít vliv na tuhost celého dílu. Jako možné řešení alespoň vizuální stránky problému by mohlo být jednoduché nanesení povrchové vrstvy, například gelcoatu či klasického laku, jež by mohly danou nevzhlednost povrchu napravit.

Témata plynoucí z práce do budoucna:

Oblasti, jimiž by se do budoucna bylo vhodné dále zabírat je, možné rozdělit do kompetencí technologa, materialisty, chemika a konstruktéra. Konkrétně výroba nenosného pěnového jádra, návrh vlastního prepregového materiálu a další optimalizace výrobního zařízení.

Výroba pěnového jádra je velmi zásadní problém, i když použitý nenosný pěnový materiál nemá na mechanické charakteristiky výsledného rámu zásadní vliv. Během odlévání jádra ovšem nastávají fenomény patřící spíše do technologické oblasti, kdy v místech komplikovanější geometrie nebo i naopak delší rovné části, dochází vlivem nedokonalého promíchání, přehřátí a degradaci pěny, či naopak nedokonalého vytvoření struktury vlivem rychlého zatuhnutí, zborcení, smrštění, praskání atd. Všechna tato místa mohou lokálně ovlivnit požadovaný tvar výsledného kompozitního dílu. Vhodný by tedy byl důkladný technologický rozbor daného problému a návrh kovové formy, opatřené o nutné technologické prvky.

Dalším z důležitých bodů, kterému by se bylo vhodné dále věnovat, je následné spojování takto vyrobených kompozitních dílů či rámu s dalšími kovovými či kompozitními díly. Za tímto účelem se nejvíce využívají dvě metody a to lepení, či tzv. „hybridní“ spoje závitovými inserty. Jejich studie, především metodika určení vhodné velikosti a zakomponování do struktury materiálu bude patřit mezi další vědecko-výzkumné cíle autora.

Z pohledu základního prepregovaného materiálu jsme aktuálně limitováni výrobci. Ačkoliv dané součásti splňují požadované mechanické parametry, velmi důležitým bodem by bylo navrhnout prepregový materiál, jehož reakce by začínala probíhat až při vyšších teplotách a výrobní proces včetně dílů výrobního zařízení by nebyl zatížen velkými silami, způsobenými velmi výraznou lepkavostí daných pásek již při pokojové teplotě. Jak je ovšem možné najít v aktuální vědecké literatuře, daným problémem se již někteří autoři zabírají, byť zatím čistě z materiálového hlediska.

Z konstrukčního hlediska výrobního zařízení, bude vhodné pružně reagovat na nové upravené výchozí uhlíkové materiály. Jistě bude možné zařízení zmenšit, zvýšit jeho komplexnost a tím umožnit výrobu menších či geometricky složitějších dílů.

V současné době je jednou z nejpokročilejších metod vyvíjené k dosažení lepších vlastností kompozitních dílů přidání nanočástic, které ve vhodném poměru mohou zlepšit požadované fyzikální a mechanické vlastnosti. Jedná se o kombinaci dvou možných principů, kdy v prvním se zaměřujeme čistě na zlepšení mezifáze – tzn. soudržnosti vlákna a matrice. V druhém případě

zlepšujeme mechanické vlastnosti samotné matrice tím, že v celém jejím objemu tvoříme vlastně „nanokompozit“ obklopující a tvořící pojící člen klasických vláken. Vhodnou volbou by mohla být cesta začlenění levných či ideálně odpadních a reziduálních plniv v podobě např. čedičových, popílkových nebo uhlíkových nanočástic mletých z průmyslového odpadu.

Přínosy pro vědní obor

- V práci bylo teoreticky popsáno a na základě provedených modelových simulací a experimentů demonstrováno reálné pozadí výpočtu vrstvených skořepin. V praxi i odborných publikacích, se často zcela zanedbává existující rozdíl mezi skořepinou a reálnou vrstvenou deskou, čímž se řada autorů možná nevědomky dopouští omylu, kdy své často přesné výsledky připisují neúplnému matematickému principu.
- Aplikace genetických algoritmů ve fázi návrhu úhlů a skladby vrstev kompozitu s ohledem na konkrétní okrajové podmínky a lokální optimalizaci.
- Použita a ověřena metodika optimalizace a řízení trajektorie kooperativních robotů při navíjení.
- Studie možností ovlivnění přenosových a útlumových charakteristik přidáním další složky.

Přínosy pro praxi

- V práci byla představena a reálně aplikována metodika konstrukčního návrhu prototypového rámu.
- Ověření mechanických a technologických vlastností epoxidových a polyuretanových vypěňovacích systémů, v praxi používaných pro mnoho rozličných aplikací.
- Představení Code Aster – open FEM sw vhodného pro menší společnosti, které s ohledem na cenu nemohou použít špičkový komerční nástroj.
- Velmi detailní o vlastní zkušenosti doplněný popis mechanických modelů vhodných pro výpočet kompozitních dílů, i v běžném případě z pohledu „pouhého“ uživatele vyžadujících hlubokou znalost daných přístupů a teorií.

Literatura:

- [1] G. Saulovič. *Co na to vynálezce?:* Vyd. 1. V Brně: Bohuslav Bušov, p. 146, 2008. ISBN 978-80-254-3035-4.
- [2] K. Zeithammer, *Vývoj techniky*, CVUT, 2003. ISBN 80-01-02836-4
- [3] G. S. Altšuller, *The Innovation Algorithm*, Technical Innovation Center, Inc., 1999.
- [4] I. Mašín, M. Petrů, O. Novák, *Metody inovačního inženýrství na mikro-úrovni*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-187-0
- [5] J. M. Whitney, Shear correction factors for orthotropic laminates under static load. *Journal of Appl Mech.* 40,1973. pp. 302-4, doi:10.1115/1.3422950
- [6] P. Cawley, R. D. J. Adams, *Composite Materials* 12 336 347, 1978.
- [7] Web výrobce Unioncarbide <http://www.unioncarbide.com/History>
- [8] Lenam a Technická Univerzita V Liberci. *Projekt LJ14005: Nové aplikace v technologii výroby a použití kompozitních rámců z vláknových kompozitů*. Liberec, 2014.
- [9] V. Malinkov, *Experimentelle und numerische Untersuchungen der Umformung von strukturierten Blechen*, PhD Thesis, Berlin, 2013.
- [10] N. E. Harry, *Clean Filament Winding: Process Optimisation*. United Kingdom, The University of Birmingham, 2012.
- [11] K. Allen, Method for Winding Advanced Composites of Unconventional Shapes using Continuous and Aligned Fibers, *Brigham Young University*, 2004.
- [12] P. Kulhavy, *Inovace závěsu zadních dveří automobilu*, Diplomová práce, TU Liberec, 2013.
- [13] F. Vlk, *Stavba motorových vozidel*. Nakladatelství Vlk, Brno, 2003, ISBN 80-238-8757-2.
- [14] P. Nedělka, Strain and stress analysis of the car buffer zone under impact loading, VUT, Brno, 2011.

