



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

REZONANČNÍ A ÚTLUMOVÉ CHARAKTERISTIKY MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING

RESONANCE AND DAMPING BEHAVIOR OF LATTICE STRUCTURES PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Lagiň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Adam Lagiň**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Rezonanční a útlumové charakteristiky mikro–prutových struktur vyrobených technologií Selective Laser Melting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V mnoha aplikacích je tlumení žádoucí vlastností, zejména pak v případě požadavků na ovlivnění dynamické odezvy komponenty. Neméně důležité jsou i rezonanční vlastnosti v případě požadavků na minimální či maximální vlastní frekvence komponenty při současné redukci hmotnosti. Použití mikro–prutových struktur pro odlehčení dílů je jednou ze stále častěji využívaných výhod aditivních technologií, avšak rezonanční a útlumové charakteristiky těchto struktur a jejich závislost na parametrech struktury nejsou dosud dostatečně prozkoumány.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je popsat vlastní frekvence a útlumové charakteristiky alespoň 3 typů vybraných mikro–prutových struktur vyrobených technologií SLM.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analyzovat současný stav poznání a vybrat vhodné struktury a jejich parametry k testování,
- navrhnout testovací tělesa a experimentální postup,
- vytvořit zjednodušený výpočtový model pro predikci vlastních frekvencí testovacích těles,
- experimentálně stanovit vlastní frekvence a útlum vybraných typů struktur,
- ověřit shodu výpočtového modelu a experimentů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

ROSA, Francesco, Stefano MANZONI a Riccardo CASATI. Damping behavior of 316L lattice structures produced by Selective Laser Melting. *Materials & Design*. 2018, 160, 1010-1018. ISSN 02641275. DOI:10.1016/j.matdes.2018.10.035

FIOCCHI, Jacopo, Carlo Alberto BIFFI, Diego SCACCABAROZZI, Bortolino SAGGIN a Ausonio TUISSI. Enhancement of the Damping Behavior of Ti6Al4 V Alloy through the Use of Trabecular Structure Produced by Selective Laser Melting. *Advanced Engineering Materials*. 2019, 22(2), 1-6. ISSN 1438-1656. DOI:10.1002/adem.201900722

COLOMBO, Chiara, Carlo A. BIFFI, Jacopo FIOCCHI, Diego SCACCABAROZZI, Bartolino SAGGIN, Ausonio TUISSI a Laura M. VERGANI. Modulating the damping capacity of SLMed AISi10Mg through stress-relieving thermal treatments. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020, 107. ISSN 01678442. DOI:10.1016/j.tafmec.2020.102537

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V reakcii na rastúci trend aditívnej výroby odľahčených a štruktúrovaných súčastí z kovu, sa táto diplomová práca venuje rezonančným a útlmovým charakteristikám mikro-prútvých štruktúr vyrobených technológiou Selective Laser Melting (SLM). Mikro-prútvé štruktúry už preukázali rôzne možnosti optimalizácie dielov, preto bolo možné predpokladať podobnú príležitosť aj pri úprave vlastných frekvencií a útlmu vibrácií. Za účelom určovania týchto charakteristík boli použité rôzne varianty zjednodušených prútvých a referenčných objemových konečno-prvkových výpočtov. Tieto dáta boli overené experimentálne, impulznou modálnou analýzou. Sekundárne experimenty vzájomne zjednotili materiálové a mechanické charakteristiky skutočných a simulovaných vzoriek. Vyšetrované bolo správanie rezonancie a útlmu troch typov štruktúr pri rôznych kombináciách ich základných parametrov. Výsledky týmto dokazujú, či už numericky, alebo experimentálne, zmenu vlastných frekvencií a pomerného útlmu po úprave priemeru prútvov, veľkosti základnej bunky alebo geometrického usporiadania prútvov. Práca tiež prezentuje úspešný spôsob optimalizácie prútvého výpočtového modelu tak, aby bola zaručená jeho presnosť na širokom rozsahu testovaných vzoriek. Novonadobudnuté vedomosti teda vytvárajú ucelený prehľad o možnostiach optimalizácie mikro-prútvých štruktúr za účelom cieleného návrhu odľahčených dielov s požadovanou vlastnou frekvenciou a útlmom.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Selective Laser Melting, vlastné frekvencie, útlm, mikro-prútvé štruktúry

ABSTRACT

In reaction to the uptrend of additive manufacturing of lightweight structured metallic parts, this diploma thesis is focused on the resonant and damping behavior of micro-truss lattices produced by Selective Laser Melting (SLM) technology. Micro-truss structures already found usage in various types of optimizations. Therefore, the optimization of resonance or damping could be also assumed as possible. For this purpose, several finite element analysis approaches were used, including the referent solid element model and simplified beam models. Obtained results were verified experimentally via pulse modal analysis. Material and mechanical properties of samples for FEA results and experimental results comparison were unified through secondary experiments. The main goal of this research was to explore the behavior of resonance and damping of structures when their elementary parameters are changed. The results from both, numerical and experimental approaches confirm that the eigenfrequency and the damping ratio of the structure can be affected by the change in the truss diameter, cell size, or type of structure. The work also presents the successful methods for simplified beam model optimization, which guarantees its high precision in the wide field of tested samples. This newly obtained knowledge creates a comprehensive overview of micro-truss structures, which can be used for the conscious design of ultra-light parts with the required eigenfrequency and damping ratio.

KEYWORDS

Selective Laser Melting, eigenfrequencies, damping, micro-truss structures

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

LAGIŇ, Adam. *Rezonanční a útlumové charakteristiky mikro–prutových struktur vyrobených technologií Selective Laser Melting*. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139911>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce: Daniel Koutný.

POĎAKOVANIE

Poďakovanie patrí vedúcemu diplomovej práce pánovi Koutnému a taktiež pánovi Klapkovi a pánovi Červinkovi za pomoc pri experimentálnej časti práce. Najvýznamnejšiu vďaku si zaslúži rodina spolu s najbližšími za podporu pri štúdiu.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing Daniela Koutného, Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne odcitované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	17
2.1	Rešeršné metódy	17
2.2	Kritická rešerš	18
2.2.1	Mikro-prúťové štruktúry a ich základné vlastnosti	18
2.2.2	Vplyv technológie SLM na geometriu a mechanické vlastnosti mikro-prúťových štruktúr	19
2.2.3	Rezonančné a útlmové charakteristiky a ich definícia	21
2.2.4	Vibračno-dynamické charakteristiky mikro-prúťových štruktúr	24
2.3	Zhrnutie hlavných zistení	31
2.4	Medzera v poznaní	32
3	CIELE PRÁCE	33
3.1	Výskumné otázky	33
3.2	Ciele výskumu	33
3.3	Hypotézy	34
4	MATERIÁL A METÓDY	35
4.1	Metodika	35
4.2	Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie	36
4.3	Materiál a testovacie podmienky	37
4.3.1	Voľba typov štruktúr a rozsahu ich parametrov	37
4.3.2	Testovacie podmienky impulznej modálnej analýzy	40
4.4	Primárne metódy	42
4.4.1	Určovanie vlastnej frekvencie modálnou analýzou	42
4.4.2	Určovanie pomerného útlmu modálnou analýzou	43
4.4.3	Overenie výpočtových modelov a ich úpravy	46
4.5	Sekundárne metódy	47
4.5.1	Meranie hustoty Archimedovým zákonom	47
4.5.2	Určovanie tuhosti materiálu tlakovou skúškou	48
4.5.3	Meranie skutočnej geometrie 3D skenovaním	49
4.6	Testované predikcie	50
5	VÝSLEDKY	51

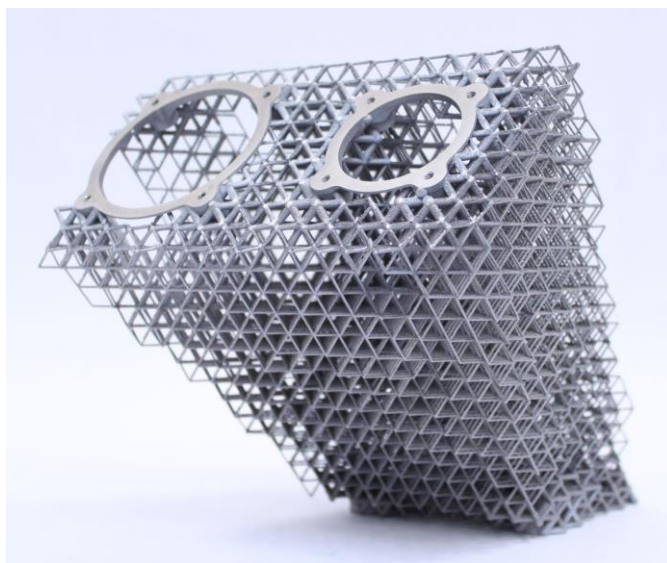
5.1	Numerická modálna analýza – overenie dostupného riešenia zjednodušeného prúťového MKP modelu	51
5.1.1	Referenčný objemový model	51
5.1.2	Prúťový model – bez optimalizácie	54
5.1.3	Prúťový model – overenie dostupnej optimalizácie	55
5.2	Numerická modálna analýza – návrh a overenie vlastnej optimalizácie zjednodušeného prúťového MKP modelu	56
5.2.1	Ovplyvnenie hmotnosti prúťovými elementami	56
5.2.2	Ovplyvnenie tuhosti prúťovými elementami	57
5.2.3	Návrh vlastnej optimalizácie	59
5.3	Sekundárne experimenty – implementácia skutočných vlastností vzoriek do MKP výpočtu	62
5.3.1	Hustota materiálu – Archimedov zákon	62
5.3.2	Skutočná geometria – 3D skenovanie	65
5.3.3	Tuhosť materiálu – Tlaková skúška	68
5.3.4	Implementácia skutočných vlastností vzoriek do zjednodušeného výpočtového modelu	68
5.4	Experimentálna modálna analýza	71
5.4.1	Rezonančné vlastnosti	71
5.4.2	Útlmové vlastnosti	73
5.5	Porovnanie experimentálne a numericky zistených rezonančných vlastností	77
6	DISKUSIA	80
6.1	Interpretácia výsledkov	80
6.1.1	Zjednodušený prúťový model	80
6.1.2	Skutočné materiálové a mechanické charakteristiky vzoriek	81
6.1.3	Rezonančné vlastnosti – predikcia a experiment	82
6.1.4	Útlmové vlastnosti	83
6.2	Verifikácia hypotéz	84
6.2.1	Hypotéza č.1	84
6.2.2	Hypotéza č.2	85
7	ZÁVER	86
8	VÝSLEDOK VÝSKUMU PODĽA RIV	88
9	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	89
10	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	93

11	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	94
12	ZOZNAM TABULIEK	98
13	ZOZNAM PRÍLOH	100

1 ÚVOD

Aditívna technológia Selective Laser Melting (SLM) umožňuje výrobu kovových súčastí s komplexnou geometriou, ktorá je nevyrobitelná bežne dostupnými konvenčnými metódami. Umožňuje tak vytvárať tvarovo optimalizovaný a odľahčený dizajn kovových dielov pri zachovaní alebo zlepšení ich požadovaných vlastností. Výrobný proces spočíva v iteratívnom nanášaní a tavení kovového prášku vrstvu po vrstve. Súčasť je teda vystavaná priamo z pripravených CAD dát. Zvyšujúca sa presnosť a výsledná kvalita výrobkov tejto technológie spôsobuje čoraz vyšší záujem o aplikáciu prúťových alebo iných typov štruktúr. Tie môžu byť efektívne optimalizované za určitým účelom.

V mnohých aplikáciách, najmä v oblasti letectva, je kvôli bezpečnosti nutné vyšetriť aj rezonančné vlastnosti súčastí. V prípade nevhodných vlastných frekvencií je častokrát potrebné pristúpiť k úprave dielu s cieľom zmeniť hodnotu problematickej vlastnej frekvencie. Druhou možnosťou je utlmenie budiacich síl. Použitie mikro-prúťových štruktúr ponúka efektívne možnosti úprav výsledných vlastností dielu, avšak ich rezonančné a útlmové charakteristiky nie sú doposiaľ dostatočne preskúmané. Súčasný stav poznania tiež poukazuje na nedostatok vedomostí v oblasti numerických predikcií rezonančných vlastností mikro-prúťových štruktúr.



Obr. 1-1 Ultraľahká konzola antény pre satelit s využitím mikro-prúťových štruktúr [1].

V nadväznosti na predošlý výskum na Ústave konštruovania (vid' Obr. 1-1) si diplomová práca dáva za cieľ preskúmať rezonančné a útlmové charakteristiky experimentálne a snaží sa popísať možnosti výpočtových simulácií týchto vlastností. Prvým dielčím cieľom práce je analyzovať súčasný stav poznania, vybrať na jeho základe štruktúry vhodné na skúmanie a určiť rozsah parametrov k testovaniu. Ďalšou časťou je návrh tvaru

testovacích telies a metodika experimentu. Tretou oblasťou je vytvorenie zjednodušeného výpočtového modelu. Posledným dielčím cieľom je experimentálne určenie útlmových charakteristík a overenie rezonančných vlastností predikovaných numericky.

Vzhľadom na fakt, že v súčasnosti neexistuje žiadny ucelený prehľad o tomto vibračno-dynamickom chovaní mikro-prútvých štruktúr, je hlavnou výskumnou otázkou tejto práce, vplyv základných parametrov štruktúry na útlm alebo vlastnú frekvenciu. Diplomová práca preto skúma najmä vplyv priemeru prútvov a veľkosti základnej bunky (resp. relatívnej hustoty), spolu so zmenou usporiadania prútvov (resp. zmenou typu štruktúry). Tieto premenné sú skúmané za rovnakých podmienok. To znamená, že tvar vzoriek, ich veľkosť a rozsah premenných parametrov je zvolený tak, aby ich bolo možné efektívne porovnať. Otázkou je tiež presnosť zjednodušených výpočtových konečno-prvkových modelov. Kvôli výpočtovej náročnosti objemových modelov, je častokrát jedinou možnosťou výpočet zefektívniť použitím plošných a prútvových elementov. To však vnáša do výpočtu významnú chybu. Diplomová práca sa preto zameriava tiež na možnosti kompenzácie výpočtových chýb prútvových modelov.

