



Stanovení materiálových parametrů kompozitů s matricí z akrylátové pryskyřice vyztužených přírodními materiály a určení jejich tlumících vlastností

Diplomová práce

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 3901T003 – Aplikovaná mechanika - inženýrská mechanika

Autor práce: **Bc. Alena Řeháková**

Vedoucí práce: prof. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Alena Řeháková**
Osobní číslo: **S14000094**
Studijní program: **M2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika - inženýrská mechanika**
Název tématu: **Stanovení materiálových parametrů kompozitů s matricí z akrylátové pryskyřice vyztužených přírodními materiály a určení jejich tlumících vlastností**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Výroba kompozitních vzorků ze zvolených materiálů a provedení základních materiálových testů při kvazistatickém zatěžování (tah, ohyb, smyk, příp. biaxiální test).
2. Navržení vhodného modelu daného materiálu a určení jeho parametrů z výsledků měření.
3. Numerická simulace testů pomocí MKP a srovnání s výsledky měření.
4. Experimentální stanovení odezvy materiálu na dynamické cyklické zatěžování a stanovení dynamických modulů a útlumu.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **60-80 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- [1] LAŠ, Vladislav. **Mechanika kompozitních materiálů. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 200 s. ISBN 978-80-7043-689-9**
[2] Ctirad Novotný. **Viskoelasticita.**
<http://www.matmodel.cz/content/files/studijni-podklady/Viskoelasticita.pdf>
[3] M. Khalfallah and all. **Innovative flax tapes reinforced Acrodur biocomposites: A new alternative for automotive applications, Materials and Design, 64 (2014) 116-126**

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.**
Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. února 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 25. února 2017

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma 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.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Ráda bych poděkovala paní prof. Ing. Bohdaně Marvalové, CSc. za trpělivost, cenné rady a poskytnutí pomoci v průběhu řešení práce. Dále bych chtěla poděkovat za poskytnutí potřebného vybavení z fakulty textilní. V neposlední řadě patří poděkování rodině a přátelům, za podporu během studia.

Abstrakt

V této práci byly připraveny dva typy kompozitních materiálů, jeden s tkaninovou výztuží z juty a druhý s kombinací tkaniny a korkových částic. Matrici tvořila acrodurová pryskyřice. Na vzorcích byla provedena rozsáhlá měření elastických parametrů. Youngův modul byl měřen jak z tahu, tak z ohybu. Pro namáhání kompozitní desky ve směru T byla shoda obou metod velmi dobrá. Elastické vlastnosti vykazují silnou anizotropii pro výztuž z juty, v přítomnosti korku byla menší a elastické moduly zhruba poloviční. V porovnání s ocelí jsou moduly minimálně o řád nižší, totéž platí i pro pevnost.

Statické tahové i další zkoušky vykazovaly lineární průběh v oblasti praktického využití, takže moduly jsou s vysokou přesností konstantní. Při dynamickém měření s vysokým předpětím byla zjištěna velmi slabá hysterese. I v dynamické oblasti lze tedy v praxi použít lineární model. Z útlumu volných kmitů vetknutého nosníku byl určen koeficient útlumu.

Pomocí metody konečných prvků byly simulovány všechny zkoušky. Bylo dosaženo dobré shody mezi simulací a experimentem. V případě volných kmitů vetknutého nosníku souhlasily frekvence naměřené a vypočtené pomocí systému Comsol Multiphysics.

V teoretické části je uveden dvourozměrný elastický model desky vyříznuté z kompozitu. Do matice elastických parametrů lze dosadit naměřené, příp. odhadnuté, hodnoty a tak získat odezvu na zvolenou dvourozměrnou napjatost.

Klíčová slova

Kompozitní materiál, juta, korek, modul pružnosti, útlum, metoda konečných prvků

Abstract

In this thesis two types of composite materials were prepared. The first one was with knitted jute reinforcement and the other one with a combination of knitwear and cork particles. The matrix was made of acrodur resin. There have been made large measurements of elastic parameters on these samples. Young's modulus was measured by means of stroke and bend methods. The conformity of these two methods was proved for the strain of the composite board in direction T. Elastic properties showed strong anisotropy for the jute reinforcement, while the anisotropy was not so strong in the presence of the cork and the elastic modules were roughly half. In comparison to steel the modules are at least one order lower, which applies also for the solidity.

Static tensile and also other tests showed a linear course in the area of practical use and so the modules are constant with high accuracy. During the dynamic measuring with high prestress there was detected weak hysteresis. The linear model is also possible to use in the dynamic area in the practical use. From the attenuation of free oscillation of the sticked girder was determined coefficient of attenuation.

With the aid of the method of infinite elements were simulated all the testings. Good conformity was reached between the simulation and the experiment. In the case of free oscillation of the sticked girder corresponded the frequencies, which were measured by the Comsol Multiphysics system.

In the theoretical part two-dimensional elastic model of board, which is cut out from the composite, is mentioned. It is possible to put measured alternatively estimated figures into the matrix of elastic parameters and get a response to the selected two-dimensional strain.

Keywords

Composite material, jute, cork, modulus of elasticity, damping, finite element method

Obsah

Úvod.....	12
1 Příprava a modely kompozitních materiálů	13
1.1 Matrice	13
1.2 Výztuž	17
1.3 Modely vláknových kompozitních materiálů.....	24
2 Experiment	30
2.1 Výroba vzorků.....	30
2.2 Tahová zkouška jutové tkaniny.....	32
2.3 Tahová zkouška kompozitu.....	36
2.4 Ohybová zkouška kompozitu	40
2.5 Smyková zkouška kompozitu	44
2.6 Cyklické zatěžování	48
2.7 Měření útlumu z kmitání vetknutého nosníku.....	50
3 Výpočty metodou konečných prvků	57
3.1 Materiálové parametry	57
3.2 Vlastní frekvence	58
4 Ověření experimentu metodou konečných prvků	61
4.1 Tahová zkouška kompozitní desky	61
4.2 Ohybová zkouška kompozitní desky	63
4.3 Smyková zkouška kompozitní desky	64
4.4 Vlastní frekvence	65
5 Diskuse.....	67
Závěr	70
Seznam literatury	72
Seznam příloh	73

Seznam zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Název
a	m	vzdálenost mezi místy upnutí
A	$m \cdot s^{-2}$	počáteční amplituda zrychlení
A_1, A_2	$m \cdot s^{-2}$	maxima amplitudy zrychlení
b	m	šířka kompozitu
B	s^{-1}	koeficient tlumení
C_i, C_s	Pa	tenzory tuhosti i-té složky, soustavy
e		exponenciála
E, E_i	Pa	Youngův modul (modul pružnosti), modul pružnosti i-té složky
E_c, E_f, E_m	Pa	moduly pružnosti soustavy, vláken, matrice
E_p	$N \cdot tex^{-1}$	počáteční tangentský modul
E_T, E_L	Pa	moduly pružnosti v hlavním směru T a L
f	s^{-1}	úhlová frekvence
f_r	$N \cdot tex^{-1}$	relativní pevnost
F	N	síla
F_c, F_f, F_m	N	síly kompozitu, vláken, matrice
G_{LT}, G_f, G_m	Pa	smýkové moduly pružnosti
h	m	výška kompozitu
I	$kg \cdot s^2$	moment setrvačnosti
l	m	délka vzorku
l_0	m	počáteční délka
Δl	m	protažení
m_{fj}, m_{fk}, m_k	kg	hmotnosti výztuže vláken, korku, hmotnost kompozitu
n		počet pozorování
s		směrodatná odchylka
S	m^2	plocha
S_c, S_f, S_m	m^2	plochy celková, vláken, matrice
S_i, S_s	Pa^{-1}	tenzory poddajnosti i-té složky, soustavy

Symbol	Jednotka	Název
t	s	čas
T	Tex	jemnost vláken
T	s	perioda kmitání
v	m·s ⁻¹	rychlost
V, V _f , V _m , V _i		objemové podíly soustavy, vláken, matrice, i-té složky
w	m	průhyb
x	m	vzdálenost podpěr ohybové zkoušky
\bar{x}		střední hodnota
x _i		i-té pozorování
y	m·s ⁻²	amplituda zrychlení
γ		zkos
γ_{LT} , γ_{LTf} , γ_{LTm}		zkosy kompozitu, vláken, matrice
δ		logaritmický dekrement útlumu
ε		poměrná deformace
ε_c , ε_f , ε_m		poměrné deformace celkové, vláken, matrice
ε_L , ε_{Lf} , ε_{Lm}		poměrné deformace v hlavním směru L kompozitu, vláken, matrice
ε_T , ε_{Tf} , ε_{Tm}		poměrné deformace v hlavním směru T kompozitu, vláken, matrice
ν_{LT} , ν_f , ν_m		Poissonovy konstanty kompozitu, vláken, matrice
σ , σ_i	Pa	napětí, i-tá složka napětí
σ_c , σ_f , σ_m	Pa	napětí celkové, vláken, matrice
σ_L , σ_{Lf} , σ_{Lm}	Pa	napětí v hlavním směru L kompozitu, vláken, matrice
σ_T , σ_{Tf} , σ_{Tm}	Pa	napětí v hlavním směru T kompozitu, vláken, matrice
τ_{LT} , τ_{LTf} , τ_{LTm}	Pa	smyková napětí kompozitu, vláken, matrice
τ	Pa	smykové napětí
φ		fázové posunutí
ω_{fj} , ω_{fk}		hmotnostní poměry vláken, matrice

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Znázornění rozložení vrstev v desce, vlevo – typ A, vpravo – typ B.....	30
Obrázek 2.2: Řez kompozitní deskou	31
Obrázek 2.3: Tahová zkouška jutové tkaniny	34
Obrázek 2.4: Tahová křivka jutové tkaniny ve směru osnovy.....	35
Obrázek 2.5: Tahová křivka jutové tkaniny ve směru útku	35
Obrázek 2.6: Tvary zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku	37
Obrázek 2.7: Tahová zkouška	38
Obrázek 2.8: Tahový diagram kompozitní desky typu A	39
Obrázek 2.9: Tahový diagram kompozitní desky typu B.....	40
Obrázek 2.10: Ohybová zkouška	41
Obrázek 2.11: Tvar zkušebního vzorku pro ohybovou zkoušku.....	41
Obrázek 2.12: Rozmístění podpěr a zatěžujícího válečku pro ohybovou zkoušku.....	42
Obrázek 2.13: Ohybová zkouška kompozitní desky typu A.....	43
Obrázek 2.14: Ohybová zkouška kompozitní desky typu B	44
Obrázek 2.15: Deformace Arcanova vzorku.....	45
Obrázek 2.16: Rozměry vzorku pro smykovou zkoušku jsou vlevo. Vpravo zkušební vzorky .	46
Obrázek 2.17: Smyková zkouška.....	47
Obrázek 2.18: Smyková zkouška kompozitní desky typu A	47
Obrázek 2.19: Cyklické zatěžování, pro určení velikosti útlumu	48
Obrázek 2.20: Rozmístění podpěr a zatěžujícího válce pro cyklickou ohybovou zkoušku	49
Obrázek 2.21: Hysterezní smyčka kompozitního materiálu	50
Obrázek 2.22: Měření kmitání nosníku.....	52
Obrázek 2.23: Časový průběh signálu	53
Obrázek 2.24: Vlastní frekvence vetknutého nosníku	54
Obrázek 2.25: Naměřený signál a jeho aproximace tlumenou sinusovou křivkou	55
Obrázek 2.26: Naměřený signál s vyznačenými maximy amplitud.....	55
Obrázek 3.1: Geometrie numerického modelu simulace tahové zkoušky	57
Obrázek 3.2: Síť numerického modelu	58
Obrázek 3.3: Geometrie numerického modelu simulace vlastní frekvence.....	59
Obrázek 3.4: Síť numerického modelu	60
Obrázek 4.1: Ověření tahové zkoušky kompozitního materiálu typu A	62
Obrázek 4.2: Ověření tahové zkoušky kompozitního materiálu typu B	62
Obrázek 4.3: Ověření ohybové zkoušky kompozitního materiálu typu A.....	63
Obrázek 4.4: Ověření ohybové zkoušky kompozitního materiálu typu B	64
Obrázek 4.5: Porovnání smykové zkoušky se simulací	65
Obrázek 4.6: Typ desky A, směr vzorku L	66

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Hmotnostní poměry jednotlivých typů desek	32
Tabulka 2.2: Hmotnostní poměry desek vyrobených na měření útlumu	32
Tabulka 2.3: Počáteční tangentový modul	36
Tabulka 2.4: Rozměry vzorků pro tahovou zkoušku	37
Tabulka 2.5: Modul pružnosti v tahu	40
Tabulka 2.6: Rozměry vzorků pro ohybovou zkoušku	42
Tabulka 2.7: Modul pružnosti v ohybu	44
Tabulka 2.8: Smykový modul v pružnosti	48
Tabulka 2.9: Rozměry vzorků pro cyklické zatěžování	49
Tabulka 2.10: Dynamický modul.....	50
Tabulka 2.11: Vlastní frekvence vzorků z desky typu A	53
Tabulka 2.12: Vlastní frekvence vzorků z desky typu B	53
Tabulka 2.13: Hodnoty útlumu	56
Tabulka 4.1: Porovnání první vlastní frekvence kompozitního materiálu typu A	65
Tabulka 4.2: Porovnání první vlastní frekvence kompozitního materiálu typu A''	66
Tabulka 5.1: Porovnání měření v tahu a ohybu	68
Tabulka 5.2: Porovnání statického a dynamického měření.....	69

Úvod

Kompozitní materiál nebo též lidově kompozit, je materiál, který je složen alespoň ze dvou různých složek, jejichž vlastnosti se liší ať už po stránce mechanických vlastností, odolnosti vůči působení prostředí např. chemická odolnost a další vlastnosti. Podstatnou výhodou kompozitního materiálu je to, že kombinuje výhody všech jeho složek a výsledný výrobek dosahuje výrazně lepších vlastností než složky, z nichž je vyroben.

S kompozitními materiály přichází do styku člověk každý den, aniž by si to uvědomoval, neboť oblasti jejich použití jsou velmi široké. Používají se např. ve stavebnictví v podobě železobetonu, což je směs písku cementu kamení a rozorů, což jsou ocelové tyče a drátobetonu, což je směs písku cementu a ocelových drátků průměru cca 1 mm a délky 5 cm. Dále se kompozitní materiály používají v dopravě a to nejen v letecké ale už i v ostatních odvětvích dopravy. V dopravě se využívají díky tomu, že pro stejnou tuhost konstrukce jsou podstatně lehčí než konvenční materiály a tím šetří náklady na provoz dopravních prostředků. Kompozitní materiály pronikly i do lékařství, kde jsou používány např. v zubním lékařství jako náhrada klasických a nevhledných plomb z amalgamu.

Přesto, že první kompozitní materiál byl vyroben před více než 100 lety, když v roce 1909 belgický chemik Leo Baekeland přišel s patentem na hmotu oxybenzylethylenglykolanhydrid, lidově nazývanou bakelit, rozmach kompozitních materiálů nastal až po druhé světové válce, kdy se poprvé použily na vnější části automobilů a letadel.

Tato diplomová práce je zaměřena na výrobu kompozitních materiálů s výztuží z přírodních materiálů tj. juty a korku a matrice z akrylátové pryskyřice.

Cíly této práce jsou: výroba kompozitního materiálu a vhodných vzorků pro správné stanovení základních materiálových parametrů, ověření získaných parametrů materiálů pomocí simulace metodou konečných prvků a stanovení dynamických modulů společně s určením útlumu vzorků kompozitních materiálů.

1 Příprava a modely kompozitních materiálů

Kompozitní materiály nazýváme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více složek, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obvykle je jedna složka v kompozitu spojitá, takovou složku nazýváme matrice. Složku, která není spojitá, nazýváme výztuž. Výztuž vykazuje obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) než matrice a hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností výsledného kompozitního materiálu. [7]

1.1 Matrice

Matrice je materiál, kterým je prosycena výztuž tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Tento výrobek je nazýván kompozit.

Mezi nejzákladnější úkoly matrice patří:

- Zajištění geometrické polohy výztuže a tvarové stálosti výrobku,
- Převedení namáhání z vlákna na vlákno,
- Přenos namáhání na vlákna,
- Ochrana vlákna před vlivy okolí.

Pro zajištění kvality kompozitu je zapotřebí zajistit přilnavost mezi vlákny a matricí. Lepší přilnavost také zajistí lepší fyzikální a příp. i chemické vazby mezi vláknem a matricí. Na vlákno se nanese apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno dostatečně smočila a netvořila bublin [5].

Matrice, používané v kompozitních materiálech, lze dělit na kovové, keramické a polymerní. [7]

Kovové matrice charakterizuje jejich tvárnost a houževnatost. Mezi nejpoužívanější kovové matrice patří lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Matrice z niklových slitin se využívají v kompozitech pro velmi vysoké teploty. Naopak kompozity s měděnými případně se stříbrnými matricemi mají využití elektrotechnice. [7]

Výhodou keramické matrice v kompozitech jsou např. lehké a většinou velmi tvrdé materiály. Jako nevýhodu lze označit skutečnost, že jsou poměrně křehké. Kompozity s keramickými matricemi patří mezi vysokoteplotní materiály. Tyto matrice mohou být jak oxidické povahy (Al_2O_3 , ZrO_2 , atd.), tak i neoxidické povahy (SiC , Si_3N_4 , atd.) [7].

Třetím druhem jsou polymerní matrice. Jejich hlavní výhodou v kompozitních materiálech je nízká hustota, která zajistí nízkou hmotnost výrobků. Hmotnost výrobku je důvodem jedné z hlavních oblastí využití těchto kompozitních materiálů, a to v oblasti konstrukcí letadel. Jistou nevýhodou je nízká tepelná stabilita polymerů [7].

Polymerní matrice se dále dělí na termoplasty a termosety (reaktoplasty). Dříve se pro kompozity používaly pouze některé typy reaktivních pryskyřic a to vyztužené nenasyčené polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. V dnešní době tyto reaktivní pryskyřice mají také veliké zastoupení v kompozitních materiálech. Jejich výhodou je, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a většinou při normální teplotě v tekutém stavu. I v případě, že jsou zpracovávány ve formě taveniny, je jejich viskozita nižší než viskozita taveniny termoplastů [5].

V porovnání s termoplasty mají reaktivní pryskyřice nižší energetické nároky na prosycování vláken, protože zpracování probíhá při podstatně nižších teplotách. Termoplasty mají zpracovatelské teploty mnohem vyšší a jsou omezeny teplotou rozkladu [5].

V této práci byla použita jako matrice epoxidová pryskyřice, která patří do skupiny reaktivních pryskyřic. Proto se budeme zabývat pouze matricemi z reaktivních pryskyřic. Předtím však stručně upozorníme na některé specifické vlastnosti plastů [5].

