



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

AUTOREFERÁT  
DIZERTAČNEJ PRÁCE

Ing. Pavol Michal  
**AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE**  
EXPERIMENTÁLNE MERANIE DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÝCH ŠTRUKTÚR A ICH  
NUMERICKÁ ANALÝZA

Na získanie akademického titulu **doktor**  
(„*philosophiae doctor*“, v skratke „PhD.“)  
v študijnom odbore Strojárstvo  
v študijnom programe časti a mechanizmy strojov

Žilina, 2024

Ing. Pavol Michal

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre aplikovanej mechaniky.

Predkladateľ: Ing. Pavol Michal  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra aplikovanej mechaniky

Školiteľ: doc. Ing. Milan Vaško, PhD  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra aplikovanej mechaniky

Oponenti:

1. prof. Ing. Jozef Bocko, CSc.  
Technická univerzita Košice  
Strojnícka fakulta  
Katedra aplikovanej mechaniky a strojného inžinierstva
2. doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
Technická univerzita Ostrava  
Fakulta Strojní  
Katedra aplikovanej mechaniky
3. Ing. Marián Handrik, PhD.  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra aplikovanej mechaniky

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 09.07.2024

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 21.08.2024 o 09:00 hod. v miestnosti BB011 na SJF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenu odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe časti a mechanizmy strojov, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SJF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Dr. Ing. Milan Sága v. r.  
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

## ÚVOD

Význam kompozitných materiálov spočíva v ich schopnosti ponúkať vynikajúce mechanické vlastnosti pri nízkej hmotnosti, čo vedie k zvýšeniu efektivity a výkonu v rôznych aplikáciách. Napríklad v leteckom priemysle môžu kompozity výrazne znížiť hmotnosť lietadla, čo vedie k úsporám paliva a zníženiu emisií. V automobilovom priemysle umožňujú vytvárať ľahšie a bezpečnejšie vozidlá, ktoré sú odolnejšie voči korózii a mechanickému opotrebeniu. Okrem toho, ich využitie v stavebníctve a športovom priemysle prináša inovatívne riešenia pre ľahké a trvácne konštrukcie a vybavenie. Táto práca je zameraná na vnútorné tlmenie kompozitných materiálov, čo je kľúčová vlastnosť tuhých telies, charakterizujúca ich schopnosť nevratne disipovať energiu mechanických vibrácií. Vnútorné tlmenie je zásadné pre aplikácie, kde je potrebné redukovať vibrácie a zlepšiť stabilitu a životnosť materiálov. Tlmenie sa kvantifikuje pomocou rôznych rezonančných metód, ktoré využívajú autori vo svojich publikáciách. Každá z týchto metód môže byť vhodnejšia pre meranie rôznych mechanizmov tlmenia a rôznych materiálov.

Naším cieľom je sledovať zmenu vnútorného tlmenia pri rôznych variantoch usporiadania výstužných vlákien vo vzorke, vyhodnotiť ktorá konfigurácia pohlcuje vibrácie najviac, a akými mechanizmami sa riadi tlmenie. Výsledky tejto štúdie môžu viesť k optimalizácii kompozitných materiálov pre špecifické aplikácie, kde je dôležité dosiahnuť vysokú mieru tlmenia bez kompromisu na mechanických vlastnostiach. Tlmenie závisí od kombinácie matrice a výstužných vlákien. Rôzne typy matric a rôzne typy vlákien majú odlišné tlmiace vlastnosti. Ich spojením v kompozitnej štruktúre dostaneme nové vlastnosti ktoré môžeme prispôbovať rôznou vnútornou konfiguráciou jednotlivých zložiek kompozitu.

## STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY

Výskumy ukazujú, že tlmenie je ovplyvnené nielen materiálom, ale aj orientáciou vlákien. Vlákna usporiadané v špecifických smeroch môžu zvýšiť schopnosť materiálu absorbovať vibrácie. Toto tlmenie sa vyskytuje predovšetkým na rozhraní zložiek kompozitu. Medzi vrstvami matrice a vrstvami výstuže vzniká trenie a ich vzájomnou interakciou dochádza k absorpcii energie a teda k tlmeniu vibrácií. Zmenou orientácie vlákien sa zmení aj množstvo prenášanej energie z vrstvy na vrstvu a tým sa mení schopnosť štruktúry tmiť vibrácie. V publikácií [1] sa skúmal vzťah medzi adhéziou medzifáz a tlmiacimi vlastnosťami laminátových kompozitov vystuženými sklenenými vláknami s rôznou povrchovou úpravou. Kvalita medzifázovej adhézie sa vyhodnocovala na základe vzťahov (1a, 1b). Výsledky štúdie ukázali, že existuje inverzný vzťah medzi úrovňou adhézie medzifáz a tlmiacimi vlastnosťami kompozitov, to znamená že nižšia adhézia vedie k vyššiemu disipovaniu energie.

$$\tan\delta_{in} = \tan\delta_{comp} - \tan\delta_s \quad (1a)$$

$$\tan\delta_s = \frac{\tan\delta_f E_f V_f + \tan\delta_m E_m V_m}{E_m V_m + E_f V_f} \quad (1b)$$

Kde:  $\tan\delta_{in}$  - vnútorný faktor strát spôsobený adhéziou na rozhraní zložiek kompozitu,  $\tan\delta_{comp}$  - nameraný faktor strát,  $\tan\delta_s$  - faktor strát pre kompozity s dokonalou medzifázovou adhéziou,  $E$  - Youngov modul pružnosti,  $V$  - objemový podiel, indexy  $f$  a  $m$  - fiber (výstužné vlákno) a matrix (matrica) [2].

Komplexnou analýzou tlmiacich a pevnostných vlastností na základe vplyvu objemu a orientácie vlákien E-skla sa venovali autori v publikácií [11]. Výskumný tím použil proces vakuového infúzneho formovania na prípravu kompozitných laminátov s rôznymi objemovými podielmi a ukladacími

uhlami vláken E-skla. Skúmali tri rôzne objemové podiely vláken (50 %, 55 %, 60 %) a tri rôzne ukladacie uhly ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Zistili, že zvyšovanie objemu vláken zvyšuje mechanickú pevnosť, ale znižuje tlmiace vlastnosti kvôli zníženej pohyblivosti matrice. Avšak zmena ukladacieho uhla vláken mala významný vplyv na tlmiace vlastnosti. Uhly  $45^\circ$  až  $90^\circ$  výrazne zlepšovali tlmiace vlastnosti v porovnaní s uhlom  $0^\circ$ . Podobné zistenia prezentujeme aj v tejto práci, za použitia rozličných materiálov a metódy výroby vzoriek a rozličnej metódy experimentu.

## TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom dizertačnej práce je zistiť hodnoty vnútorného tlmenia kompozitných materiálov. Hlavnou úlohou je porovnať zistené hodnoty medzi sebou a numerickou analýzou, určiť presnosť a spoľahlivosť metód zisťovania hodnôt vnútorného tlmenia. Experimentálna časť pozostáva z dynamických skúšok viacerých druhov vzoriek. Vzorky sú rozdelené do troch kategórií podľa materiálu z ktorého sú vyrobené: onyx (nylon s krátkymi časticami uhlíkového vlákna) vystužený dlhými uhlíkovými vláknami, onyx vystužený dlhými sklenenými vláknami, onyx vystužený dlhými kevlarovými vláknami.