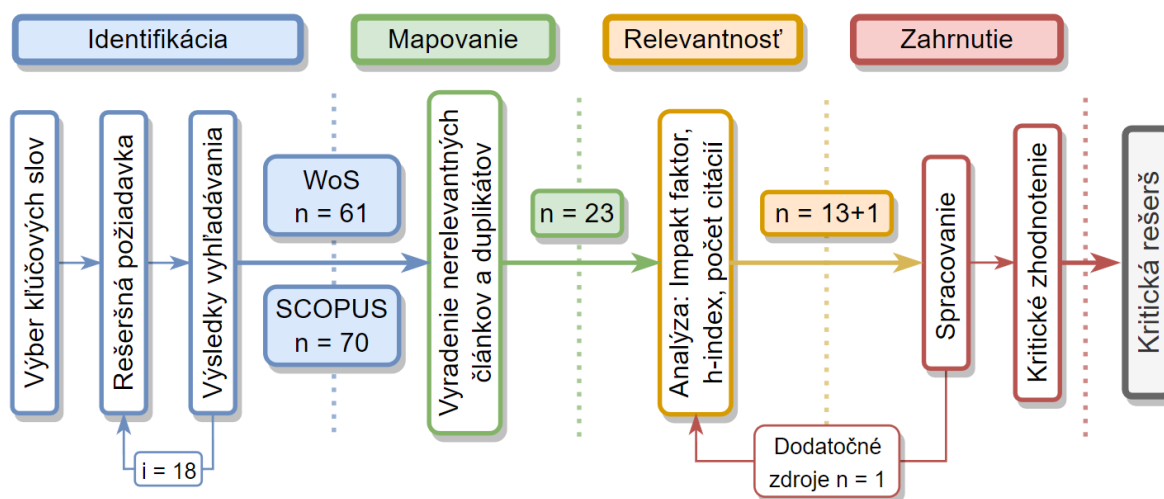
Tieto novonadobudnuté vedomosti o rezonančných a útlmových charakteristikách mikro-prútvových štruktúr, by mali napomôcť k ich jednoduchej implementácii do cieľného návrhu optimalizovaných dielov z pohľadu vibračného zaťaženia. Uplatnenie by mali nájsť najmä v leteckom priemysle s cieľným zameraním pre vesmírne plavidlá. Aditívne vyrobené a optimalizované súčasti s mikro-prútvovými štruktúrami by teda mali umožniť zámernú moduláciu vlastných frekvencií alebo pomerného útlmu súčastí, pri zachovaní pevnostných a hmotnostných požiadaviek.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

V nasledujúcej kapitole je popísaný systematický postup spracovania súčasného stavu poznania. Úvodom do rešerše je výber relevantných informačných zdrojov nasledovaný vypracovaním kritického prehľadu riešenej problematiky. Zistené medzery v poznaní poslúžili k spresneniu zamerania tejto diplomovej práce.

2.1 Rešeršné metódy

Prvá časť približuje zvolené kroky vyhľadávania relevantných publikácií venujúcich sa problematike útlmových a modálnych vlastností mikro-prútvých štruktúr a možnostiam ich numerických simulácií. Cieľom bolo zachytiť čo najvyšší počet najrelevantnejších publikácií. Skúmané boli najmä informačné zdroje z databáz Scopus a Web of Science. Celkový postup je znázornený v diagrame PRISMA:



Obr. 2-1 PRISMA diagram – postup vyhľadávania informačných zdrojov

Rešeršná požiadavka (vid' Tab. 2-1) bola identifikovaná v 18 iteráciách postupným rozširovaním a orezávaním vyhľadávacieho výrazu využitím logických operátorov *AND*, *NOT*, *OR* alebo * (symbol * rozširuje základ slova). Ďalšie články boli vyradené náhľadom do abstraktu alebo samotného článku. Výsledkom tohto mapovania bol výber dohromady 23 publikácií. Ich relevantnosť (vid' Tab. 2-2) bola hodnotená z pohľadu počtu citácií, impakt faktora časopisu a h-indexu prvého autora článku. Pri štúdií článkov bol získaný jeden priamo súvisiaci dodatočný zdroj a bol zahrnutý do tejto analýzy.

Tab. 2-1 Výsledky vyhľadávania primárnych informačných zdrojov

Výsledná rešeršná požiadavka		
(damp* OR vibration* OR eigenfrequency* OR modal OR "natural frequency*" OR "loss factor*" OR "damping ratio*") AND (beam OR truss OR strut OR lattice*) AND (selective AND laser AND (melting OR sintering OR fusion OR deposition)) AND NOT impact AND NOT failure		
	Scopus	Web of Science
Počet informačných zdrojov	70	61

Pozn.: Vyradovací operátor „AND NOT“ platí pre Scopus, pre Web of Science platí: „NOT“, pre Google Scholar platí: „-“.

Tab. 2-2 Citačná analýza primárnych zdrojov

	Rok	Počet citácií	H-index	Impakt faktor
Najvyšší	2021	36	13	7,66
Najnižší	2018	0	0	1,93
Arit. priemer	2019	5	5	4,16

Systematicky získané publikácie sa stali základným kameňom kritickej rešerše. Tá však musela byť postupom práce rozšírená o sekundárne informačné zdroje, nevyhnutné k širšiemu a presnejšiemu pochopeniu testovacích metód, výpočtových modelov a výrobných vlastností technológie SLM.

2.2 Kritická rešerš

Prehľad súčasného stavu poznania rezonančných a útlmových vlastností prúťových štruktúr je spracovaný v kritickej rešerši pojednávajúcej o jednotlivých vedomostných celkoch. Tie sú nevyhnutné k správne porozumeniu multidisciplinárnej problematiky vibračno-dynamických vlastností mikro-prúťových štruktúr vyrobených technológiou SLM.

2.2.1 Mikro-prúťové štruktúry a ich základné vlastnosti

Mikro-prúťová štruktúra je pravidelne opakujúca sa bunka zložená zo siete spojených prúťov, používaná na náhradu plného materiálu. Jej veľkosť sa rádovo pohybuje v jednotkách mikrometrov až milimetrov [2]. Tvar štruktúry môže byť rôzny, pričom jej zložitnosť nemusí byť vďaka výrobe pomocou SLM, až na určité technologické pravidlá, nijak obmedzená. Variabilita mikro-prúťových štruktúr tak umožňuje nielen výrazne znížiť hmotnosť súčasti, ale aj optimalizovať jej rôzne či už statické alebo dynamické vlastnosti.

Základnou charakteristikou mikro-prútových štruktúr podľa Gibsonovho-Ashbyho modelu, na základe ktorej sú ďalej definované odhady ostatných vlastností je *relatívna hustota*, určená vzťahom [3]:

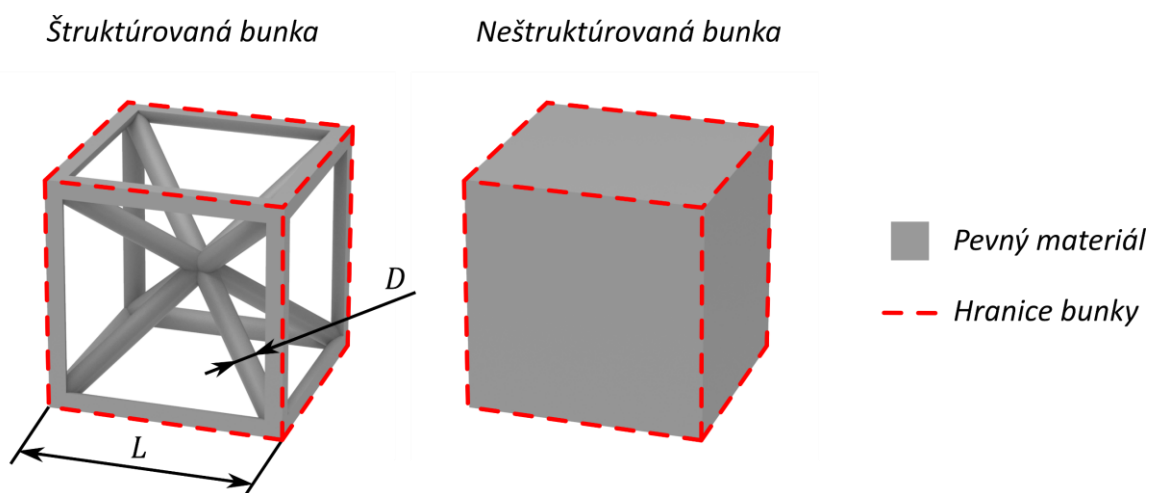
$$\rho_{rel} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2.1)$$

pričom ρ^* je hustota štruktúry a ρ_s je hustota materiálu.

Objem materiálu štruktúry je závislý na priemere prútov D , veľkosti základnej bunky L a samotnom geometrickom usporiadaní prútov (viď Obr. 2-2). Tento objem je možné jednoducho získať z CAD geometrie alebo výpočtom. Prakticky je teda možné relatívnu hustotu určiť pomerom objemov alebo pomerom hmotností materiálu štruktúrovanej a neštruktúrovanej bunky:

$$\rho_{rel} = \frac{V_{\check{s}}}{V_n} = \frac{m_{\check{s}}}{m_n} \quad (2.2)$$

kde V je objem, m je hmotnosť, index \check{s} označuje štruktúrovaný materiál a index n neštruktúrovaný materiál (pri uvažovaní rovnakej oblasti, viď Obr. 2-2).

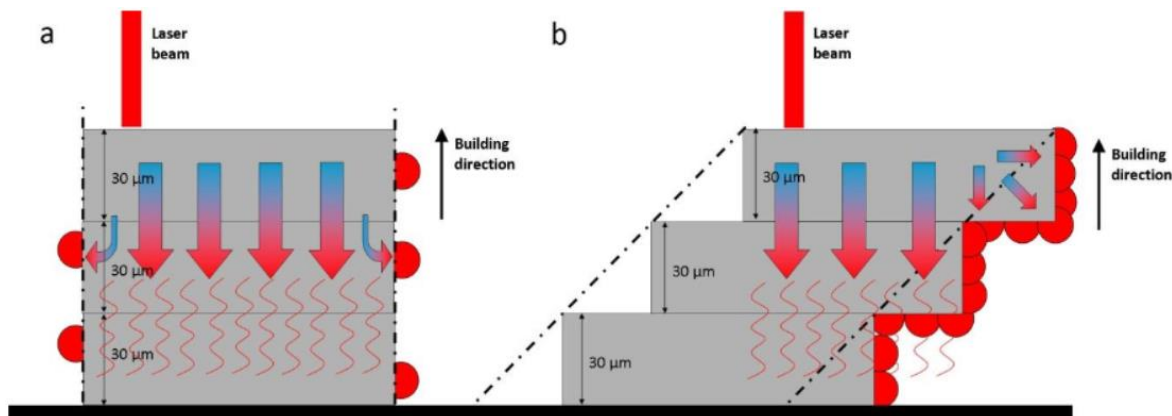


Obr. 2-2 Štruktúrovaný materiál vľavo, neštruktúrovaný materiál vpravo; oba uvažujú rovnaký základný objem (vyznačený červenou farbou).

2.2.2 Vplyv technológie SLM na geometriu a mechanické vlastnosti mikro-prútových štruktúr

Pri výrobe prútových štruktúr technológiou SLM dochádza často k nepresnostiam výslednej geometrie. Tie sú závislé na procesných parametroch, akými sú výkon lasera, rýchlosť a stratégia skenovania [4], zvolený materiál a charakteristika kovového prášku [5], alebo geometria a umiestnenie súčasti vo výrobnom priestore [6]. Súčinnosťou týchto rôznych vplyvov a postupnej stavby súčasti po vrstvách dochádza často ku zhrubnutiu alebo stenčeniu prútov v porovnaní s nominálnou geometriou. Tento jav je nazývaný ako

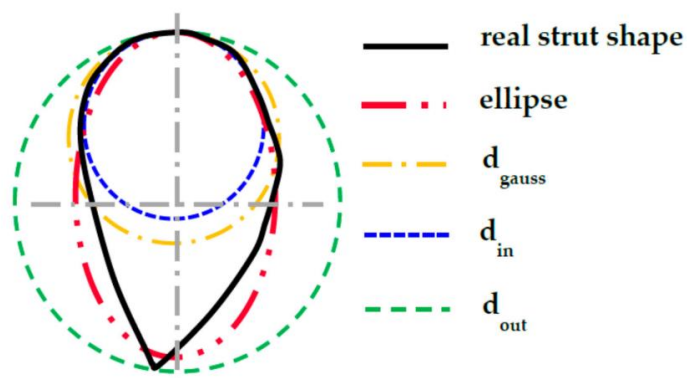
schodovitý efekt [7] (vid' Obr. 2-3) a smeruje ku vzniku eliptického prierezu prútov. Je spôsobený najmä rôznou tepelnou vodivosťou pevného materiálu a okolitého nenataveného prášku, čo spôsobuje nerovnomerný tepelný tok v rámci prierezu a natavovanie prášku mimo obálky požadovanej geometrie na plochách naklonených ku podstave.



Obr. 2-3 Schodovitý efekt a tepelný tok a.) pri kolmej, b.) naklonenej geometrii [7].

Koutný a spol. [6] sa tomuto efektu podrobne venoval. Vo výsledkoch svojej práce ukázal pre materiál S316L, že priemer vpísanej kružnice do prierezu naklonených prútov je voči nominálnej geometrii nižší bez ohľadu na mieru naklonenia prútu voči podstave. Opakom je elipticita prierezu, ktorá sa výrazne zvyšuje pri nakláňaní prútov smerom ku stavebnej platforme. Tento fakt ústi v preukázanie zmeny mechanických vlastností v závislosti na uhle naklonenia prútov.

V nadväznosti na to, **Vrána a spol.** [8] skúmal možnosti priblíženia MKP modelu nárazových skúšok prútových vzoriek z materiálu AlSi₁₀Mg k experimentálnym výsledkom. Pri riešení bol určený Youngov modul pružnosti ťahovými skúškami prútových a plno-materiálových skúšobných telies. Tieto materiálové charakteristiky boli do simulácie priradené separátne štruktúrovanej a neštruktúrovanej oblasti modelu.