Specifické mechanické vlastnosti plastů

Pod pojmem plast rozumíme v této práci i pryskyřice. Mezi méně obvyklé vlastnosti plastů patří relaxace napětí a kříp. Relaxace napětí se projevuje u vzorku zatíženého konstantním posunutím. Elastické napětí ve vzorku postupně klesá, zhruba podle exponenciální funkce a blíží se ustálené hodnotě. Relaxační doba bývá od sekund po dny.

Kříp se projevuje při konstantním elastickém napětí. Měřený vzorek se prodlužuje. Opět je časová závislost prodloužení (deformace) zhruba exponenciální. Praktický důsledek je např. nemožnost používání šňůr z některých polymerů. Po napnutí se samovolně prohýbají i bez zatížení. Po novém napnutí se děj znovu opakuje.

Další zajímavou vlastností je časové teplotní superpozice. Při vysokých teplotách se materiál chová jako plastický, při nízkých jako elastický. Jako klasický případ se uvádí asfalt. Při vysokých teplotách (v létě) velmi pomalu vytéká z povalené nádoby. Při nízkých teplotách (v zimě) je elastický a křehký. Po prudkém nárazu se roztříští podobně jako např. kus ledu. Křehkost výrobků z plastů za nízkých teplot, např. při mrazu, omezuje jejich praktické využití.

Obecně polymery patří mezi viskoelastické látky, zatímco např. kovy jsou čistě elastické a kapaliny naopak čistě viskózní materiály. Právě viskózní složka je odpovědná za specifické chování plastů.

Reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice patří ve skupině termosetů mezi nejčastěji používanou maticí při výrobě kompozitů. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které se buď samostatně, nebo za pomoci jiných složek (tvrdidel), vytvrzující polyadici nebo polymeraci bez odštěpení těkavých složek. Reaktivní pryskyřice nazýváme také laminační, impregnační nebo prosycovací pryskyřice [5].

Typy reaktivních pryskyřic:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice
- Vinylesterové pryskyřice
- Epoxidové pryskyřice
- Fenolické pryskyřice

Při vytvrzování jsou reaktivní pryskyřice míchány s tvrdidly. Tvrdidla jsou sloučeniny, které ovlivňují vytvrzování v průběhu polyadice epoxidových nebo izokyanátových pryskyřic. Mezi nejdůležitější tvrdidla patří iniciátory a urychlovače. Urychlovače jsou látky, které přidány v malém množství urychlují síťovací reakci [5].

Nenasycené polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyesterové pryskyřice, které patří mezi reaktivní pryskyřice, jejichž roztoky jsou bezbarvé, až slabě nažloutlé. Polyesterové pryskyřice je možné vytvrzovat za normální nebo zvýšené teploty, při které nevznikají těkavé vedlejší produkty. Vytvrzování probíhá uvolněním reakčního tepla a dochází při něm k objemovému smrštění o 5 až 9%. Vysokoviskózní pryskyřice se rozpouštějí ve styrenu, který současně působí při vytvrzování jako kopolymerační monomer. Vytvrzují se radikálovým mechanismem. Tato pryskyřice dodnes patří mezi nejčastěji používané materiály v kompozitech, vzhledem k jeho dobrým vlastnostem, mezi které mimo jiné patří vysoká rychlost vytvrzování, dobré smáčení vláken, nízká cena nebo nízká viskozita [5].

Vinylesterové pryskyřice

Na rozdíl od předchozí pryskyřice, vinylesterová pryskyřice zesítuje pomocí koncových metakrylátových skupin, kde jsou také esterové vazby. Výhodou zesítování u vinylesterové pryskyřice na bázi bisfenolu A je velmi dobrá odolnost proti alkalickému prostředí, vysoká houževnatost, naopak nevýhodou je nižší tvarová stálost za tepla. Vinylesterové pryskyřice jsou odolnější vyšším teplotám, protože vycházející ze základních složek fenolických pryskyřic. Zároveň jsou také reaktivnější a vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají vyšší stupeň zesílení a nižší viskozitu. Svou křehkostí, se ale podobají materiálům nenasycených polyesterových pryskyřic na bázi bisfenolu A. Jsou odolné proti aromatickým uhlovodíkům, ale nedosahují odolnosti proti alkáliím jako nenasycené polyesterové pryskyřice [5].

Epoxidové pryskyřice

Při běžné teplotě jsou epoxidové pryskyřice kapalné nebo pevné látky. Ty mohou obsahovat přidané pomocné látky, např. rozpouštědla. V molekule obsahují epoxidové skupiny, jednu nebo dvě, nutné jako funkční skupiny pro makromolekuly. Tvrdidlo, které se přidává v kapalné nebo pevné formě, obsahuje v molekule aktivní vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami pryskyřice [5].

Epoxidové pryskyřice mají velice dobré mechanické vlastnosti, a to vysokou rozměrovou stálost a přilnavost k podkladu. Ve formě vyztužených kompozitů zpracováváme pouze 8 % epoxidové pryskyřice. Mezi oblastmi využití patří zalévací hmoty pro elektroniku, výroba forem, nástrojů a různé povlaky, zejména pro práškové nanášení [5].

Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice jsou vyráběny buďto z 30 až 50 % vodných roztoků kondenzací aldehydů, nebo kondenzací fenolů. Jednotlivé varianty fenolických pryskyřic vycházejí např. z různých chemických nebo fyzikálních modifikací [5].

1.2 Výztuž

Výztuž dělíme podle geometrie a prostorového uspořádání na dvě základní skupiny. První skupinou jsou částicové kompozity. Částicové výztuže jsou využívány zejména pro zvýšení tvrdosti, otěruvzdornosti a odolnosti při zvýšených teplotách [7]. Druhou skupinou jsou vláknové kompozity. Pro vláknové výztuže je typická výrazná anizotropie vlastností (vlastnosti jsou v různých směrech různé). Pevnost i modul pružnosti ve směru osy bývají vyšší než ve směru kolmém k ose. Vyztužení vlákny je využíváno zejména ke zvýšení pevnosti, modulu pružnosti (tuhosti) a v některých případech rovněž houževnatosti [7].

Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou plněny částicemi, které jsou definovány jako nevláknový útvar, který nemá dlouhý rozměr. Mohou být ve tvaru koule, krychle, kvádrů, popř. jiného tvaru. Částice se mohou rovněž podílet na přenosu namáhání, ale v mnohem menším měřítku než vlákna. Hlavní význam částic je zlepšení mechanických vlastností materiálu, např. úprava elektrické a tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti opotřebení, snížení koeficientu tření, apod. Použitím částic v kompozitech, lze také mírně zvýšit i pevnost v tahu. Částice mohou mít v matici náhodnou orientaci, nebo přednostní (výhodnější) orientaci z důvodu dosažení požadovaných mechanických vlastností [6].

Korková výztuž

Korek je materiál získávaný z kůry dubu korkového nebo korkovníku amurského. Dub korkový se vyskytuje pouze v oblasti jižní Evropy a severní Afriky. Převážnou většinu celosvětové produkce korku obstarává Portugalsko (51 %) a Španělsko (21 %). Kůra se ze stromu odřezává nejdříve po 25 letech od vysazení, poté každých 9-30 let v závislosti na tom, jak kvalitní korek požadujeme. Životní cyklus dubu korkového je okolo 200 let. Korek je přírodní materiál, tudíž je jeho výroba ekologická a trvale udržitelná. Poptávka po korku stále stoupá a během příštích několika let se očekává, že poptávka převýší nabídku. Z korku se vyrábí různé sportovní pomůcky, např. badmintonové košíčky, rybářské splávky nebo jádra basebalových holí. Další velké uplatnění má korek jako materiál zvyšující tření, například u protiskluzových podložek nebo u spojek motocyklu.

Vláknové kompozity

Vláknové kompozity dělíme na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity dále dělíme na kompozity s krátkými vlákny a kompozity s dlouhými vlákny. Jednovrstvé kompozity jsou tvořeny buď jednou vrstvou, nebo z několika samostatných vrstev, ve kterých mají vrstvy stejnou orientaci a vlastnosti.

V kompozitech s krátkými vlákny jsou vlákna orientována nahodile, nebo v určitém směru. Vlákna orientována nahodile jsou nejčastěji vstříkována do formy spolu s pryskyřicí. Naopak kompozity s orientovanými vlákny v určitém směru se vyrábí většinou z rohoží, které vzniknou spojením krátkých vláken, a následně je aplikována pryskyřice.

Kompozity s dlouhými vlákny mohou mít vlákna uspořádána v jednom směru nebo ve dvou směrech. Vlákna uspořádána v jednom směru jsou prosycena pryskyřicí, která je udržuje v dané poloze a zároveň tvoří matici kompozitu. Takto vyrobené kompozity mají vysokou pevnost ve směru vláken a naopak nízkou ve směru kolmém na vlákna. Zlepšení těchto vlastností kompozitu se provádí vyztužením i v druhém směru.

Nejčastěji jsou používány vícevrstvé kompozity. Tyto kompozity se skládají z několika různě orientovaných kompozitů (lamin). Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, nazývá se tento kompozit laminát. Pokud jsou materiály v jednotlivých vrstvách různé, např. různé druhy vláken nebo pryskyřic, nazýváme takové kompozity hybridní laminát.

Vzhledem k použité matici v experimentální části se budeme dále zabývat pouze výztuží vhodnou do polymerních kompozitů.

Druhy vláken pro užití v polymerních kompozitech jsou zejména tyto:

- Aramidová vlákna
- Uhlíková vlákna
- Skleněná vlákna
- Přírodní vlákna

Aramidová vlákna

Vazby jsou orientované podle osy vlákna, což značí, že aramidová vlákna jsou na bázi lineárních organických polymerů. Tyto vlákna mají vysokou pevnost a tuhost. Vysokou tuhost zajišťují aromatická jádra v řetězcích. Odhadovaná teoretická pevnost je kolem 200 GPa [5].

Aramidová vlákna lze zpracovávat s běžnými termoplasty i reaktivními pryskyřicemi. Hlavní oblasti použití jsou výztuž pro pneumatiky (kevlar), náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích, balistické aplikace a světlovodné kabely. Vzhledem k vysoké orientaci molekul mají aramidová vlákna záporný součinitel teplotní délkové roztažnosti ve směru vláken [5].

Vyrábějí se různé druhy aramidových vláken, které se navzájem liší hodnotami tažnosti a modulu pružnosti v tahu. Typy s vyšším E-modulem a nižší tažností, jsou schopny pojmout nižší deformační práci než vlákna s nízkým E-modulem a vyšším protažením [5].

Kruhový průřez aramidového elementárního vlákna bývá kolem 12 μm a na povrchu je vlákno lehce zdrsňeno. Hustota $1,45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ je nízká v porovnání s ostatními vyztužujícími vlákny, a tím je vedle vysoké meze pevnosti v tahu další velmi dobrou vlastností [5].

Aramidová vlákna lze vidět na trhu ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží.

Vlastnosti aramidových vláken:

- Nejlehčí vyztužující vlákno, z čehož vyplývá vysoká měrná pevnost v tahu.
- Měřené vlastnosti ve směru vlákna se liší od vlastností měřených v příčném směru, z toho vyplývá, že vlákna jsou anizotropní.
- Absorbují vlhkost, která ovlivňuje pevnost mezi vláknem a matricí, proto je potřeba vlákna před použitím vysušit.
- Nejsou odolná proti vysokým teplotám. V kompozitu odolávají teplotě do 300 °C.
- Při expozici zářením s vysokou energií dochází k výraznému poklesu pevnosti [5].

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost a tuhost, ale nízkou tažnost. Vlákna se vyrábí z celulózy, polyakrylonitrilu a smoly. Tyto suroviny jsou ve vláknitém tvaru nejprve karbonizovány. Kar-

bonizace je proces, při kterém jsou suroviny zahřívány nad teplotu 900 °C bez přístupu vzduchu. Během tohoto procesu se odštěpí všechny prvky až na uhlík. Mechanické vlastnosti se zlepšují při následném zvyšování teploty až nad 1 800 °C, kdy je proces ukončen. Při této úpravě se zvyšuje i grafítizace [5].

Uhlíková vlákna se využívají např. při výrobě větrných elektráren, tlakových nádob, ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, letectví, na sportovní potřeby a další. Nejčastěji se používají standardní vlákna, nebo vlákna se střední hodnotou pevnosti, která byla zpracována na náročnější aplikace ve formě nezkroucených pramenců (od 1 000 do 12 000 elementárních vláken). U vysokopevnostních a vysokomodulových vláken je požadovaná nízká měrná hmotnost materiálu. Pro tento předpoklad je vhodnější použít prvky z prvních dvou řad periodické tabulky, jako jsou bor, uhlík, dusík, kyslík nebo křemík [5].

Vlákna mají průměr přibližně 5 až 10 μm . Youngův modul a pevnost je závislá na výskytu vadných míst a na stupni orientace uhlíkových vrstev, vzniklých během výroby. Hodnoty mechanických vlastností vycházejí z hodnot energie vazeb gravitovaného monokrystalu ve směru vrstev. Youngův-modul dosahuje až 1 000 GPa a pevnost 100 GPa. Youngův modul měřený kolmo na směr vrstev dosahuje pouze 4 GPa. Tepelná roztažnost ve směru rovnoběžném s vrstvami uhlíku dosahuje i záporných hodnot [5].

Uhlíková vlákna se vyrábí hlavně dvěma způsoby. První způsob je postup, který využívá polyakrylonitril jako prekurzor. Druhý způsob využívá surovin bohatých na uhlík [5].

Za účelem dosažení co největší orientace molekul ve směru osy vlákna je polyakrylonitril nejprve dlužen. Poté je pod mechanickým napětím za přístupu vzduchu zahříván na teplotu 220 až 300 °C. Polyakrylonitril při zahřívání dehydruje a přeměňuje se na žebříčkovitý polymer. Žebříčkovitá struktura polymeru se v dalším kroku přemění při karbonizaci v inertní atmosféře při teplotách do 1 600 °C na grafitickou strukturu. Dalším dlužením polymeru a působením tahového napětí dosáhnou vrstvy dobrého usměrnění rovnoběžně s osou vlákna. Po tomto kroku výroby získáme vysoké hodnoty pevnosti (více než 5 GPa) i Youngův modulu. Dalším tepelným procesem, při kterém teplota dosahuje až 2 500 °C, může Youngův modul vláken dosahovat až 400 GPa, ale na úkor snížení pevnosti [5].

Druhý způsob výroby uhlíkových vláken používá suroviny bohaté na uhlík, a to smoly na bázi dehtů vznikajících při destilaci ropy nebo kamenouhelného dehtu. V prvním kroku jsou suroviny tepelně zpracovány (při teplotě nad 350 °C) na přechodový stupeň mezi izotropní kapalnou fází (mezofáze) a trojrozměrně uspořádanou krystalickou fází. Během následného spřádání vznikají vlákna s vysokým stupněm orientace v osovém směru. V druhém kroku dochází k přeměně na uhlík, karbonizací při teplotě do 2 000 °C. Tato vlákna mají velmi vysoký Youn-

gův modul (až 700 GPa), ale nižší pevnost (2 GPa). V posledním kroku výroby probíhá žíhání při teplotách až 3 000 °C. Takto lze vyrábět vysokomodulová uhlíková vlákna [5].

Vlastnosti uhlíkových vláken:

- Hodnota Youngova modulu stoupá se zvyšujícím se zatížením.
- Vysoká hodnota Youngova modulu i vysoká pevnost až do teploty 500 °C, nízká hustota.
- Vysoká korozní odolnost, vysoká snášenlivost s tělesnými tkáněmi.
- Dobrá elektrická i tepelná vodivost.
- Jsou velmi křehká a snadno se lámou. Povrchově se upravují apretací směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Dochází ke zlepšení vazby mezi vláknem a matricí a slouží jako ochrana při zpracování.
- Při delším skladování vlákna ztrácejí ohebnost.
- Dynamické vlastnosti laminátu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u ostatních materiálů [5].

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna, která se používají pro textilní účely, je název pro tenká vlákna s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny. Tato vlákna se nazývají textilní skleněná vlákna. Skleněná vlákna, vhodná jako elektrický izolant s vysokou propustností pro záření, jsou vyrobené z bezalkalické skloviny (tzv. sklo E) a označují se E-vlákna (elektrická). Bezalkalická skleněná vlákna, ale s jiným složením (AR-vlákna) se používají pro vyztužení betonu. Vlákna jsou dodávána ve formě krátkých vláken, příze, pramence, či rohože [5].

Výroba skleněných vláken probíhá ve sklářské peci. V tavicí peci je při teplotě 1 400°C roztaven křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kyselina boritá a kazivec na sklovinu. Sklovina je v tekutém stavu vedena kanálky předpecí, odkud vytékají skrz spřádací trysky. Z trysek sklovina pomalu vytéká a rychle tuhne do tvaru vláken. Vlákna mají na výstupu průměr asi 2 mm a na požadovaný průměr se upravují dlužením na rychle rotujícím navíjecím zařízení [5].

V průběhu tažení vláken, je nanášena vodní emulze. Vodní emulze má za úkol spojit jednotlivá vlákna do vlákna spřádacího, chránit citlivý povrch, přizpůsobit vlákna dalšímu zpracování a zlepšit vazby mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem [5].

Slabým místem kompozitu je rozhraní mezi vláknem a matricí, kudy mohou pronikat chemikálie. Tyto chemikálie podobně jako voda na neošetřený kov může působit např. korozivně. Předjít tomu lze silnější vrstvou pojiva na povrchu laminátu, anebo kvalitnějším spojením mezi matricí a vlákny. Kvůli kvalitnějšímu spojení matrice s vlákny se na vlákna nanáší vrstva lubrikační, která zajišťuje také mimo jiné dobrou přilnavost [5].

Vlákna jsou používána např. pro textilní zpracování případně pro vyztužování termoplastů, termosetů nebo lehčených plastů. Jedná se o izotropní materiál, protože, materiálové vlastnosti vláken v podélném i příčném směru jsou totožné [5].

Vlastnosti skleněných vláken [5]:

- Modul pružnosti v tahu je podobný modulu pružnosti u hliníku a přibližně jedna třetina z hodnoty oceli. Pevnost v tahu je většinou výrazně vyšší než u oceli.
- Vlákna nemají viskoelastické chování jako syntetická vlákna. Deformace je téměř elastická a mez průtažnosti je kolem 3 %.
- Tepelná vodivost je vyšší než u ostatních materiálů, ale nižší než u kovů. Trvalé tepelné namáhání i při teplotě 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Bod měknutí E-skloviny je vyšší než 625 °C.
- Skleněná vlákna jsou nehořlavá.
- Součinitel teplotní délkové roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.

Přírodní vlákna

Pro vyztužování polymerů se z přírodních vláken používají pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří např. len, konopí, juta, sisal a bavlna. Výhodou rostlinných vláken je čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách a odolnost proti stárnutí. Pozoruhodné jsou i pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké hustotě jsou tato vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce.

Výhodou přírodních vláken je nízká hustota, malá abrazivita (obroušení) při mechanickém opracování a výhodná likvidace spalováním.