- [15] M. Hormann, M. Wacker, *Simulation of the Crash Performance of Crash Boxes based on Advanced Thermoplastic Composite*, 5th European LS-DYNA Conference :DYNAmore, 2005.
- [16] A. Hloušek, V. Sháněl, V. Kulíšek, M. Růžička, Vývoj kompozitních deformačních členů pro dopravní prostředky, *Transfer* č.19, 2013. ISSN 1801-9315
- [17] P. Kulhavy, P. Srb, M. Syrovatková, *Methods for determining the tensile properties of a fiber composite rods*, Book of Proceedings of 56th International Conference of Machine Design Departments. Slovak University of Agriculture in Nitra, 2015.
- [18] K. Daďourek, *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [19] G. A. Lesieutre, *Modeling Frequency-Dependent Longitudinal Dynamic Behavior of Linear Viscoelastic Long Fiber Composites*, *Journal of composite materials*, vol. 28 no. 18, 1994.
- [20] W. T. Wang, T.Y. Kam, *Material characterization of laminated composite plates via static testing*, *Composite Structures* Vol. 50, Issue 4, Elsevier, 2000.
- [21] L. Ševčík, P. Tůma, M. Petrů, T. Martinec, R. Kovář, Composite reinforcement, Patent Application no. 2013-1066, 2013.
- [22] T. Kaw, *Mechanics of composite materials*, Taylor and Francis, 2006.
ISBN-13: 978-0849313431
- [23] J. Grégr, *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*, *Textilie pro speciální aplikace*, TU v Liberci, 2004.
- [24] J. B. Collier, H. H. Epps, *Textile testing and analysis*. Merrill, New Jersey, Columbus, Ohio, 1999.
- [25] T. P. Hughes, *Edison's method*. In Pickett, W. B. *Technology at the Turning Point*. San Francisco: San Francisco Press. 1977.
- [26] N. N. Greenwood, A. Earnshaw, *Chemie prvků*, Informatorium, Praha, 1993.

- [27] M. Syrovatkova, M. Vik, P. Kulhavy, M. Vikova, *Total Appearance Measurements of Special Effect Finish After Real-live Tests*, Defect and Diffusion Forum vol 368, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016.
- [28] G. Fettis: Automotive paints and Coatings, Weinheim: VCH, 1995.
- [29] P. Zhang, R. Sun, X Zhao, L. Hu, Placement suitability criteria of composite tape for mould surface in automated tape placement. *Chinese Journal of Aeronautics Vol. 28(5)*, 2015.
- [30] A. Gessler, Braided reinforcements for composites, Woodhead Publishing Limited, Germany, 2011.
- [31] S. Hawking, A Brief History of Time, Bantam Books, p.212, 1998.
- [32] I. Newton, Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, 1687.
- [33] R. Faukner, *Moderní fyzika*. Praha: Josef Hokr, 1947.
- [34] R. W. Cahn, B. Harris. *Newer forms of carbon and their uses*, Univ. of Sussex, Brighton, Eng., 1969.
- [35] M. Beran. *Unikátní ultralehký dvojník L-39 Albatros vzlétl po sedmnácti letech vývoje k nebi*. Flying revue č. 3, 2016.
- [36] K. K. Chawla, Composite Materials — Science and Engineering, Springer–Verlag, 1998.
- [37] L. Pospisil, *The Desing of a Rear Wheel Fork Made of Composite Materials Used in Ambulance Vehicles*, Master thesis, CVUT, Praha, 2016.
- [38] M. Janošík, Problematika výroby dutých součástí z predimpregnovaných kompozitů. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2017.

- [39] H. L. Ornaghi et.al., Mechanical and Dynamic Mechanical Analysis of Hybrid Composites Molded by Resin Transfer Molding, Wiley Periodicals, J Appl Polym Sci 118: 887–896, 2010.
- [40] Z. Korinek, Composite Technology, available from: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [41] M. Hrazdára, Materiály na bázi uhlíku a jejich využití, bachelor thesis, VUT, Brno, 2010.
- [42] V. T. Lukjanova, Carbon fibers in nature, Carbon 32, pp. 777 – 783, 1994.
- [43] S. Chand, *Carbon fibers for composites*, Journal of materials science, Vol. 35, 2000.
- [44] I. Michio: New Carbons Control of Structure and Functions, Elsevier Science Ltd., Kidlington, Oxford, UK, 2000.
- [45] A. Legendre. *Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-860-7382-3.
- [46] Torayca TY-030B-01 Test Method- Data sheets. Toray Carbon Fibers America, Inc., USA, 2001.
- [47] Zoltek: Web výrobce kompozitů. <http://zoltek.com/applications/automotive/>
- [48] B. Wei, H. Cao, and S. Song, “Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fiber,” *Material Science and Engineering*, pp. 4708-4715, 2010.
- [49] K. Singha, “A short review of basalt fiber,” *International Journal of Textile Science*, 2012.
- [50] J. U. Rosenbaum, *Flechten: Rationelle Fertigung faserverstärkter Kunststoffbauteile*, Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1991. ISBN 3-88585-979-3
- [51] V. Ducháček, *Polymery - Výroba, Vlastnosti, Zpracování, Použití*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2006.

- [52] M. Meyer, Microwave drying of Aquacore. DLR, Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig, 2005.
- [53] Web výrobce kompozitů Hexcel, Datasheets, <https://www.hexcel.com/Products/Tooling/>
- [54] J. E. Ashton, M. E. J. Waddoups, *Composite Materials* **3**, Vol. 148, 1969.
- [55] J. Staněk, Nauka o textilních materiálech. Díl I., Část 4., Vlastnosti délkových a plošných textilií. Skripta VŠST. Liberec, 1986.
- [56] O. Sigmund. VÝZKUM MATRIC PRO PREPREG APLIKACE. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2017.
- [57] M. Petru, M. Syrovatková, T. Martinec, *Analysis of Changes in the Surface Quality of a UD Prepregs Composite due to Mechanical Loading*, Material Science Forum, Vol. 818, 2015.
- [58] A. Potěšil, A. Lufinka, P. Horník: Testing of Space Frames Made of Composite Materials, EAN 2015, 2015.
- [59] T. Martinec, J. Mlýnek, M. Petrů, Calculation of the robot trajectory for the optimum directional orientation of fibre placement in the manufacture of composite profile frames, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 35, 2015.
- [60] Výrobce prepreguu: HUNTSMAN. *Prepregs*. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: http://www.huntsman.com/advanced_materials/
- [61] H. Koushyar, S. Alavi-Soltani, B. Minaie, Effects of variation in autoclave pressure, temperature, and vacuum-application time on porosity and mechanical properties of a carbon fiber/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, Vol. 46(16), 2012.
- [62] Bokatech: Výrobce prepregu. [online]. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.bokatech.cz/>
- [63] Technické listy kompozitních a PUR materiálů, Web CZ prodejce (Last access 6/2018): <http://www.havel-composites.com/>