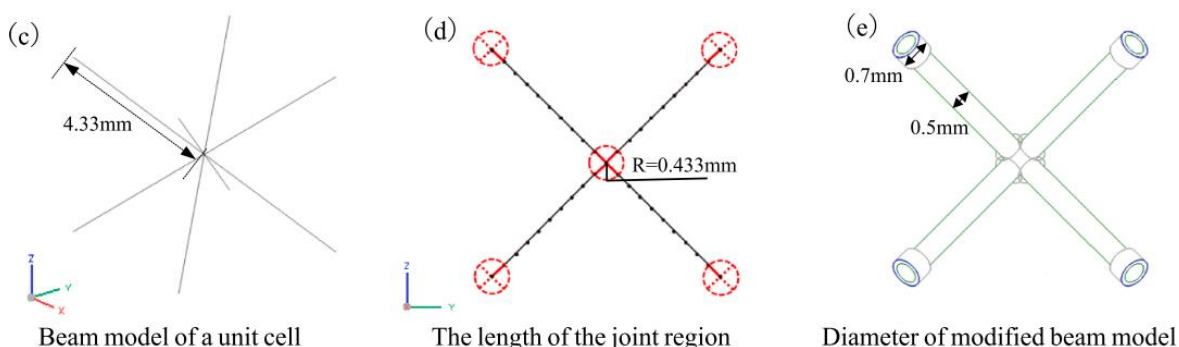


Obr. 2-4 Schéma skutočného prierezu nakloneného prútu vyrobeného technológiou SLM a jeho aproximácia elipsou a rôznymi kružnicami [8].

Pri výpočtoch zanesol výrobné nepresnosti prútov do objemového modelu vo forme Gaussovského eliptického prierezu a Gaussovského kruhového prierezu prútov, určeného z reálnej geometrie (viď Obr. 2-4). Po týchto úpravách, simulácie preukázali priblíženie výpočtu k experimentálne nameraným hodnotám deformácie. Tento efekt bol pozorovaný najvýraznejšie pri použití aproximácie prierezu elipsou.

Červinek a spol. [9] implementoval tieto metódy pri vzorkách vyrobených z materiálu S316L. Cieľom pozorovania bola taktiež schopnosť absorpcie energie pri náraze. Rovnakým spôsobom ako v predošlej publikácii určil materiálové a geometrické charakteristiky, avšak implementoval ich na zjednodušený prútový model. Podobne skúmal vplyv Gaussovského kruhového a eliptického prierezu. Ich rozdiel sa však v rámci vplyvu na tuhosť preukázal významný len vo veľmi malej miere. Vo svojej práci tiež poukázal na nutnosť dodatočnej úpravy prútového modelu spevnením uzlov.

Pred ním, na tento fakt reagoval **Guo a spol.** [10], ktorý vo svojom výskume poukázal na nezrovnalosť objemových a zjednodušených prútových výpočtových modelov BCC štruktúry pri simulovaných tlakových skúškach. Túto chybu prútového modelu dokázal efektívne eliminovať zhrubnutím prútov v oblasti uzlov. Navrhol korekčný faktor pre štruktúru s relatívnou hustotou 10 %, avšak predpokladal jeho nefunkčnosť pri vyšších relatívnych hustotách.



Obr. 2-5 Spôsob korekcie tuhosti uzlov prútového MKP modelu [10].

2.2.3 Rezonančné a útlmové charakteristiky a ich definícia

Tlmiace a modálne vlastnosti sú veľmi dôležitou charakteristikou, nutnou k správnej predikcii dynamického chovania súčastí. V nasledujúcej časti sú popísané hlavné veličiny a experimentálne metódy, najčastejšie používané v analyzovaných publikáciách.

Dynamická mechanická analýza (DMA) [11, 12] je komplexná experimentálna metóda spočívajúca v cyklickom namáhaní testovaného telesa. Pri aplikovaní harmonicky premenlivej sily na vzorku sa vzorka taktiež deformuje harmonicky. Ak uvažujeme úplne elastický materiál odozva pretvorenia bude vo fáze s časovým priebehom zaťaženia:

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

V praxi však neexistuje dokonale elastický materiál. Pri uvažovaní reálneho, čiže viskózne-elastického materiálu má odozva pretvorenia fázový posun voči časovej závislosti zaťaženia (vid' Obr. 2-6) podľa vzťahu:

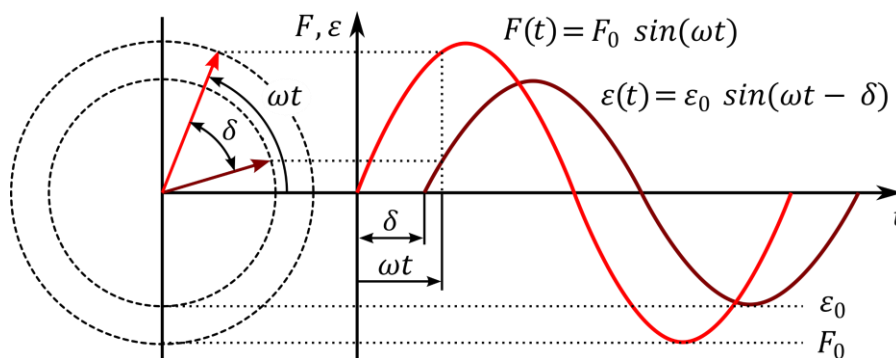
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (2.5)$$

pričom $F(t)$ a $\varepsilon(t)$ sú okamžité hodnoty sily a pretvorenia, F_0 a ε_0 sú ich amplitúdy, ω je frekvencia, t je čas a δ značí fázový posun.

Na znázornenom časovom priebehu rovníc (2.3) a (2.5) (vid' Obr. 2-6) je možné vidieť, že pretvorenie „mešká“ voči záťaži. Toto oneskorenie je spôsobené disipáciou energie pri deformácii a je vhodné na popis útlmových vlastností. Na tento účel bol zavedený stratový súčiniteľ (zvaný tiež stratový faktor alebo ang. loss factor) definovaný ako:

$$\eta = \tan \delta \quad (2.6)$$

kde δ je fázový posun záťaže a odozvy pretvorenia.



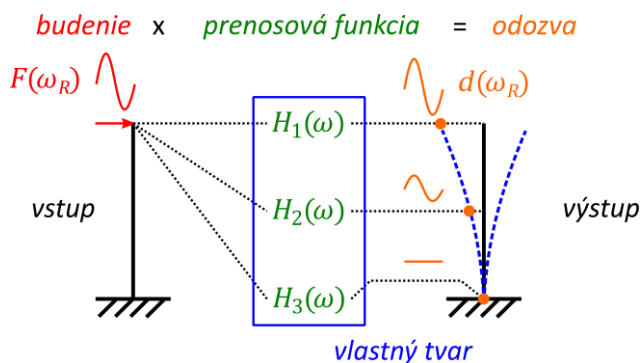
Obr. 2-6 Časový priebeh sily a pretvorenia viskózne-elastického materiálu pri cyklickom namáhaní.

Modálna analýza [13–15] sa zakladá na meraní vibračnej odozvy systému počas jeho excitácie. Prvotne skúmanou informáciou z pohľadu rezonančných vlastností sú vlastné frekvencie. Je to vlastnosť každého telesa a určuje frekvencie, pri ktorej súčasť prirodzene rezonuje. Determinácia vlastných frekvencií je dôležitá najmä pri aplikáciách, kde sú súčasti vystavené cyklickému namáhaniu alebo vibráciám. Častou snahou konštruktérov je navrhnuť diel tak, aby sa jeho vlastná frekvencia nezhodovala s kmitočtom zaťaženia alebo jeho násobkom. Dôvodom je fakt, že prípade ich zhody dochádza k prirodzenému zosilneniu cyklickej záťaže, čo vedie k nadmernému namáhaniu materiálu.

Snímaním budenia v mieste excitácie súčasne s odozvou sústavy na inom mieste, je mimo vlastných frekvencií možné určiť aj frekvenčnú odozovú funkciu (FRF z ang. Frequency Response Function) vzájomným porovnaním signálov:

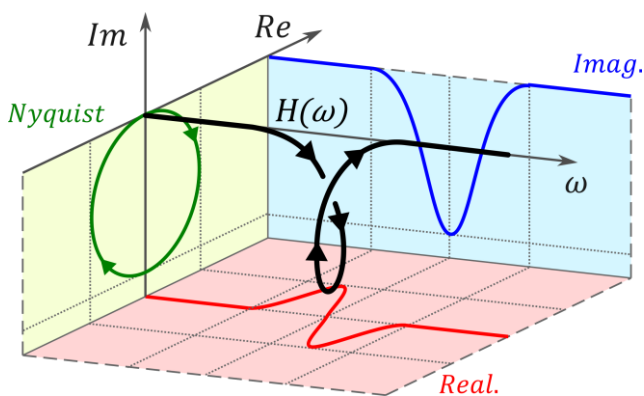
$$H(\omega) = \frac{\text{výstup}}{\text{vstup}} = \frac{\text{odozva}}{\text{budenie}} \quad (2.7)$$

Jej priebeh (viď Obr. 2-8) zobrazuje vzťah dvoch bodov systému (miesto excitácie a miesto merania odozvy) v závislosti na frekvencii budenia. Vytvorenie siete bodov a zápis ich prenosových funkcií do matice poskytuje obraz o rezonančnej deformácii nazývanej tiež ako *vlastný tvar* súčasti [16] (viď Obr. 2-7).



Obr. 2-7 Zobrazenie prenosových funkcií premietnutých do odozvy a vlastného tvaru votknutého prútu.

Priebeh samostatnej prenosovej funkcie je možné zobraziť v trojrozmernom priestore. Pri takomto zobrazení FRF, je možné jej interpretáciou do niektorej z rovín určiť stratový faktor, či už zobrazením do reálnej roviny, alebo do Niqustovej roviny (viď Obr. 2-8). Tieto metódy sú bližšie popísané v [14, 15].



Obr. 2-8 FRF systému zobrazená v priestore ω -Re-Im [14].

V nižšie spomenutých publikáciách je však najčastejšie využívaná metóda *half-power bandwidth* [14], ktorá na určenie útlmu využíva amplitúdovú charakteristiku definovanú z reálnej a imaginárnej zložky FRF (viď Obr. 2-9):

$$|H(\omega)| = \sqrt{\text{Re}(H(\omega))^2 + \text{Im}(H(\omega))^2} \quad (2.8)$$

Táto metóda determinácie stratového faktora sa zakladá na určení nominálnej šírky rezonančného pásma,

$$\Delta\omega = \omega_a - \omega_b \quad (2.9)$$

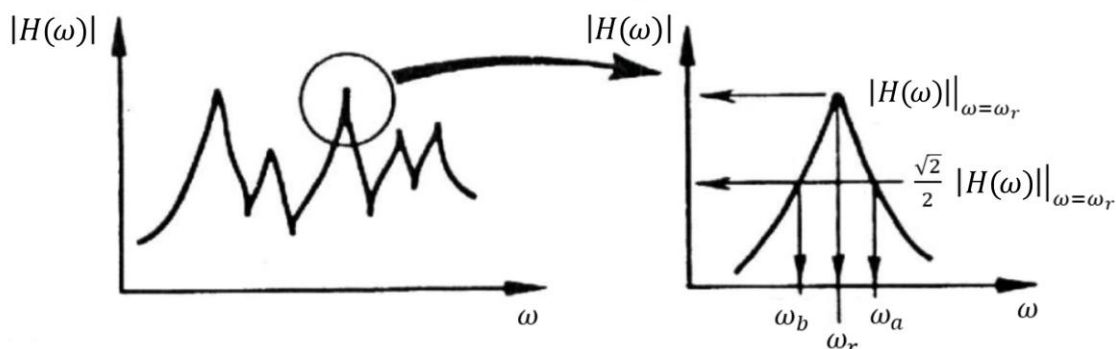
pričom platí podmienka:

$$|H(\omega)|\Big|_{\omega=\omega_a, \omega_b} = \frac{\sqrt{2}}{2} |H(\omega)|\Big|_{\omega=\omega_r} \quad (2.10)$$

Stratový súčiniteľ je potom možné určiť vzťahom:

$$\eta = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{2\omega_r^2} \quad (2.11)$$

kde η je stratový súčiniteľ, $\Delta\omega$ je nominálna šírka rezonančného pásma, ω_a a ω_b sú jej krajné hodnoty a $H(\omega)$ je FRF systému.



Obr. 2-9 Určenie nominálnej šírky frekvenčného rezonančného pásma z amplitúdovo-frekvenčnej charakteristiky [14].

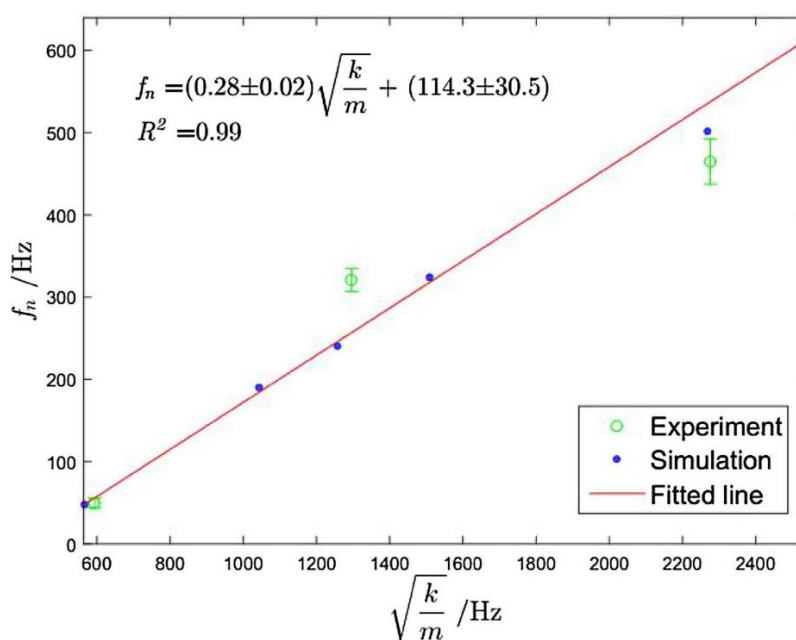
2.2.4 Vibračno-dynamické charakteristiky mikro-prútvých štruktúr

Štruktúrované materiály sa v súčasnosti preukazujú ako funkčné absorbéry nárazovej práce [8]. Preto je snahou implementovať mikro-prútvé konštrukcie aj v odvetví vibračného a cyklického namáhania. Nasledujúce riadky teda pojednávajú o súčasnom stave poznania útlmových a rezonančných vlastností mikro-prútvých štruktúr.

Syam a spol. [17] upozornil vo svojej publikácii na fakt, že súčasti z pevných materiálov sa často chovajú ako rezonátor, čím zosilňujú namáhanie vibráciami. Jeho myšlienkou bolo využiť mikro-prútvú náhradu plného materiálu k naladeniu vlastnej frekvencie vzorky. To by umožnilo navrhnuť štruktúru tak, aby sa súčasť vyhla vlastnou frekvenciou frekvencii pôsobiacich vibrácií.