Vzhledem k tomu, že přírodní vlákna se získávají z rostlin a jejich částí, konkrétně ze stonku, listů, plodů i křtů semen, mají i nevýhody. Tyto nevýhody spočívají např. ve vlivu podmínek při jejich růstu na vlastnosti vláken, citlivost na působení vlhkosti. Další problémy mohou nastat při použití vysoké teploty při zpracování vláken (nad 200 °C), proto je omezená možnost volby matrice. Přírodní vlákna získaná z rostlin mají také omezenou délku vláken.

Nejrozšířenější druhy přírodních vláken jsou len a juta.

Len

Lněná vlákna se získávají ze stonku nejdéle používané textilní rostliny, lnu setého (*Linum usitatissimum*). Len je zdrojem mnoha cenných surovin, nejvýznamnější je lněné semeno. Sekundární materiál je právě lněné vlákno. Lněná vlákna se dají získat mnoha způsoby: máčením ve vodě, rosením, chemickou a fyzikální metodou. Nejčastěji se používá rosení a máčení. Rosení je na rozdíl od máčení ve vodě proces aerobní. Vlákna jsou tradičně využívána v textilním průmyslu, v poslední době se využívají v podlahových krytinách a automobilovém průmyslu [8].

Při sklizni se len vytrhává z půdy i s kořeny, klade se do řad a nechává oschnout. Suchý len se odsemeňuje a po odsemenění se rostlina rosí a máčí, při tomto procesu na dřevinu působí mikroorganismy, které rozruší rostlinné vazby mezi vlákny a dřevinou. Organismy rozkládají rostlinné „lepidlo“ pektin. Když už je rosení v pokročilém stádiu, je potřeba rostliny otočit. Otáčení napomáhá rovnoměrnému rosení a zabraňuje nežádoucímu růstu vegetace. Doba rosení je rozhodující pro kvalitu vlákna. Pokud proces rosení zastavíme brzy, bude vlákno hrubé a tuhé.

Juta

Juta je jedním z nejznámějších vláken rostlinného původu využívaných v textilním průmyslu. Jutová vlákna jsou dlouhá, měkká a lesklá. Skládají se převážně z celulózy, ligninu a pektinu. Jsou dva hlavní typy juty. První typ je capsularis a druhý olitorious. Capsularis je bílá, naopak olitorious je žlutavá až načervenalá. Olitorious je jemnější a silnější. Juta se používá pro výrobu pytlů, lan a pro základovou osnovu při tkaní koberců.

Jutovníky (*Corchorus*) jsou teplomilné rostliny, původem z Indie, vyžadující vlhké tropické klima. Jsou rozšířeny především v tropickém pásu Jižní a Jihovýchodní Asie. Jutovníky jsou

byliny s vláknitým stonkem vysokým 2 až 4 metry s tloušťkou až 15 mm. Ze stonků se po zpracování (namáčení, tření, sprádání) získává hrubé textilní vlákno, které není obzvláště pevné ani pružné, ale je levné.

1.3 Modely vláknových kompozitních materiálů

Jak již bylo uvedeno, kompozitní materiály dělíme na vláknové a částicové kompozity. Dále je dělíme na jednovrstvé a vícevrstvé, jednosměrné a dvousměrné. Jednosměrné vláknové kompozitní materiály (1D kompozity) jsou takové, které mají vlákna rovnoběžně uspořádána a následně prosycena pryskyřicí. Dvousměrné kompozity (2D kompozity) jsou takové, které mají vlákna uspořádána i v druhém směru. Tento typ kompozitu je tvořen např. tkaninou, která obsahuje vzájemně kolmá vlákna.

Kompozit je v principu anizotropní materiál, tj. jeho vlastnosti v různých směrech jsou různé. Obecně, ve fyzice, jsou elastické vlastnosti anizotropních (krystalických) materiálů popsány tenzorem čtvrtého řádu, který má 81 složek, z nichž maximálně 21 je nezávislých v případě nejnižší krystalové symetrie, trojklonná soustava. U nejvyšší symetrie, izotropního prostředí, jsou nezávislé jen dvě složky.

Mezi základní modely 1D kompozitů patří model průměrné tuhosti (iso-strain), průměrné poddajnosti (iso-stress) a směsový model. Model průměrné tuhosti předpokládá při zatížení u všech složek materiálu stejné přetvoření, ale různé napětí. Tento model vede na výpočet tenzoru tuhosti, který je funkcí tenzorů tuhosti a jejich objemových podílů. Tenzor tuhosti soustavy C_S lze napsat ve tvaru

$$C_S = \sum_{i=1}^n V_i \cdot C_i, \quad (1)$$

kde C_i je tenzor tuhosti i -té složky a V_i objemový podíl složky.

Naproti tomu model průměrné poddajnosti předpokládá při zatížení u všech složek materiálu stejné napětí, ale různé přetvoření. Tento model vede na výpočet tenzoru poddajnosti, který je inverzní k tenzoru tuhosti. Tenzor poddajnosti soustavy S_S lze napsat ve tvaru

$$S_S = \sum_{i=1}^n V_i \cdot S_i, \quad (2)$$

kde S_i je tenzor poddajnosti i -té složky a V_i objemový podíl složky. Oba předchozí modely kombinuje směsový model, který lze aplikovat přímo na laminát. Jehož předpokladem je stejné přetvoření v podélném směru a stejné napětí v příčném směru.

Tento obecný přístup lze aplikovat na konkrétní realizace kompozitů. Zde se omezíme na 1D a 2D kompozity.

1D kompozity

1D kompozity lze modelovat za zjednodušených předpokladů jako homogenní materiál. Prvním předpokladem je, že vlákna jsou geometricky i fyzikálně homogenní tzn., jsou nekonečná, rovnoběžná a pravidelně rozmístěná v průřezu kompozitu. Druhým předpokladem je dokonalá adhezní vazba mezi matricí a vlákny to znamená, že na mezifázovém rozhraní nedochází ke kluzu a poměrná deformace vláken a matricí kompozitu je stejná

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c, \quad (3)$$

kde ε_f je poměrná deformace vláken, ε_m je poměrná deformace matrice a ε_c je celková poměrná deformace kompozitu [10].

Napětí jednotlivých fází (vlákna, matrice) lze popsat Hookeovým zákonem, pokud jsou vlákna i matrice deformována elasticky. Hookeův zákon pro vlákna i matrici lze napsat

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f, \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m. \quad (4)$$

Napětí σ_f působí na průřezích vláken o celkové ploše S_f a napětí σ_m působí na průřezu matrice o celkové ploše S_m . Zatěžující síly působící na vlákna F_f a matrici F_m mají tvar

$$F_f = \sigma_f \cdot S_f, \quad F_m = \sigma_m \cdot S_m. \quad (5)$$

Výsledné zatížení F_c působící na kompozit je součtem síly působící na vlákna F_f a síly působící na matrici F_m

$$F_c = F_f + F_m. \quad (6)$$

Síla působící na celý kompozit F_c je dána celkovým napětím σ_c působícím na celkovou plochu S_c , platí

$$F_c = \sigma_c \cdot S_c = \sigma_f \cdot S_f + \sigma_m \cdot S_m. \quad (7)$$

Když vydělíme rovnicí (7) plochou S_c dostaneme vztah pro celkové napětí v kompozitu σ_c

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot (S_f/S_c) + \sigma_m \cdot (S_m/S_c). \quad (8)$$

Objemové podíly V_f a V_m pro kompozitní materiály s rovnoběžnými vlákny vyjádříme

$$V_f = S_f/S_c, \quad V_m = S_m/S_c. \quad (9)$$

Dosazením rovnice (9) do (8) získáme pro celkové napětí σ_c vztah

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m. \quad (10)$$

Když rovnici (10) zderivujeme podle deformace ε , dostaneme

$$d\sigma_c/d\varepsilon = d\sigma_f/d\varepsilon \cdot V_f + d\sigma_m/d\varepsilon \cdot V_m. \quad (11)$$

V rovnici (11) $d\sigma/d\varepsilon$ znamená směrnice tečny v diagramu napětí-deformace pro konkrétní deformaci. V případě, že závislost napětí na deformaci je lineární, lze směrnici tečny nahradit odpovídajícím modulem pružnosti E , pro který platí

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m. \quad (12)$$

Vztahy (10) a (12) vyjadřují přímou úměru objemových podílů k příspěvkům vláken a matrice. Takové vztahy nazýváme směšovací pravidlo. Vztahy (10) a (12) lze zobecnit na vztahy

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \sigma_i \quad \text{a} \quad E_c = \sum_{i=1}^n V_i \cdot E_i, \quad (13)$$

které jsou analogií vztahů (1) a (2).

1D kompozity, kterým se říká také laminy, mají tvar desky s tloušťkou mnohem menší než šířka nebo délka. Pak lze závislost mezi napětím a deformací převést na případ rovinné napjatosti. Uvažujme souřadný systém $O(L,T,T')$, kde L je osa ve směru vláken (longitudinální směr), T je osa ve směru kolmém k vláknům ležící v desce (transverzální směr) a T' je směr kolmý k desce. Materiál s těmito vlastnostmi nazýváme ortotropní materiál vzhledem k ose L . Pro tento případ je tenzor poddajnosti S roven

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

kde E_L je modul pružnosti v podélném směru vláken L , E_T je modul pružnosti v příčném směru T , ν_{LT} a ν_{TL} je Poissonova konstanta a G_{LT} je smykový modul. Tenzor tuhosti C je roven inverzní matici tenzoru poddajnosti. Pro vztah mezi napětím a deformací platí

$$\varepsilon = S \cdot \sigma. \quad (15)$$

Tato rovnice je tenzorová pro tři napětí a tři deformace a při aplikaci se musí rozepsat na jednotlivé členy. Jde o tři rovnice, každá obsahuje obecně tři členy. Některé členy jsou však nulové.

Při určení vztahu mezi napětím a deformací ortotropního materiálu je nutno znát 4 elastické konstanty uvedené v tenzoru S (14). V případě desky nyní můžeme studovat vliv namáhání ve směru vláken (L) a ve směru kolmém k nim (T).

Modul pružnosti ve směru vláken E_L

Uvažujme kompozit tvořený jedním typem vláken a matricí v souřadnicovém systému O(L,T,T'). Zatížíme tento kompozit silou F ve směru L a předpokládáme prodloužení v podélném směru Δl u vláken stejné jako u matrice. Upravíme-li vztah (10) a dosadíme ze vztahu (4) pro takový kompozit, dostaneme

$$\sigma_L = \sigma_{Lf} \cdot V_f + \sigma_{Lm} \cdot V_m = (V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m) \cdot \varepsilon_L \quad . \quad (16)$$

Aplikujeme-li výraz (16) na (4) a vyjádříme E_L , získáme modul pružnosti v podélném směru

$$E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} = V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m \quad . \quad (17)$$

Pro objemové zastoupení platí vztah $V_f + V_m = 1$

Pokud modul matrice E_m zanedbáme z důvodu vyššího modulu pružnosti ve vláknu $E_f \gg E_m$ dojde k následnému zjednodušení vztahu (17)

$$E_L = V_f \cdot E_f \quad , \quad (18)$$

Modul pružnosti ve směru kolmém na vlákna E_T

Nyní uvažujme zatížení silou F, ve směru T. V tomto směru předpokládáme, že napětí působící na vlákna je stejné jako napětí působící na matrici

$$\sigma_T = \sigma_{Tf} = \sigma_{Tm} \quad , \quad (19)$$

Dílicí příčná deformace pak je

$$\varepsilon_{Tf} = \frac{\sigma_T}{E_f} \quad , \quad \varepsilon_{Tm} = \frac{\sigma_T}{E_m} \quad . \quad (20)$$

Celková deformace v příčném směru je rovna

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{Tf} \cdot V_f + \varepsilon_{Tm} \cdot V_m = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right) \cdot \sigma_T \quad . \quad (21)$$

Vyjádřením $E_T = \sigma_T / \varepsilon_T$ z rovnice (21) a následnou úpravou získáme vztah

$$E_T = \frac{E_m}{V_m + V_f \frac{E_m}{E_f}} \quad . \quad (22)$$

Stejně jako u určení modulu pružnosti v podélném směru i zde platí, pokud je $E_f \gg E_m$, že lze vztah (22) zjednodušit

$$E_T = \frac{E_m}{V_m} \quad . \quad (23)$$

Poissonova konstanta ν_{LT}

Poissonova konstanta značí poměr deformace v podélném směru a směru příčném. Příčná deformace vlákna a matice jsou

$$\varepsilon_{Tf} = -\nu_f \cdot \varepsilon_L \quad , \quad \varepsilon_{Tm} = -\nu_m \cdot \varepsilon_L \quad , \quad (24)$$

kde ν_f a ν_m jsou Poissonovy konstanty vlákna a matice. Deformace kompozitu v příčném směru pak je

$$\varepsilon_T = V_f \cdot \varepsilon_{Tf} + V_m \cdot \varepsilon_{Tm} = -(V_f \cdot \nu_f + V_m \cdot \nu_m) \cdot \varepsilon_L \quad . \quad (25)$$

Z tohoto vztahu dostaneme pro Poissonovu konstantu výraz

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = V_f \cdot \nu_f + V_m \cdot \nu_m \quad . \quad (26)$$

Smykový modul pružnosti G_{LT}

Pro určení smykového modulu pružnosti zavedeme předpoklad konstantního smykového napětí celkového kompozitu, vláken a matice

$$\tau_{LT} = \tau_{LTf} = \tau_{LTm} \quad . \quad (27)$$

Z Hookeova zákona pro vlákna a matrici lze zkosy napsat

$$\gamma_{LTf} = \frac{\tau_{LTf}}{G_f} \quad , \quad \gamma_{LTm} = \frac{\tau_{LTm}}{G_m} \quad . \quad (28)$$

Celkový zkos má tvar

$$\gamma_{LT} = V_f \cdot \gamma_{LTf} + V_m \cdot \gamma_{LTm} \quad . \quad (29)$$

Po dosazení vztahu (28) do vztahu (29) získáme

$$\gamma_{LT} = \left[\frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \right] \cdot \tau_{LT} \quad . \quad (30)$$

Vydělením vztahu (30) získáme

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{\gamma_{LT}}{\tau_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad . \quad (31)$$

Výsledný smykový modul po úpravě rovnice (31), pokud platí $G_f \gg G_m$, má tvar

$$G_{LT} = \frac{G_m}{1 - V_f} \quad . \quad (32)$$

2D kompozity

2D kompozity mají výztuž tvořenou dvěma navzájem kolmými svazky vláken, může to být např. plošná textilie získaná tkaním. Podmínka kolmosti není nutná, v praxi se však používá. Postupem uvedeným pro 1D kompozit se dají odvodit analogické vztahy. Jsou však velmi složité, poněvadž zde vystupuje více volitelných parametrů. Proto se tímto případem dále nezabýváme. V práci se sice studuje 2D kompozit, avšak je uspořádán tak, aby vedl k izotropnímu prostředí. Navíc v prvním přiblížení lze při analýze výsledků použít vztahy pro 1D kompozit.

2 Experiment

V této části práce je popsána výroba zkušebních vzorků a tahová zkouška jutové tkaniny. Dále jsou uvedeny zkoušky potřebné pro určení materiálových parametrů a útlumu kompozitního materiálu. Na závěr každé zkoušky je uvedeno její vyhodnocení.

2.1 Výroba vzorků

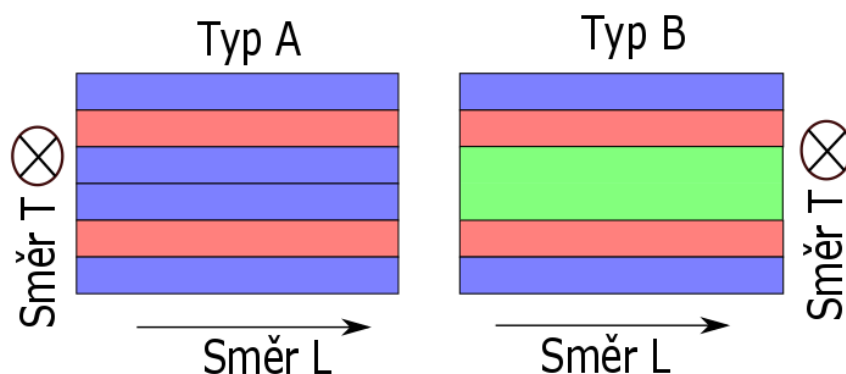
Pro experimenty byly vyrobeny 2 typy kompozitních desek, které byly dále zpracovány do podoby zkušebních vzorků. Všechny kompozitní desky byly složeny z jutové tkaniny jako výztuže a acrodurové pryskyřice Acrodur DS 3530, z níž byla vytvořena matrice. Byly studovány dva různé typy desek, pracovních označených jako A a B.

Typ desky A

Deska je složena z šesti vrstev jutové tkaniny. Tkanina byla v jednotlivých vrstvách různě natočena. Druhá a pátá vrstva byla vůči první, třetí, čtvrté a šesté natočena o 90° , nebo-li směr osnovy byl stejný jako směr útku vrstvy první. Na obrázku 2.1 vlevo je modrou barvou zobrazen směr osnovy tkaniny a červenou směr útku. Pro měření tahové a ohybové zkoušky byly vyrobeny desky o tloušťce 3,5 mm a 4,5 mm.

Typ desky B

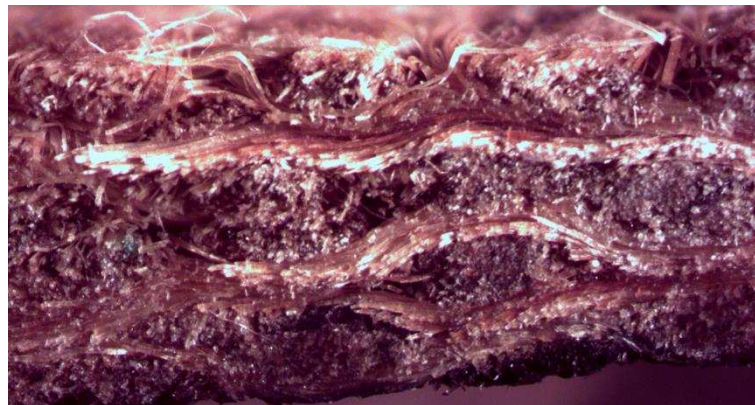
Deska je složena ze čtyř vrstev jutové tkaniny a jedné vrstvy korku. Tkanina byla v jednotlivých vrstvách různě natočena. Druhá a čtvrtá vrstva byla vůči první a páté natočena o 90° , nebo-li směr osnovy byl stejný jako směr útku vrstvy první. Uprostřed byla jedna vrstva korku. Na obrázku 2.1 vpravo je modrou barvou zobrazen směr osnovy tkaniny a červenou směr útku a zelenou barvou korek.