- [64] M. Tariq, a kol., Effect of carbon fiber winding layer on torsional characteristics of filament wound composite shafts, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 40:198, 2018.
- [65] K. Mori, T. Maeno, Y. Nakagawa, Dieless forming of carbon fibre reinforced plastic parts using 3D printer, *ICTP 2014, Procedia Engineering* 81, 2014.
- [66] C. C. Spackman, Ch. R. Frank, K. C. Picha, J. Samuel, 3D printing of fiber-reinforced soft composites: Process study and material characterization, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 23, page. 296–305, 2016.
- [67] N. Li, Y. Li, S. Liu, *Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylacticacid composites by 3D printing*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 238, 2016.
- [68] R. Whitwam, *New 3D Printers Can Print Materials as Strong as Steel*, *Extremetech*, 2017.
- [69] G. Lepoittevin, *Composite laminates with integrated vibration damping treatments. Dissertation thesis*. ETH Zurich. 2012.
- [70] M. Vyhnalek, *Mechanické vlastnosti oplétaných kompozitních tyčí*, Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, 2015.
- [71] M. Petru, *Numerické modelování pro podporu výzkumu a vývoje ráámů z kompozitní struktury vyztužené dlouhými vlákny*, Habilitační práce, TU Liberec, 2016.
- [72] L. Pešík, *Části strojů. 1. díl*. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-938-4
- [73] W. E. Gottfried, *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: SCIETIA, 2009.
- [74] B. D. Agarwal, L. J. Broutman, *Vláknové kompozity*. Přeložil: L. Sodomka. Praha: SNTL, 1987.
- [75] M. Sejnoha, *Micromechanical Analysis of Random Composites*, Habilitation thesis, Czech Technical University in Prague, 2000.
- [76] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*, Taylor and Francis, United States of America, 1998.

- [77] E. Reissner, The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates, *ASME J. Appl. Mech.* 617, 1945.
- [78] R. D. Mindlin, *Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates*, *ASME J. Appl. Mech.* 18 (1951) 31–38.
- [79] M. Levinson, An accurate simple theory of statics and dynamics of elastic plates, *Mech. Res. Commun.* 7 (1980) 343–350.
- [80] M. Aydogdu, A new shear deformation theory for laminated composite plates, *Composite Structures*, Vol. 89, pp. 94–101, 2009.
- [81] M. Touratier, An efficient standard plate theory, *Int. J. Eng. Sci.* 29, 1991.
- [82] E. J. Barbero and J. N. Reddy, *International Journal of Solids and Structure* 28. Modelling of delamination in composite laminates using a layerwise plate theory, 1991.
- [83] K. Nedri, N. El Meiche, A. Tounsi, Free vibration analysis of laminated composite plates resting on elastic foundations by using a refined hyperbolic shear deformation theory, *Mech. Compos. Mater.*, Vol. 49, pp. 629–640, 2014.
- [84] X. Wang, G. Shi, A refined laminated plate theory accounting for the third-order shear deformation and interlaminar transverse stress continuity, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, Issue 18, 2015.
- [85] ANSYS Manual, Training Material, ANSYS, Inc. Proprietary, 2010.
- [86] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *The finite element method*. Fifth edition, BH, 5th, 2000.
- [87] Z. Bittnar, J. Šejnoha: *Numerické metody mechaniky 1-2*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1992.

- [88] Society of Automotive Engineers, *Test procedures for automotive structural composite materials*. Surface vehicle standard, Automotive Composites Consortium, 1995.
- [89] QDMA Manual, TA Instruments - Waters LLC, New Castle, DE 19720, 2006.
- [90] M. Zelený, Transformace a metamorfóza, neboli ekonomika v éře akcelerující změny, CAD, Vol. 3, 2016.
- [91] Ch. Laval, *Composites design in the real world, Reinforced Plastics, Belgium, 11, 2003*.
- [92] C. G. Pereira, a kol. *Optimization of braided reinforced composite rods*, 3rd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Miami, 2006.
- [93] T. Aized, B. Shirinzadeh, Robotic fiber placement process analysis and optimization using response surface method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 55, 2011.
- [94] J. M. Hodgkinson, Mechanical testing of advanced fibre composites, Woodhead Publishing, 2000.
- [95] H. Xiadong, *Research on fuzzy control based flexible composite winding systém*, Journal Advances in Fuzzy Systems, Hindawi Publishing Corp. New York, NY, United States, 2016.
- [96] F. Campbell, Thermoset Composite Fabrication Processes. *Structural Composite Materials*, ASM International, pp. 119-182, 2010.
- [97] W. Blazejewski, Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe wzmocnione włóknami według wzorów mozaikowych, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2014.
- [98] M. Böhm, J. Reisner. *Materiály na bázi dřev. Praha: Česká zemědělská univerzita, p.183, 2012*.
- [99] Technické listy výrobce TCR composites, dostupné: www.tcrcomposites.com

- [100] Resoltech, Resoltech Technical Datasheet V3 – 20(10), 2016.
- [101] T. Métais, S. Plessis, T. Chau and J. L. Roux, Evolution of Fatigue Post-Processing Methods in the EDF Open-Access FEA Code Aster, ASME 2016, Canada, 2016
- [102] S. Puchegger, et. al.: Experimental validation of the shear correction factor. Letter to editor, Journal of Sound and Vibration 261 (2003) p. 177-184
- [103] G. Gruber, S. Wartzack, Three-point bending analyses of short fiber reinforced thermoplastic: Comparison between simulation and test results. SAS Tech Journal, 2013.
- [104] J. Petruška: *MKP v inženýrských výpočtech*, VUT ,Ustav mechaniky těles, mechaniky a biomechaniky, 2016.
- [105] M. Fusek, R. Halama, MKP a MHP, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [106] Mechanical Structural Nonlinearities - Advanced Contact, Training Material, ANSYS, Inc. Proprietary, 2010.
- [107] H. Sönnnerlind, Comsol user manual, Comsol engineering, Sweden, 2013.
- [108] R. L. Foye, *Compression strength of unidirectional composites*, Columbus, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Structural composites group, USA, 1966.
- [109] Y. Suganuma, H. Fukuda, Applicability of compression bending test to measure compressive failure strain, 16th conference on composite materials, Kyoto, Japan, 2007.
- [110] W. T. Wang, T. Y. Kam, Material characterization of laminated composite plates via static testing, Composite Structures 50/4, 2000. doi: 10.1016/S0263-8223(00)00112-4

- [111] M. Vyhňálek, *Mechanické vlastnosti oplétaných kompozitních tyčí*. Technická Univerzita V Liberci, Liberec, 2015.
- [112] P. Vozkova, *Víceúrovňové modelování mechanických vlastností textilních kompozitů*, Dissertation thesis, Technical University of Liberec, Liberec, 2008.
- [113] M. Černý, Měření elastických konstant ortotropních materiálů ve tvaru desek a trubek metodou rezonančních frekvencí. Disertační práce. ČVUT FS, Praha, 2000.
- [114] R. F. Gibson, *Modal vibration response measurements for characterization of composite materials and structures*, Elsevier, Composites Science and Technology 60, 2000.
- [115] Y. Zou, L. Tong, G. P. Steven, *Vibration based model dependent damage identification and health monitoring for composite structures*. Journal of Sound and vibration 230, 2000.
- [116] J. M. Berthelot a kol, Damping analysis of composite materials and structures, Composite Structures, 85, 2008.
- [117] H. Ullah, A. R. Harland, V. Silberschmidt, Damage modelling in woven-fabric CFRP laminates under large-deflection bending, Computational Materials Science, Vol. 64, 2012.
- [118] H. Koushyar, S. Alavi-Soltani, B. Minaie, M. Violette, Effects of variation in autoclave pressure, temperature, and vacuum-application time on porosity and mechanical properties of a carbon composite. *Journal of Composite Materials*; Vol. 46(16), 2012.
- [119] F. Kirstein, R. M. Woolley. Symmetrical bending of thin circular elastic plates on equally spaced point supports. Washington DC: National Bureau of Standards, 1966.
- [120] P. Camanho, C. G. Davila, M. F. de Moura, Numerical Simulation of Mixed-Mode Progressive Delamination in Composite Materials, J. of Comp. Materials, Vol. 37, 2003.
- [121] A. Azzam, W. Li, An experimental investigation on the three-point bending behavior of composite laminate, Global Conference on Polymer and Composite Materials, Materials Science and Engineering, Vol. 62, 2014.
- [122] J. Petrik, et al., Vibration and Noise Reduction Analysis of Sheet Metal Structures with Damping Layer, Applied Mechanics and Materials 732, 2014.