Vo svojom výskume porovnali dve analytické výpočtové metódy s experimentom. Meranie prebehlo impulznou modálnou analýzou na vzorkách z materiálu Nylon-12. Výpočtom skúmali možnosť predikcie vlastnej frekvencie pomocou momentu zotrvačnosti alebo tuhosti vzorky. Moment zotrvačnosti sa ukázal ako menej efektívny. Jeho koeficient determinácie dosiahol hodnotu $R^2 = 0,81$. Naopak predpoveď pomocou tuhosti sa ukázala ako efektívna s koeficientom $R^2 = 0,99$ (viď Obr. 2-10).

Tieto poznatky preukázali výraznú spojitosť tuhosti a vlastnej frekvencie mikro-prútvých štruktúr. Výhodným však môže byť aj odhad pomocou momentu zotrvačnosti, pretože jeho určenie je oproti tuhosti časovo úspornejšie. Autor tiež vyslovil nutnosť venovať sa útlmovým charakteristikám prútvých dielov.

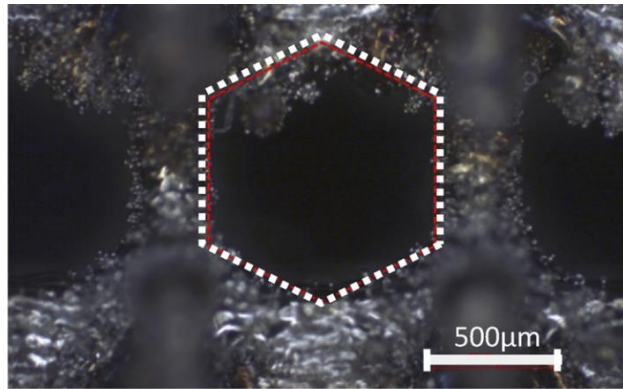


Obr. 2-10 Spôsob predikcie vlastnej frekvencie tuhosťou [17].

Veľmi podobný fenomén skúmal aj **Ibrahim a spol.** [18]. Snahou jeho výskumu bolo overiť možnosť predikcie tuhosti plných a prútvých testovacích kvádrov. Autor predpokladal, že neinvazívnym akustickým meraním určí efektívny modul pružnosti mikro-prútovej súčasti.

Experiment prebehol na kovových vzorkách z materiálov Al6082 a S316L impulzno-akustickou modálnou analýzou a bol overovaný tlakovou skúškou spolu s modálnym MKP výpočtom. Uspokojivá zhoda výsledkov bola zaznamenaná pri plnom materiáli s konečno-prvkovým modelom uvažujúcim objemové elementy. Pri štruktúrovanom materiáli však došlo k výraznej nezhode výsledkov MKP prútvého modelu, ktorého efektívny modul pružnosti bol oproti tlakovej a modálnej skúške výrazne nižší.

Výsledky tejto práce ukázali, že vlastné frekvencie môžu slúžiť na predikciu tuhosti mikro-prútovej súčasti, avšak prútvý výpočtový model sa neosvedčil. Vysoká nepresnosť výpočtu bola zrejme spôsobená jeho prílišným zjednodušením prútvými elementami a zanedbaním výrobných nepresností (viď Obr. 2-11), na ktoré autori v práci upozornili.

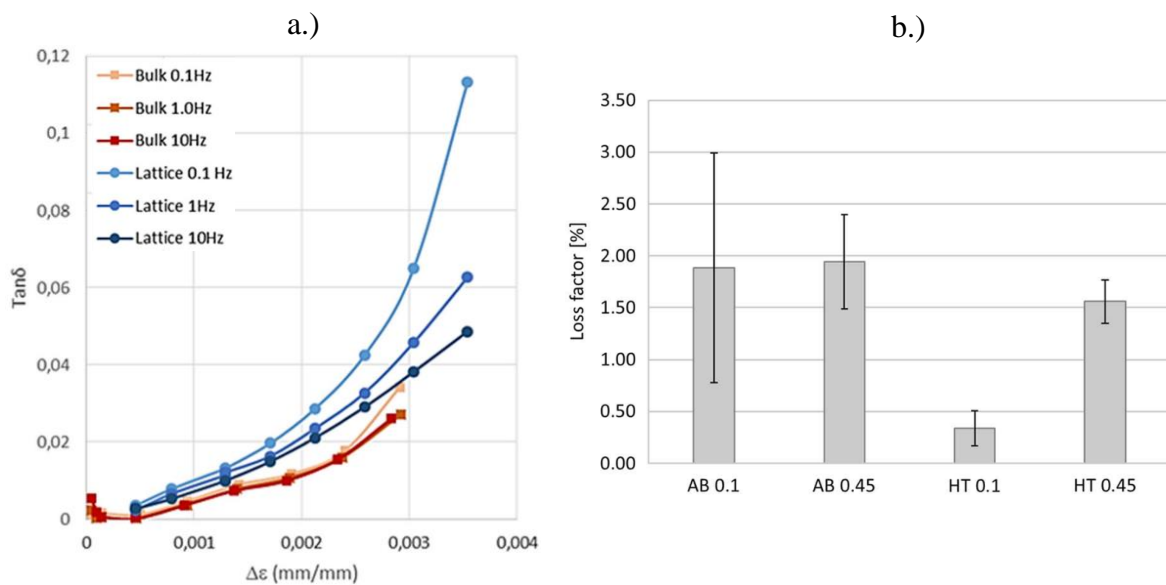


Obr. 2-11 Nepresnosti výroby SLM - nalepený prášok na prútoch štruktúry [18].

Chovanie mikro-prútových vzoriek namáhaných cyklicky (DMA) ako prvý popisoval **Rosa a spol.** [19]. Jeho práca popisuje chovanie štruktúry BCCxyz z materiálu S316L. Namáhanie bolo nastavené na rôzne parametre. Výsledky ukázali, že ak rastie frekvencia alebo amplitúda pretvorenia, rastie aj hodnota útlmu (viď Obr. 2-12 a.)).

Toto chovanie neskôr po ňom potvrdil **Fiocchi a spol.** [20] na trabekulárnej prútovovej štruktúre z materiálu Ti₆Al₄V. V práci skúmal tiež vplyv tepelného spracovania vzoriek. V závere práce popisuje, že tepelné spracovanie síce znižuje hodnoty útlmu, avšak rozptyl nameraných hodnôt sa znižuje, čím môže byť ich predikcia úspešnejšia (viď Obr. 2-12 b.)).

Výsledky týchto dvoch prác preukázateľne hovoria o výraznom zvýšení stratového faktora prútových vzoriek v porovnaní so vzorkami s plným materiálom. Autori tiež popisujú možnosti modulácie a spresňovania útlmových charakteristík tepelným spracovaním. To môže viesť k efektívnemu a cieľenému návrhu mikro-prútových štruktúr určených ku tlmeniu vibrácií.

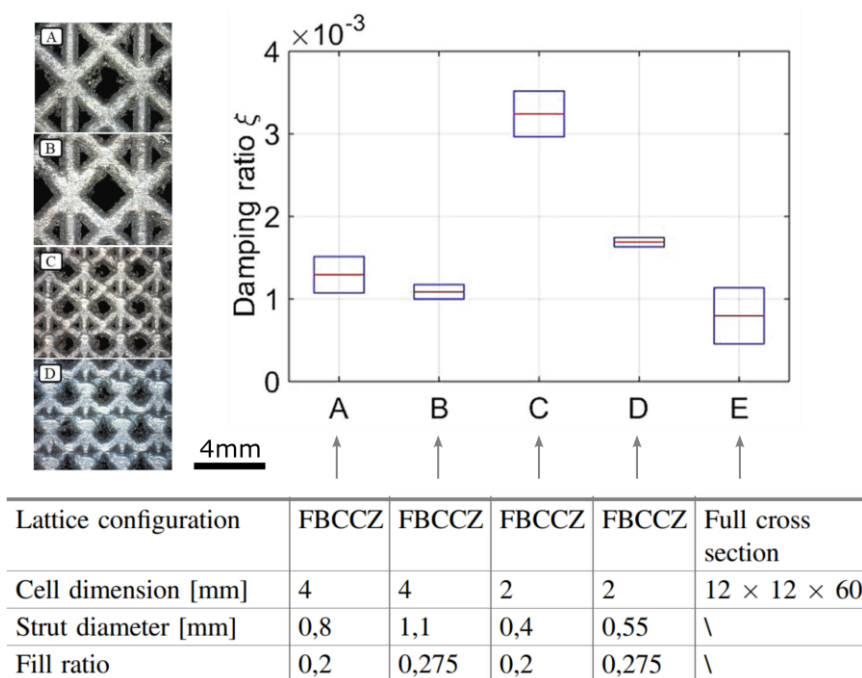


Obr. 2-12 Stratový faktor závislý: a.) na amplitúde a frekvencii zaťaženia; b.) na tepelnom spracovaní (AS = As built, HT = Heat treated; 0.1 a 0.45 = pretvorenie 0,1% a 0,45%).

Podrobnej analýze útlmových charakteristík prútových vzoriek sa venoval **Sortino a spol.** [21]. Jeho cieľom bolo skúmať útlm štruktúry FBCCZ z materiálu AlSi₁₀Mg so zámerom jej implementácie na vývoj robotického ramena. Autor vo svojich výskumoch predpokladal, že dosiahne vyšší útlm v porovnaní s plným materiálom pri zachovaní rovnakých tuhostných vlastností súčasti.

Výber základných parametrov štruktúry ako sú veľkosť bunky a priemer prútov bol založený na statickom MKP modeli, pričom tieto parametre boli zvolené tak, aby súčasti vykazovali totožnú ohybovú tuhosť. Set vzoriek umožnil skúmať vplyv veľkosti základnej bunky a relatívnej hustoty (zmenou priemeru prútov) a porovnať ich s plným neštruktúrovaným materiálom. Determinácia vibračno-dynamických vlastností bola založená na experimentálnej modálnej skúške. Excitácia bola vykonaná impulznej modálnym kladivkom tak, aby boli okrajové podmienky totožné so statickým MKP modelom.

Výsledky jednoznačne preukázali zvýšenie útlmu štruktúrovaných vzoriek voči plnému materiálu (vid' Obr. 2-13). Získané dáta tiež poukazujú na vplyv relatívnej hustoty na útlmové vlastnosti, kde jej znižovanie zvyšuje pomerný útlm. Podobný efekt je možné pozorovať pri štruktúrach s menšou základnou bunkou. Súhrn týchto poznatkov potvrdzuje možnosť modulácie útlmových charakteristík zmenou základných parametrov štruktúry.

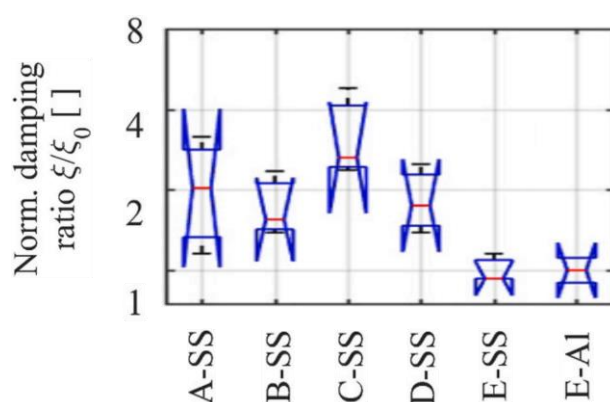


Obr. 2-13 Výsledky útlmu mikro-prútových vzoriek [21, 22].

Scalzo a spol. [22, 23] v spolupráci s predošlým autorom (Sortino [21]) rozšíril výskum o materiál S316L a MKP modálny výpočet. Experimentálne implementoval rovnaký postup na nové vzorky a porovnával ich s predošlými výsledkami. Výpočtová analýza využívala zjednodušené prútové elementy v oblasti mikro-prútovej štruktúry

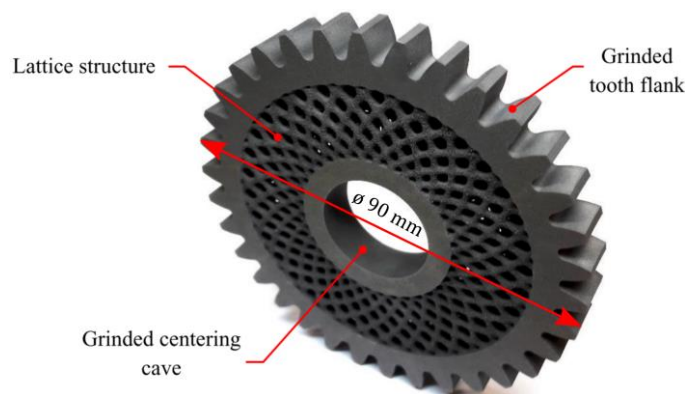
a objemové elementy v neštruktúrovaných častiach vzorky. Prúty boli v oblasti uzlov, kde sa spájajú, spevnené zväčšením ich priemeru podľa Guo a spol. [10]. V práci bol tiež skúmaný vplyv modelovania okrajových podmienok reálnou geometriou aretačného prípravku.

Experimentálne výsledky štruktúr pre materiál S316L zaznamenali podobné chovanie ako pre materiál AlSi₁₀Mg (viď Obr. 2-13 a Obr. 2-14). V porovnaní materiálov však boli namerané nižšie hodnoty pomerného útlmu materiálu S316L (viď Obr. 2-14 vzorky E-SS a E-Al). Výsledky simulácie preukázali výrazný vplyv okrajových podmienok na hodnotu prvej vlastnej frekvencie. V prípade aplikácie votknutia priamo na súčasť bol rozdiel až ± 30 %. Po implementovaní geometrie aretačného prípravku sa znížila nezhoda výsledkov na ± 15 %. Tento postup však podľa autorov výrazne zvyšuje hardwarovú náročnosť výpočtu.



Obr. 2-14 Pomerný útlm normalizovaný ku vzorke E-Al (E pre Obr. 2-13). Parametre vzoriek A-E sú totožné s tabuľkou na Obr. 2-13. Označenia materiálu sa značia: SS – S316L; Al – AlSi₁₀Mg [23].