V každej kategórii je vyhotovených pomocou 3D tlačie 10 kusov vzoriek s rôznym usporiadaním dlhých vláken. Orientácia vláken je rozdelená do dvoch variantov a 5 konfigurácií. Prvý variant je bez obvodovej výstuže a druhý variant je s obvodovou výstužou. V jednotlivých konfiguráciách je definovaná rôzna orientácia vláken. Prvá konfigurácia má vlákna usporiadané pozdĺžne, druhá konfigurácia má vlákna orientované priečne pod uhlom  $45^\circ$  voči pozdĺžnej osi, tretia konfigurácia má vlákna orientované v kolmom smere, štvrtá konfigurácia má vlákna orientované striedavo pod uhlom  $\pm 45^\circ$  a piata konfigurácia má vlákna uložené striedavo v pozdĺžnom aj kolmom smere.

## ZVOLENÉ METÓDY SPRACOVANIA

Na výrobu vzoriek sa použila 3D tlačiareň Markforged Mark Two. Táto tlačiareň využíva metódu tlačie CFF (Continuous Filament Fabrication), ktorá umožňuje plynulé ukladanie dlhých vláken výstuže rôznych materiálov. Použitím tejto metódy tlačie sme schopní zabezpečiť špecifickú orientáciu vláken vo vzorke a následne porovnať vplyv rôznych konfigurácií výstuže na výsledné vlastnosti vzorky. Vzorky pozostávajú celkovo z 20 vrstiev pre vzorky s uhlíkovými vláknami a 25 vrstiev pre vzorky so sklenenými a kevlarovými vláknami, z čoho je polovica tvorená vrstvami výstuže vo forme dlhých vláken a zvyšok je tvorený výplňou z materiálu onyx.

Experimentálne merania boli vykonané na dvoch pracoviskách s použitím rôzneho vybavenia. Prvý experiment bol spracovaný v softvéri signal express, za použitia akcelerometra typu 4507 - B od spoločnosti Brüel & Kjær a dynamického kladivka typu IH 101 – 500 od spoločnosti Omega Engineering. Druhý experiment bol spracovaný v softvéri BK connect za použitia akcelerometra typu 4393 a dynamického kladivka typu 8206 od spoločnosti Brüel & Kjær. Postup merania prebiehal v oboch prípadoch rovnako. Vzorky sme upevnili o pevnú konštrukciu pomocou pružných popruhov v mieste výskytu uzlov kmitania prvého vlastného tvaru (70mm od okrajov vzorky). Následne sme dynamickým kladivkom klepli na vzorku, čím sa vybudilo kmitanie a akcelerometrom umiestneným v strede vzorky sme sledovali frekvenčnú odozvu. Získané dáta sme spracovali v prostredí MATLAB. Kde sme vykreslili funkcie frekvenčnej odozvy pre každú vzorku, ktorá bola základom pre ďalšiu analýzu.

Na základe spracovaných dát sme identifikovali vlastné frekvencie štruktúry a zo získaných hodnôt sme výpočtom, metódou polovičnej šírky píku (half-power bandwidth method), získali hodnotu tlmiaceho koeficientu  $\zeta$  (damping ratio). Kde sme najskôr našli maximálnu hodnotu amplitúdy prvej vlastnej frekvencie a pomocou vzťahu (2) sme určili hodnoty amplitúd v polovici píku, na základe

ktorých sme vyjadrili rozdiel frekvencií  $\Delta f$  (3), ktorý je potrebný pre výpočet faktora zosilnenia Q (4). A na záver pomocou vzťahu (5) sme vypočítali koeficient tlmenia pre danú štruktúru.

$$\frac{A_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

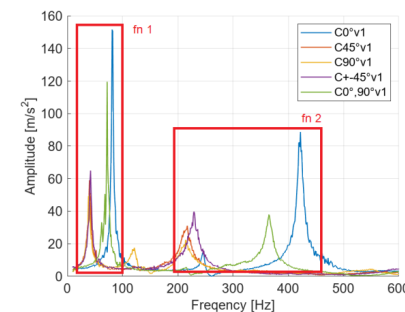
$$\Delta f = f_1 - f_2 \quad (3)$$

$$Q = \frac{f_n}{\Delta f} \quad (4)$$

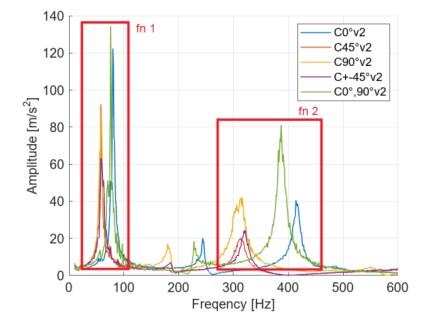
$$\zeta = \frac{1}{2Q} \quad (5)$$

Kde:  $A_{max}$  - rezonančná amplitúda,  $f_1$ ,  $f_2$  - hraničné frekvencie v polovici píku,  $f_n$  - rezonančná frekvencia.

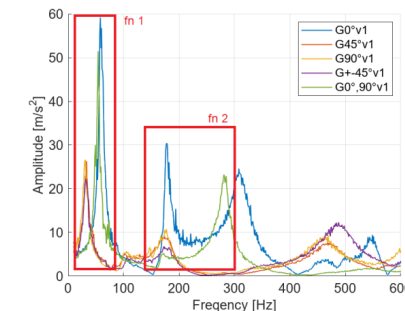
Pri výpočte sme vychádzali z dát v oblasti prvej a druhej vlastnej frekvencie čo odpovedá intervalu frekvencií od 20 Hz do 150 Hz pre prvé vlastné frekvencie a pre druhé vlastné frekvencie odpovedá interval od 150 Hz do 1000 Hz (Obr. 1-6). Vykreslením funkcie frekvenčnej odozvy z dát získaných meraním na druhom pracovisku sa nám zobrazila len jedna vlastná frekvencia pre každú vzorku, dané frekvencie sa vyskytovali v intervale od 28 Hz do 82 Hz (Obr. 7-12).



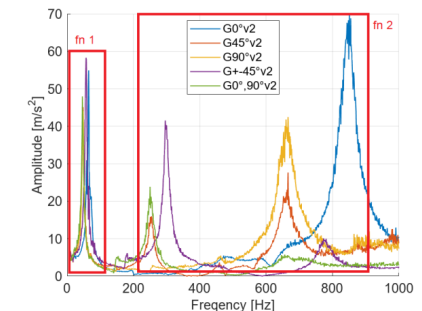
Obr. 1 Frekvenčná odozva pracovisko 1, uhlíková výstuž variant 1



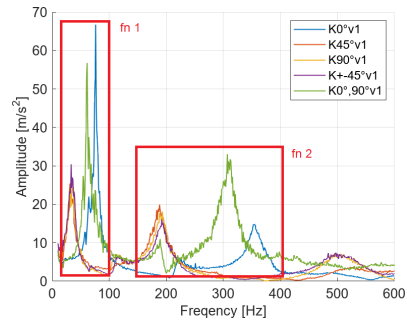
Obr. 2 Frekvenčná odozva pracovisko 1, uhlíková výstuž variant 2



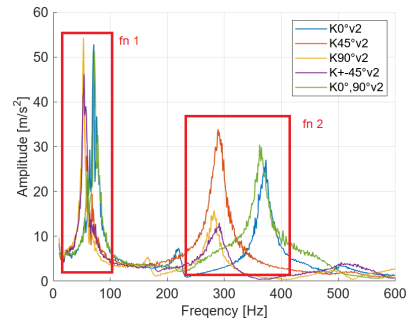
Obr. 3 Frekvenčná odozva pracovisko 1, sklenená výstuž variant 1