- [123] J. Summerscales, *Non-Destructive Testing of Fiber-Reinforced Plastics Composites*. Elsevier Applied Science, London and New York, 1984.
- [124] D. L. Chung, *Structural composite materials tailored for damping*, *Journal of Alloys and Compounds* 355, 2003.
- [125] P. CUPIAL; and J. NIZIOL; Vibration and damping analysis of three-layered composite plate with a viscoelastic mid- layer. *Journal of Sound and Vibration* nr. 183, 1995.
- [126] J. J. B. Harlow, *Astrophysics*, University of toronto, 2003.
- [127] CADWIND, User Manual, MATERIAL SA, 2013.
- [128] Ch. Laval, *Process Simulation in Filament Winding. Reinforced Plastics*, pp. 40-42, 1991.
- [129] H. Li, Y. Liang, *Computer Aided Filament Winding for Elbows*, *Journal of Software*, Vol. 13(4), 2002.
- [130] Y. Y. Shi, H. Tang, and Q. Yu, *Key technology of the NC tape winding machine*, *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, vol. 29, no. 1, pp. 233-239, 2008.
- [131] X. Wang, J. Xiao, L. Wen, *Winding Pattern Design and Simulation of S-elbow*, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 23(5), 573-577, 2010.
- [132] M. Wu, Y. Liang, Y. Yu, *Stability of geodesic on torus*. *Applied Mathematics, A Journal of Chinese Universities*, 16(4), pp. 480-485, 2001.
- [133] P. Mertiny, F. Ellyin, A. Hothan, *An experimental investigation on the effect of multi-angle filament winding on the strength of tubular composite structures*, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004.
- [134] T. S. Plagianakos, D. A. Saravanos, *High-order layer wise mechanics and finite element for the damped dynamic characteristics of sandwich composite beams*, *International Journal of Solids Structure*, 41, pp. 6853–71, 2004.

- [135] K. Sepahvand, Stochastic finite element method for random harmonic analysis of composite plates with uncertain modal damping parameters, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 400, pp. 1-12, 2017.
- [136] L. Meirovitch, *Analytical Methods in Vibrations* by Leonard Meirovitch, 1967.
- [137] S. Srebrenkoska, A. Kochov, R. Minovski, Six sigma and DOE for improving the production of composite pipes. *Journal for Technology of Plasticity* 41 (2), pp. 11-18, 2016.
- [138] I. Deshmanya, K. Purohit, Study of Mechanical Behaviour of Metal Matrix Composites using Design of Experiments. *Advances in Production Engineering*, 2011.
- [139] R. Storn and K. Price, "DE- A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces," Tech. Report, International Computer Science, Berkeley, 1995.
- [140] D. Wennberg, *Multi-Functional Composite Design Concepts for Rail Vehicle Car Bodies*, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2013.
- [141] G. Alvino, Innovative composite materials application in the design of seats and interior parts, *Electronic Theses and Dissertations*. Paper 5355, 2012.
- [142] I. Matoušek, *Computer modeling in the automated production of molded glass*: Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-708-3988-0.
- [143] C. Capela, J. A. Ferreira, T. Febra, Fatigue strength of tubular carbon fiber composites, *International Journal of Fatigue*, Vol. 70, 2015.
- [144] P. Zhang, R. Sun, X. Zhao, L. Hu, Placement suitability criteria of composite tape for mould surface in automated tape placement. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(5), 2015.

Seznam odborných publikací autora

Publikace v časopise s Impakt faktorem [JI]

Kulhavý, P.; Lepšík, P.: Comparison of Modal Characteristic of Carbon Prepreg Tubes Manufactured by Wrapping and Winding, *Journal of Vibroengineering (JVE)*, Vol. 20, Issue 1, 2018.

M. Novotna, P. Kulhavy, Model verification of material properties of wound composite rods in tensile loading, *Journal of Industrial Textiles (JIT)*, 0(00) 1–23, 2018,

P. Kulhavy, A. Samková, M. Petru, M. Pechociakova, Problematic of improving the acoustic attenuation of plaster composites using short fiber reinforcement, *Integrated Lightweight Composites and Structures with Multifunctional Properties for Engineering Application*, Hindawi, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.

A. Samková, P. Kulhavy, V. Tunakova, M. Petru, Improving electromagnetic shielding ability of cement based composites by addition of carbon fibers , *Integrated Lightweight Composites and Structures with Multifunctional Properties for Engineering Application*, Hindawi, 2018.

P. Kulhavy, M. Petru, M. Syrovatkova, Possibilities of the Additional Damping of Unidirectional Fiber Composites by Implementation of Viscoelastic Neoprene and Rubber Layers, *Shock and Vibration*, Hindawi, 2017.

Vybrané odborné recenzované a indexované časopisy [J]

Petřík, J., Kulhavý, P. Pašek, M. Šašek, J. *Vibration and Noise Reduction Analysis of Sheet Metal Structures with Damping Layer*, *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 732) 2014

P. Kulhavy, N. Kovalova, J. Vosahlo, Numerical Model of the Static Loading of a Stitched Seam in the Composite Cover of Car Seat, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 827, Trans tech publication, 2015

P. Kulhavy, P. Srb, M. Petru. *Numerical and experimental analysis of the real load arising in the cushion of the car seat*. In: *Manufacturing technology*, Vol 15 no 6, 2016

M. Petrů, R. Kovář, T. Martinec, P. Srb, A. Lufinka, P. Kulhavý, "Experimental Analysis and Optimization of Vibrations of a Clamping Device by Using Hyperelastic Elements", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 827, pp. 99-104, 2016

M. Syrovatkova, M. Vik, P. Kulhavy, M. Vikova, *Total Appearance Measurements of Special Effect Finish After Real-live Tests*, *Defect and Diffusion Forum vol 368, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016.*

M. Syrovatkova, P. Kulhavy, P. Srb, M. Petru, *Testing of Tensile Properties of Carbon Prepreg Composite Rods with Adding of a Non Composite Part*, *Defect and Diffusion Forum vol 368, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016.*

P. Kulhavý, P. Lepšík: Digitization of structured composite plates with regard to their numerical simulations, In: Manufacturing technology, Vol. 17, No. 2. 2017

N. Kovalova, P. Kulhavy, J. Vosahlo, A. Havelka, Experimental investigation of multiaxial stress of the sewing seam and creating its numerical Model, Fibres and textiles, 2017, Vol. 24(2).