Obrázek 2.1: Znázornění rozložení vrstev v desce, vlevo – typ A, vpravo – typ B

Tkanina byla před výrobou desek vyprána z důvodu zbavení škrobu a lepšího sání materiálu. Acrodurová pryskyřice Acrodur DS 3530 od výrobce BASF byla vybrána na základě zlepšení mechanických vlastností přírodní výztuže, rychlému zesíťování, snadné manipulaci a čištění. Výrobce uvádí, že Acrodur DS 3530 obsahuje 50 % vody [4]. Výrobce uvádí tyto další vlastnosti: viskozita pryskyřice je 150-300 MPa·s, nízká rychlost molekul, vytvrzovací teplota je 130°C a vyšší. Mimo jiné je tato pryskyřice přizpůsobena dřevu a rostlinným vláknům jako je např. len, juta nebo sisal.

Při výrobě desek byly prepregy z jutové tkaniny složeny jako ortotropní materiál. Složení vrstev záviselo na typu kompozitní desky, který je popsán výše. Z důvodu vysoké koncentrace vody v pryskyřici byly připravené desky nechány několik dnů zavadnout v chladu. Následně byly zalisovány ve vyhřívaném lisu. Lisování probíhalo při teplotě 170 °C, přítlaku 13 kN po dobu 15 minut. Tímto způsobem bylo vyrobeno celkem 8 desek, 6 desek pouze s jutovou výztuží a 2 desky s jutovou a korkovou výztuží, o velikosti 26 x 26 cm. Tento způsob se neosvědčil, z důvodu stále vysoké koncentrace vody při lisování a následném vytékání velkého množství pryskyřice a značné pórovitosti zobrazené na obrázku 2.2. Proto výroba zbylých 4 desek byla upravena, 2 desky pouze s jutovou výztuží a 2 desky s jutovou a korkovou výztuží, o velikosti 24 x 17 cm. Jednotlivé prepregy byly nejprve nechány zavadnout na 24 hodin při běžné teplotě a poté byly složeny do desek se stejnou orientací, jako předchozí desky. Tyto desky byly použity pro měření útlumu a dynamického modulu.



Obrázek 2.2: Řez kompozitní deskou

Hmotnostní poměr je určen zvlášť pro typ desky A a typ desky B. Hmotnostní poměr jutové výztuže v kompozitní desce je roven

$$\omega_{fj} = \frac{m_{fj}}{m_k} . \quad (33)$$

Hmotnostní poměr korkové výztuže v kompozitní desce je

$$\omega_{fk} = \frac{m_{fk}}{m_k}, \quad (34)$$

kde m_{fk} značí hmotnost výztuže v kompozitní desce a m_k hmotnost celé kompozitní desky. Hmotnosti a hmotnostní poměry jednotlivých desek jsou uvedeny v tabulce 2.1. Hmotnosti a hmotnostní poměry desek pro měření útlumu jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tabulka 2.1: Hmotnostní poměry jednotlivých typů desek

	Hmotnost			Hmotnostní poměry	
	Hmotnost jutové výztuže m_{fj} [g]	Hmotnost korkové výztuže m_{fk} [g]	Hmotnost kompozitu m_k [g]	Hm. poměr jutové výztuže ω_{fj} [%]	Hm. poměr korkové výztuže ω_{fk} [%]
Deska A _{3,5mm}	100,61	-	130,13	77	-
Deska A _{4,5mm}	110,69	-	187,65	59	-
Deska B	73,39	26,7	118	62	23

Tabulka 2.2: Hmotnostní poměry desek vyrobených na měření útlumu

	Hmotnost			Hmotnostní poměry	
	Hmotnost jutové výztuže m_{fj} [g]	Hmotnost korkové výztuže m_{fk} [g]	Hmotnost kompozitu m_k [g]	Hm. poměr jutové výztuže ω_{fj} [%]	Hm. poměr korkové výztuže ω_{fk} [%]
Deska A	45,03	-	82,29	55	-
Deska B	29,92	10,88	61,21	49	18

Zkušební vzorky se tvarově lišily podle druhů zkoušek. Z desek byly zkušební vzorky buďto vyříznuty kotoučovou pilou a v případě složitých tvarů vypáleny laserem. Tvary zkušebních vzorků jsou popsány v rámci popisu zkoušky.

2.2 Tahová zkouška jutové tkaniny

Účelem tahové zkoušky je stanovení počátečního tangentského modulu pro vzorky jutové tkaniny ve směru osnovy a útku.

Stanovení počátečního tangentového modulu

U textilních materiálů se určuje počáteční tangentový modul E_p , protože u nich nelze určit Youngův modul (modul pružnosti v tahu). Youngův modul určujeme ze závislosti napětí na deformaci. Pro stanovení napětí je zapotřebí znát plochu průřezu a to u vlákna, příze nebo tkaniny nelze na rozdíl od kompozitních, kovových a dalších materiálů [3].

U textilních vláken se napětí a tedy i modul vztahuje k jemnosti vlákna T , což je specifická textilní veličina. Její jednotkou je tex, což je hmotnost vlákna délky 1 km / 1000 m. Pokud je známa hustota materiálu vlákna, lze spočítat efektivní průřez. U textilních vláken se zavádí počáteční tangentový modul E_p , který je určen z tahové křivky, ze závislosti relativní pevnosti (síly) f_r na poměrné deformaci (tažnosti) ε

$$E_p = \frac{f_r}{\varepsilon} . \quad (35)$$

Relativní pevnost ze vztahu (35) je dána silou F a jemností vlákna T , příze či nitě vztahem

$$f_r = \frac{F}{T} . \quad (36)$$

Výpočet deformace textilního materiálu ze vztahu (35) se provádí analogicky k výpočtu deformace kovových, kompozitních a jiných materiálů. Deformace je dána protažením Δl a počáteční délkou l_0 , v našem případě vzdálenost mezi dvěma vyznačenými body o kterých se zmíníme později

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} . \quad (37)$$

U plošných textilií je pevnost vyjadřována v absolutních hodnotách síly, proto výsledný tangentový modul je dán silou F a poměrnou deformací ε . Tangentový modul je dán první derivací tahové křivky pro tečnu v jeho počátku. Při lineární závislosti dostaneme vztah

$$E_p = \frac{F}{\varepsilon} . \quad (38)$$

Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním stroji Instron 5967, jehož součástí je video extenzometr. Video extenzometr zaznamenává skutečné prodloužení vzorku. Zkušební vzorky u tkanin se určují podle počtu nití. V našem případě šířka tkaniny měla 11 nití, délka tkaniny byla přibližně 250 mm. Pro měření ve směru osnovy i ve směru útku bylo použito 5 vzorků pro každý směr tkaniny.

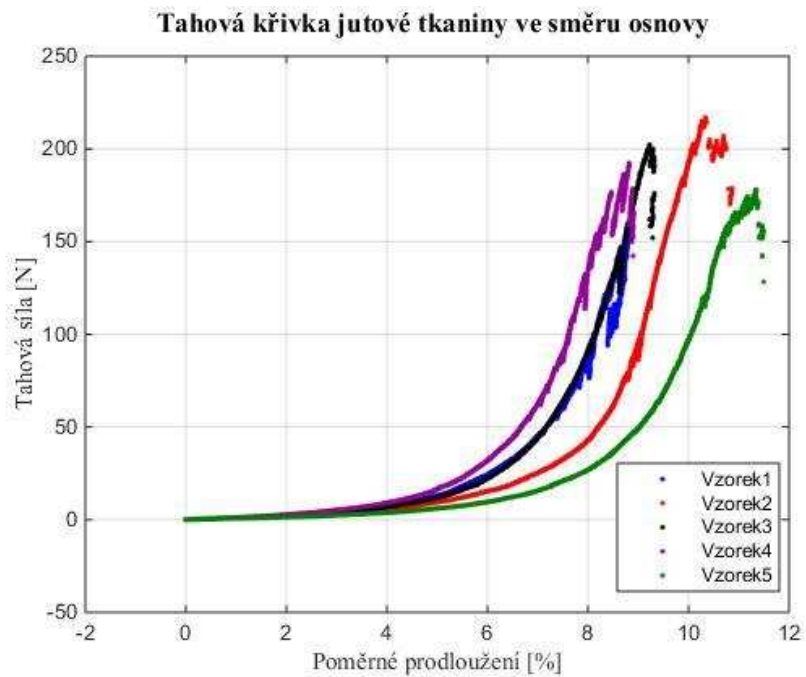
Měření tahové zkoušky probíhalo až do destrukce vzorku a je vidět na obrázku 2.3. Rychlost testování byla nastavena stejná jako pro tahovou zkoušku kompozitního materiálu, $v = 2$ mm/min. Vzhledem k použití video extenzometru během měření, bylo třeba vzorky označit 2 kontrastními body. Na vzorky byly použity označovací lepící body. Protože by se tkanina z běžných čelistí pro tahovou zkoušku pravděpodobně vysouvala, byly použité čelisti, které se během zatěžování neustále utahují. Čelisti jsou také zobrazeny na obrázku 2.3 .



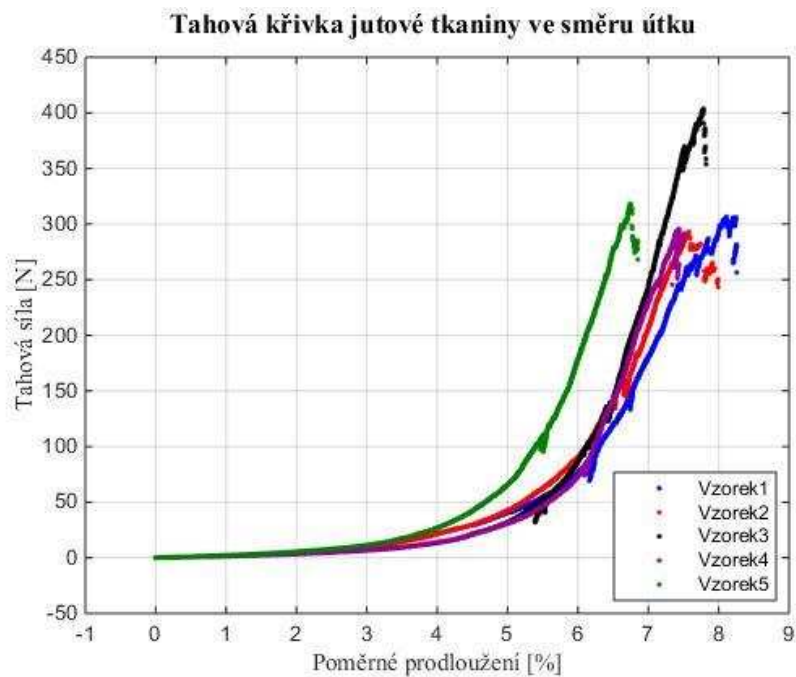
Obrázek 2.3: Tahová zkouška jutové tkaniny

Vyhodnocení tahové zkoušky

Na obrázku 2.4, je zobrazena tahová křivka zkušebních vzorků ve směru osnovy a na obrázku 2.5 zkušebních vzorků ve směru útku. Jak je na obrázcích vidět, ve vzorcích ve směru osnovy při stejné deformaci působí až pětkrát menší síla, než ve vzorcích ve směru útku. Celkové protažení v jednotlivých směrech se zas tolik neliší, přesto vzorky ve směru osnovy byly na konci zkoušky protaženy až o 20 % více než ve směru útku. Dále jsou na obrázcích patrná místa, kde docházelo k porušení nití a v daném místě k poklesu síly. I přesto tato porušení, zkouška probíhala dále - až do celkové destrukce vzorků.



Obrázek 2.4: Tahová křivka jutové tkaniny ve směru osnovy



Obrázek 2.5: Tahová křivka jutové tkaniny ve směru útku

Při vyhodnocování tahových křivek se vycházelo ze vztahu počátečního tangentového modulu (30). Zjištěné moduly pružnosti jsou uvedeny v tabulce 2.3. Výsledky neodpovídají počátečním

předpokladům, které byly opačné. Počáteční předpoklad byl, že jutová tkanina ve směru osnovy bude mít lepší mechanické vlastnosti než ve směru útku.

Tabulka 2.3: Počáteční tangentový modul

Počáteční tangentový modul E_p [N]	
Směr osnovy	Směr útku
106,39	180,67

2.3 Tahová zkouška kompozitu

Účelem tahové zkoušky je stanovení modulů pružnosti v tahu pro vzorky kompozitních materiálů ve směru L a T.

Stanovení modulu pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu E určíme na základě Hookeova zákona, který lze formulovat tak, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (39)$$

kde σ je napětí v tahu a ε je poměrná deformace. Napětí i deformaci získáme z dat tahové zkoušky. Data obsahují záznam síly a protažení vzorku. Napětí je definováno jako

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (40)$$

F je síla a S průřez tělesa kolmý na působící sílu. Průřez je určen pomocí tloušťky h a šířky b

$$S = b \cdot h. \quad (41)$$

Poměrná deformace ze vztahu (43) se určí z protažení Δl a počáteční délky l_0

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (42)$$

Statistické vyhodnocení zkoušky

Statistické vyhodnocení bylo provedeno pro všechna experimentální měření tj. tahové zkoušky, ohybové zkoušky a další. Byly provedeny základní statistické výpočty. Mezi námi určované

statistické veličiny patří střední hodnota a směrodatná odchylka s . Tyto veličiny jsou definovány podle [9]

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (43)$$

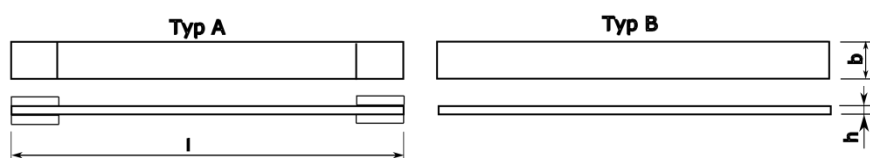
a

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (44)$$

kde \bar{x} je střední hodnota, x_i jsou jednotlivá pozorování (měření) a n je jejich počet. Výsledky statistického vyhodnocení jsou u jednotlivých typů zkoušek.

Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním stroji Instron 5967, jehož součástí je video extenzometr. Video extenzometr zaznamenává prodloužení vzorku mezi dvěma vyznačenými body. Zkouška, včetně tvaru zkušebních vzorků, probíhala podle normy [1]. Norma udává, že vzorek může být 2 různých tvarů, který je zobrazen na obrázku 2.6. Vzhledem k použitým čelistem pro provedení zkoušky byl vybrán typ A, který je vidět na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Tvary zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku

Rozměry vzorků se lišily podle měřeného materiálu, hodnoty jsou uvedené v tabulce 2.4. Pro měření ve směru L i ve směru T bylo použito 5 vzorků pro každý typ materiálu. Tento počet je minimální počet pro měření dle normy [1].

Tabulka 2.4: Rozměry vzorků pro tahovou zkoušku

	Šířka b (mm)	Délka l (mm)	Tloušťka h (mm)
Deska $A_{3,5\text{mm}}$	19,5	228	3,5
Deska $A_{4,5\text{mm}}$	19,5	228	4,5
Deska B	19,5	220	5

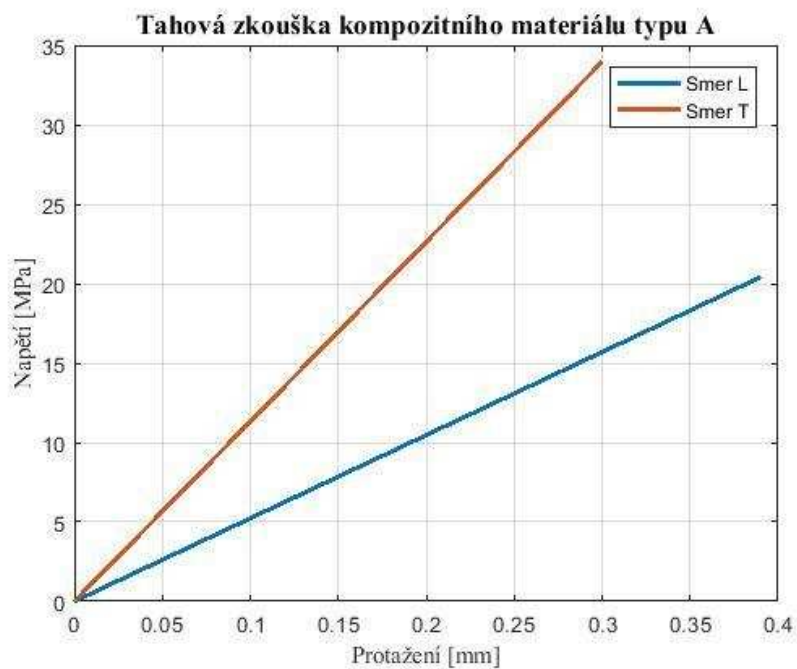
Měření tahové zkoušky probíhalo dle normy až do destrukce vzorku, viz obrázek 2.7. Rychlost testování byla určena dle norem $v = 2 \text{ mm/min}$. Vzhledem k použití video extenzometru během měření, bylo třeba vzorky označit 2 kontrastními body. Vzorky, které byly testované ve směru L, byly začerněny, aby bílé body byly dostatečně kontrastní. Na vzorky, které byly testované ve směru T, byly využity označovací lepicí body. V obou případech byly body od sebe vzdáleny 50 mm.



Obrázek 2.7: Tahová zkouška

Vyhodnocení tahové zkoušky kompozitního materiálu

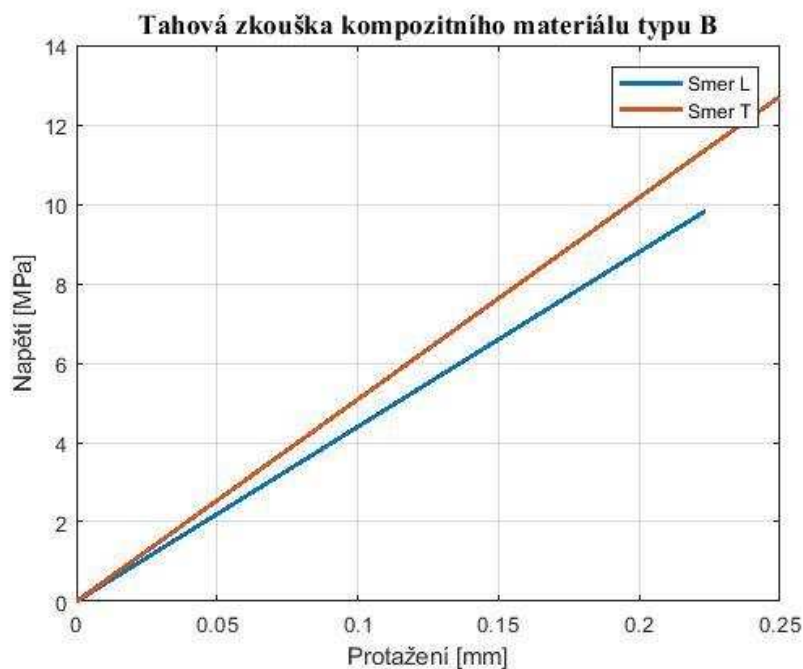
Na tahovém diagramu, na obrázku 2.8, je zobrazena tahová křivka zkušebních vzorků typu A v hlavním směru L a zkušebních vzorků v hlavním směru T. Jak je na obrázku 2.8 vidět, ve vzorcích ve směru L při stejné deformaci působí asi poloviční napětí, než ve vzorcích ve směru T.