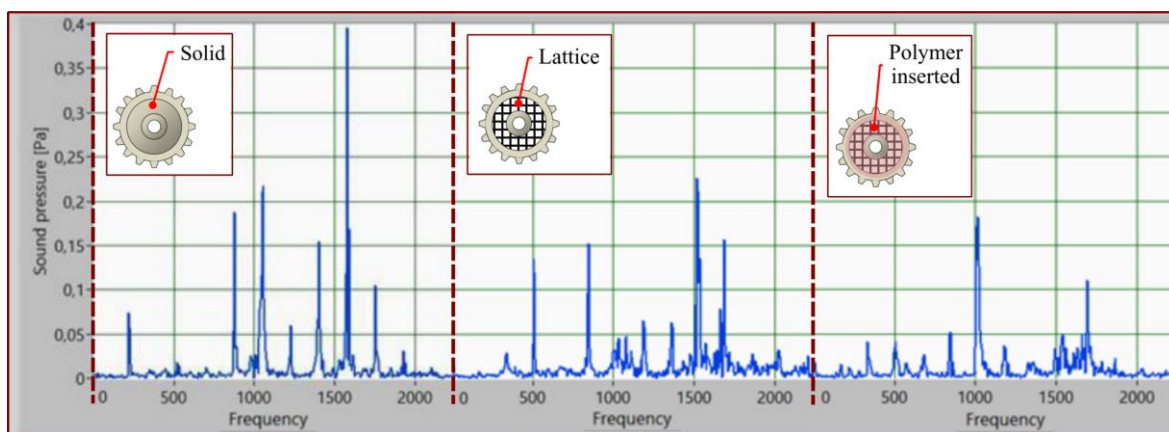
Jednu z prvých aplikácií prútových štruktúr na skutočnú súčasť z pohľadu modálnych vlastností predstavil **Ramadani a spol.** [24, 25]. Ten sa vo svojich publikáciách zaoberal topologickou optimalizáciou vnútornej výplne ozubeného kolesa. Tvrdil, že vhodným nahradením plného materiálu je možné výrazne redukovať hluk prevodu.



Obr. 2-15 Aditívne vyrobené, topologicky optimalizované ozubené koleso [24].

Ozubené koleso topologicky optimalizoval využitím radiálne zahnutej BCC štruktúry. Pri vytváraní organickej geometrie bolo zamedzené odoberať materiál v mieste náboja a samotného ozubenia. Koleso bolo pevnostne overené MKP výpočtom a následne aditívne vyrobené z materiálu Ti_6Al_4V . Funkčné plochy boli finálne obrobené. Experimentálna časť pozostávala v meraní hluku kolesa v troch konfiguráciách: 1. plný materiál; 2. štruktúrovaný materiál; 3. štruktúra s polymérou výplňou.

Výsledky poukázali na zníženie akustickej emisie štruktúrovanej súčasti. Zo spektrálnej analýzy zvuku je možné badať nielen zníženie amplitúd, ale aj posun vlastných frekvencií k nižším hodnotám (viď Obr. 2-16 Solid a Lattice). Výhodou topologicky upraveného kolesa je aj zníženie hmotnosti. Polymérou výplň umocnila efekt útlmu hluku (viď Obr. 2-16 Polymer inserted), avšak za cenu spätného zvýšenia hmotnosti. Autor týmito výsledkami upozorňuje na vhodnú aplikáciu prútových štruktúr pozitívne ovplyvňujúcich rezonančné chovanie súčastí.



Obr. 2-16 Frekvenčná charakteristika akustickej emisie chodu ozubeného kolesa [24].

Andresen a spol. [26] taktiež skúmal aspekty topologickej optimalizácie z pohľadu vibračno-dynamických vlastností systémov. Jeho zámerom bolo vyšetriť vplyv nepravidelnosti prútovej štruktúry na vlastné frekvencie a útlm.

Autor zahrnul do optimalizácie štruktúr zmenu priemeru prútov a ich geometrické rozloženie. Jej cieľom bolo navýšiť prvú vlastnú frekvenciu pri zachovaní hmotnosti. Vytvorené tak boli tri testovacie telesá:

- L1** – základná konfigurácia – pravidelné usporiadanie a konštantný priemer prútov
- L2** – obmedzená opt. – pravidelné usporiadanie a premenlivý priemer prútov
- L3** – neobmedzená opt. – nepravidelné usporiadanie a premenlivý priemer prútov

Testovacie vzorky boli vyrobené technológiou SLM z materiálu $AlSi_{10}Mg$ a otestované modálnou analýzou kontinuálnym budením na vibračnej podložke. Výsledky boli overené MKP výpočtom, s využitím prútových a objemových elementov. Uvažovaná geometria

prútov nebola pre výpočet nijako upravovaná vďaka presnej výrobe. V analýze bol tiež vyšetrovaný vplyv hmotnosti akcelerometrov na výsledky.

Z experimentálnych a výpočtových výsledkov boli vyslovené predpoklady potvrdené. Akékoľvek vhodne navrhnuté nepravidelnosti štruktúry, či už úprava geometrického usporiadania prútov alebo zmena ich priemeru, pozitívne zvýšili prvú vlastnú frekvenciu vzorky. Porovnanie prútového a objemového výpočtového modelu však poukázalo na ich nezgodu (viď Tab. 2-3). Prútový model vykazoval vyššiu hmotnosť spolu s vlastnou frekvenciou nižšou až o 22,4%.

Tab. 2-3 Porovnanie prútového a objemového výpočtového modelu [26].

	Beam model			Solid model			Difference
	acc. negl.	acc. incl.	mass	acc. negl.	acc. incl.	mass	acc. incl.
L1	1,500 Hz	1,471 Hz	127.7 g	1,925 Hz	1,895 Hz	119.3 g	22.4%
L2	1,615 Hz	1,586 Hz	127.7 g	2,073 Hz	2,028 Hz	119.1 g	21.8%
L3	2,430 Hz	2,404 Hz	127.2 g	2,619 Hz	2,581 Hz	121.4 g	6.9%

Tieto dáta tiež dokázali, že vplyv akcelerometra na hodnotu vlastnej frekvencie je zanedbateľný. Zmena hodnôt dosiahla maximálne 2%. Autor celkovým porovnaním preukázal veľmi dobrú zhodu numerického riešenia objemovými elementami (pri uvažovaní hmotnosti akcelerometrov) a experimentu (viď Tab. 2-4). Zdôvodnil to vysokou vzájomnou presnosťou vyrobenej a nominálnej CAD geometrie testovacích telies.

Tab. 2-4 Porovnanie numerického výpočtu a experimentu [26].

	Simulation	Measurement	Difference
L1	1,895 Hz	1,809 Hz	4.5%
L2	2,028 Hz	2,003 Hz	1.2%
L3	2,581 Hz	2,568 Hz	0.5%

K podobným výsledkom došiel aj **Wei a spol.** [27], ktorý skúmal vibračnodynamické chovanie Kelvinovej štruktúry vyrobené z nerezovej oceli S304 odlievaním do škupinových foriem. Podobne ako predošli autori tvrdil, že členitosť prútovej štruktúry spôsobí navýšenie pomerného útlmu.

Autor vytvoril set vzoriek tak, aby bolo možné nezávisle sledovať vplyv zmeny priemeru prútov (pri konštantnej relatívnej hustote) a naopak vplyv relatívnej hustoty (pri konštantnom priemere prútov). Experimentálne určenie útlmu a vlastných frekvencií prebehlo impulznou modálnou analýzou spolu s overením pomocou objemového MKP výpočtu.

Experiment vyslovenú hypotézu potvrdil, pretože prútové telesá dosiahli útlmový pomer až 10x vyšší než vzorka s plným materiálom. Z výsledkov bolo tiež možné povedať, že mikro-prútové súčasti s nižšou relatívnou hustotou vykazujú nižšie vlastné frekvencie

a vyššie hodnoty pomerného útlmu. Výpočet hodnoty vlastných frekvencií potvrdil bez nutnosti dodatočných úprav MKP modelu, vďaka vysokej homogenite materiálu a presnosti výslednej geometrie po odlievaní.

2.3 Zhrnutie hlavných zistení

Z úvodnej časti súčasného stavu poznania jednoznačne vyplynulo, že výrobná technológia SLM dokáže efektívne produkovať mikro-prútové súčasti, avšak spôsobuje tiež značné nepresnosti geometrie perforovaných oblastí. Rôzne výskumy preukázali vznik eliptického prierezu prútov v závislosti na ich naklonení voči stavebnej platforme [6–8]. Táto zmena spôsobila zmenu mechanických vlastností, čo sťažuje predikciu chovania prútových dielov. K zahrnutiu tejto zmeny do numerického výpočtu tuhosti vhodne poslúžila úprava vstupnej CAD geometrie prispôbením priemeru prútov podľa Gauss-fit elipsy alebo kružnice preloženej cez skutočný prierez prútu [8].

Význam mikro-prútových štruktúr v zmysle absorpcie energie cyklického namáhania a vibrácií bol potvrdený niekoľkými nezávislými výskumami [18–23, 27], spolu s ich praktickou aplikáciou [24, 25]. Výsledky preukázali zvýšené hodnoty stratových súčiniteľov perforovaných súčastí voči plno-materiálovým dielom, čo potvrdilo zníženie akustickej emisie ozubeného kolesa (viď Obr. 2-16). Predikcia útlmových charakteristík je však nejednoznačná. Na jednu stranu, výsledky naznačujú, že jemnejšie perforácie (tenšie prúty s menšou základnou bunkou) pri zachovaní rovnakej relatívnej hustoty dosahujú vyšší útlmový pomer [21–23] (viď Obr. 2-13 a Obr. 2-14), na druhú stranu, rozptyl hodnôt je príliš vysoký na vyvodenie jednoznačných záverov. Táto nepresnosť je zrejme spôsobená zvyškovým napätím a môže byť redukovaná tepelným spracovaním (viď Obr. 2-12 b.)), to však nutne vedie k zníženiu útlmových schopností [28].

Dôležitým faktorom je spojitosť tuhosti a vlastnej frekvencie štruktúr. Experimentálne dáta preukázali túto závislosť [17, 18, 26], vďaka čomu je možné hodnoty vlastných frekvencií predpovedať a validovať statickými numerickými výpočtami. Vzhľadom na dokázaný vzťah relatívnej hustoty s tuhosťou [3] je možné predpokladať podobný vzťah relatívnej hustoty s vlastnými frekvenciami. To by mohlo viesť k účinnej modulácii vlastných frekvencií základnými parametrami ako je priemer a geometrické usporiadanie prútov.

Najčastejším spôsobom experimentálnej determinácie vlastných frekvencií a útlmu v spomenutých publikáciách bola modálna analýza. Excitácia systému zväčša prebiehala impulzným budením, pričom odozva bola meraná zvyčajne akcelerometrom alebo meraním zvukového signálu pomocou mikrofónu. Vlastné frekvencie boli určené z lokálnych maxim

amplitúdovej charakteristiky spolu s útlmom pomocou metódy half-power bandwidth (viď kap. 2.2.3).

Z rešerše tiež vyplynulo, že presnosť akéhokoľvek MKP výpočtu mikro-prútvých dielov výrazne závisí na zvolenom type elementov (objemový alebo prútvový). V prípade uvažovania objemového MKP modelu boli dosiahnuté veľmi presné výsledky voči experimentálnemu meraniu [18, 26, 27]. Tento typ výpočtu je však nielen časovo, ale aj hardwarovo veľmi náročný. Zjednodušený prútvový výpočtový model dosahuje v prípade mikro-prútvých štruktúr výrazné nepresnosti [10, 26]. Možnosťou korekcie prútvového modelu je spevnenie v oblastiach vzájomného spájania prútov. Tento prístup bol aplikovaný v prípade analýzy dynamického porušovania [9], tuhosti [10] a modálnej analýzy [21], avšak toto vylepšenie je nekonzistentné v širšej škále relatívnych hustôt. Prútvový model tiež vykazuje zvýšenie hmotnosti [26], čo by mohlo viesť k zvýšeniu nepresnosti výsledkov výpočtu vlastných frekvencií (viď Tab. 2-3). Na pravdivosť výsledkov MKP modálnej analýzy vplyvajú aj okrajové podmienky, kde ich softwarové zjednodušenie vnáša do modelu umelú tuhosť systému. Naopak zahrnutie geometrie aretačného prípravku znižuje túto chybu, avšak výrazne zvyšuje náročnosť výpočtu [23].

2.4 Medzera v poznaní

Z kritickej rešerše je zrejmé, že mikro-prútvé štruktúry a ich využiteľnosť v oblastiach, kde sú súčasti zaťažované cyklickým namáhaním alebo vibráciami sa stávajú terčom vedeckého bádania mnohých výskumných skupín. No aj napriek tomuto záujmu neexistuje všeobecne ucelený prehľad o tejto problematike. Potenciál mikro-prútvých štruktúr v oblasti úprav rezonančno-útlmových vlastností súčasti je teda v súčasnosti nevyužitý.

Publikácie preukazujú vplyv rôznych parametrov na vlastné frekvencie a stratový súčiniteľ, avšak vzájomne ich nie je možné porovnať, pretože nedodržiavajú rovnaké podmienky. Každý výskum využíva rôzne typy štruktúr a materiálu, rozdielne spôsoby namáhania alebo skúma iné vstupné premenné. V končnom dôsledku teda nie je možné jednoznačne predpovedať chovanie súčastí na základe základných parametrov akými sú veľkosť základnej bunky štruktúry, priemer prútov alebo geometrické usporiadanie prútov.

Z pohľadu predikcie vlastností je numerická analýza mikro-prútvých dielov veľmi problematická. Objemové výpočtové modely sú pomerne presné, avšak prakticky nepoužiteľné na súčastiach bežných rozmerov. Možným riešením je zjednodušenie prútvovými elementami, ktoré je sprevádzané vznikom nepresností. Tie je nutné eliminovať rôznymi korekciami. Spomenuté práce načrtli možné riešenia, avšak tie sa preukázali ako nedostatočné alebo ich účinok je nekonzistentný v širokom rozsahu relatívnych hustôt.

3 CIELE PRÁCE

Medzery v súčasnom poznaní problematiky pomohli vymedziť zameranie tejto diplomovej práce. Je zjavné že vplyv základných parametrov mikro-prúťových štruktúr na rezonančné a útlmové charakteristiky súčasti a možnosti predikcie týchto vlastností skrz zjednodušené numerické modely sú neznámymi faktami. Tieto v súčasnosti nevyriešené problémy sa stali základom pre vyslovenie výskumných otázok a hypotéz.

3.1 Výskumné otázky

Základné premenné ovplyvňujúce vlastné frekvencie a útlm sú definované pomerne presne. Z rešerše však nevyplývajú jasné závislosti, na základe ktorých by bolo možné presne predpovedať chovanie súčastí a cielene ovplyvňovať ich vlastné frekvencie spolu s útlmom. Prvá vyslovená výskumná otázka je teda relačná, pretože sleduje vzťah medzi vstupnými a výstupnými premennými:

Otázka č.1 – Ako vplývajú základné parametre štruktúry, teda veľkosť bunky, priemer prúťov a ich geometrické usporiadanie na vlastné frekvencie a pomerný útlm súčasti?