P. Kulhavy, M. Syrovatkova, P. Srb, M. Petru, A. Samkova. Irregular Winding of Pre-preg Fibres Aimed at the Local Improvement of Flexural Properties, Tekstilec, Vol. 60, No. 5, 2017.

P. Kulhavy, P. Lepsik, *Using Of Advanced Numerical Tools In Designing Composite Structures*, Manufacturing Technology, Vol. 3, 2018.

Vybrané tematicky zaměřené konference [D]

P. Kulhavý, P. Lepšík, Study of wound and wrapped composites under dynamic loading DYNAMICS OF RIGID AND DEFORMABLE BODIES 2018, Ústí n. L., Czech Republic, 2018.

P. Kulhavy, P. Lepsik, Principles of winding elbows from pre-impregnated carbon fibres, ICMD 2018, the 59th international conference of machine design departments, Žilinská Univerzita V Žiline, 2018.

P. Kulhavý, V. Fliegel, P. Lepšík, P. Srb, Dynamic analysis of 3D printed and moulded composites with carbon microfibers, EAN 2018, 2018.

P. Srb, P. Kulhavý, V. Fliegel, R. Martonka, Dynamic analysis of PUR foam reinforced with coconut fibres in various thermal conditions, EAN 2018, 2018.

P. Srb, M. Syrovátková, P. Kulhavý, B. Tomkova, Study of mechanical properties and modeling of flax reinforced composites, Study of mechanical properties and modeling of flax reinforced composites, NTPDS Trnava, 2018

P. Kulhavý, M. Syrovátková, M. Petrů, Alternative Possibilities Of Biaxial Testing Of Fiber And Fabric Materials In Nonstandard Conditions, 23rd International Conference on Engineering Mechanics Location: Svatka, CZECH REPUBLIC Date: MAY 15-18, 2017, Svatka, 2017.

P. Lepsik, P. Kulhavy, Design Optimization Of Composite Parts Using Doe Method, ICMD 2017, Prague, 6-8 September 2017, Czech Republic, p. 200-204, 2017.

P. Kulhavy, P. Lepsik, Comparison Of Bending Properties For Winded And Wrapped Composites, ICMD 2017, Prague, Czech Republic, 2017.

A. Samková, P. Kulhavý, M. Pechočiaková: Possibilities to improve electromagnetic shielding of plaster composites adding carbon fibers, World Textiles Conference AUTEX, Piraeus university of applied science, pages 5. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 254, Issue 4, 2017.

P. Kulhavy, P. Lepsik, S. Simon, *Using Hyperelastic Material in Device for Manufacturing Metal Templates Used for Creating Composites*, The 22nd International Scientific Conference, Mechanika 2017, Kaunas University Of Technology, p. 205-210, 2017.

P. Kulhavy, P. Lepsik, *Study of bending properties of thin walled carbon and flax composite rods winded of prepreg fibers*, EAN 2017, Nový Smokovec, Slovakia, 2017, ISBN 978-80-553-3166-9

P. Kulhavy, P. Lepsik, *Comparison of modal characteristic of wrapped and winded composite tubes from carbon prepreg*, JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEEDIA, Vol. 11. p. 91-96, 2017

P. Kulhavy, J. Egert, Thermal properties of highly structured composite and aluminium sheets in an aerodynamic tunnel, EPJ Web of Conferences 143, 02059 (2017)

P. Kulhavý, P. Lepšík, P. Srb, Innovation of a manufacturing device of sheet metal templates used for production composite plates, 57th International Conference of Machine Design Departments, University of west Bohemia in Pisen, p. 327-332.

Srb, P., Kulhavy, P., Fliegel, V., Lepsik, P. Cam mechanism for car seat testing, Mechanisms and Machine Science, 44, pp. 289-294, (2017)

R. Kovář, P. Kulhavý, A. Lufinka: *Stress analysis of the winding head frame for the production of the composites*, In: 54th International conference on Experimental Stress Analysis, University of West bohemia, 2016. I

P. Kulhavý, J. Petřík, P. Srb, P. Lepšík: *Vibration response of composite structures* In: 54th International conference on Experimental Stress Analysis, University of West bohemia, 2016.

N. Kovalova, P. Kulhavy, A. Havelka. *Static and dynamic strength of sewing seams for a special application*, Clotech 2015.

P. Kulhavy, N. Kovalova, J. Vosahlo, *Methods of Creating a Numerical Model of a Real Seam Based on Experimental Data*. In: EAN 2015 - 53nd International Conference on Experimental Stress Analysis, 2015

P. Kulhavý, N. Kovalova, R. Martonka and J.Petrik. *Biaxial Stress of the Textile Car Seat Cover Tested in a Climatic Chamber*. In: *ICMD 2014: book of proceedings of the 55th International conference of machine design departments: Beroun, Czech Republic, September 9-12, 2014*.

Seznam příloh

Příloha_1. Code-Aster

Příloha_2. Syntaxe přenosných formátů CAD geometrie

Příloha_3. Přenosové charakteristiky kompozitu

Odborné ohlasy práce

- EVM 2015: Czech Society for Mechanics Award. Best presented paper by young researchers.
- EAN 2015: Czech Society for Mechanics Award. Best presented paper by young researchers.
- EAN 2016: Czech Society for Mechanics Award. Best presented paper by young researchers.
- EVM 2016: Best presented paper by young researchers.
- ICMD 2016: Best Poster Award
- TUL 2017 SVOC: Best work of doctoral program in Mechanical engineering
- TUL 2018 SVOC: 3th place of the doctoral program in Mechanical engineering

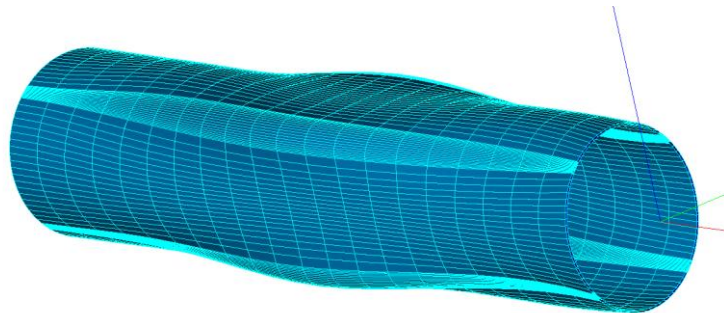
Použitý software

- PTC Creo 4.0 (KST TUL Licence)
- Autodesk Inventor (TUL Licence)
- Ansys (TUL Teaching Licence)
- Mathlab (TUL Licence)
- CADWIND (Výrobce poskytnutá licence)
- Salome, CodeAster (Free - Open source, CAE_Linux package)
- Dewesoft (TUL Licence)

Příloha. 1 Code-Aster

Konkrétně se jedná o kombinaci programů na platformě Unix v jazyce Python (pre, procesor a post procesor). Jmenovitě: Salome-Meca, ASTK, Eficás, jako solver Code_Aster a Post-Processor pro zobrazení výsledků. Vzhledem k existenci jen minima základních zdrojových kódů se pro anizotropní a kompozitní materiály jednalo víceméně jen o testování aplikovatelnosti daných výpočtů, pro danou platformu. Ani vize využít open source rozhraní pouze pro tvorbu sítí a jejich následný převod do komerčních SW je vzhledem k vzájemné nekompatibilitě nevhodná.