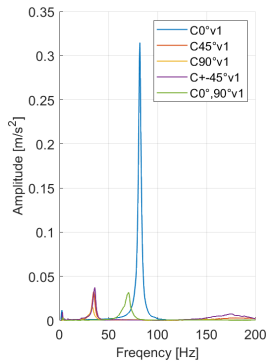
Obr. 4 Frekvenčná odozva pracovisko 1, sklenená výstuž variant 2



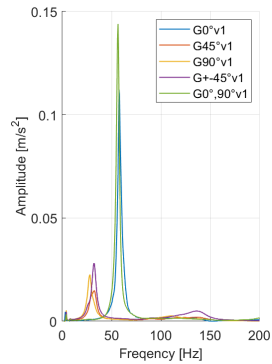
Obr. 5 Frekvenčná odozva pracovisko 1, kevlarova výstuž variant 1



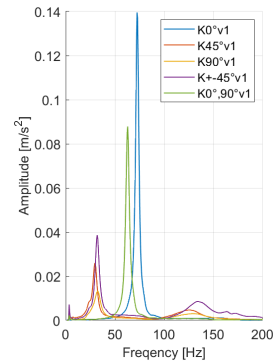
Obr. 6 Frekvenčná odozva pracovisko 1, kevlarova výstuž variant 2



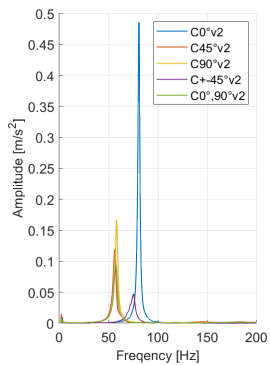
Obr. 7 Frekvenčná odozva pracovisko 2, uhlíková výstuž variant 1



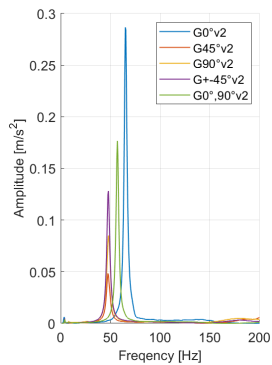
Obr. 8 Frekvenčná odozva pracovisko 2, sklenená výstuž variant 1



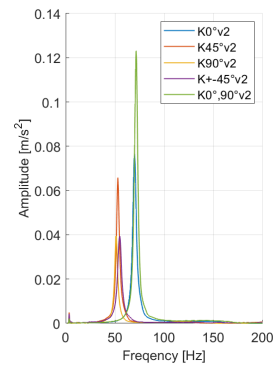
Obr. 9 Frekvenčná odozva pracovisko 2, kevlarova výstuž variant 1



Obr. 10 Frekvenčná odozva pracovisko 2, uhlíková výstuž variant 2



Obr. 11 Frekvenčná odozva pracovisko 2, sklenená výstuž variant 2

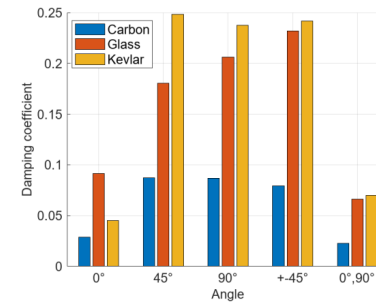


Obr. 12 Frekvenčná odozva pracovisko 2, kevlarova výstuž variant 2

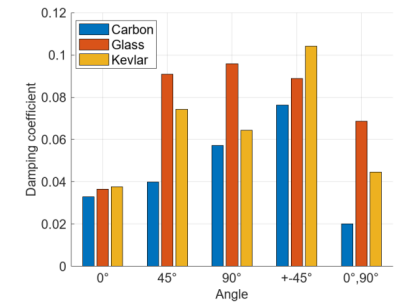
## DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Výsledky tlmenia sa líšili v závislosti od skúmaného variantu vzoriek a ich štruktúrnych konfigurácií, od použitého materiálu výstuže a aj od typu meracích zariadení.

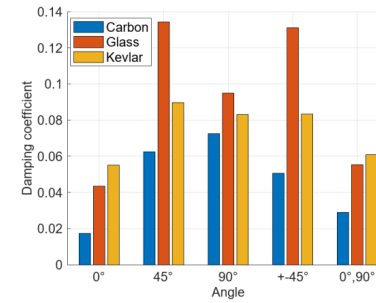
Z materiálového hľadiska dosiahli najväčšie hodnoty tlmiaceho koeficientu vzorky vystužené kevlarom (0,249), druhé najväčšie hodnoty tlmenia dosiahli vzorky vystužené sklom (0,232) a najmenšie hodnoty dosiahli vzorky vystužené uhlíkom (0,087). Na druhom pracovisku sme použitými meracími zariadeniami zistili menšie hodnoty tlmiaceho koeficientu pre všetky materiály a konfigurácie okrem jedného prípadu. Vo vzorkách vystužených uhlíkovými vláknami v 5. konfigurácii sme zistili vyššie tlmenie v prípade oboch variantov (s aj bez obvodových vláken). V ostatných prípadoch sú priebehy tlmenia voči jednotlivým konfiguráciám podobné ako priebehy zistené z meraní na prvom pracovisku. To znamená že najmenšie hodnoty tlmenia sú pri konfiguráciách 1 a 5 teda vzorky s výskytom pozdĺžnych vláken, v ostatných konfiguráciách sme zistili výrazne vyššie hodnoty (Obr. 13-18).



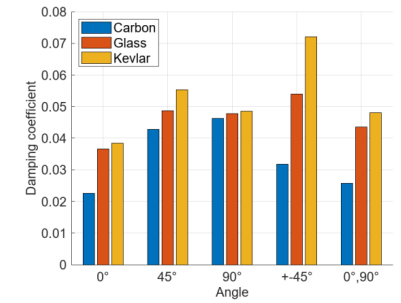
Obr. 13 Porovnanie koeficientu tlmenia, 1.vlastná frekvencia, variant 1



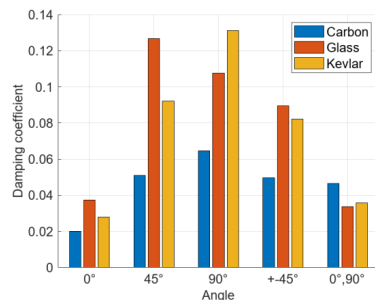
Obr. 14 Porovnanie koeficientu tlmenia, 1.vlastná frekvencia, variant 2



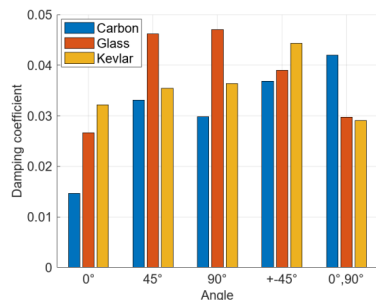
Obr. 15 Porovnanie koeficientu tlmenia, 2.vlastná frekvencia, variant 1



Obr. 16 Porovnanie koeficientu tlmenia, 2.vlastná frekvencia, variant 2



Obr. 17 Porovnanie tlmenia, pracovisko 2 variant 1



Obr. 18 Porovnanie tlmenia, pracovisko 2 variant 2

Pre vyjadrenie miery tlmenia spôsobeného kvalitou prílnavosti vrstiev na základe vzťahu (1a) je potrebné určiť stratový koeficient  $\tan \delta$ . Ten môžeme vyjadriť na základe poklesu amplitúdy z časového priebehu kmitania tzv. Logaritmický pokles (logaritmický pokles). Tlmenie pomocou tejto metódy môžeme vyjadriť vzťahom (6).

$$d = \frac{1}{n} \ln \frac{x_1}{x_{n+1}} \quad (6)$$

Kde:  $n$  - počet vrcholov amplitúdy v časovom priebehu,  $x_1 - x_{n+1}$  - hodnoty amplitúdy jednotlivých vrcholov.