V prípade problému zjednodušených prúťových výpočtových modelov, kde nie sú známe možnosti korekcie voči objemovým modelom pre simulácie rezonancie, je vyslovená deskriptívna otázka:

Otázka č.2 – Aké sú možnosti vytvorenia zjednodušeného prúťového výpočtového modelu tak, aby sa výsledkami priblížil k objemovému modelu a experimentálne nameraným hodnotám?

3.2 Ciele výskumu

Z výskumných otázok prirodzene vyplýva, že hlavným cieľom práce je popísať modálne vlastnosti niekoľkých vybraných mikro-prúťových štruktúr vyrobených technológiou SLM. Ich počet je stanovený na tri štruktúry. Vzhľadom na komplexnosť hlavného cieľa, je jeho štruktúra bližšie špecifikovaná:

- Predmetom výskumu je určiť vzťahy vlastných frekvencií a útlmu so základnými parametrami určujúcimi relatívnu hustotu štruktúry (priemer prúťov a veľkosť bunky), vytvoriť k týmto vzťahom zjednodušený výpočtový model a jeho funkčnosť overiť na troch štruktúrach s rôznym geometrickým usporiadaním prúťov.

- Dáta boli získavané numerickými výpočtovými modelmi a experimentálnymi meraniami so štatistickým spracovaním.
- Relevantnosť práce je zaručená metodickým vedeckým prístupom.
- Vzorky boli pripravované a testované s vybavením dostupným na fakulte školy. Postup prípravy vzoriek a realizácie meraní a výpočtov je založený na predošlej analýze súčasného stavu poznania.
- Rozsah hodnôt premenných bol volený primerane k časovej dispozícii riešenia diplomovej práce.

Vzhľadom na vyslovené výskumné otázky a ciele je táto práca považovaná za základný výskum (na 60 %), pretože sa zameriava na chovanie štruktúr z pohľadu ich základných parametrov, bez implementácie na skutočnú súčasť. Práca je však v kombinácii s aplikovaným výskumom (na 40 %). Dôvodom je dôraz na aplikovateľnosť výstupov a nie na exaktný fyzikálny popis javov. Vedomosti zhromaždené v diplomovej práci by tak mali napomôcť konštruktérom cielene navrhnuť, s využitím numerických simulácií, súčasť odľahčenú mikro-prúťovými štruktúrami s presne definovanými vibračno-útlmovými vlastnosťami.

3.3 Hypotézy

Z analýzy súčasného stavu poznania a základných znalostí dynamiky bolo možné predikovať určité chovanie mikro-prúťových štruktúr, odpovedať na vyslovené výskumné otázky a stanoviť prvú hypotézu:

Hypotéza č.1 – Vlastné frekvencie a pomerný útlm štruktúry závisia na relatívnej hustote (teda na priemere prúťov a veľkosti základnej bunky) a na geometrickom usporiadaní prúťov.

Takéto chovanie naznačujú viaceré publikácie (najmä články [17, 18, 26] pre vlastné frekvencie a [21–23] pre stratový súčiniteľ (resp. pomerný útlm)). Potvrdenie tejto hypotézy by umožnilo využívať tieto parametre na cieľnú moduláciu rezonančných a útlmových vlastností súčasti.

Z pohľadu výpočtových simulácií bola formulovaná druhá hypotéza:

Hypotéza č.2 – Zjednodušený výpočtový model je možné korigovať úpravou vlastností vybraných prúťových elementov v oblastiach uzlov a priblížiť sa tak ku objemovému modelu a experimentálnym hodnotám vlastných frekvencií.

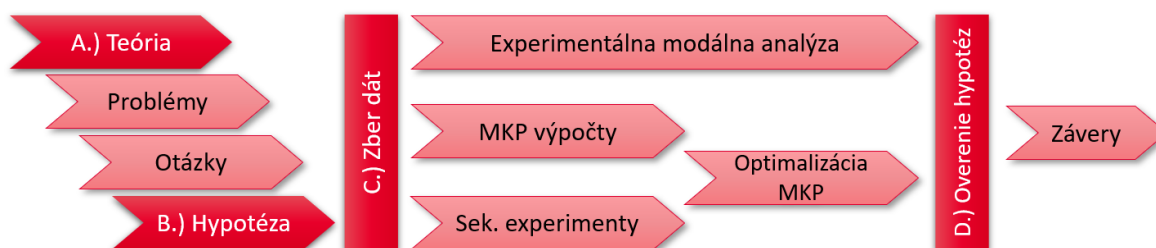
Podobnú metodiku naznačili Červinek [9] a Guo [10]. Dokázanie pravdivosti druhej hypotézy by zvýšilo relevantnosť zjednodušených výpočtových modelov mikro-prúťových štruktúr, čo by uľahčilo ich implementáciu v bežných aplikáciách.

4 MATERIÁL A METÓDY

Komplexnosť diplomovej práce si z dôvodu veľkého množstva skúmaných veličín vyžadovala použiť hneď niekoľko typov experimentov a numerických analýz. Aby bola zaručená relevantnosť výskumu, musel byť zvolený metodický postup, ktorý pomohol určiť potrebné experimentálne zariadenia, testovacie podmienky a metódy vyhodnotenia. S ich pomocou bolo možné otestovať vyslovené predikcie. Tento metodický postup je popísaný v nasledujúcej časti.

4.1 Metodika

S prihliadnutím na vyslovené výskumné otázky a hypotézy opierajúce sa najmä na experiment, meranie a pozorovanie, je táto diplomová práca charakterizovaná z pohľadu vedeckého postupu ako empirická. Z tohto faktu prirodzene vyplýva nutnosť využívať explanačné výskumné metódy. Vzhľadom na kvantitatívny charakter spracovávaných dát, bolo vhodné zvoliť deduktívny prístup riešenia vedeckého problému. Z toho vyplýva nasledujúci postup:



Obr. 4-1 Metodický postup riešenia diplomovej práce.

A.) Teória – Postup diplomovej práce započal získavaním teoretických znalostí danej problematiky. Najprv bolo nutné zistiť chovanie mikro-prútových štruktúr z pohľadu cyklického, alebo vibračného namáhania. V týchto publikáciách bol tiež načrtnutý základ experimentálnych a výpočtových metód. Tieto vedomosti bolo nutné rozšíriť, a pochopiť tak modálnu analýzu a jej možnosti výpočtového a experimentálneho prevedenia v širšom kontexte. Štúdium však sprevádzalo celý postup riešenia práce, počas ktorého bolo nutné riešiť najrôznejšie problémy.

B.) Hypotézy – Postupným štúdiom publikácií bolo možné vyhliadnuť ich nedostatky a na tomto základe vysloviť výskumné otázky. Tie sa stali spolu s teoretickým základom hlavným stavebným kameňom pre stanovenie hypotéz. Ich všeobecné znenie bolo spresnené dielčimi testovanými predikciami popisujúcimi vplyv rôznych konfigurácií

mikro-prútových štruktúr na vlastné frekvencie a útlm. Ich pravdivosť bola overovaná experimentálne a výpočtom.

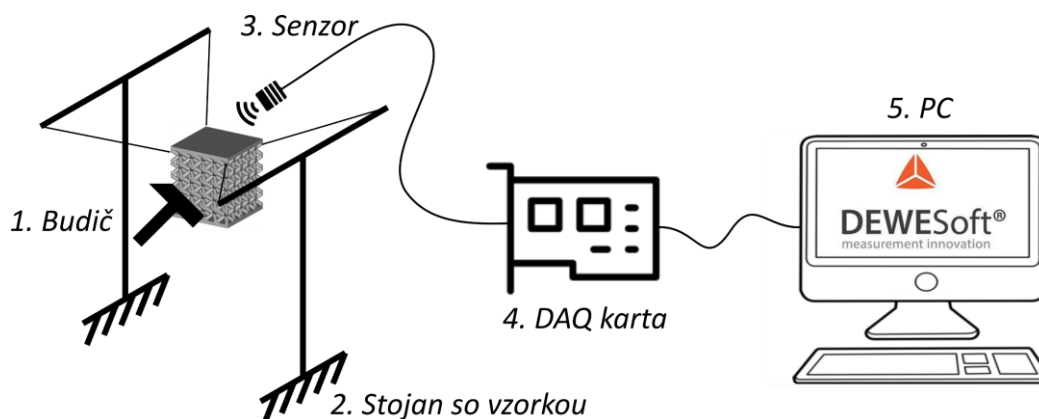
C.) Zber dát – Základom zberu dát bolo vytvorenie skupiny vzoriek, tak aby bolo možné sledovať rôzne vplyvy parametrov štruktúry na modálne vlastnosti. Chovanie štruktúr bolo popisované najmä experimentálnou modálnou analýzou a MKP výpočtami, ktoré bolo nutné výrazne korigovať. K tomu poslúžili sekundárne experimentálne metódy ako meranie hustoty materiálu Archimedovým zákonom, 3D skenovanie alebo tlakové skúšky.

D.) Overenie hypotéz – Až po úspešnom zbere dát a ich spracovaní bolo možné potvrdiť alebo vyvrátiť vyslovené hypotézy. Na základe takto získaných výsledkov a ich kritickom spracovaní boli vyslovené závery diplomovej práce.

4.2 Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie

Primárny experiment spočíval v určení prvej vlastnej frekvencie a útlmového pomeru. K tomuto účelu bola využitá modálna analýza impulzným budením, pričom bola snímaná odozva bez záznamu vstupného budenia. Experimentálny meračiaci aparát (viď Obr. 4-2) sa skladal z týchto prvkov:

1. Budič – kladívko s plastovým a kovovým hrotom – excitácia vzorky
2. Stojan – uchytenie vzorky pomocou silonových závesov
3. Senzor – akcelerometer – meranie odozvy systému – B&K 4507-B-004
4. DAQ karta – vzorkovanie a digitalizácia signálu – zariadenie DEWETRON USB
5. PC – spracovanie signálu a jeho vyhodnotenie – software DEWESoft



Obr. 4-2 Schéma experimentálnej sústavy pre modálnu analýzu.

Na určenie materiálových charakteristík sekundárnymi experimentami slúžili iné bežné laboratórne prístroje. Na určenie hustoty vyrobených vzoriek slúžili váhy Radawag s prepočtom hustoty podľa Archimedovho zákona. K vykonaniu tohto experimentu bolo

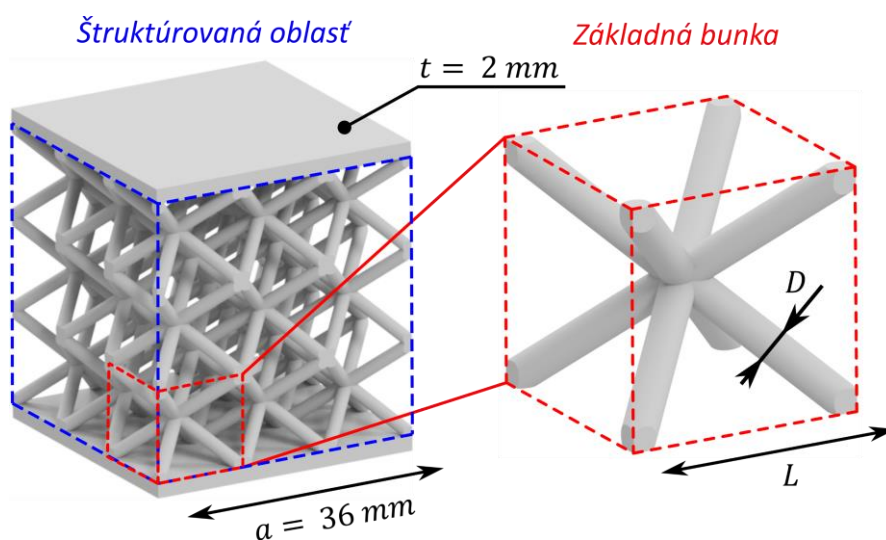
nutné okrem samotných váh použiť nádobu na kvapalinu spolu s oddeľovacou podložkou a závesný mechanizmus (viď Obr. 4-13). Získanie mechanických vlastností, najmä tuhosti prebehlo tlakovou skúškou na lise Zwick Roell. Skutočná geometria vzoriek bola určovaná pomocou 3D skenovacieho zariadenia ATOS TripleScan 8M, umožňujúceho trojrozmerné zachytenie povrchu vyrobenej súčasti.

4.3 Materiál a testovacie podmienky

4.3.1 Voľba typov štruktúr a rozsahu ich parametrov

Ako preukázala kritická rešerš, publikácie spoločne neposkytujú ucelený prehľad o vplyvoch základných parametrov mikro-prúťových štruktúr na výsledné modálne a útlmové vlastnosti vzoriek. Základom tohto výskumu teda bolo vybrať tri typy štruktúr a rozsahy ich parametrov tak, aby mohli byť preukázané vplyvy priemeru prúťov, veľkosti základnej bunky štruktúry a geometrického usporiadania prúťov.

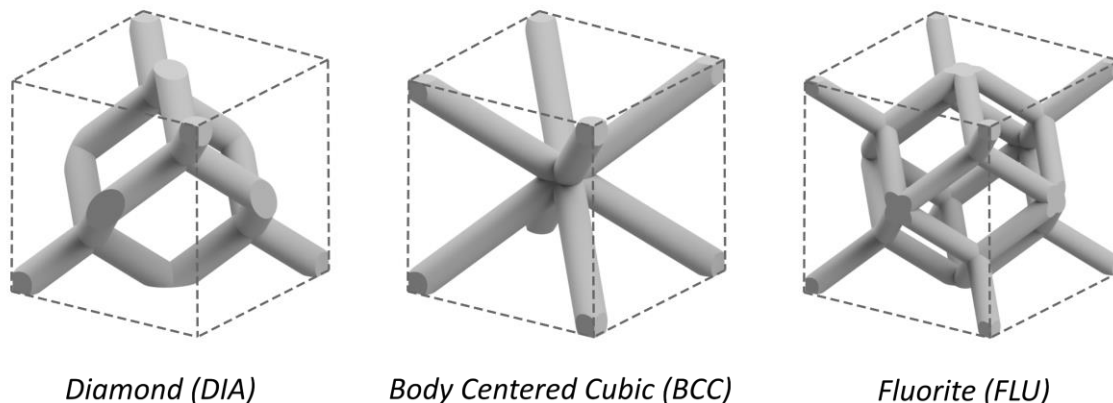
Aby nedošlo k vnášaniu vplyvov iných parametrov do experimentu a výpočtu, bol zvolený jednotný tvar a konfigurácia obálkovej plochy vzoriek (viď Obr. 4-3). Štruktúrovaná oblasť bola vymedzená na kocku s dĺžkou hrany $a = 36 \text{ mm}$. Za účelom umiestnenia akcelerometra a excitácie vzorky boli na dvoch protichodných stenách umiestnené plno-materiálové dosky s hrúbkou steny $t = 2 \text{ mm}$.