Na (Obr. 1) níže zobrazena vygenerovaná síť (stavebního elementu rámu). Dále a zdrojový kód command souboru v Code_Aster, aplikovatelný pro řešení ortotropního a vrstveného materiálu.



Obr. 1 Zesíťovaný testovaný díl rámu s proměnným průřezem v Pre-Processoru Salome

Pro ortotropní materiál vychází skript z rovnice a souřadného prostoru:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{NN} \\ 2\varepsilon_{LT} \\ 2\varepsilon_{LN} \\ 2\varepsilon_{TN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{-\nu_{NL}}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{NT}}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LN}}{E_L} & \frac{-\nu_{TN}}{E_T} & \frac{1}{E_N} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{LT}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{LN}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{TN}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{NN} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LN} \\ \sigma_{TN} \end{bmatrix}$$

SYM

Obr. 2 Charakteristické rozdělení os a přepis Hookova zákona v syntaxi jazyka Code_Aster

Lineárně elastický ortotropní materiál:

`DEBUT();`

`COMPOSI=EFI_MATERIAU(ELAS_ORTH = _F(E_L = 50.0e9,`

`E_T = 120.0e9,`

`E_N = 160.0e9,`

`G_LT = 15.0e9,`

```

G_LN = 30.0e9,
G_TN = 50.0e9,
NU_LT = 0.3,
NU_TN = 0.3,
NU_LN = 0.3));

```

Kompozitní materiál definovaný pomocí tloušťky a úhlu jednotlivých vrstev

```

STRAT=DEFI_COMPOSITE( COUCHE=(_F( EPAIS=0.28 MATER=COMPOSI, ORIENTATION=0.0,),
_F( EPAIS=0.25, MATER=COMPOSI, ORIENTATION=60.0,),
_F( EPAIS=0.25, MATER=COMPOSI, ORIENTATION=-60.0,),
_F( EPAIS=0.25, MATER=COMPOSI, ORIENTATION=0.0,)),
IMPRESSION=_F(UNITE=8,));

```

A následně po definici sítě, okrajových podmínek jednotlivých geometrických skupin atd. definice zobrazení pro post-processor.

```

RESU=CALC_ELEM(reuse=RESU, MODELE=MODE, CHAM_MATER=MATE, RESULTAT=RESU,
OPTION=('SIGM_ELNO', 'SIEQ_ELNO',), EXCIT=_F(CHARGE=CHAR,));

```

```

RESU=CALC_NO(reuse=RESU, RESULTAT=RESU, OPTION=('SIGM_NOEU', 'SIEQ_NOEU', ));

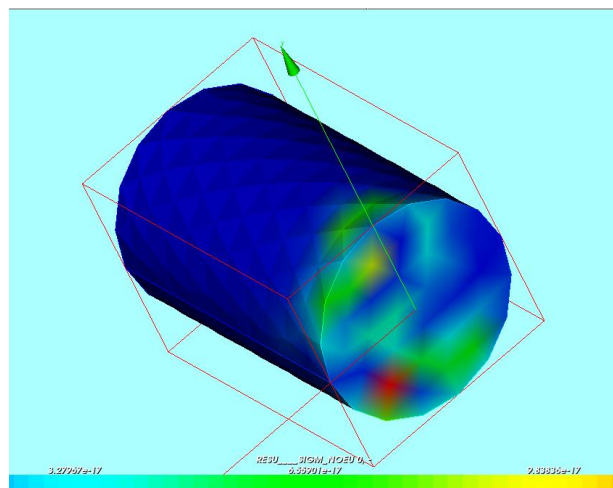
```

```

IMPR_RESU(FORMAT='MED', UNITE=80, RESU=_F(MAILLAGE=MAIL, RESULTAT=RESU,
NOM_CHAM=('SIGM_NOEU', 'SIEQ_NOEU', 'DEPL',),),); FIN();

```

Grafické výstupy z post-processoru pro testovaný kompozitní model:



Obr. 3 Příklad pokusného výpočtu anizotropního materiálu v Salome-meca, solver Code_Aster

Příloha. 2 Syntaxe přenosných formátů CAD geometrie

Struktura formátu IGES (Initial Graphics Exchange Specification),

Tento formát souboru byl vyvinut v kooperaci společnosti ICAM a US Air force . Jedním z cílů bylo vyvinout CAD software, který by automaticky generovat číselné kontrolní programy pro velmi složité počítače číslicově řízené (CNC) obráběcí stroje používané v leteckém průmyslu. IGES formát je založen na ASCII kódu a využívá tzv. Hollerithův formát pro řetězce. Jedná se o číslo udávající počet znaků v řetězci a písmeno H. 7HPRIKLAD tedy znamená „příklad“.

Pro popis tvarů geometrie, jsou použity číselně označené skupiny geometrií, jako např. 100 – oblouk, 116 bod, 112 splyne, 110 přímka a velmi často se vyskytující 314 což je definice barvy. Struktura souboru, je rozdělena na 5 sekcí označených jako S, G, D, P a T - Start, Global, Directory, Entry, Parameter Data, a Terminate.

0	10	20	30	40	50	60	70	80
PTC IGES file: body.igs								S 1
1H,,1H;,7HPRT0006,8Hbody.igs,								G 1
52HCreo Parametric by Parametric Technology Corporation,7H2012230,32,								G 2
38,7,38,15,7HPRT0006,1.,2,2HMM,32768,0.5,15H20170111.162101,0.00469023,								G 3
46.9042,12HPetr_Kulhavy,7HUnknown,10,0,15H20170111.162101;								G 4
314 1 1 1 0 0 0 001000200D								1
406 12 1 1 0 0 0 001000000D								23
406 0 0 1 15 PROP 2D								24
116 13 1 1 0 0 0 000000000D								25
116 0 5 1 0 POINT 2D								26
406 14 1 1 0 0 0 001000000D								27
406 0 0 1 15 PROP 3D								28
116 15 1 1 0 0 0 000000000D								29
116 0 5 1 0 POINT 3D								30
314,1.1D0,1.2D0,1D2;								1P 1
314,3.92D1,1.2D0,1.2D0;								3P 2
314,4.1D1,0D0,2.2D1;								5P 3
314,6.952D1,7.426D1,7.9D1;								7P 4
314,7.84314D1,7.84314D1,7.84314D1;								9P 5
314,8.784D1,9.49D1,1D2;								11P 6
314,9.6D1,9.6D1,9.6D1;								13P 7
314,9.8D1,6.27D1,0D0;								15P 8
314,1D2,1D2,9.49D1;								17P 9
406,1,4HPNT0;								19P 10
116,-1D1,0D0,1D1,0,0,1,19;								21P 11
406,1,4HPNT1;								23P 12
116,-2D1,2D1,0D0,0,0,1,23;								25P 13
406,1,4HPNT2;								27P 14
116,0D0,3D1,3D1,0,0,1,27;								29P 15
S 1G 4D 30P 15 T 1								

Obr. 4 Syntaxe formátu IGES, tři body o souřadnicích (10,0,10);(20,20,0); (0,30,30).