Hodnoty logaritmického poklesu pre jednotlivé zložky kompozitu sme vyjadrili z odvodeného vzťahu, ktorý vyjadruje závislosť logaritmického poklesu a koeficientu tlmenia (7 a). Pre malé hodnoty tlmenia je možné použiť aj prepočtové vzťahy (8).

$$\zeta = \frac{d}{\sqrt{4\pi^2 + d^2}} \quad (7 a)$$

Po úprave:

$$d = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (7 b)$$

$$\tan \delta = \eta = \frac{d}{\pi} = 2\zeta \quad (8)$$

Kde:  $\tan \delta$  a  $\eta$  - stratový koeficient,  $d$  - logaritmický pokles  $\zeta$  - koeficient tlmenia

Zo vzťahu (7 b) sme vyjadrili logaritmický pokles pre Onyx 0,6315, pre uhlíkové vlákno 0,0534, pre sklenené vlákno 0,0754 a pre kevlarové vlákno 0,1414. Tieto hodnoty sú použité ako vstupy do výpočtu podielu tlmenia spôsobeného kvalitou prílnavosti. Porovnaním týchto hodnôt s nameranými hodnotami stratového koeficientu môžeme vyjadriť percentuálnu mieru tlmenia spôsobeného adhéziou k celkovému tlmeniu. Toto porovnanie je znázornené v

Tabuľka a

Tabuľka .

Tabuľka 1 Stratový koeficient, variant 1

Variant 1	Uhlíkové vlákna			Sklenené vlákna			Kevlarové vlákna		
	$\eta_{comp}$	$\eta_{in}$	$\eta_{in}/\eta_{comp}$	$\eta_{comp}$	$\eta_{in}$	$\eta_{in}/\eta_{comp}$	$\eta_{comp}$	$\eta_{in}$	$\eta_{in}/\eta_{comp}$
0°	0,201	0,137	68 %	0,357	0,25	70 %	0,36	0,204	56 %
45°	0,438	0,374	85 %	0,932	0,825	88 %	0,582	0,425	73 %
90°	0,419	0,356	84 %	0,645	0,538	83 %	0,569	0,413	72 %
±45°	0,455	0,392	86 %	0,684	0,577	84 %	0,176	0,019	10 %
0°, 90°	0,371	0,307	82 %	0,429	0,322	75 %	0,399	0,242	60 %

Tabuľka 2 Stratový koeficient, variant 2

Variant 2	Uhlíkové vlákna			Sklenené vlákna			Kevlarové vlákna		
	$\eta_{comp}$	$\eta_{in}$	$\eta_{in}/\eta_{comp}$	$\eta_{comp}$	$\eta_{in}$	$\eta_{in}/\eta_{comp}$	$\eta_{comp}$	$\eta_{in}$	$\eta_{in}/\eta_{comp}$
0°	0,207	0,143	69 %	0,598	0,492	82 %	0,498	0,342	68 %
45°	0,435	0,372	85 %	0,628	0,521	82 %	0,561	0,404	72 %
90°	0,351	0,287	81 %	0,468	0,361	77 %	0,458	0,301	65 %
±45°	0,43	0,367	85 %	0,465	0,358	77 %	0,47	0,314	66 %
0°, 90°	0,35	0,286	81 %	0,411	0,304	73 %	0,533	0,376	70 %

Realizovali sme aj experiment s votknutou vzorkou v troch rôznych miestach. V prvom upnutí bola vzorka vysunutá 80 mm v druhom upnutí 155 mm a v treťom upnutí 260 mm (Obr. -21).



Obr. 19 Upnutie 1, vysunutie 80 mm



Obr. 20 Upnutie 2, vysunutie 155 mm



Obr. 21 Upnutie 3, vysunutie 260 mm

Rôzna dĺžka vysunutia vzorky spôsobí to, že pri vychýlení z rovnovážnej polohy začne vzorka kmitať s rôznou frekvenciou. Vyhodnotenie tlmiaceho koeficientu pri týchto frekvenciách nám pomôže určiť druh tlmenia charakteristický pre danú štruktúru. Pri tomto type experimentu je vhodné brať do úvahy aj odpor prostredia, ktorý pôsobí proti pohybu vzorky. Tento odpor môžeme vyjadriť ako silu závislú od hustoty prostredia, od veľkosti pohybujúcej sa plochy a od jej rýchlosti (9). Keďže meraním zaznamenávame zrýchlenia, ich integráciou v časovom intervale jednej periódy (11) získame rýchlosť (10). Dosadením daných hodnôt do rovnice (9) vyjadríme silu ekvivalentnú odporu prostredia.

$$F_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (9)$$

$$v = \int_0^T a_{max} \cdot dt \quad (10)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (11)$$

Kde:  $\rho$  - hustota vzduchu,  $S$  - plocha kmitajúcej časti vzorky,  $v$  - rýchlosť kmitania,  $T$  - perióda kmitania,  $f$  - frekvencia kmitania.

Priemerné hodnoty odporu prostredia pre jednotlivé dĺžky vysunutia vzorky sú nasledovné:

- Vysunutie 80 mm: 0,001755 N
- Vysunutie 155 mm: 0,004434 N
- Vysunutie 260 mm: 0,001944 N

Z uvedených výsledkov vyplýva, že najväčší odpor prostredia vzniká pri druhom upnutí. Pri porovnaní tejto sily s tiažovou silou akcelerometra (4,8 g), je odpor prostredia ekvivalentný 9,4% tiažovej sily akcelerometra.

Prvým upnutím sa podarilo vybudovať rezonančnú frekvenciu v intervale od 38,9 Hz do 112,6 Hz, pri druhom upnutí sa vybudila frekvencia v intervale od 13,3 Hz do 33,8 Hz a v treťom upnutí sa podarilo vybudovať frekvencie v intervale od 4 Hz do 14,3 Hz.

Porovnaním jednotlivých materiálov výstuže variantu 1, pre prvé upnutie, môžeme pozorovať že vzorky so sklenenými vláknami dosahujú najvyššie tlmenie v konfigurácii 1 (0,0441), v konfigurácii 2 (0,0903), v konfigurácii 3 (0,1041) a v konfigurácii 5 (0,1182). Vo 4. konfigurácii bolo najväčšie tlmenie zistené vo vzorke vystuženej kevlarovým vláknom (0,16) (Obr. ).

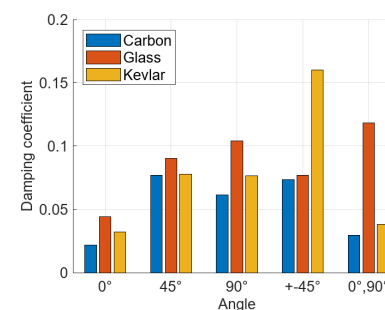
V druhom upnutí sme najväčšie tlmenie pozorovali v 1. konfigurácii (0,0597), 3. konfigurácii (0,1411), 4. konfigurácii (0,1622) a 5. konfigurácii (0,0719) s kevlarovou výstužou a v 2. konfigurácii so sklenenou výstužou (0,1802) (Obr. ).