Obrázek 2.8: Tahový diagram kompozitní desky typu A

Původní předpoklad byl opačný, protože v hlavním směru kompozitní desky L jsou celkem 4 vrstvy jutové tkaniny natočené ve směru osnovy. Po bližším zkoumání samotné jutové tkaniny, jak již bylo dříve zmíněno, bylo zjištěno, že vlákna ve směru osnovy jsou tenčí než ve směru útku, tudíž přenesou i menší síly.

Na tahovém diagramu, na obrázku 2.9, je zobrazena tahová křivka zkušebních vzorků typu B v hlavním směru L a zkušebních vzorků v hlavním směru T. Jak je na obrázku 2.9 vidět, ve vzorcích ve směru L při stejné deformaci působí téměř stejné napětí, než ve vzorcích ve směru T.



Obrázek 2.9: Tahový diagram kompozitní desky typu B

Při vyhodnocování tahových křivek se vycházelo z Hookeova zákona, např. vztah (41), (42), a (44). Zjištěné moduly pružnosti, které jsou uvedeny v tabulce 2.5, odpovídají předpokladu.

Tabulka 2.5: Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Tah		
	Deska A _{3,5mm}	Deska A _{4,5mm}	Deska B
Směr L	3,5 ± 0,9	2,6 ± 0,4	2,2 ± 0,2
Směr T	6,4 ± 0,9	5,7 ± 0,7	2,59 ± 0,16

2.4 Ohybová zkouška kompozitu

Účelem ohybové zkoušky je stanovení modulu pružnosti v ohybu pro vzorky kompozitních materiálů. Tato zkouška byla provedena k nezávislému ověření modulu pružnosti z tahové zkoušky.

Stanovení modulu pružnosti v ohybu

Modul pružnosti v ohybu E určíme z třibodového ohybu na základě síly F, průhybu w (obojí z dat ohybové zkoušky), vzdálenosti podpěr x a plošného momentu setrvačnosti průřezu I

$$I = \frac{1}{12} b \cdot h^3 \quad (45)$$

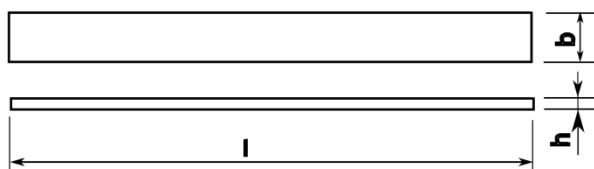
$$E = \frac{F \cdot x^3}{48 \cdot w \cdot I} \quad (46)$$

Ohybová zkouška

Třibodová ohybová zkouška byla provedena na zkušebním stroji TIRA test 2810, který je vidět na obrázku 2.11. Zkouška, včetně tvaru zkušebních vzorků, probíhala podle normy[2]. Norma také udává tvar vzorků, který je zobrazen na obrázku 2.11.



Obrázek 2.10: Ohybová zkouška



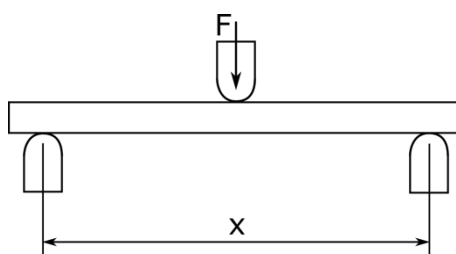
Obrázek 2.11: Tvar zkušebního vzorku pro ohybovou zkoušku

Podobně jako u tahové zkoušky se rozměry vzorků lišily podle měřeného materiálu. Rozměry jsou uvedené v tabulce 2.6. Pro měření ve směru L i ve směru T bylo použito 5 vzorků pro každý typ materiálu. Tento počet je minimální počet pro měření dle normy.

Tabulka 2.6: Rozměry vzorků pro ohybovou zkoušku

	Šířka b (mm)	Délka l (mm)	Tloušťka h (mm)
Deska A _{3,5mm}	19,6	224	3,5
Deska A _{4,5mm}	19,5	226	4,5
Deska B	19,6	224	5

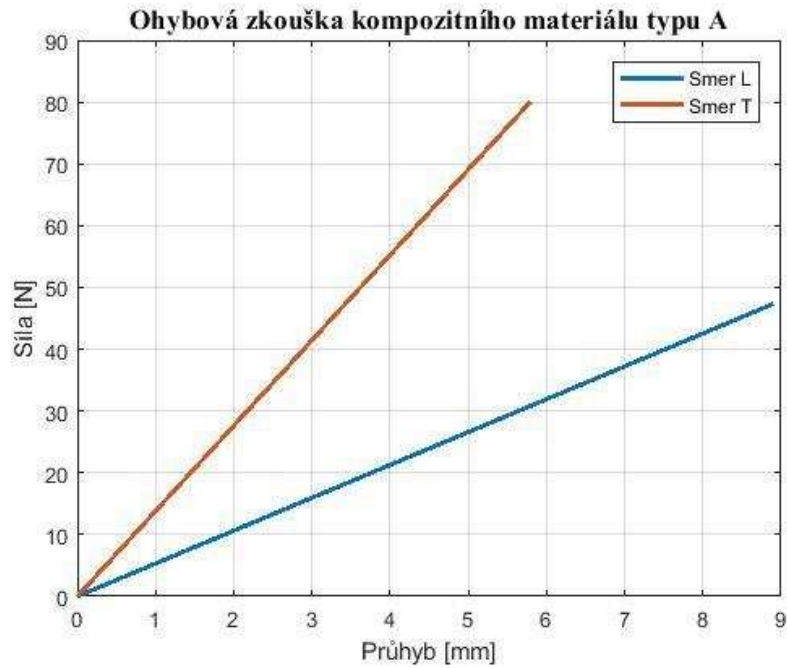
Měření ohybové zkoušky probíhalo až do destrukce vzorku. Rychlost zatěžování byla určena dle norem $v = 1 \text{ mm/min}$. Podpěry i zatěžující dotyk pro ohybovou zkoušku byly ve tvaru válce, stejně vypadala i zatěžující část. Vzdálenost podpěr x , která je vidět na obrázku 2.12, se určí přepočtem tloušťky vzorku podle poměru, který určují normy. Pro přepočítání byl použitý standardní poměr 32 : 1 a poměr 40 : 1. Poměry byly zvoleny tak, aby vzdálenost x byla přibližně 150 mm.



Obrázek 2.12: Rozmístění podpěr a zatěžujícího válečku pro ohybovou zkoušku

Vyhodnocení ohybové zkoušky kompozitního materiálu

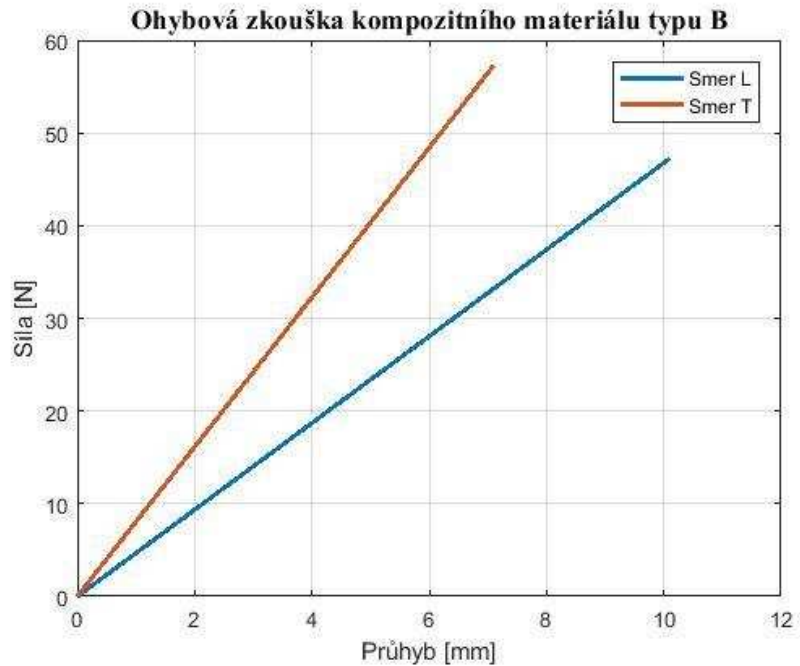
Na diagramu z ohybové zkoušky je zobrazena závislost síly zatížení na průhybu zkušebních vzorků typu A. Na obrázku 2.13 je zobrazena křivka zkušebních vzorků v hlavním směru L a zkušebních vzorků v hlavním směru T. Jak je na obrázku 2.13 vidět, ve vzorcích ve směru L při porušení vzorku je průhyb téměř dvojnásobný, než ve vzorkách ve směru T. A podobně jako u tahové zkoušky i zde je patrné, že při stejném průhybu působí na vzorky ve směru L působí třetinové zatížení než na vzorky ve směru T.



Obrázek 2.13: Ohybová zkouška kompozitní desky typu A

Původní předpoklad byl opačný, protože v hlavním směru kompozitní desky L jsou celkem 4 vrstvy jutové tkaniny natočené ve směru osnovy. Po bližším zkoumání samotné jutové tkaniny, jak již bylo dříve zmíněno, jsme přišli na to, že vlákna ve směru osnovy jsou tenčí než ve směru útku, tudíž přenesou i menší napětí.

Na diagramu z ohybové zkoušky je zobrazena závislost síly zatížení na průhybu zkušebních vzorků typu B. Na obrázku 2.14 je zobrazena křivka zkušebních vzorků v hlavním směru L a zkušebních vzorků v hlavním směru T. Jak je na obrázku 2.14 vidět, při stejném průhybu u vzorků ve směru L působí téměř dvojnásobné zatížení než na vzorkách ve směru T.



Obrázek 2.14: Ohybová zkouška kompozitní desky typu B

Přestože v této kompozitní desce typu B byl stejný počet vrstev jutové tkaniny natočené ve směru osnovy i útku, stejně jako v desce typu A byl původní předpoklad opačný. Vysvětlení této odchylky bylo již vysvětleno u vzorku typu A výše.

Při vyhodnocování ohybových křivek s cílem určení modulu pružnosti jsme vycházeli ze vztahů (45) a (46) ze začátku této kapitoly. Zjištěné moduly pružnosti jsou uvedeny v tabulce 2.7, odpovídají předpokladu.

Tabulka 2.7: Modul pružnosti v ohybu

Modul pružnosti v ohybu E [GPa]	Ohyb			
		Deska A _{3,5mm}	Deska A _{4,5mm}	Deska B
	Směr L	2,7 ± 0,5	2,2 ± 0,6	1,82 ± 0,17
Směr T	6,5 ± 0,5	5,5 ± 0,3	2,2 ± 0,3	

2.5 Smyková zkouška kompozitu

Účelem smykové zkoušky je stanovení smykového modulu pružnosti pro vzorky kompozitních materiálů.

Stanovení smykového modulu pružnosti

Hookeův zákon lze použít i pro určení smykového modulu pružnosti G

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (47)$$

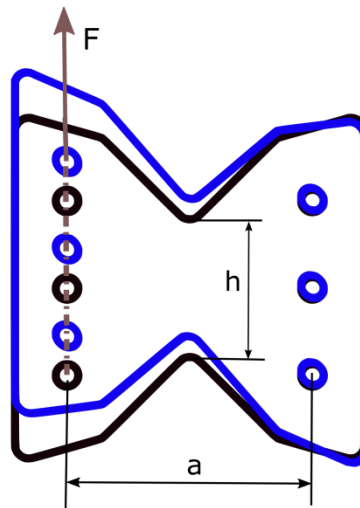
kde τ znamená smykové napětí a γ zkos. Stejně jako u modulu pružnosti v tahu, je nutné smykové napětí a skos určit z dat smykové zkoušky, a to ze síly a příčného protažení. Protože smykové napětí je analogické k tahovému napětí, pouze působí v tečném směru k ploše a nikoliv v kolmém, hodnoty určíme pomocí síly F a plochy S . Plocha $S = b \cdot h$, kde b je rovno šířce průřezu (v tomto případě tloušťce Arcanova vzorku) a h výšce. Pak platí

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (48)$$

Zkos γ je smykový úhel. Fyzikálně je definován jako úhel, o který se zmenší původně pravý úhel při aplikaci tečného napětí. U smykové zkoušky, pro tento úhel platí vztah

$$\tan \gamma = \frac{\Delta l}{a} \doteq \gamma, \quad (49)$$

v němž a je vzdálenost mezi místy upnutí do zkušebního stroje, viz obrázek 2.15. Tato vzdálenost je kolmice na směr zatížení. Protažení Δl je vzdálenost mezi upnutými místy ve zkušebním stroji ve směru zatížení. Protažení je způsobené vzájemným posuvem míst upnutí.

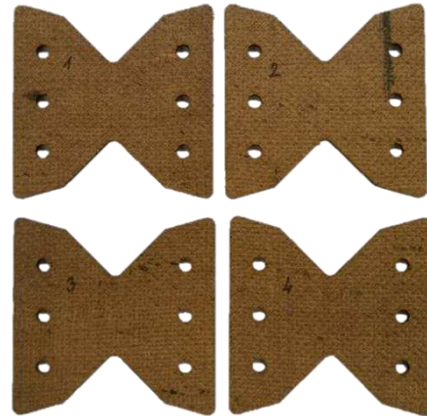
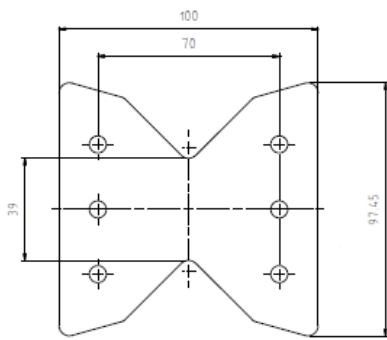


Obrázek 2.15: Deformace Arcanova vzorku

Smyková zkouška

Smyková zkouška byla provedena na zkušebním stroji Instron5967, jehož součástí je video extenzometr. Video extenzometr zaznamenává změnu vzdálenosti mezi dvěma vyznačenými

mi body. Pro smykovou zkoušku jsou vzorky upraveny do podoby Arcanova vzorku. Arcanův vzorek je ve tvaru „motýlka“ viz obrázek 2.16, na kterém jsou znázorněny i jeho rozměry. Tvar Arcanova vzorku a jeho rozměry jsou dány přípravkem použitým v Instronu, který je vidět na obrázku 2.17. Přípravek se skládá ze 4 půlkulatých částí, ve kterých je vzorek upevněn šrouby. Arcanův vzorek obsahuje 6 otvorů na šrouby, které jsou znázorněny na obrázku 2.15, z kterého lze vypočítat, jak byl vzorek namáhaný. Na obrázku 2.17 je patrné uložení vzorku v přípravku.



Obrázek 2.16: Rozměry vzorku pro smykovou zkoušku jsou vlevo. Vpravo zkušební vzorky

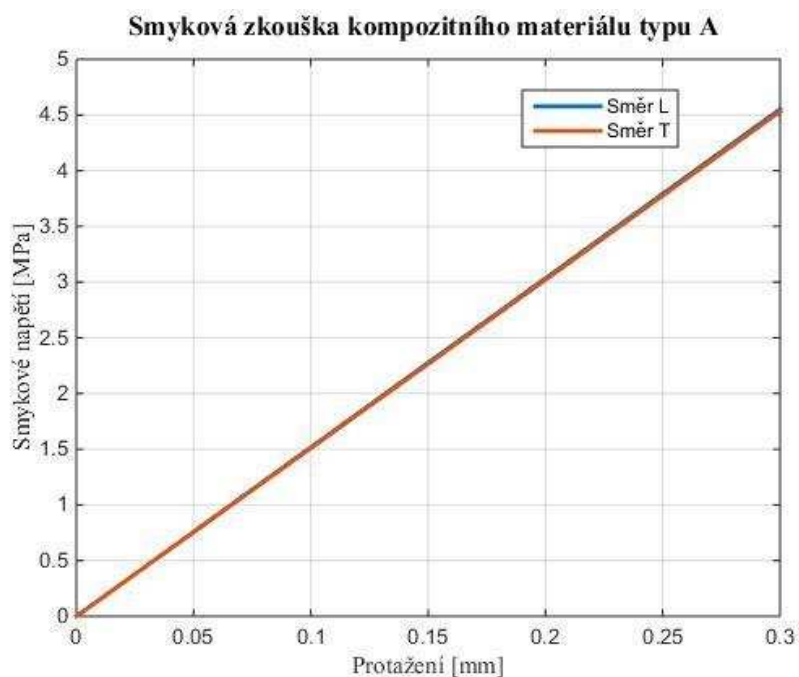
Pro měření ve směru osy i ve směru útku byly použity 4 vzorky pro typ desky B. Pro jeden vzorek byla provedena 4 měření. První měření bylo pootočení vzorku o 0° , pro každé další měření byl vzorek pootočen o 15° . Měření smykové zkoušky proto neprobíhalo do destrukce. Rychlost testování byla určena $v = 0,5 \text{ mm/min}$. Pro určení modulu pružnosti ve smyku byly použity pouze měření, kde byl vzorek pootočen o 0° . Při ostatních úhlech pootočení vzniká ve vzorku víceosá napjatost. Podobně jako u tahové zkoušky byl použit video extenzometr, který snímá skutečné protažení vzorku. V tomto případě se jedná o vzdálenost mezi upnutými místy ve zkušební stroji ve směru zatížení. Jak je vidět na obrázku 2.17 přípravek je rozdělen na 2 poloviny. Na každé polovině je jeden bod v ose zatěžování označený nálepkou. Tyto body jsou potřebné kontrastní body pro správné zaznamenání protažení video extenzometrem.



Obrázek 2.17: Smyková zkouška

Vyhodnocení smykové zkoušky kompozitního materiálu

Na diagramu ze smykové zkoušky, je zobrazena závislost smykového napětí na protažení zkušebních vzorků typu A. Místo zkosu je uvedeno skutečné protažení, které snímal video extenzometr a lze na zkoušku snadno převést podle vztahu (49). Na obrázku 2.18 je zobrazena křivka zkušebních vzorků v hlavním směru L a zkušebních vzorků v hlavním směru T. Smyková křivka kompozitního materiálu zpracovaného ve směru L se téměř neliší od křivky vzorků zpracovaných ve směru T, proto se na obrázku 2.18 překrývají.



Obrázek 2.18: Smyková zkouška kompozitní desky typu A

Experimentální měření splnilo původní předpoklad. Měření také potvrdilo, že při určení modulu pružnosti ve smyku nezáleží na tom, v jakém směru jsou vzorky zpracovány, což je patrné i z určených smykových modulů. Při určování smykových modulů se vycházelo z Hookeova zákona (47) a vztahů (48) a (49). Zjištěné smykové moduly pružnosti jsou uvedeny v tabulce 2.8 a odpovídají předpokladu o směrové nezávislosti.