Souborový formát STEP (**Standard for Exchange of Product model data**)

Mezinárodní standard pro výměnu CAD dat (ISO 10303). Je vyvíjen od roku 1984 jako nástupce formátů IGES a německého VDA-FS. Specifikace formátu STEP zahrnuje několik tzv. aplikačních protokolů (*Application Protocol, AP*). Ty popisují jednotlivé oblasti produktových dat - např. 2D výkresy, plechy, materiály, nábytek, elektronika, loďařství, dynamika, proudění.

Původní verze AP203 definuje data Geometrie, topologie a správu konfigurací pevných modelů pro mechanických dílů a sestav. Tento typ souboru nepodaří barvy a vrstvy.

Aktuální rozšířená verze AP214 má vše co obsahuje soubor AP203, ale přidává barvy, vrstvy, geometrické kótování a toleranci. Soubor STEP má logickou modulární strukturu, která vývojářům usnadňuje přizpůsobení formátu jejich potřebám. Moduly se nazývají "třídy" a jsou klasifikovány čísly. Hlavní sekce souboru tvoří hlavička (popis, jméno, schéma, jazyk) a datová část (jednotlivé instance, parametry, atributy)

Definováno dle standardu:

ISO 10303-21:2002 Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure

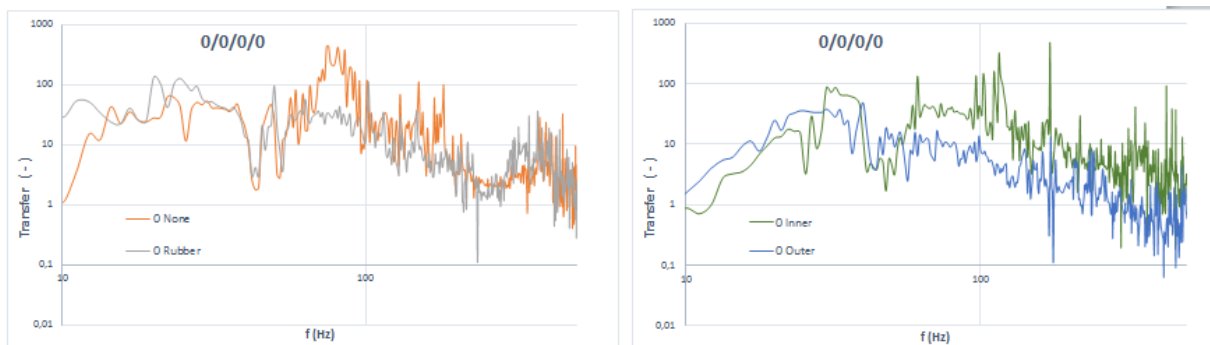
```
0      10      20      30      40      50      60      70      80
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION('', '2;1');
FILE_NAME('PRT0006', '2017-01-11T', ('Petr_Kulhavy'), (''),
'PRO/ENGINEER BY PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION, 2012230',
'PRO/ENGINEER BY PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION, 2012230', '');
FILE_SCHEMA(('CONFIG_CONTROL_DESIGN'));
ENDSEC;
DATA;
#1=CARTESIAN_POINT('', (0.E0,0.E0,0.E0));
#2=DIRECTION('', (0.E0,0.E0,-1.E0));
#3=DIRECTION('', (0.E0,1.E0,0.E0));
#4=AXIS2_PLACEMENT_3D('PRT_CSYS_DEF', #1.#2.#3);
#5=CARTESIAN_POINT('PNT0', (-1.E1,0.E0,1.E1));
#7=CARTESIAN_POINT('PNT1', (-2.E1,2.E1,0.E0));
#8=CARTESIAN_POINT('PNT2', (0.E0,3.E1,3.E1));
#10=DIMENSIONAL_EXPONENTS(0.E0,0.E0,0.E0,0.E0,0.E0,0.E0,0.E0,0.E0);
#12=PLANE_ANGLE_MEASURE_WITH_UNIT(PLANE_ANGLE_MEASURE(1.745329251994E-2), #11);
#13=(CONVERSION_BASED_UNIT('DEGREE', #12) NAMED_UNIT(*) PLANE_ANGLE_UNIT());
#15=UNCERTAINTY_MEASURE_WITH_UNIT(LENGTH_MEASURE(4.690228143193E-3), #9,
'closure',
```

Obr. 5 Syntaxe formátu IGES, tři body o souřadnicích (10,0,10);(20,20,0); (0,30,30).

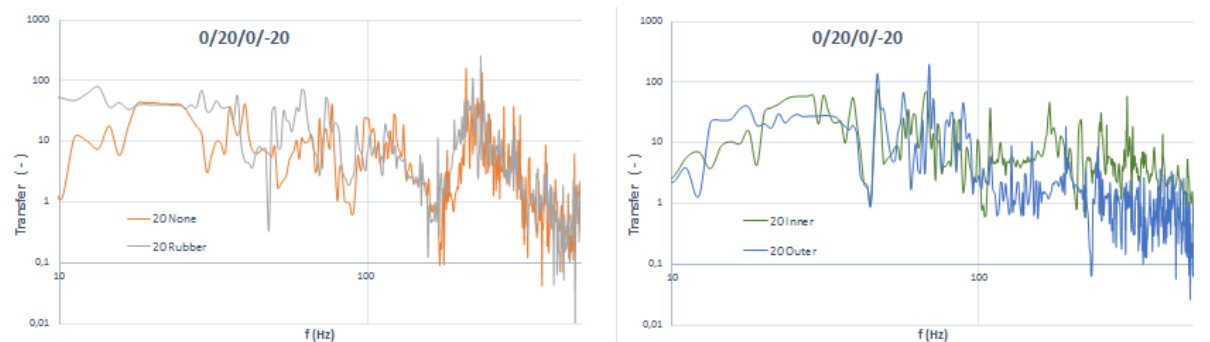
Příloha. 3 Přenosové charakteristiky kompozitu

Na přiložených grafech, jsou přiloženy přenosové funkce pro různé rozložení vrstev čtyř vrstvého laminátu v úpravě:

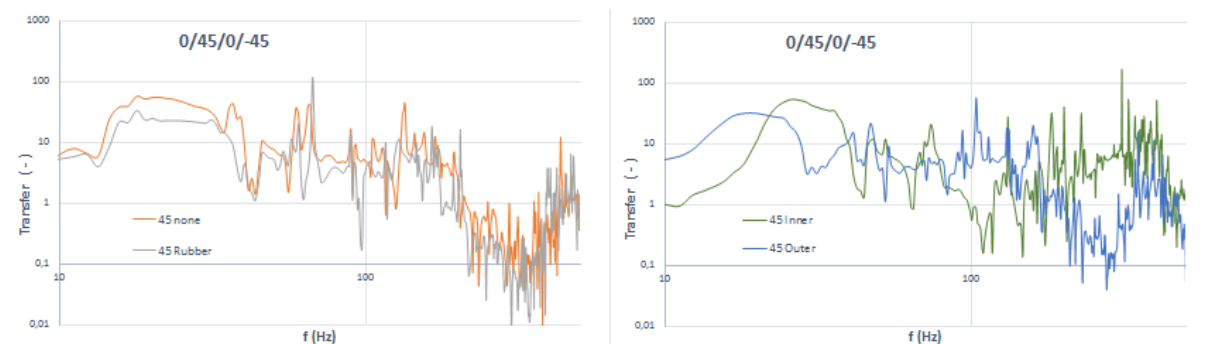
- None – čistý uhlíkový prepreg
- Rubber – gumový povlak
- Inner – vnitřní neoprenová vlákna
- Outer – vnější vrstva neoprenových vláken