V treťom upnutí sme pozorovali maximálne tlmenie vo vzorkách vystuženými sklenenými vláknami v 1. konfigurácii (0,1231), 2. konfigurácii (0,2633), 4. konfigurácii (0,2833) a v 5. konfigurácii (0,1536). V 3. konfigurácii je maximálne tlmenie opäť vo vzorke vystuženej kevlarom (0,2781) (Obr. ).

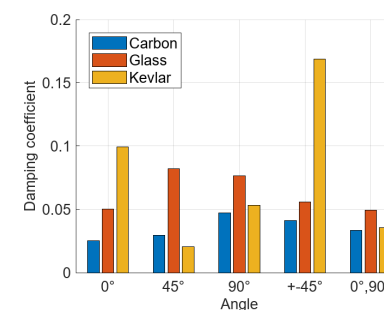
V druhom variante vzoriek (s obvodovou výstužou) môžeme pozorovať maximálne hodnoty koeficientu tlmenia pre 1. upnutie vo vzorkách vystužených kevlarom v konfigurácii 1 (0,0993), a konfigurácii 4 (0,1688). V konfiguráciách 2 (0,0821), 3 (0,0766) a 5 (0,0492) dosiahli najväčšie tlmenie vzorky vystužené skleneným vláknom (Obr. ).

Maximálne hodnoty v druhom upnutí dosiahli vzorky vystužené kevlarom v konfiguráciách 3 (0,0858), 4 (0,0850) a 5 (0,0640). A vzorky vystužené sklom v konfiguráciách 1 (0,0654) a 2 (0,0793) (Obr. ).

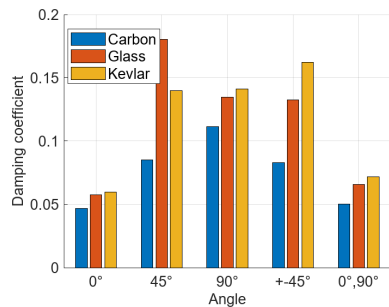
A v treťom upnutí dosiahli kevlarom vystužené vzorky maximálne hodnoty tlmenia v konfiguráciách 4 (0,1868) a 5 (0,1322). A vzorky vystužené sklom majú maximálne hodnoty v konfiguráciách 1 (0,1339), 2 (0,1906) a 3 (0,1859) (Obr. 27 ).



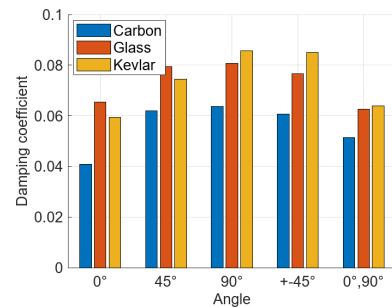
Obr. 22 Porovnanie materiálov výstuže, upnutie 1 variant 1



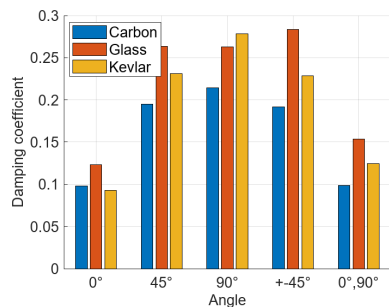
Obr. 23 Porovnanie materiálov výstuže, upnutie 1 variant 2



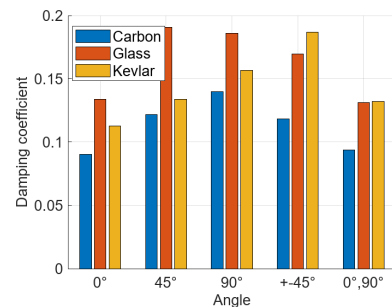
Obr. 24 Porovnanie materiálov výstuže, upnutie 2 variant 1



Obr. 25 Porovnanie materiálov výstuže, upnutie 2 variant 2



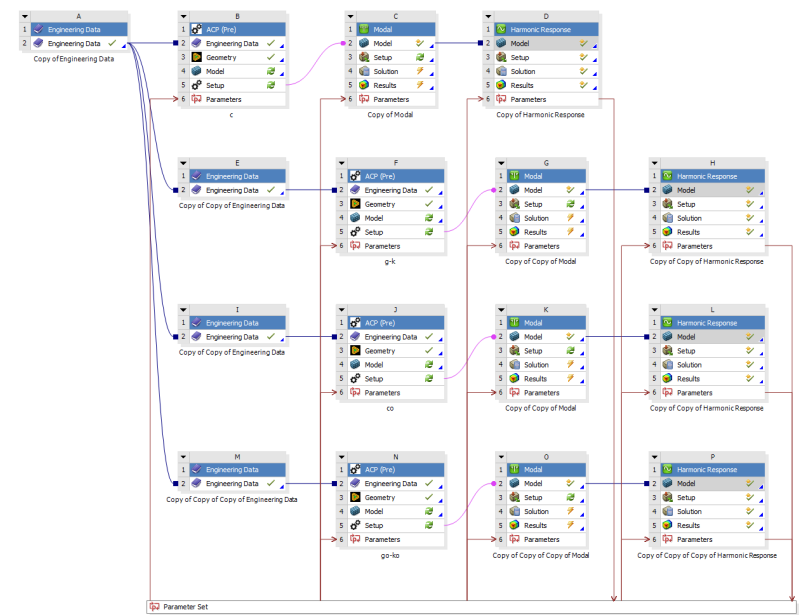
Obr. 26 Porovnanie materiálov výstuže, upnutie 3 variant 1



Obr. 27 Porovnanie materiálov výstuže, upnutie 3 variant 2

Pre vzorky s obvodovými vláknami (variant 2) sme zaznamenali u všetkých upnutiach pokles hodnôt tlmenia. Pre vzorky vystužené uhlíkovými vláknami sú hodnoty tlmenia vo variante 2 nižšie v priemere o 33% v 1. upnutí, 26% v 2. upnutí a 29% v 3. upnutí. Pri sklenenej výstuži dosiahli vzorky druhého variantu nižšie hodnoty v priemere o 28% pre 1. upnutie, 36% pre 2. upnutie a 25% pre 3. upnutie. Vzorky vystužené kevlarom dosiahli nižšie hodnoty v 2. variante priemerne o 2% v 1. upnutí, 36% v 2. upnutí a 24% v 3. upnutí.

Pre overenie výsledkov sme vykonali aj numerickú analýzu v softvéri ANSYS Workbench. Ako vstupné dáta pre simuláciu sme použili výsledky experimentov a materiálové vlastnosti jednotlivých zložiek kompozitu (Tabuľka 3 a Tabuľka 4). Cieľom bolo porovnať frekvenčnú odozvu experimentu voči simulácií. **Na Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** je možné vidieť schému projektu, ktorá sa skladá z modulu ACP (Ansys Composite Pre-postprocessing) a riešičov pre modálnu a frekvenčnú analýzu.