Tabulka 2.8: Smykový modul v pružnosti

Smykový modul pružnosti G [Gpa]	Smyk	
		Deska A _{4,5mm}
	Směr L	1,07 ± 0,11
	Směr T	1,07 ± 0,2

2.6 Cyklické zatěžování

Ve statických měřeních, dosud uvedených, se napětí měnilo velmi pomalu. V praxi se ovšem může měnit velmi rychle. Pak mluvíme o dynamickém zatěžování, které může vést k poněkud jiným hodnotám modulů, a u reálných materiálů vznikají tlumící efekty. Nejjednodušším případem je cyklické zatěžování, a to harmonickým napětím.

Cyklické zatěžování

Cyklické zatěžování v tříbodovém ohybu bylo provedeno na zkušebním stroji Instron E3000, viz obrázek 2.19. Účelem experimentů je stanovení dynamických modulů v ohybu. Z něho lze určit tzv. tangenty δ veličiny, která je mírou vnitřního tření materiálu. Tvar zkušebních vzorků byl stejný jako pro ohybovou zkoušku, viz obrázek 2.11. Rozměry vzorků se lišily podle měřeného materiálu. Tyto rozměry jsou uvedené v tabulce 2.9. Pro měření ve směru osnovy i ve směru útku bylo použito 5 vzorků pro různé typy materiálu.

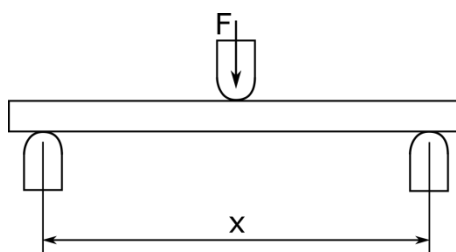


Obrázek 2.19: Cyklické zatěžování, pro určení velikosti útlumu

Tabulka 2.9: Rozměry vzorků pro cyklické zatěžování

	Šířka b (mm)	Délka l (mm)	Tloušťka h (mm)
Deska A	19,5	220	4,5
Deska B	19,5	220	5

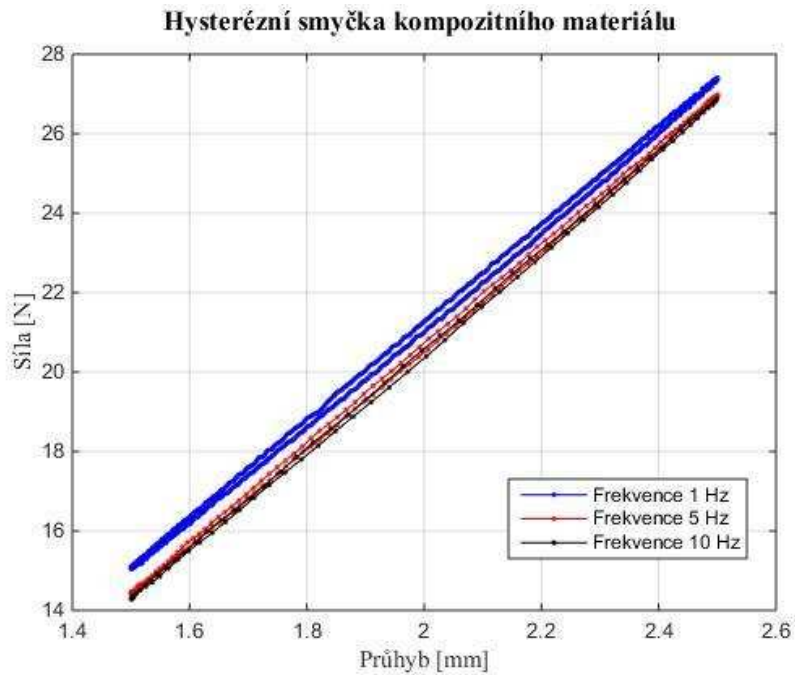
Na začátku zkoušky byl vzorek zatížen do průhybu 2 mm. Následně bylo započato cyklické zatěžování se sinusovým průběhem a s amplitudou 0,5 mm. Frekvence cyklického zatěžování byla postupně zvyšována po 1 Hz, od 1 Hz až do 10 Hz. Vzdálenost podpěr x pro dynamické zatěžování byla nastavena na 140 mm, je zobrazena na obrázku 2.20.



Obrázek 2.20: Rozmístění podpěr a zatěžujícího válce pro cyklickou ohybovou zkoušku

Vyhodnocení cyklického zatěžování kompozitního materiálu

Velikost dynamického modulu byla určena z cyklické zkoušky kompozitního materiálu typu A a B. Dynamický modul byl stanoven v programu Matlab. Z naměřeného signálu byla provedena Fourierova transformace, v jejímž výsledku jsme našli amplitudy nejvyšších spektrálních čar. Z těchto amplitud odpovídajících výchylce a síle jsme určili dynamické moduly pro každou budící frekvenci. Zdrojový kód výpočtu je v příloze. Na obrázku 2.21 je zobrazen jeden cyklus cyklické zkoušky pro frekvenci 1 Hz, 5 Hz a 10 Hz. Z obrázku je patrné, že materiál se chová lineárně a velikost hystereze není závislá frekvenci.



Obrázek 2.21: Hysterézní smyčka kompozitního materiálu

Jak již bylo řečeno, byl určen také dynamický modul materiálu. V tabulce 2.10 jsou uvedeny jednotlivé moduly pro kompozitní materiál typu A a B a ve směru L a T. Hodnoty se liší od již určeného statického modulu pružnosti v tahu. Tento rozdíl přisuzují jinému postupu při výrobě kompozitních desek.

Tabulka 2.10: Dynamický modul

Dynamický modul E_D [GPa]			
Deska A		Deska B	
Směr L	4,44	Směr L	3,42
Směr T	6,1	Směr T	4,16

2.7 Měření útlumu z kmitání vetknutého nosníku

Dynamické měření v předchozí části předpokládalo vynucené kmity. Jejich amplituda je konstantní. Poněvadž se v důsledku vnitřního tření část energie kmitů mění neustále v teplo, musí ji dodávat vnější generátor. Pokud jej vypneme, amplituda začne klesat. Dostáváme tlumené kmity. Prakticky se však tlumené kmity budí krátkým počátečním impulsem. Jsou plně popsány frekvencí a útlumem.

Stanovení útlumu

Pro určení vlastní frekvence a koeficientu tlumení kmitání vetknutého nosníku byly použity dva způsoby. Oba způsoby využívají naměřeného signálu. Tento signál byl naměřen pomocí akcelerometru, který byl připevněn na zkušebních vzorcích. U každého vzorku bylo naměřeno deset průběhů kmitání. První způsob určení vlastní frekvence a koeficientu tlumení je proložení signálu tlumenou sinusovou křivkou. Z naměřeného signálu byla nejprve vybrána oblast jednoho tlumeného kmitání vzorku. Touto oblastí byla proložena křivka, jejíž funkce je podobnou funkcí naměřeného signálu.

$$y = A \cdot e^{-Bt} \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) , \quad (50)$$

kde y značí amplitudu zrychlení, t znamená čas. Koeficient A je počáteční amplituda zrychlení, B je koeficient tlumení zkušebního vzorku, f úhlová frekvence a φ je fáze. Amplituda signálu, který lze získat z akcelerometru je rovna amplitudě zrychlení křivky. Výpočet byl naprogramován v programu Matlab 2017. Aproximace naměřeného signálu byla provedena funkcí `fminsearch`.

Druhý způsob určení vlastní frekvence bylo provedení Fourierovy transformace signálu pro každý naměřený průběh kmitání. K určení koeficientu tlumení δ bylo využito logaritmického dekrementu útlumu δ , pro který platí následující vztah (51), kde veličiny A_1 a A_2 vyjadřují velikost maxim dvou po sobě jdoucích amplitud se stejnou fází. Tyto maxima jsou znázorněna na obrázku 2.26.

$$\delta = \log \frac{A_1}{A_2} \quad (51)$$

Z logaritmického dekrementu útlumu, lze určit koeficient tlumení b , pro který platí další vztah (52), kde veličina T je perioda kmitání.

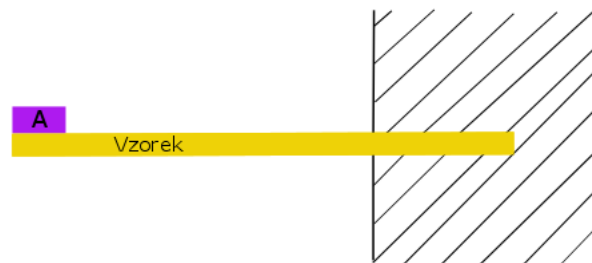
$$b = \frac{\delta}{T} \quad (52)$$

Zdrojové kódy obou způsobů určení vlastní frekvence a koeficientu tlumení jsou v příloze.

Měření útlumu

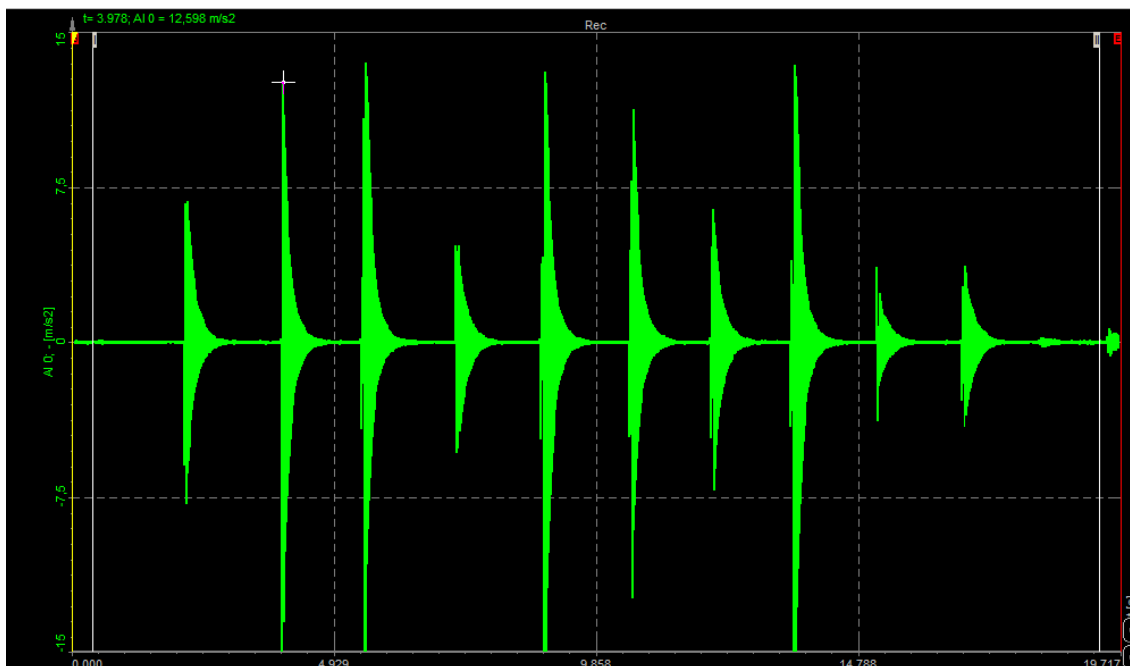
Měření bylo provedeno na zkušebních vzorcích, které jsou identické se vzorky z předchozího měření. Stejně jako pro cyklické zatěžování byl testovaný kompozitní materiál typu A zpracovaného ve směru L a T a kompozitní materiál typu B, také zpracovaný ve směru L a T. Pro

všechny typy materiálu bylo použito 5 vzorků, celkem jich bylo 20. Vzorky byly upevněny svěrkou k desce stolu, tak aby přesahovaly o délku 100 mm, tímto způsobem byl vytvořen vetknutý nosník. Nosník byl připevněn tak, že ležel na desce stolu svojí širší stranou. Principiální schéma upevnění je vidět na obrázku 2.22.



Obrázek 2.22: Měření kmitání nosníku

Jak je na obrázku vidět na volném konci nosníku je upevněn akcelerometr, kterým bylo změřeno zrychlení koncového bodu nosníku. Koncový bod nosníku byl buzený impulzem síly vyvolaným klepnutím kladívkem. Časový průběh signálu z akcelerometru byl zobrazen v programu DEWESoft X1 SP6, tato data byla exportována pro další zpracování do programu Matlab 2017. Časový průběh signálu je zobrazen na obrázku 2.23. Osa x na záznamu značí čas zaznamenání signálu v [s] a osa y značí amplitudu zrychlení v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. Nестejné výšky absolutních maxim ukazují na to, že počáteční podmínky nejsou přesně reprodukovány. Na výsledek měření a jeho zpracování to však nemá vliv.



Obrázek 2.23: Časový průběh signálu

Vyhodnocení kmitání kompozitního materiálu

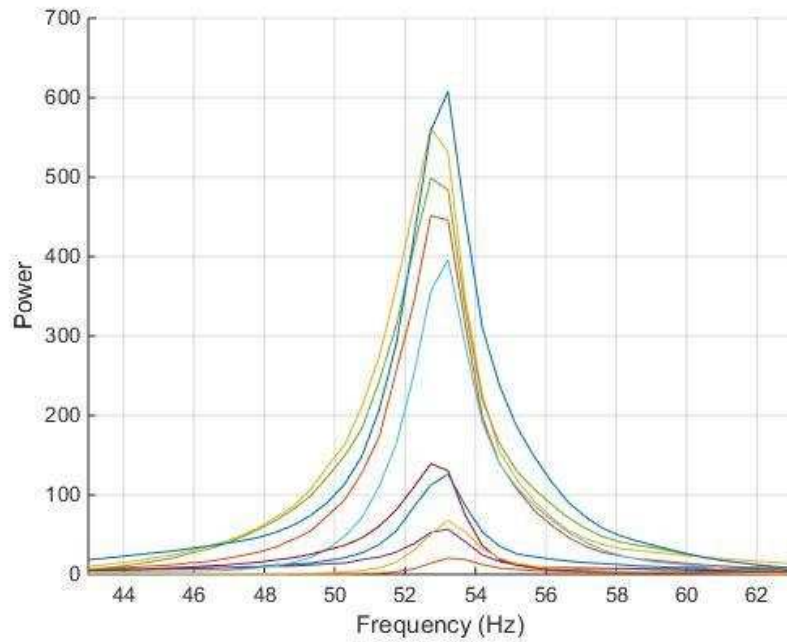
Během tohoto měření bylo zaznamenáno zrychlení kmitání v závislosti na čase. Vyhodnocení dat z měření bylo provedeno oběma způsoby uvedenými v úvodu této kapitoly. První způsob byla aproximace naměřeného signálu funkcí tlumené sinusovky, pro kterou platí vztah (50). Vlastní kruhová frekvence je rovna koeficientu f také ze vztahu (50). Druhý způsob je založený na Fourierově transformaci. Jejím využitím byla zjištěna první vlastní frekvence, která je zobrazena na obrázku 2.24, kde jednotlivé křivky jsou pro jednotlivé impulsy. Výsledky obou způsobů vyhodnocení jsou zobrazeny v tabulce 2.11 a tabulce 2.12. Z těchto tabulek je patrné, že kompozitní materiál typu A ve směru L má nižší vlastní frekvenci přibližně o 7 % než ve směru T. Kompozitní materiál typu B má nižší vlastní frekvenci ve směru L o 12 % než ve směru T.

Tabulka 2.11: Vlastní frekvence vzorků z desky typu A

Deska A	
Směr L	54,1 Hz
Směr T	58,4 Hz

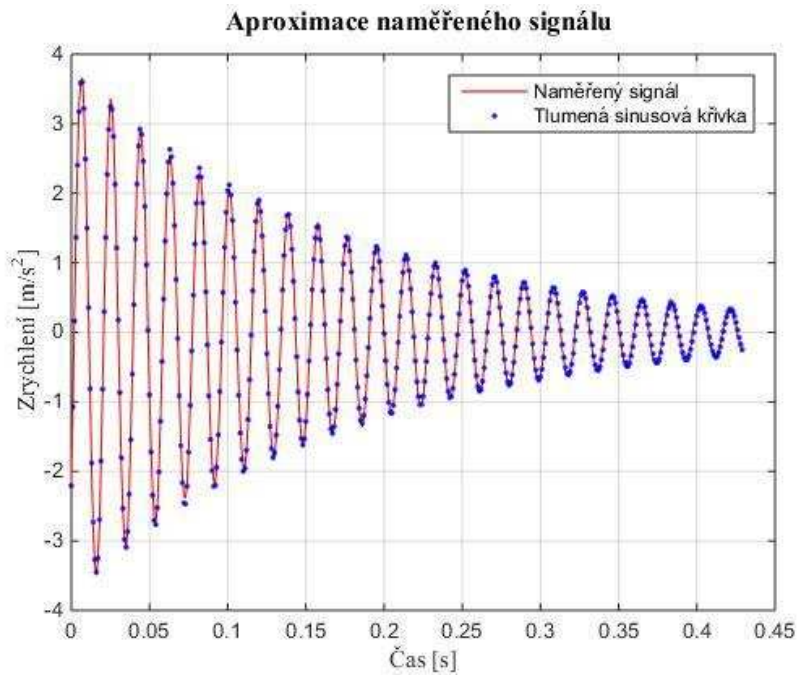
Tabulka 2.12: Vlastní frekvence vzorků z desky typu B

Deska B	
Směr L	54,3 Hz
Směr T	61,5 Hz



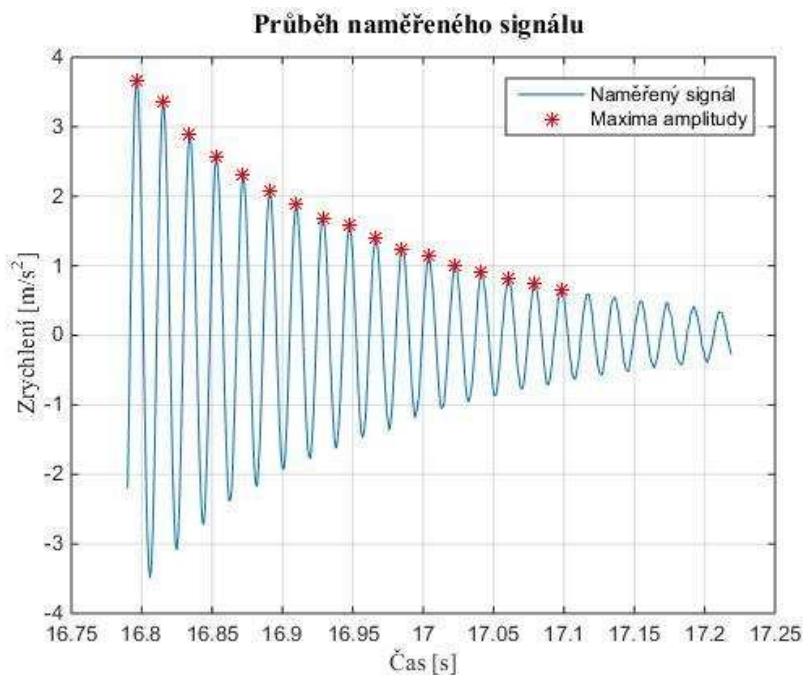
Obrázek 2.24: Vlastní frekvence vetknutého nosníku

Obdobně byl stanoven koeficient tlumení. První způsob stanovení byla aproximace signálu, kde koeficient tlumení je roven koeficientu b ze vztahu (50). Průběh aproximace je znázorněn na obrázku 2.25. Jak je vidět křivka věrohodně aproximuje celý naměřený signál. Ve formě bodů je na obrázku 2.25 uvedena aproximační křivka, aby byla viditelná. Jinak obě splývají. Body jsou pro okamžiky vzorků signálu. Je zřejmé, že vzorkovací frekvence byla docela nízká.