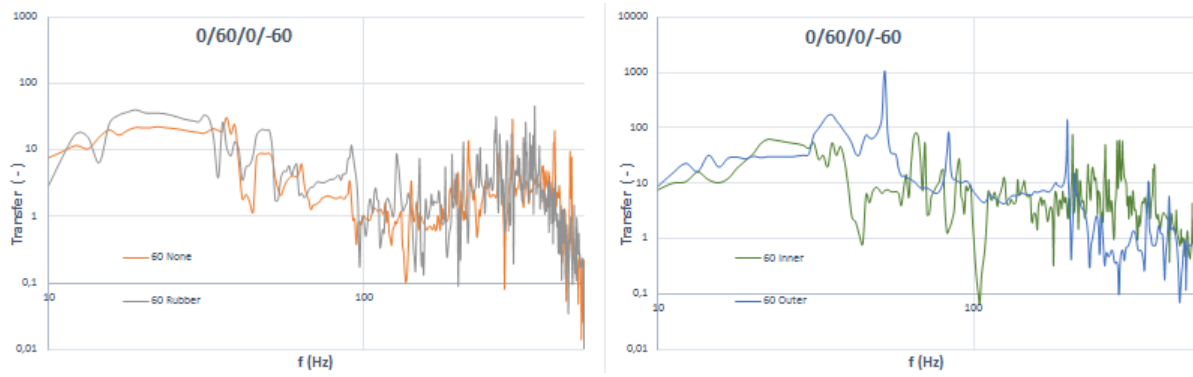
Obr. 6 Prepreg s layoutem 0/0/0/0



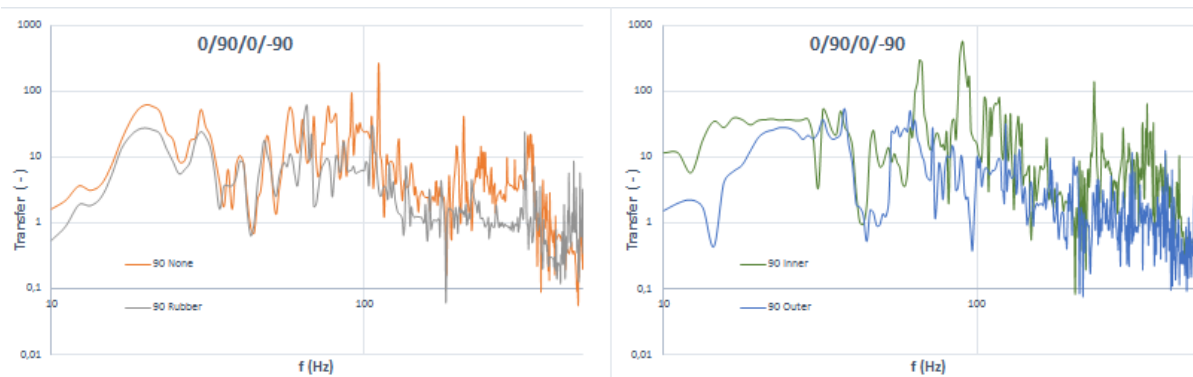
Obr. 7 Prepreg s layoutem 0/20/0/-20



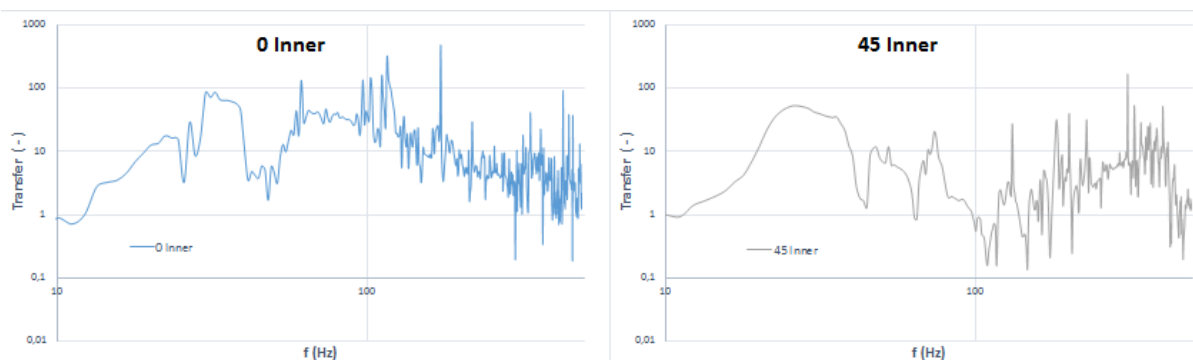
Obr. 8 Prepreg s layoutem 0/45/0/-45



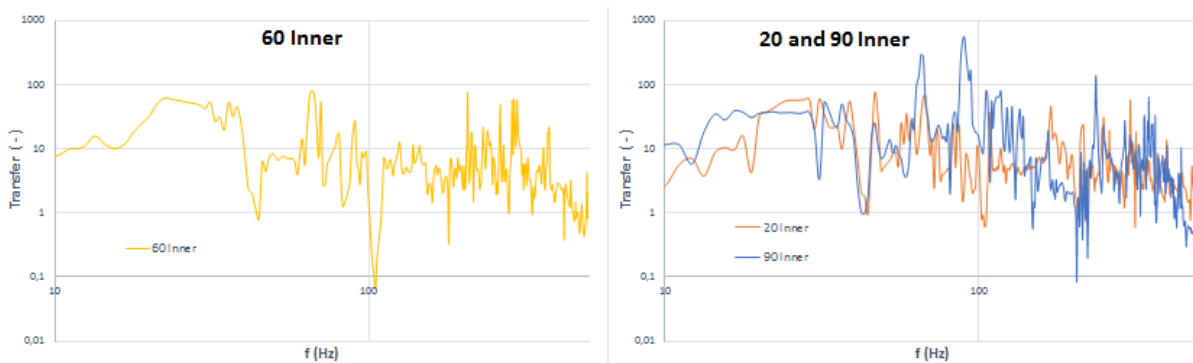
Obr. 9 Prepreg s layoutem 0/60/0/-60



Obr. 10 Prepreg s layoutem 0/90/0/-90



Obr. 11 Prepreg s layoutem 0/0/0/0 a 0/45/0/-45 s vnitřními vlákny



Obr. 12 Prepreg s layoutem 0/60/0/-60, 0/20/0/-20, 0/90/0/-90 s vnitřními vlákny