Obr. 28 Schéma projektu

Tabuľka 3 Materiálové vlastnosti výstužných vláken

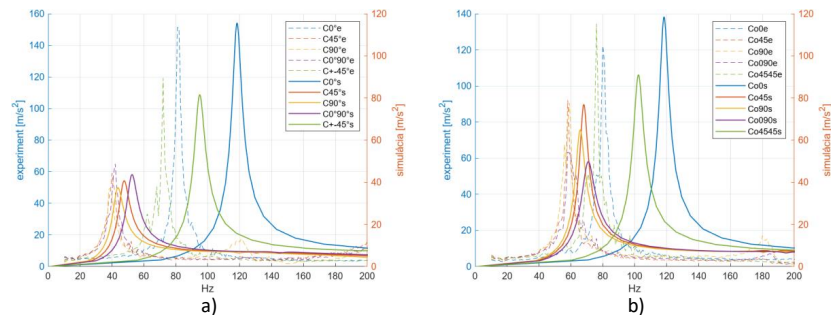
Materiálové vlastnosti	Jedn.	Uhlíkové vlákno	Sklenené vlákno	Kevlarové vlákno
Youngov modul pružnosti 0°	GPa	135	40	75
Youngov modul pružnosti 90°	GPa	10	8	6
Rovinný modul v šmyku	GPa	5	4	2
Poasonovo číslo	-	0,3	0,25	0,34
Maximálna medza v ťahu 0°	MPa	1500	1000	1300
Maximálna medza v tlaku 0°	MPa	1200	600	280
Maximálna medza v ťahu 90°	MPa	50	30	30
Maximálna medza v tlaku 90°	MPa	250	110	140
Maximálna medza v šmyku	MPa	70	40	60
Maximálna ťahová deformácia 0°	%	1,05	2,5	1,7
Maximálna ťahová deformácia 90°	%	0,85	1,5	0,35
Maximálna ťahová deformácia 90°	%	0,5	0,35	0,5
Maximálna tlaková deformácia 90°	%	2,5	1,35	2,3
Maximálna šmyková deformácia	%	1,4	1	3
Hustota	[Kg/m³]	1600	1900	1400
Koeficient tlmenia	-	0,01	0,012	0,015

Tabuľka 4 Materiálové vlastnosti matrice

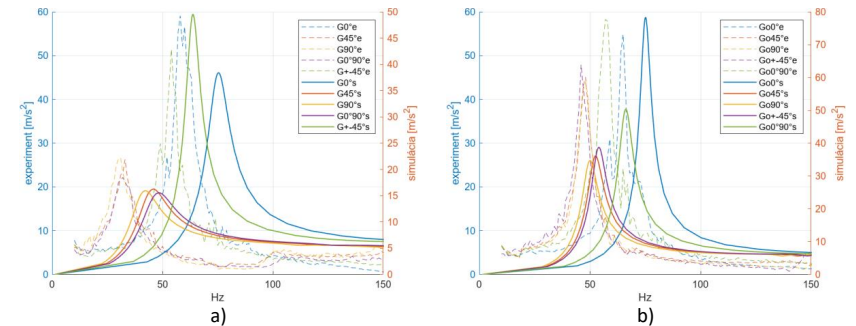
Materiálové vlastnosti	Jednotky	Onix
Youngov modul pružnosti	[GPa]	2,4
Napätie na medzi pružnosti	[MPa]	40
Napätie pri pretrhnutí	[MPa]	37
Maximálna ťahová deformácia	[%]	25
Ohybová pevnosť	[MPa]	71
Ohybový modul pružnosti	[GPa]	3
Hustota	[Kg/m <sup>3</sup> ]	1200
Koeficient tlmenia	-	0,1

Do jednotlivých modulov ACP vstupujú premenné parametre, ktoré zabezpečujú zmenu orientácie výstužných vlákien a ich materiálové vlastnosti. Keďže materiály výstuže sklo a kevlar majú definovanú menšiu hrúbku a vyšší počet vrstiev, bolo vhodné tieto modely vytvoriť v samostatných moduloch, pretože bolo jednoduchšie definovať len parametre orientácie vlákien ako definovať parametrami rôzny počet vrstiev. Takisto varianty s obvodovými vláknami sú riešené v samostatných moduloch, pretože majú odlišnú geometriu.

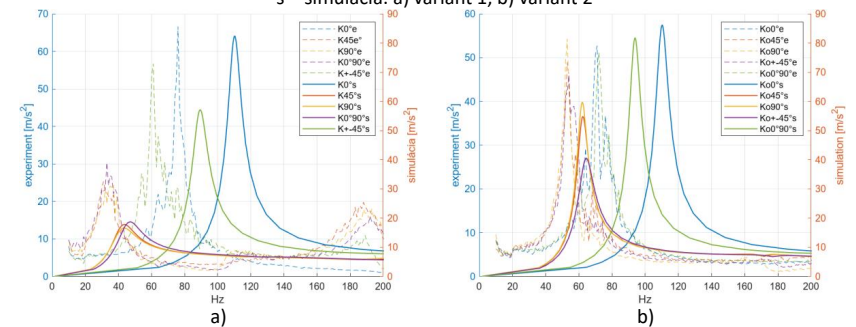
Získané dáta sme porovnali s výsledkami experimentu a pozorovali sme podobnú zmenu frekvenčnej odozvy naprieč všetkými konfiguráciami a variantami usporiadania vlákien. Na Obr. -31 je možné vidieť porovnanie jednotlivých frekvenčných odoziev v oblasti prvej vlastnej frekvencie. Dáta vyznačené prerušovanou čiarou zodpovedajú experimentálnym dátam (stupnica naľavo) a dáta znázornené plnou čiarou sú získané zo simulácií (stupnica vpravo). Okrem podobnosti dát v relatívnom rozložení hodnôt vlastných frekvencií je možné pozorovať aj odlišnosti vo veľkosti amplitúd a vo frekvenčnom posunutí. Tieto odlišnosti môžu byť spôsobené rôznou budiacou silou pri každom meraní a komplexnosťou reálnej štruktúry vzoriek. Simulácia je do značnej miery idealizovaná, pretože do nej nevstupujú dáta o výskyte štruktúrnych porúch a dutínach, ktoré sa môžu vyskytnúť pri 3D tlači.



Obr. 29 Porovnanie dát vzoriek s uhlíkovými vláknami, e – experiment, s – simulácia: a) variant 1, b) variant 2



Obr. 30 Porovnanie dát vzoriek so sklenenými vláknami, e – experiment, s – simulácia: a) variant 1, b) variant 2



Obr. 31 Porovnanie dát vzoriek s kevlarovými vláknami, e – experiment, s – simulácia: a) variant 1, b) variant 2

## PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRE PRAX

Výsledky tejto práce poskytujú detailné informácie o dynamických vlastnostiach kompozitných materiálov, čo umožňuje inžinierom optimalizovať dizajn kompozitných komponentov tak, aby dosiahli lepšie tlmenie vibrácií a zvýšenie životnosti. Optimalizácia dizajnu prispieva k efektívnejšiemu využitiu materiálov a zníženiu nákladov na výrobu a údržbu. Práca poskytuje numerické modely a experimentálne údaje, ktoré môžu byť použité na predikciu správania kompozitov v reálnych podmienkach. Táto schopnosť predikcie je kľúčová pri návrhu nových produktov a pri hodnotení ich spoľahlivosti a bezpečnosti.

## RESUME

This dissertation focused on the internal damping of composite materials, with an focus on interfacial damping and its effect on the dynamic and mechanical properties of these materials. The aim was to gain a deeper understanding of the damping mechanisms and to assess which internal structure of the specimens achieves the greatest damping.

The results show that the orientation of the reinforcing fibers significantly affects the damping. The highest values of internal damping were found for fiber orientations of 45°, 90° and ±45°. From a material point of view, the specimens reinforced with glass and Kevlar fibres achieved better damping than the specimens with carbon fibres.



The calculations also showed that the quality of adhesion at the interface of the composite layers has an important role in the damping. The average value of the proportion of damping caused by adhesion is 74%, the rest is due to other mechanisms such as external environmental damping and viscoelastic losses.