Obrázek 2.25: Naměřený signál a jeho aproximace tlumenou sinusovou křivkou

Druhý způsob určení koeficientu tlumení byl proveden dle vztahu (52). Logaritmický dekrement útlumu byl vyhodnocen dle vztahu (51) pro každá dvě po sobě jdoucí maxima amplitud zrychlení. Protože takto určené logaritmické dekrementy se navzájem lišily, bylo provedeno jejich zprůměrování. Výběr maxim je znázorněn na obrázku 2.26.



Obrázek 2.26: Naměřený signál s vyznačenými maximy amplitud

Do tohoto vyhodnocení byla zanesena chyba během vybírání maxim amplitud. Z obrázku 2.25 je zřejmé, že v okolí maxim je poměrně málo vzorků signálu. Chyba tudíž byla způsobena absencí naměřených dat a následným nepřesným výběrem. Částečně ji lze zmírnit použitím většího počtu bodů při aproximaci, nebo aplikaci interpolace na naměřená data. Z tohoto důvodu lze považovat aproximaci signálu podle vztahu (50) za přesnější.

Koeficienty tlumení z obou způsobů vyhodnocení jsou pro jednotlivé druhy vzorků uvedeny v tabulce 2.13. Je patrné, že kompozitní materiál obsahující vrstvu korkové výztuže má větší koeficient tlumení. Výsledky odpovídají počátečnímu předpokladu.

Tabulka 2.13: Hodnoty útlumu

Koeficient tlumení		
	Z logaritmického dekrementu	Proložení tlumenou sinovou křivkou
Deska A		
Směr L	7,84	8,44
Směr T	11,11	10,74
Deska B		
Směr L	9,78	10,55
Směr T	13,64	14,39

3 Výpočty metodou konečných prvků

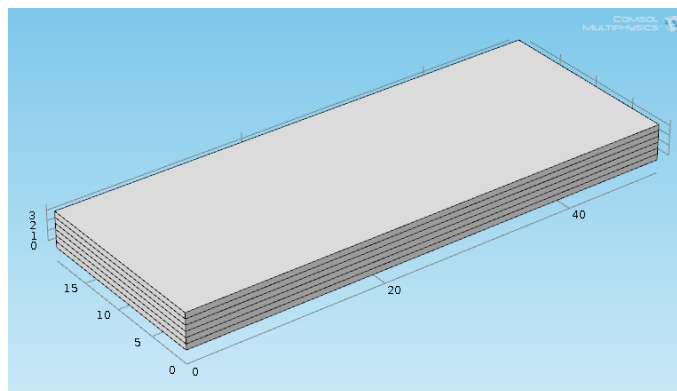
Pro metodu konečných prvků MKP byl použit program COMSOL Multiphysics 4.3. Tento program je výkonný, univerzální nástroj pro řešení lineárních i nelineárních systémů metodou konečných prvků. Program umožňuje provádět výpočty z oblasti mechaniky, akustiky, proudění a dalších oblastí. V našem případě byla využita oblast mechaniky.

3.1 Materiálové parametry

Materiálové parametry jsme určili experimentálně, metodou konečných prvků jsme parametry pouze ověřili. K ověření materiálových parametrů byla pro použití metody konečných prvků využita oblast lineární mechaniky. Tato oblast byla vybrána, proto-že se materiál chová lineárně, jak dokazují výše uvedené experimenty. Způsob chování materiálu byl zjištěn během dynamického namáhání, jehož výsledky jsou zobrazeny v následujících kapitolách.

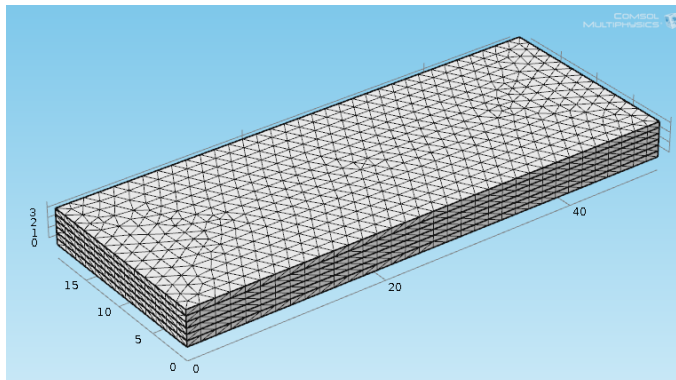
Reporty ze simulace metodou konečných prvků jsou v příloze. Na příkladu tahové zkoušky popíšeme postup vytvoření numerického modelu:

- Ve funkci Geometry byl vytvořen trojrozměrný model, který byl ve formě vrstveného materiálu v souladu s experimentem. Jednotlivé vrstvy neměly dané natočení jako v kompozitním materiálu vyrobeném pro experimentální měření, protože materiál byl zadán pro celou geometrii. Byly tedy totožné, ale přesto byly vrstvy zachovány z důvodu zahrnutí případných vazeb, které by se mohly projevit hlavně u ohybové zkoušky. Oproti reálnému zkušebnímu vzorku, byl numerický model kratší, protože poměrné protažení bylo měřeno mezi kontrastními body, tj. numerický model znázornil pouze vyhodnocovanou část reálného vzorku. Šířka a tloušťka materiálového modelu odpovídala reálnému vzorku. Geometrie modelu je zobrazena na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Geometrie numerického modelu simulace tahové zkoušky

- Ve funkci Mesh byla vybrána funkce Physics-controlled mesh, která automaticky vytvořila síť bez nutnosti dalšího zásahu. Druhý bod, který se v této funkci nastavuje, je velikost elementů sítě. Tam byla vybrána možnost Coarse. Vytvořená síť je zobrazena na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Síť numerického modelu

- Vzhledem k tomu, že numerický model byl vytvořen pro ověření správnosti experimentálně určených materiálových parametrů vzorků kompozitního materiálu, bylo nutné zadat materiálové parametry ručně. Tyto hodnoty byly zadány v nastavení ortotropního materiálu Linear Elastic Material.
- V dalším kroku byly nastaveny okrajové podmínky, které odpovídají reálné tahové zkoušce. Jeden konec byl pevně fixován použitím funkce Fixed Constraint. Druhý konec modelu byl zatížen posuvem. V parametrech simulace byla nastavena velikost protažení.

Pro simulaci ohybové zkoušky se geometrie numerického modelu nelišila od zkušební vzorku reálné zkoušky. Okrajové podmínky byly nastaveny, aby odpovídaly skutečnému provedení zkoušky vzorku na fyzickém stoju. Podobně byla provedena simulace smykové zkoušky.

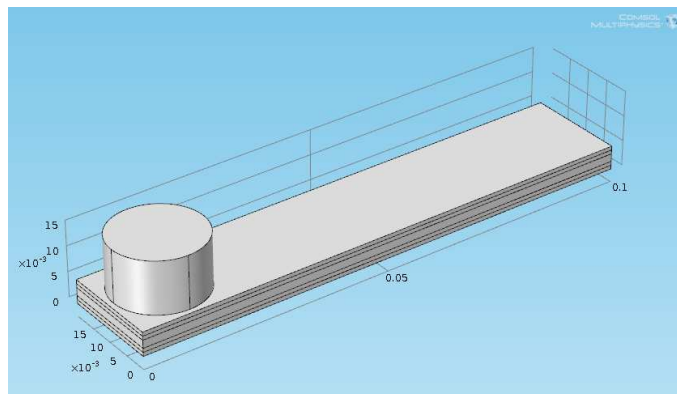
3.2 Vlastní frekvence

Nelze ověřit vlastní frekvenci samotného kompozitního materiálu, přestože lze provést simulaci metodou konečných prvků. Během experimentálního měření bylo zaznamenáno zrychlení kmitání vetknutého nosníku pomocí akcelerometru, který byl upevněn na jeho konci. Vlastní frekvence materiálu určena z dat takto provedeného měření byla akcelerometrem ovlivněna. Proto nelze hovořit o vlastní frekvenci vetknutého nosníku, ale soustavy. Simulace jsme této skuteč-

nosti přizpůsobily, aby bylo možné experimentálně určené vlastní frekvence porovnat. Pro tuto simulaci bylo využito funkce eigenfrequency.

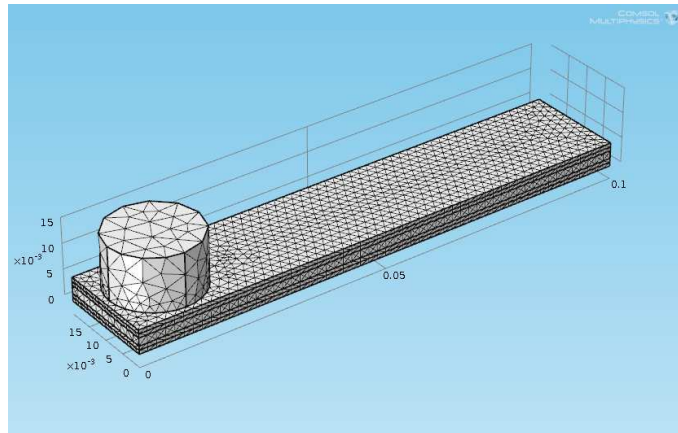
Reporty ze simulace metodou konečných prvků jsou v příloze. Zde si popíšeme alespoň jeden postup vytvoření numerického modelu výpočtu vlastní frekvence:

- Geometrie numerického modelu byla složena z modelu zkušební vzorku a přidané hmotě na volném konci nosníku, která zhruba odpovídala tvarem, velikostí a hmotností akcelerometru. Model byl vytvořen stejně jako pro předchozí simulace, tzn. vrstvený materiál. Obdobně jako vetknutý nosník z reálného vzorku byl numerický model dlouhý 100 mm. Šířka a tloušťka materiálového modelu odpovídala reálnému vzorku. Geometrie modelu je zobrazena na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Geometrie numerického modelu simulace vlastní frekvence

- Ve funkci Mesh byla vybrána funkce Physcs-controlled mesh, která automaticky vytvořila síť bez nutnosti dalšího zásahu. Druhý bod, který se v této funkci nastavuje, je velikost elementů sítě, tam byla vybrána možnost Normal. Vytvořená síť je zobrazena na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Síť numerického modelu

- Podobně jako pro předchozí simulace byl materiál určen v nastavení ortotropního materiálu Linear Elastic Material.
- V dalším kroku byly nastaveny okrajové podmínky, které odpovídají reálné zkoušce. Jeden konec byl pevně fixován použitím funkce Fixed Constraint. Druhý konec modelu, na kterém byla přidána hmota, byl nechán volně.

4 Ověření experimentu metodou konečných prvků

Ověření bylo provedeno pro každý modul pružnosti zvlášť. V každém obrázku jsou znázorněny lineární křivky z tahové, ohybové nebo smykové zkoušky. V poslední části kapitoly jsou zobrazeny výsledky z výpočtu konečných prvků. Zároveň jsou porovnány vlastní frekvence získané z experimentální části práce a z metody konečných prvků.

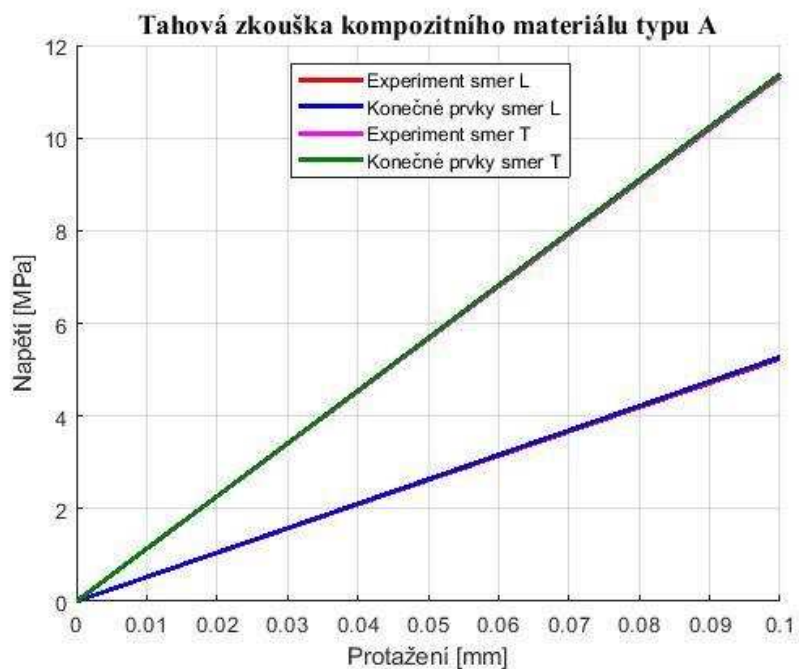
V případě desky A nezávisle výsledky simulace na tloušťce. Proto jsou uvedeny jen pro tenčí desku o tloušťce 3,5 mm.

4.1 Tahová zkouška kompozitní desky

V této části kapitoly jsou zobrazeny výsledky z výpočtu konečných prvků tahové zkoušky kompozitní desky. Výsledky jsou zároveň porovnány s vyhodnocením tahové zkoušky kompozitních desek z experimentální části.

Typ vzorků A

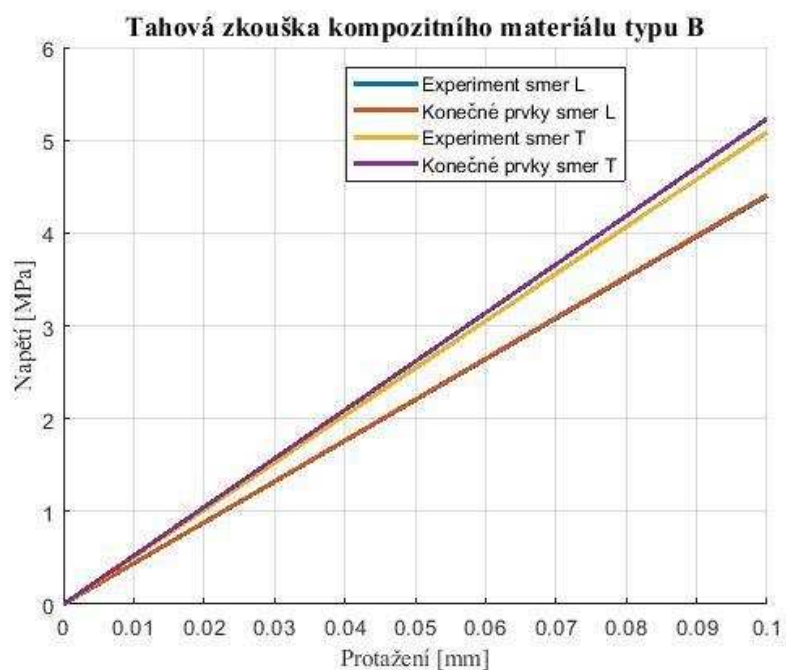
Numerický model byl stejného tvaru jako reálný zkušební vzorek. Délka modelu byla identická se vzdáleností mezi dvěma vyznačenými body. Kdyby byla stejná, jako např. byla původní vzdálenost mezi čelistmi, výsledná křivka by neodpovídala výsledku z tahové zkoušky. Na obrázku 4.1 je zobrazeno porovnání tahové zkoušky a simulace z numerického modelu. Lineární křivka z tahové zkoušky byla vytvořena na základě statistického vyhodnocení a potvrzeného předpokladu, že materiál se chová lineárně. Vzhledem k tomu, že výsledky zobrazené na obrázku 4.1 jsou téměř identické, jsou křivky experimentu téměř překryty křivkami z metody konečných prvků. Výpočet pomocí MKP potvrzuje, že rozložení napětí a deformace je v měřené části vzorku rozloženo rovnoměrně a tudíž lze předpokládat správnost určení materiálových parametrů.



Obrázek 4.1: Ověření tahové zkoušky kompozitního materiálu typu A

Typ vzorků B

Na obrázku 4.2 je zobrazeno porovnání tahové zkoušky a numerického modelu. Malá odchylka ve směrnici je jen pro směr útku. Poněvadž platí vše, co bylo řečeno pro desku A, modul pružnosti pro desku B byl určen správně.



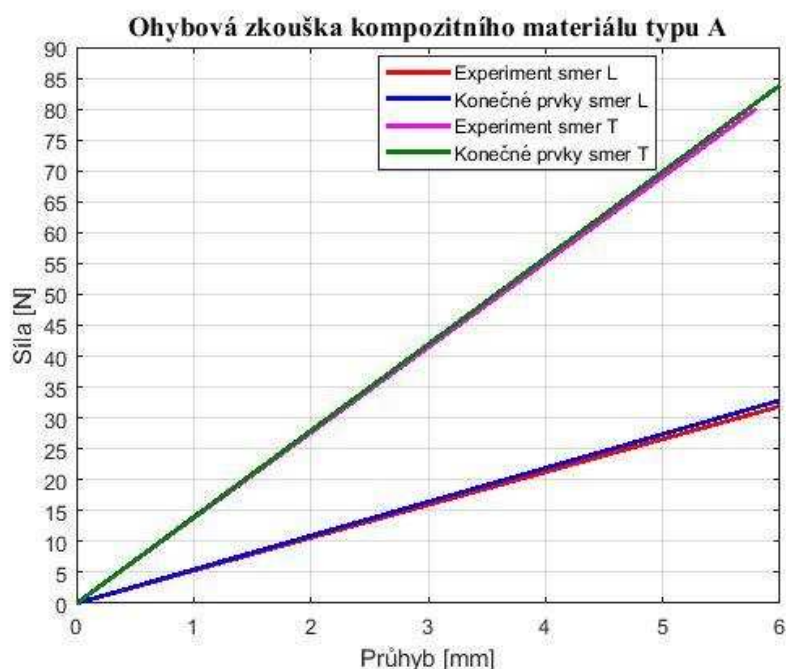
Obrázek 4.2: Ověření tahové zkoušky kompozitního materiálu typu B

4.2 Ohybová zkouška kompozitní desky

Stejně jako v předchozí kapitole, i zde je uvedeno porovnání vyhodnocení ohybové zkoušky z experimentální části s výsledky z výpočtu metodou konečných prvků.