Obr. 4-3 Tvar a parametre definujúce vzorku.

Tri rôzne typy štruktúr boli zvolené tak, aby ich prúty boli vždy smerované rovnobežne s priestorovou uhlopriečkou základnej bunky (kocky). Prúty tak zaujímali voči stavebnej platforme pri výrobe vždy uhol $\varphi \approx 35,26^\circ$. Konfigurácia štruktúr sa líšila

geometrickým usporiadaním prútov, resp. počtom prútov a uzlov v rámci základnej bunky. Tento fakt vytvoril rovnaké výrobné podmienky pre všetky geometrické konfigurácie štruktúr. Tým sa eliminovala ich rôznorodosť z pohľadu výrobných nepresností naklonených prútov, ktoré sú zapríčinené technológiou SLM. Vybranými konfiguráciami štruktúr sa stali: *Diamond (DIA)*, *Body Centered Cubic (BCC)* a *Fluorite (FLU)*.



Obr. 4-4 Geometria skúmaných typov štruktúr s rovnakou relatívnou hustotou 10 %. Bunky sú zoradené zostupne zľava podľa priemeru prútov.

Prvá a najväčšia skupina vzoriek uvažovala geometriu štruktúry BCC, pretože sa jej venuje najväčšie množstvo publikácií. Rozsah parametrov bol zvolený podľa výpočtu relatívnej hustoty. Matica vzoriek bola zostavená tak, aby mohol byť pozorovaný vplyv základných parametrov štruktúry, teda priemer prútov a veľkosť základnej bunky spolu s chovaním pri konštantnej relatívnej hustote.

Tab. 4-1 Zvolený rozsah vzoriek štruktúry BCC.

D ↓ \ L →	4 mm	4,5 mm	5,14 mm	6 mm	7,2 mm	9 mm	12 mm
2,61 mm						33,8%	
2,08 mm					33,6%	23,0%	
1,74 mm				33,8%	24,9%	16,8%	9,9%
1,49 mm			33,8%	26,1%	19,0%	12,7%	7,5%
1,30 mm		33,6%	26,9%	20,6%	14,9%	9,9%	
1,16 mm	33,8%	27,8%	22,1%	16,8%	12,1%		
1,04 mm	28,2%	23,0%	18,2%	13,8%	9,9%		
0,87 mm	20,7%	16,8%	13,2%	9,9%			
0,74 mm		12,5%	9,8%				
0,65 mm		9,9%					

Výhodou zvoleného súboru vzoriek je najmä možnosť pozorovať závislosti rovnakej premennej vo viacerých podskupinách. To znamená, že vplyv priemeru prútov bolo možné sledovať pri konštantných veľkostiach buniek: $L = 4 \text{ mm}; 4,5 \text{ mm}; 5,14 \text{ mm}; 6 \text{ mm}; 7,2 \text{ mm}; 9 \text{ mm}$ (viď Tab. 4-1 po stĺpcoch). Vplyv veľkosti základnej bunky bolo možné

hodnotiť pri konštantných priemeroch prútov: $D = 0,87 \text{ mm}; 1,04 \text{ mm}; 1,16 \text{ mm}; 1,3 \text{ mm}; 1,49 \text{ mm}; 1,74 \text{ mm}$ (viď Tab. 4-1 po riadkoch). Chovanie vzoriek bolo tiež možné popísať pri konštantných relatívnych hustotách: $\rho_{rel} \approx 9,9 \%$ alebo $33,7 \%$ (viď Tab. 4-1 zelenou a modrou).

Dodatočná skupina štyroch vzoriek (viď Tab. 4-2) umožnila overiť chovanie pri konštantnej relatívnej hustote $\rho \approx 20,7 \%$ (viď Tab. 4-1 a Tab. 4-2 červenou), pričom vzorky mohli byť taktiež zahrnuté do závislostí skúmajúcich vplyv priemeru prútov a veľkosti základnej bunky. Takto zvolená matica vzoriek zaručila vysokú efektívnosť výroby, pretože každá vzorka bola svojimi výsledkami zahrnutá aspoň v dvoch závislostiach. Súbor vzoriek tak poskytol komplexný prehľad o rezonančných a útlmových vlastnostiach BCC štruktúry.

Tab. 4-2 Rozšírenie rozsahu vzoriek štruktúry BCC.

D↓ \ L→	4 mm	4,5 mm	5,14 mm	6 mm	7,2 mm	9 mm	12 mm
1,96 mm						20,7%	
1,57 mm					20,8%		
1,12 mm			20,8%				
0,98 mm		20,7%					

Výsledky experimentálneho merania a navrhnuté korekcie zjednodušeného výpočtového modelu boli overované na ďalších dvoch štruktúrach DIA a FLU. Za týmto účelom vznikli dve zúžené skupiny vzoriek tak, aby bolo možné overiť každú závislosť aspoň raz. Skúmať je teda možné chovanie pri konštantnej relatívnej hustote, vplyv priemeru a veľkosti základnej bunky na vlastnú frekvenciu a útlmový pomer. Veľkosti základných buniek sú v rozsahu $L = 9 \text{ mm}; 12 \text{ mm}; 18 \text{ mm}$, čo korešponduje s veľkosťami základnej bunky BCC: $L = 4,5 \text{ mm}; 6 \text{ mm}; 9 \text{ mm}$. Dvojnásobok vyplýva z polovičnej dĺžky prútov štruktúr FLU a DIA pri rovnakej veľkosti základnej bunky (viď Obr. 4-4).

Tab. 4-3 Skupina vzoriek štruktúry FLU (rozdiel priemerov 1,85; 1,86 a 1,87 je pri skúmaní vplyvu veľkosti základnej bunky zanedbateľný).

D↓ \ L→	9 mm	12 mm	18 mm
3,73 mm			33,7%
2,79 mm			20,7%
2,49 mm		33,7%	
1,87 mm	33,8%		
1,86 mm		20,7%	
1,85 mm			9,9%
1,4 mm	20,8%		
1,23 mm		9,9%	
0,92 mm	9,8%		

Tab. 4-4 Skupina vzoriek štruktúry DIA (rozdiel priemerov 2,64; 2,66 a 2,7 je pri skúmaní vplyvu veľkosti základnej bunky zanedbateľný).

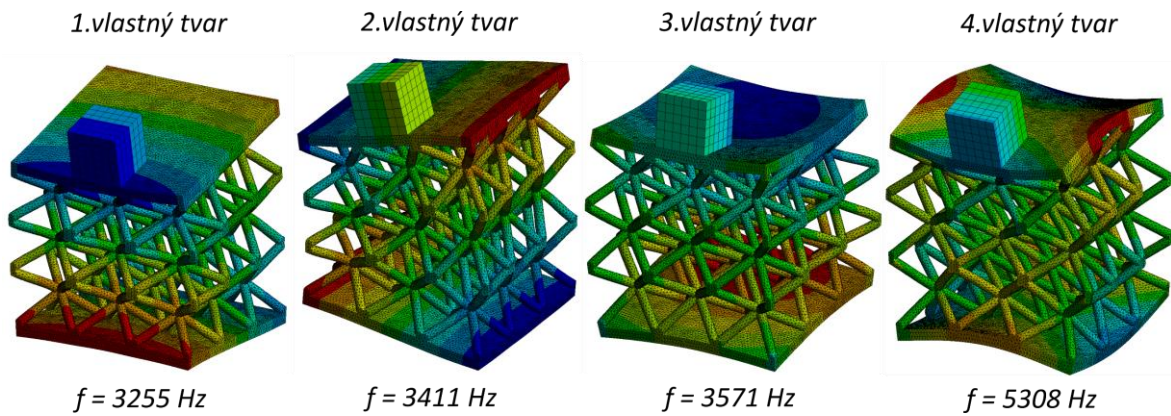
D↓ \ L→	9 mm	12 mm	18 mm
5,45 mm			33,8%
4,08 mm			20,8%
3,55 mm		33,7%	
2,7 mm			9,9%
2,66 mm		20,7%	
2,64 mm	33,7%		
1,98 mm	20,7%		
1,77 mm		9,9%	
1,31 mm	9,8%		

Zvoleným výrobným materiálom všetkých vzoriek bola nerezová oceľ S316L, najmä kvôli predošlým pozitívnym skúsenostiam s kvalitou výroby. V prvých výpočtoch boli využívané dostupné materiálové charakteristiky z publikácií [29] a tabuľkových hodnôt dostupných v softwari Ansys Workbench.

4.3.2 Testovacie podmienky impulznej modálnej analýzy

Zvolenou experimentálnou metódou determinácie vlastných frekvencií a súčiniteľa útlmu sa stala modálna analýza. Samotnému experimentu predchádzala rozvaha o umiestnení resp. upevnení vzoriek. Vzhľadom na to, že je preukázaný výrazný vplyv zjednodušenia okrajových podmienok v numerických simuláciách (viď kap. 2.2.4 Scalzo a spol. [22, 23]), bolo snahou vyhnúť sa pevnému opevneniu vzoriek. Testované teleso bolo teda umiestnené v priestore, pomocou štyroch dlhých závesov. Sily pôsobiace od závesov boli zanedbané, pretože pri najťažších skúmaných vzorkách dosahovali v súčte $F \approx 1,6 N$. Vďaka veľkej dĺžke závesov boli ich rezonančné frekvencie dostatočne nízke, vďaka čomu mohli byť jednoducho odfiltrované. Tým sa zamedzilo infiltrácii signálu parazitnými vlastnými frekvenciami pri rozhojdaní vzorky po údere.

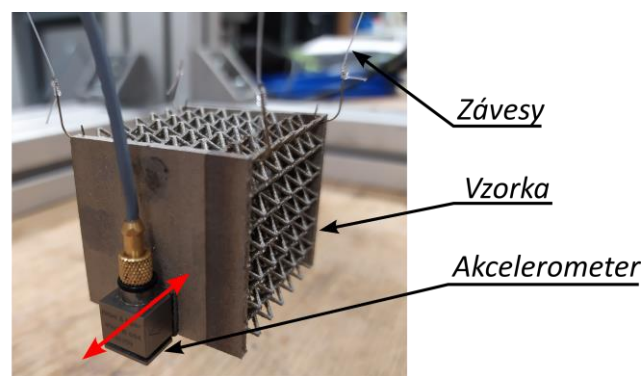
Umiestnenie akcelerometra zohľadnilo simulácie zamerané na vplyv hmotnosti snímača na vlastné tvary. Ako najvhodnejšie miesto sa osvedčila pozícia pri strede hrany podstavy. Numerický výpočet so zahrnutím hmotnosti senzora preukázal, že najnižšie rezonančné frekvencie, môžu byť zachytené práve na tomto mieste, kvôli ohybovému charakteru vlastných tvarov (viď Obr. 4-5). Výhodou bol tiež vznik širšieho štatistického súboru, pretože odozva vzorky mohla byť snímaná na štyroch hranách s totožným umiestnením snímača. Akcelerometer bol na podstavu pripevnený pomocou vosku. Vzorka bola vždy zavesená na závesoch tak, že akcelerometer bol na spodnej hrane a kábel smeroval nahor (viď Obr. 4-6). Pri meraní na ďalšom mieste bola vzorka vždy nanovo zavesená, aby boli tieto podmienky splnené.



Obr. 4-5 Vlastné tvary štruktúry BCC pri uvažovaní vplyvu akcelerometra (farebne je vykreslená smerová deformácia v zvislom smere totožná so smerom snímania zrýchlenia akcelerometrom).

Meraným výstupom akcelerometra bolo napätie v rozsahu $U = \pm 5000 \text{ mV}$. Systém bol pred meraním skalibrovaný. Akcelerometer bol ponechaný v pokoji a snímané napätie vynulované. Kalibrácia v zmysle prevodu napätia na inú veličinu nebola nutná, pretože vyhodnotenie signálu z pohľadu vlastných frekvencií alebo útlmu nezávisí od snímanej fyzikálnej veličiny. Signál odozvy bol snímaný v časovej doméne pričom bol využitý FIR filter s hornou priepusťou nad $f = 50 \text{ Hz}$. S jeho pomocou bolo možné odfiltrovať nízke frekvencie spôsobené rozhojdaním vzorky na závesoch.

Samotné meranie spočívalo v snímaní odozvy vzorky po údere. Za týmto účelom bolo navrhnuté a 3D tlačou vyrobené excitačné kladívko z materiálu PLA. Kladívko bolo vybavené dvoma hrotmi: na jednej strane plastovým hrotom a druhej strane kovovým, pomocou naskrutkovanej klobúkovej matice. To umožnilo vyvolať nielen mäkký, ale aj tvrdý budiaci impulz, pričom boli pri meraní používané vždy obidva. Úder bol smerovaný na protichodnú spodnú hranu podstavy oproti akcelerometru. To vyvolalo požadovaný vlastný tvar.



Smer merania odozvy

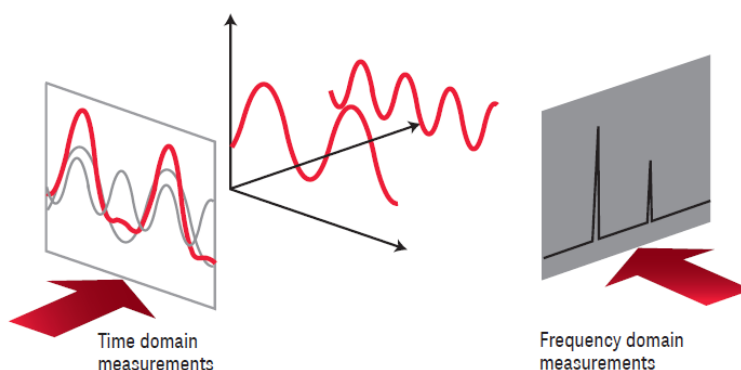
Obr. 4-6 Umiestnenie akcelerometra na vzorke.

4.4 Primárne metódy

Charakteristiky, priamo súvisiace s vlastnými frekvenciami a útlmovými vlastnosťami, boli určované primárnymi metódami. Z experimentálneho pohľadu bola využívaná impulzná modálna analýza. Vlastné frekvencie boli tiež overované výpočtom.