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Gu, W.; Lu, G.Q.; Wu, H.F. et al. Nondestructive Characterization of Fiber-Matrix Adhesion in Composites by Vibration Damp-ing. MRS Online Proceedings Library (1995) Vol. 385, pp. 33–39. <https://doi.org/10.1557/PROC-385-33>
- [2] Zorowski C.F. and Murayama T., Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Society of Materials Science, Kyoto, Japan (1972).
- [3] Lurie S.; On the possible of the abnormally high damping effective properties of dispersion-reinforced composites and fibrous composites. Journal of Physics: Conference Series (2020) Vol. 1666 012029, DOI 10.1088/1742-6596/1666/1/012029
- [4] Gusev A. A. and Lurie S. A. Loss Amplification Effect in Multiphase Materials with Viscoelastic Interfaces. Macromolecules (2009) Vol. 42 pp. 5372–5377, DOI: 10.1021/ma900426v
- [5] Sain T.; Meaud J.; Hulbert G.; Arruda E. M. and Waas A. M. Simultaneously high stiffness and damping in a class of wavy layered composites Composite Structures (2013) Vol. 101, pp. 104–110 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.024>
- [6] Meaud J.; Sain T.; Hulbert G. M. and Waas A. M. Analysis and optimal design of layered composites with high stiffness and high damping International Journal of Solids and Structures (2013) Vol. 50, Issue 9, pp. 1342–1353 <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.01.014>
- [7] Nuriddinov B.; Karimov I.; Namozov J.; Ismoilova Z. and Ibragimova D. Energy dissipation under natural vibrations of viscoelastic composite cylindrical shells. E3S Web Conf. (2023) Vol. 419 01004 DOI: 10.1051/e3sconf/202341901004
- [8] Safarov I. I.; Teshaev M. Kh.; Marasulov A. M. and Nuriddinov B. Z. Propagation of Own Non-Axisymmetric Waves in Viscoelastic Three-Layered Cylindrical Shells. Engineering Journal (2021) Vol. 25 (7), pp. 97-107. DOI: [10.4186/ej.2021.25.7.97](https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.7.97)
- [9] Pei X.; Chen L.; Gao Y.; Li J. and Tang Y. Effect of reinforcement structures on vibration performance of composites. Journal of Composite Materials (2017) Vol. 51 (22). <https://doi.org/10.1177/0021998316689602>
- [10] Kurzina, E. G.; Kolmakov, A.G.; Bepal'ko, S.V. et al. Influence of Structure on the Dynamic Properties of Polymer Damping Composite Materials. Russian Metallurgy (2021), Vol. 2021, pp. 1294–1298. <https://doi.org/10.1134/S0036029521100189>
- [11] Zhang, B.; Li, Z.; Wu, H. et al. Research on damping performance and strength of the composite laminate. Scientific Reports (2021) Vol. 11, 18281. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97933-w>
- [12] Hadji H.; Assarar M.; Zouari W.; Pierre F.; Behlouli K. et al. Damping analysis of nonwoven natural fibre-reinforced polypropylene composites used in automotive interior parts. Polymer Testing, (2020), Vol. 89, pp.106692 [10.1016/j.polymertesting.2020.106692](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106692) hal-03338540
- [13] Bennet C.; Rajini N.; Jappes JT. W.; Siva I.; Sreenivasan VS. and Amico SC. Effect of the stacking sequence on vibrational behavior of Sansevieria cylindrica/coconut sheath polyester hybrid composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites (2015) Vol. 34 (4), DOI: 10.1177/0731684415570683
- [14] Kishi H.; Kuwata M.; Matsuda S.; Asami T.; Murakami A. Damping properties of thermoplastic-elastomer interleaved carbon fiber-reinforced epoxy composites. Composites science and technology (2004) Vol. 64 pp. 2517-2523. DOI: [10.1016/j.compscitech.2004.05.006](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.05.006)
- [15] Zapoměl J.; Dekýš V.; Ferfecký P.; Sapietová A.; Sága M.; Žmindák M. Identification of Material Damping of a Carbon Composite Bar and Study of Its Effect on Attenuation of Its Transient Lateral Vibrations. International Journal of Applied Mechanics (2015) Vol. 7, DOI: 10.1142/S1758825115500817
- [16] Li Y.; Cai S.; Huang X. Multi-scaled enhancement of damping property for carbon fiber reinforced composites. Composites Science and Technology (2017) Vol. 143, pp. 89-97. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.03.008
- [17] Tuan D. N.; Kashani A.; Imbalzano G.; Nguyen K. T.Q.; Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering (2018) Vol.143, pp. 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [18] Kabir S. M. F.; Mathur K.; Seyam A. M. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. Composite Structures (2020) Vol. 232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>.
- [19] Bárnik F.; Vaško M.; Handrik M.; Dorčiak F.; Majko J. Comparing mechanical properties of composites structures on Onyx base with different density and shape of fill. Transportation Research Procedia (2019) Vol. 40, pp. 616-622. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.088>
- [20] Martulli L. M.; Ruiz P. B.; Rajan A.; Bárnik F.; Sága M.; Bernasconi A. Infill shape effects on bending stiffness of additively manufactured short fibre reinforced polymer sandwich specimens. Journal of Reinforced Plastics and Composites (2021) Vol. 40(23-24), pp. 927-938. DOI: 10.1177/07316844211020115
- [21] Majko J. et al. FE modeling of continuous fiber reinforced thermoplastic composite structures produced by additive manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (2020). Vol. 776 012080 DOI 10.1088/1757-899X/776/1/012080
- [22] A. Gemant, Frictional Phenomena, Chemical Publishing, New York (1950).
- [23] Puškár, A.: Vnútročné tlmenie materiálov. Vysoká škola dopravy a spojov v Žiline-edičné stredisko VŠDS 1995. ISBN 80-7100-260-7.
- [24] C. Zener, Proc. Phys. Soc. 52, 152 (1940).
- [25] A. S. Nowick in Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity, STP 378, American Society for Testing and Materials, 21 (1965)
- [26] C. Zener, phys. Rev., 60, 906 (1941).
- [27] C. Zener, Elasticity and Anelasticity of Metals, Univ. Chicago Press, Chicago, Illinois, 167 (1948).
- [28] R. F. Gibson and R. Plunkett, Shock and Vib. Digest, 9 (2), 9 (1977).
- [29] R. F. Gibson and D. G. Wilson, Shock and Vib. Digest, 11 (10), 3 (1979).
- [30] Treviso A., Van Genechten B., Mundo D., Tournour M. Damping in composite materials: Properties and models. Composites Part B: Engineering 2015 Vol. 78, pp 144-152 <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.081>
- [31] Neumark S. a kol. Concept of complex stiffness applied to problems of oscillations with viscous and hysteretic damping. Tech. rep. London: ARC; 1962. R & M No.3269.
- [32] Crandall S. The role of damping in vibration theory. Journal of Sound and Vibration 1970. Vol. 11, (1), Pp 3-18 DOI 10.1016/S0022-460X(70)80105-5
- [33] Crandall SH. The Hysteretic Damping Model in Vibration Theory. Mechanical Engineering Science. 1991. Vol. 205(1) pp.23-28. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1991\_205\_086\_02
- [34] Pritz T. Frequency power law of material damping. Applied Acoustics 2004 Vol. 65, (11), Pp 1027-1036
- [35] Ungar E. E.; Kerwin E. M. Loss Factors of Viscoelastic Systems in Terms of Energy Concepts J. Acoust. Soc. Am. (2024) Vol. 155, Pp 915–929 [doi.org/10.1121/10.0024522](https://doi.org/10.1121/10.0024522)
- [36] Adams RD, Bacon DGC. Effect of Fibre Orientation and Laminate Geometry on the Dynamic Properties of CFRP. Journal of Composite Materials. 1973 Vol. 7(4) Pp 402-428. [doi:10.1177/002199837300700401](https://doi.org/10.1177/002199837300700401)