Typ vzorků A

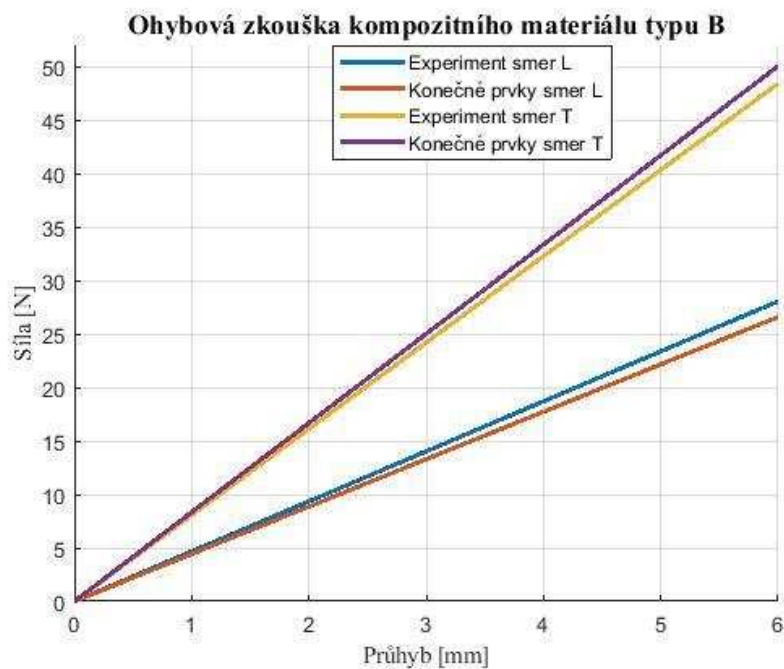
Numerický model byl stejného tvaru jako reálný zkušební vzorek. Vzdálenost podpěrných vazeb u numerického modelu, byla stejná jako vzdálenost podpěr během zkoušky. Na obrázku 4.3 je zobrazeno porovnání ohybové zkoušky a numerického modelu. Výborná shoda opět potvrzuje správnost určení modulu.



Obrázek 4.3: Ověření ohybové zkoušky kompozitního materiálu typu A

Typ vzorků B

Simulace ohybové zkoušky pro data z tahové zkoušky v tabulce 2.4 jsou zobrazeny na obrázku 4.4. Jsou opět lineární, avšak směrnice jsou poněkud různé, poněvadž moduly v tabulce 2.4 získané za tahové zkoušky se poněkud liší od modulů v tabulce 2.6 pro ohybovou zkoušku. Přesto toto porovnání, správnost určení materiálových parametrů lépe potvrzuje. Ohybová zkouška sloužila zejména pro ověření výsledků z tahové zkoušky.

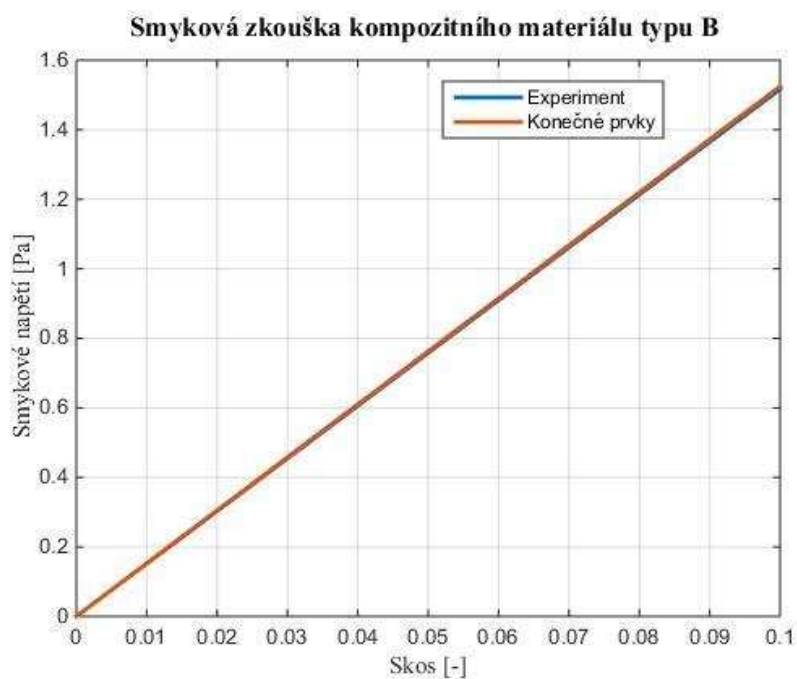


Obrázek 4.4: Ověření ohybové zkoušky kompozitního materiálu typu B

4.3 Smyková zkouška kompozitní desky

Typ vzorků A

Numerický model byl stejného tvaru jako reálný zkušební vzorek. Geometrie modelu byla větší 2,7krát než reálný vzorek, protože okrajové podmínky musely odpovídat vzdálenosti kontrastních bodů. Kdyby model byl stejně velký, výsledná křivka by neodpovídala výsledku ze smykové zkoušky. Podobný problém byl dříve u simulace tahové zkoušky. Na obrázku 4.5 je zobrazeno porovnání smykové zkoušky a numerického modelu. Křivky jsou téměř identické. To potvrzuje správnost experimentálního výsledku. Vzhledem k tomu, že nezáleží na směru vyříznutí vzorku pro určení modulu pružnosti ve smyku, byl vytvořen pouze jeden numerický model.



Obrázek 4.5: Porovnání smykové zkoušky se simulací

4.4 Vlastní frekvence

Numerický model pro určení vlastní frekvence se skládal z vetknutého nosníku a akcelerometru upevněného na jeho volném konci. Na obrázku 4.6 jsou zobrazeny výchylky kmitů, přesněji stojaté vlny, modelu s 1. vlastní frekvencí pro desku A. Výchylky se zvyšují směrem k volnému konci a v daném průřezu jsou zhruba shodné, soudě, podle barvy. To potvrzuje konstantní výchylku v daném průřezu.

Porovnání hodnot 1. vlastní frekvence pro tuto desku, je v tabulce 4.1. V tabulce 4.2 je porovnání 1. vlastní frekvence experimentu a numerického modelu pro typ desky B.

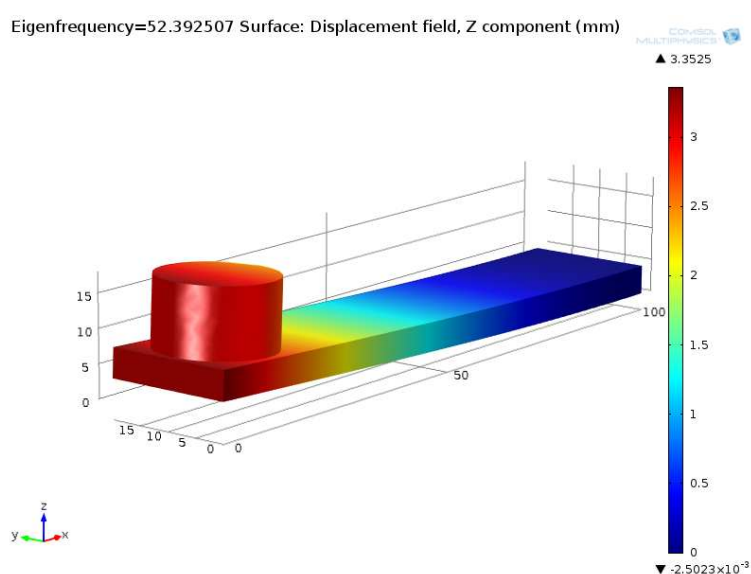
Tabulka 4.1: Porovnání první vlastní frekvence kompozitního materiálu typu A

1. vlastní frekvence kompozitního materiálu typu A		
	Experiment	Metoda konečných prvků
Směr L	54,08691	52,397
Směr T	58,35938	60,25

Tabulka 4.2: Porovnání první vlastní frekvence kompozitního materiálu typu A

1. vlastní frekvence kompozitního materiálu typu B		
	Experiment	Metoda konečných prvků
Směr L	54,30176	52,96
Směr T	61,50391	61,263

Ze získaných hodnot vlastních frekvencí je patrná odchylka mezi experimentálním měřením a mezi konečnými prvky. Odchylka výsledků je pro desku A ve směru L je 3 % a ve směru T - 3 %. Velikost odchylky pro desku B ve směru L je 2 % a ve směru T dokonce jen 0,4 %.



Obrázek 4.6: Typ desky A, směr vzorku L

Přidání dodatečného válce na konec sloužilo k dosažení shody modelu a experimentu. Tuto shodu se podařilo prokázat. Z modelu však můžeme získat i vlastní frekvence pro čistší vetknutý nosník.

5 Diskuse

Diplomová práce je převážně experimentální a v průběhu jejího řešení bylo provedeno značné množství různých testů na připravený kompozitní materiál. Velmi pracná a časově náročná byla právě příprava kompozitních desek. Přitom byly připraveny dva rozdílné typy, které byly podobně testovány. V rámci testu byl popsán experiment, uvedeny výsledky, které pak byly zpracovány a test doplněn diskusí. Tím jsou všechny dílčí informace na jednom místě, což považujeme za lepší, než členit práci na kapitoly experiment, výsledky a diskuse a v nich pak pracně hledat informace vztahující se k té či oné zkoušce. Nicméně kapitola diskuse v práci je a jejím účelem je mj. porovnat celkové výsledky.

V kapitole 1 Příprava a modely kompozitních materiálů je jednak přehled nejčastěji používaných výztuží a maticí se zaměřením na textilní kompozity. Z nich by se mělo vycházet při projektu nového kompozitu na základě požadovaných vlastností a zejména ceny. S přihlédnutím k zadání a možnostem pracoviště nakonec volba padla na jutovou textilií a acrodurovou pryskyřici. Důležitá je část modelování kompozitů, kde je zejména klíčový vztah (14). Uvedená matice plně popisuje elastické parametry pro desku z připraveného kompozitu. Dále je zde uvedeno směšovací pravidlo pro všechny elastické parametry v případě poměrně jednoduchého modelu.

Pro kompozit je důležitý synergický efekt. Podle něho výsledná vlastnost nemusí být pouhou superpozicí vlastností složek vzhledem k jejich zastoupení, tedy směšovací pravidlo. Je to důsledek komplikované struktury kompozitu, v níž se uplatní řada efektů do směšovacího pravidla nezahrnutých. Bohužel, v našem případě nebylo možné synergický efekt ověřit, poněvadž jsme nemohli zjistit elastické vlastnosti matrice a vlastnosti výztuže byly v neúplné formě.

Elastickým modelem kompozitu je matice (14), z níž lze zjistit odezvu (deformaci) na jakékoliv rovinné zatížení desky. Všechny její složky byly experimentálně určeny, některé dokonce více metodami, až na Poissonovu konstantu. Jedna z možností je odhadnout Poissonovu konstantu, jak nakonec bylo učiněno, a konstanta byla zvolena $\nu_{LT} = 0,4$. Nejjednodušší je použít tahovou zkoušku a na vzorek nalepit dvě značky ve směru kolmém k síle. Pak lze určit relativní příčné zkrácení v závislosti na aplikovaném napětí. Poněvadž průběh podélné deformace je znám, lze již snadno spočítat Poissonova konstanta a určit její závislost na napětí. Obě deformace by se daly měřit ze čtyř značek umístěných na konci kříže. To však vyžaduje 2D video extenzometr, který není k dispozici. Přesnost měření příčného zkrácení bude zatížena větší chybou, poněvadž použitá šířka vzorku je desetkrát menší než jeho délka (tab. 3.3).

K určení rozptylu parametrů v jedné desce by se měly vybrat vzorky z různých částí desky a ty proměřit. Pak se dá zjistit střední hodnota a směrodatná odchylka. To se ovšem týká jen jedné

sady vyrobených desek, což je případ našeho experimentu. Ve výrobě se série desek znovu neustále připravuje a rozptyl parametrů může být vyšší.

V porovnání s ocelí jsou základní elastické parametry kompozitu minimálně o řád nižší. Modul pružnosti v tahu je kolem 4 GPa, zatímco Youngův modul oceli je 210 GPa. Navíc u vyšetřovaného dvousměrně vyztuženého kompozitu modul pružnosti v tahu závisí na směru působící síly, ocel je isotropní. Pevnost kompozitu odvozená z tahové zkoušky byla kolem 20 MPa, minimální pevnost oceli je 200 MPa.

Nejdůležitější Youngův modul byl měřen dvěma metodami, v tahu a ohybu. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.1. Pro desku A ve směru T jsou hodnoty získané oběma metodami velmi podobné, u tenčí desky dokonce prakticky shodné. Naproti tomu u těžší desky jsou ve směru L rozdíly u obou metod výrazné. U desky typu B jsou odchylky prakticky nezávislé na směru, ale nejsou zanedbatelné. Větší rozdíl u desky A ve směru L se vysvětluje tím, že ve směru osnovy jsou nitě slabší.

Největším překvapením v tabulce 5.1 je však to, že moduly u desky A silně závisí na její tloušťce a to jak pro směr L, tak pro směr T. Toto chování si zatím neumíme vysvětlit. Pravděpodobně by byly nutné další rozsáhlé experimenty.

Tabulka 5.1: Porovnání měření v tahu a ohybu

Deska-směr	Tah E [GPa]	Ohyb E [GPa]	Průměr E [GPa]	Odchylka δ [%]
A _{3,5} L	3,51	2,67	3,09	13,6
A _{3,5} T	6,46	6,48	6,47	0,15
A _{4,5} L	2,61	2,21	2,42	8,68
A _{4,5} T	5,66	5,47	5,57	1,8
BL	2,18	1,82	2,00	9
BT	2,59	2,24	2,42	7,44

Z tabulky 5.1 také vyplývá rozdíl mezi dvěma realizovanými kompozity. Typ A obsahoval pouze tkaninu. Vyznačuje se silnou anizotropií, moduly ve směru T jsou téměř dvojnásobné než moduly ve směru L. U typu B, který jako vyztuž obsahoval i částice korku, je izotropie podstatně menší. Jeho moduly jsou také menší zhruba dvakrát.

Moduly zjištěné statickou a dynamickou metodou jsou v tabulce 5.2. Pro desku A byla vzata průměrná hodnota z obou tloušťek. S výjimkou desky A ve směru T je dynamický modul téměř dvojnásobný. Možná se zde projevuje vyšší chyba při dynamickém měření.

Tabulka 5.2: Porovnání statického a dynamického měření.

Deska-směr	Statický modul	Dynamický modul
AL	2,75	4,44
AT	6,02	6,1
BL	2,00	3,42
BT	2,42	4,16

Všechna měření kompozitu (tahové zkoušky, ohybová měření, měření ve smyku) prokázala, že se jedná o lineární materiál. Metoda konečných prvků tuto vlastnost potvrdila simulací všech zkoušek. Ukázala, že rozložení napětí a deformace ve zkoumané části vzorku je homogenní. Důsledkem linearit je to, že všechny elastické parametry jsou konstantní. Tím se značně zjednoduší výpočty a analýza možných aplikací.

Závěr

Podle zadání se měly v diplomové práci vyřešit zejména tyto dílčí úkoly:

Výroba kompozitního materiálu a vhodných vzorků pro stanovení jeho mechanických parametrů. Byly připraveny dva typy kompozitního materiálu postupem podrobně popsáním v práci. Tato etapa byla pracovně i časově náročná. Byly proměřeny všechny základní elastické parametry až na Poissonovu konstantu. Nejdůležitější parametr, modul pružnosti byl měřen dvěma metodami. Výsledky obou metod zhruba souhlasily.

Experimentální určení dynamických a elastických parametrů a útlumu. Pomocí dynamického buzení superponovaného na předpětí byly určeny dynamické moduly. Z průběhu velikosti průhybu a síly v časové a amplitudové oblasti byla zjištěna velmi slabá hystereze, prakticky zanedbatelná. Z časového průběhu volných kmitů byl určen koeficient útlumu. Nepodařila se změřit Poissonova konstanta, v diskusi je však navrženo přibližné řešení.

Ověření správnosti určení parametrů pomocí simulace metodou konečných prvků. V systému Comsol Multiphysics byly připraveny modely všech provedených zkoušek. Výborná shoda simulace a experimentu potvrdila správnost dosažených výsledků.

Lze konstatovat, že stanovené úkoly byly splněny v plném rozsahu, někde i překročeny. Hlavní přínos práce je v tomto:

- Byly připraveny dvě rozdílné realizace kompozitního materiálu a ty podrobně proměřeny z hlediska elastických vlastností.
- Všechny statické zkoušky vykazovaly vysoký stupeň linearitu, takže moduly jsou konstantní.
- Vzorky vykazovaly anizotropii, zejména u jutové tkaniny byla výrazná.
- Měření Youngova modulu dvěma metodami vedlo k velmi dobré shodě ve směru T pro výztuž z jutové tkaniny.
- Základní elastické parametry jsou asi o řád nižší než u oceli.
- Byly určeny všechny parametry připraveného modelu, až na Poissonovu konstantu. Tu by bylo nutné doměřit, ale nebylo k dispozici potřebné vybavení (2D videoextenziometr).

- Při dynamickém měření s mechanickým předpětím byla zjištěna velmi slabá hystereze. I v dynamické oblasti lze materiál pokládat za lineární, protože hystereze je zanedbatelná.
- Z útlumu volných kmitů byl určen koeficient útlumu vyvolaný vnitřním třením.
- Naměřené frekvence volných kmitů souhlasily dobře se simulací pomocí MKP.

Další práce by se měla soustředit do těchto oblastí:

- Připravit větší množství vzorků za účelem extenzivních měření
- Ověřit přesnost měření elastických parametrů a jejich rozptyl způsobený přípravou.
- Změřit Poissonovu konstantu.
- Provést dynamická měření a zjistit meze linearity.
- Sestavit model kompozitu a ověřit na něm možnost předpovědi elastických vlastností.

Seznam literatury

- [1] ASTM D3039 / D3039M-08, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, www.astm.org
- [2] ASTM D7264 / D7264M-07, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org
- [3] KOVAČIČ, Vladimír. *Textilní zkušebnictví*. Liberec: Technická univerzita, 2004. ISBN 80-7083-824-8.
- [4] *Acrodur*®, Ludwigshafen: BASF SE, 03/2011, 8s.
- [5] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1.vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6. [1] Nauka o materiálu ČVUT
- [6] LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-698-9.
- [7] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. 1.vyd. Praha: VŠCHT, 2014. 189 p. ISBN 978-80-7080-568-8.
- [8] JANOVEC, J. *Technické materiály v primárním a preprimárním vzdělávání*. 1.vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2013. 78 p. ISBN 978-80-7414-596-4.
- [9] KLADIVO, Petr. *Základy statistiky*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3841-2.
- [10] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.

Seznam příloh

1 CD-s elektronickou verzi práce a všemi skripty pro Matlab, které byly použity ke zpracování naměřených dat a k výpočtům. Dále jsou zde soubory pro softwaru pro MKP a všechny soubory s naměřenými daty.