- [37] Berthelot J. M. Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz method. *Composite Structures* 2006, Vol. 74, (2), Pp 186-201, ISSN 0263-8223, doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.04.031.
- [38] Vasques C.M.A.; Moreira R.A.S.; Rodrigues J. D. Viscoelastic Damping Technologies–Part I: Modeling and Finite Element Implementation. *Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering* 2010 Vol.1 (2), pp. 76-95
- [39] Santosa F.; Symes W.W. A model for a composite with anisotropic dissipation by homogenization. *International Journal of Solids and Structures* 1989 Vol. 25 (4) Pp 381-392, ISSN 0020-7683, doi.org/10.1016/0020-7683(89)90054-1.
- [40] L. E. Nielson, *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, Vol. 2, Dekker, New York (1974).
- [41] Pengyi Dai a kol. Dynamic Analysis and Vibrations Research on Multi-Degree of Freedom Shear Structures. *Journal of Physics: Conference Series* 2021 DOI 10.1088/1742-6596/2206/1/012008
- [42] Sun P, Wang D. Comparison of damping parameters based on the half-power bandwidth methods of viscous and hysteretic damping models. *Journal of Vibration and Control*. 2023 Vol. 29(3-4) Pp 968-979. doi:10.1177/10775463211054646
- [43] Zhou, S.; Lai, Y.; Ma, J.; Liu, B.; Ni, N.; Dai, F.; Xu, Y.; Wang, Z.; Yang, X. Synchronous Improvement of Mechanical and Damping Properties of Structural Damping Composites with Polyetherimide Non-Woven Fabric Interlayers Loaded with Polydopamine and Carbon Nanotubes. *Polymers* 2023, Vol. 15, 3117. doi.org/10.3390/polym15143117
- [44] Ghadarah N. S.; Ayre D. A comparative analysis of acoustic emission sensor embedding in glass fibre composite. *Composites Science and Technology* 2024 Volume 247 ISSN 0266-3538, doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110392.
- [45] Chandra, R.; Singh, S. P.; Gupta, K1. Damping studies in fiber-reinforced composites—a review. *Composite structures*, 1999, 46.1: 41-51.
- [46] Greif, R.; Hebert, B. Experimental techniques for dynamic characterization of composite materials. *Advances in Experimental Mechanics and Biomimetics (ASME - 1992)*, AD-49/AMD-146:83-97
- [47] Tita, V.; Carvalho, J.D.; Lirani, J. A procedure to estimate the dynamic damped behavior of fiber reinforced composite beams submitted to flexural vibrations. *Materials research*, 2001, 4.4: 315-321.
- [48] Murčíňková, Z.: Výskum a vývoj kompozitných materiálov s pokročilými vlastnosťami s podporou numerických a experimentálnych metód. *Technická univerzita v Košiciach edícia Vedeckej a odbornej literatúry Strojníckej fakulty* 2020.
- [49] Greengard, L.; Rokhlin, V. A fast algorithm for particle simulations. *Journal of computational physics*, 1987, 73.2: 325-348.
- [50] Zhang, Y.M.; Sun, F.L.; Qu, W.Z.; Gu, Y., Young, D.L. A meshless average source boundary node method for steady-state heat conduction in general anisotropic media. *Computers & Mathematics with Applications*, 2018, 75.5: 1739-1755.
- [51] Rjasanow, S.; Weggler, L. Matrix valued adaptive cross approximation. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2017, 40.7: 2522-2531.
- [52] Wang, H.; Qin, Q.H. *Methods of Fundamental Solutions in Solid Mechanics*. Elsevier, 2019.
- [53] Buryachenko, V. A. Method of fundamental solutions in micromechanics of elastic random structure composites. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 124: 135-150.
- [54] Drvárová B.; Dekýš V.; Pijáková K. Effect of accelerometer mass on the natural frequencies of the measured structure. *Transportation Research Procedia* (2023) Vol. 74, pp. 740-747. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.205>
- [55] BOLCU, A., STANESCU, M.M., BOLCU, D., CIUCA, I., MIRITOIU, C.M., IVAN, M.A., Study of Composite Bar Damping from Dammar Hybrid Resin Reinforced with Natural Fibers, *Mater. Plast.*, 59(2), 2022, 100-110. doi.org/10.37358/MP.22.2.5589
- [56] Timoshenko S. *Vibration problems in engineering*, D. Van Nostrand Company, Inc. Second Edition fifth printing, 1937.
- [57] Michal P.; Paulec M.; Šavrnoch Z.; Vaško M, Modeling and analysis of composite plates and their implementation in transportation. *Transportation Research Procedia* (2023) Vol. 74, pp. 600-607. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.187>.

## ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ

V3001 Structural design and safety verification of a service hatch used at airports by FEM analysis / Jakub Fiačan ... [et al.]. In: *Infrastructures*. - Bazilej : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. - [online]. - ISSN 2412-3811 (online). - Roč. 8, č. 4 (2023), s. [1-12] [online]. Zараденé v: SCOPUS ; Web of Science Core Collection [Fiačan Jakub (25%) - Jenis Jozef (25%) - Čechmánek Damián (25%) - Hrček Slavomír (15%) - Michal Pavol (10%)] [anonymné recenzné konanie]

ADF001 Modelovanie a analýza tenkých vrstvených kompozitných dosiek vystužených uhlíkovými vláknami = Modelling and analysis of thin layered composite boards reinforced with carbon fibres / Pavol Michal ... [et al.]. In: *Technológ*. - Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2009. - [print, online, USB-key]. - ISSN 1337-8996. - Roč. 13, č. 4 (2021), s. 11-14 [print]. [Michal Pavol (25%) - Paulec Michal (25%) - Šavrnoch Zdenko (25%) - Vaško Milan (25%)] [recenzované]

ADF002 Návrh brzdového systému automobilu = Design of a braking system of the vehicle, 1 st part: Dynamic load of axles and braking distance. 1. časť : Dynamické zaťaženie náprav a brzdná dráha vozidla / Zdenko Šavrnoch ... [et al.]. In: *Technológ*. - Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2009. - [print, online, USB-key]. - ISSN 1337-8996. - Roč. 13, č. 4 (2021), s. 24-27 [print]. [Šavrnoch Zdenko (20%) - Sapietová Alžbeta (20%) - Paulec Michal (20%) - Michal Pavol (20%) - Gavlas Martin (20%)] [recenzované]

ADF003 Vplyv mechanických a tepelných cyklov na životnosť nástrojovej ocele 1.2714 = Effect of mechanical and thermal cycle on life tool steel 1.2714 / Milan Sága ... [et al.]. In: *Technológ*. - Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2009. - [print, online, USB-key]. - ISSN 1337-8996. - Roč. 13, č. 4 (2021), s. 20-23 [print]. [Sága Milan (20%) - Paulec Michal (20%) - Kopas Peter (20%) - Michal Pavol (20%) - Šavrnoch Zdenko (20%)] [recenzované]

"The Impact of Internal Structure Changes on the Damping Properties of 3D-Printed Composite Material". Pavol Michal, Milan Vaško, Milan Sapieta, Jaroslav Majko, and Jakub Fiačan. 2024. *Applied Sciences* 14, no. 13: 5701. <https://doi.org/10.3390/app14135701>