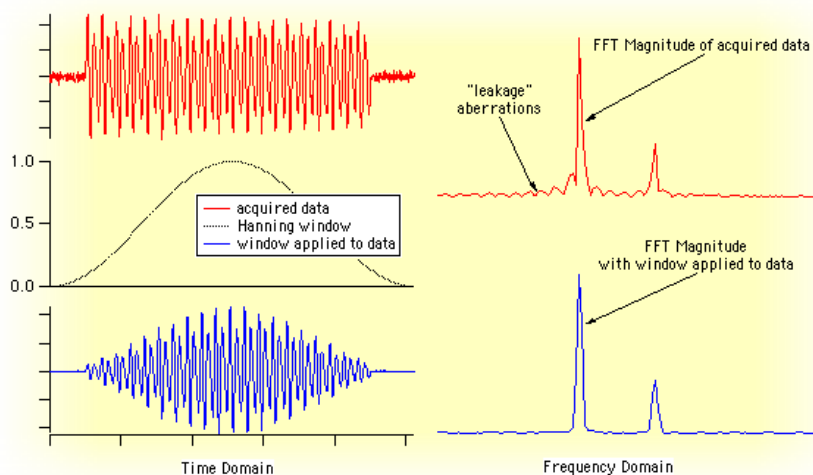
4.4.1 Určovanie vlastnej frekvencie modálnou analýzou

Signál zaznamenaný v časovej doméne poslúžil na určenie vlastných frekvencií pomocou Fourierovej transformácie. Táto transformácia slúži na vyjadrenie priebehu funkcie súčtom harmonických signálov, teda funkciami sínus a kosínus (vid' Obr. 4-7). Pri spracovaní diskretných signálov sa využíva najčastejšie využíva metóda *Fast Fourier Transform (FFT)* kvôli jej vysokej efektívnosti [30]. Software DEWESoft poskytuje FFT ako vstavaný modul a umožňuje previesť meraný signál z časovej oblasti do frekvenčnej (spektrálnej) domény.



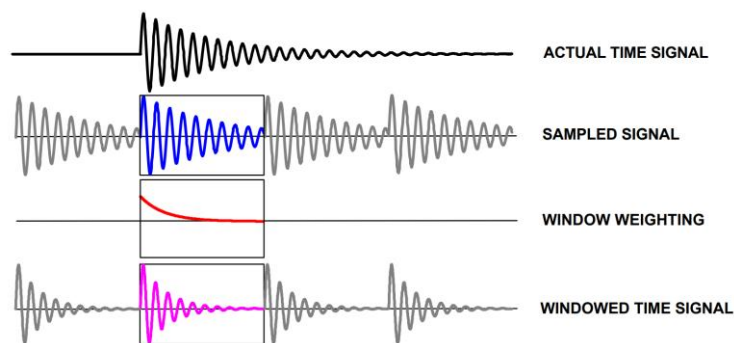
Obr. 4-7 Princíp spektrálnej analýzy: transformácia z časovej do frekvenčnej domény [31].

Aby bolo možné aplikovať FFT analýzu lokálne, je nutné vybrať časť analyzovaného signálu. Podmienkou FFT spektrálnej analýzy je však periodický signál. To je možné dosiahnuť kopírovaním vybraného úseku za sebou (vid' Obr. 4-9). Problém však nastáva ak signál spojených úsekov je nespojitý, pretože nespojitosť rozmazáva výsledné spektrum falošnými frekvenciami (vid' Obr. 4-8). Tento problém je možné vyriešiť pre násobením analyzovaného úseku váhovou funkciou. Jej priebeh môže byť podľa účelu analýzy rôzny, avšak na hraniciach vždy smeruje k nule. To zaručuje, že výsledný signál z periodicky kopírovaného úseku bude hladký a spojitý.



Obr. 4-8 Vplyv aplikácie váhovej funkcie (Hanningovo okno) na výsledné frekvenčné spektrum [32].

V diplomovej práci bola v rámci modálnej analýzy zvolená exponenciálna váhová funkcia, ktorá je pre impulzné budenie najpoužívanejšia [16]. Pribeh funkcie v okne je exponenciálne klesajúci od ľavej hranice. To umožňuje sledovať frekvenčné spektrum, zamerané najmä na oblasť signálu tesne po údere (viď Obr. 4-9). Vďaka tomu sú v spektrálnej charakteristike zachytené všetky frekvencie spolu s tými silno tlmenými. Vysoké rozlíšenie spektra bolo zaručené vysokou vzorkovacou frekvenciou $f_{vz} = 200 \text{ kHz}$, ktorá definovala minimálne rozlíšenie čiar spektra na $\Delta f = 1,53 \text{ Hz}$. Tieto parametre FFT analýzy boli striktné dodržiavané pri spracovaní všetkých signálov. Zo spektra bola zisťovaná najmä najnižšia rezonančná frekvencia prvého vlastného tvaru.



Obr. 4-9 Okienkovanie (exponenciálnou) váhovou funkciou zaručuje periodicitu analyzovaného úseku [16].

4.4.2 Určovanie pomerného útlmu modálnou analýzou

Kritická rešerš ukázala, že najčastejším spôsobom určenia stratového faktora je dynamickou mechanickou analýzou alebo metódou half-power bandwidth, ktorá je založená na modálnej analýze (viď kap. 2.2.3). Avšak, technicky jednoduchším spôsobom určenia stratového faktora pomocou modálnej analýzy je skrz logaritmický dekrement [15].

Teleso je pri tejto metóde excitované impulzom alebo uvoľnením z krajnej polohy. Dekrement je určený na základe časovej odozvy systému bez nutnosti merania vstupného budenia. Jeho hodnota je určená dvoma po sebe idúcimi amplitúdami,

$$v = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} \quad (4.1)$$

alebo určením súčiniteľa útlmu b , pri preložení amplitúd exponenciálou (viď Obr. 4-10),

$$y(t) = A_0 e^{-bt} \quad (4.2)$$

a jeho prepočtom na logaritmický dekrement:

$$v = bT \quad (4.3)$$

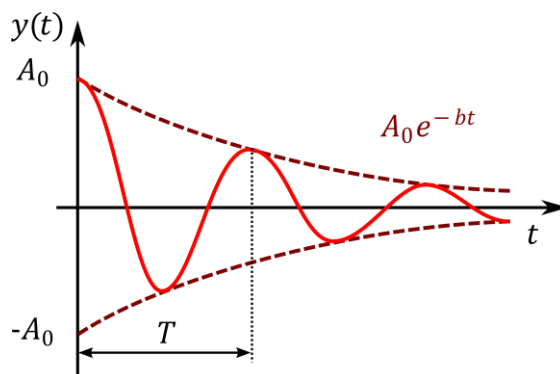
Z logaritmického dekrementu je následne možné odvodiť pomerný útlm:

$$\zeta = \frac{v}{\sqrt{4\pi + v^2}} \quad (4.4)$$

pričom pre $\zeta < 0,05$ platí, že:

$$\eta = 2\zeta \quad (4.5)$$

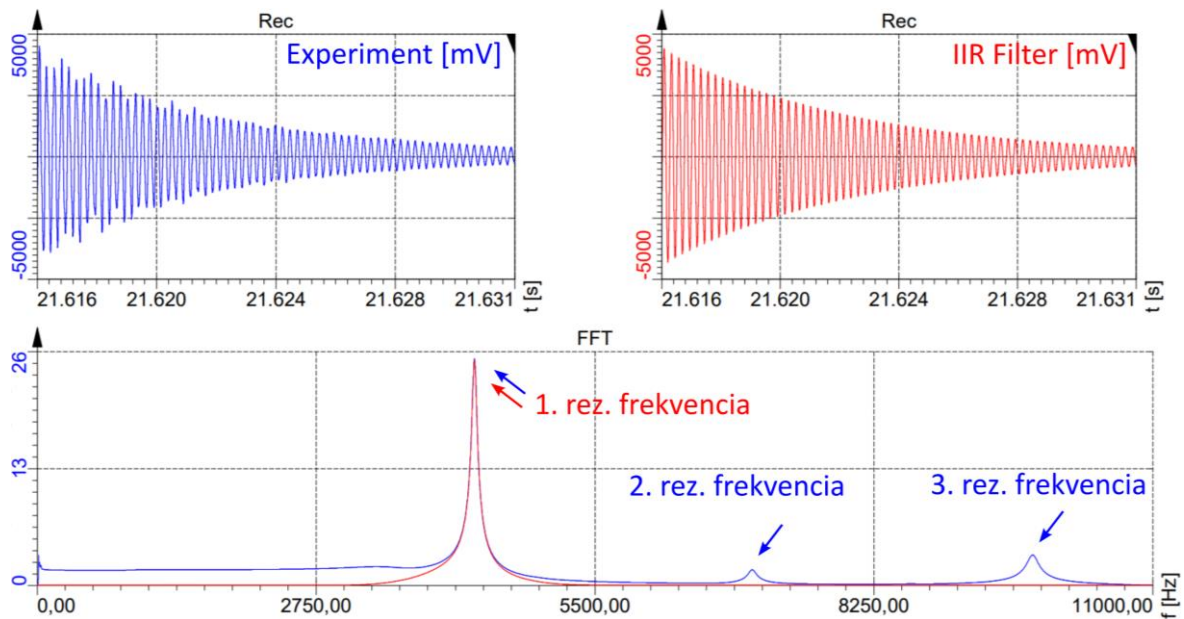
kde v je logaritmický dekrement, $A(t)$ a $A(t+T)$ sú dve po sebe namerané amplitúdy, b je súčiniteľ útlmu, T je perióda kmitania, ζ je pomerný útlm a η je stratový súčiniteľ.



Obr. 4-10 Tlmené kmitanie – preloženie extrémov časového priebehu exponenciálou.

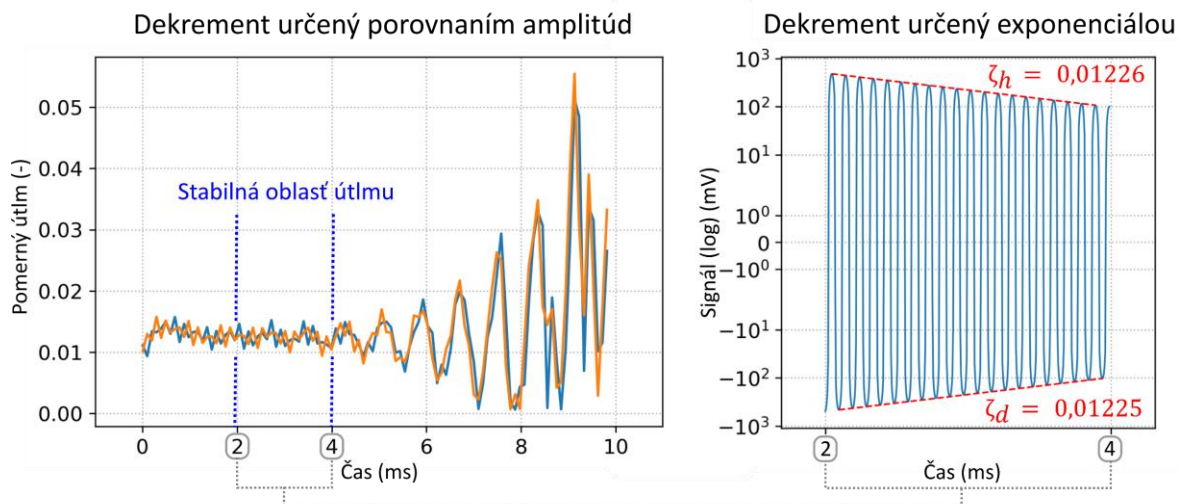
V diplomovej práci boli využité oba princípy určenia logaritmického dekrementu či už porovnaním lokálnych maxím, alebo preložením amplitúd exponenciálnou funkciou. Determinácia útlmového pomeru sa však skladala z niekoľkých krokov:

1. Odfiltrovanie nechcených rezonančných frekvencií aplikáciou IIR Besselovho filtra s pásmovou priepusťou v rozsahu $\Delta f \pm 500 \text{ Hz}$ vzhľadom k prvej rezonančnej frekvencii (DEWESoft; viď Obr. 4-11):



Obr. 4-11 Aplikácia IIR filtra na elimináciu parazitných rezonančných frekvencií (modrou).

2. Určenie analyzovaného úseku signálu a export dát (DEWESoft)
3. Určenie oblasti so stabilnou hodnotou pomerného útlmu (Python; vid' Obr. 4-12 vľavo)
4. Určenie hodnoty pomerného útlmu aproximačnými exponenciálami, pričom zistené hodnoty útlmu pre hornú a dolnú krivku boli spriemerované (Python; vid' Obr. 4-12 vpravo)



Obr. 4-12 Určenie stabilnej oblasti útlmu (log. dekrement zistený porovnaním amplitúd - vľavo) a výsledná determinácia pomerného útlmu (log. dekrement určený exponenciálou - vpravo).

4.4.3 Overenie výpočtových modelov a ich úpravy

Metódy konečných prvkov sú v súčasnosti bežným prístupom určovania vlastných frekvencií a tvarov súčastí a strojných systémov. Sú obľúbené najmä kvôli názornej ukážke rezonančných tvarov celej sústavy, čo umožňuje efektívne posudzovať chovanie súčastí pri vibráciách. MKP modálna analýza je založená na riešení sústavy diferenciálnych rovníc pre harmonický kmitavý pohyb, určených pre konečný počet prvkov spojitého kontinua [33]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{f} = 0 \quad (4.6)$$

Vzhľadom na predpokladané vykonanie experimentu so zanedbateľným vplyvom okrajových podmienok je možné predpokladať $\mathbf{f} = 0$. Vplyv útlmu na hodnotu vlastnej frekvencie je taktiež nepodstatný, preto je možné pri simuláciách uvažovať $\mathbf{C} = 0$. Rovnicu je teda možné redukovať na tvar:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad (4.7)$$

kde \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} sú matice hmotnosti, útlmu a tuhosti a sú definované pre celú konečno-prvkovú sieť, $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$, \mathbf{u} sú vektory neznámych nezávislých zrýchlení, rýchlostí a posuvov a \mathbf{f} je vektor zaťaženia (resp. okrajových podmienok).

Zostavenie potrebných matíc hmotnosti a tuhosti je algoritmicky náročné, preto sa využívajú softwary zjednodušujúce tento proces. V diplomovej práci sa využil overený software Ansys Workbench s objemovým a zjednodušeným prútovo-plošným modelom. Príprava modelov bola však časovo náročná alebo prakticky nepoužiteľná. Za týmto účelom bol vytvorený objemovo-prútový výpočtový model v programe nTopology. Jeho výhodou je najmä parametrické zostavenie geometrie, čo umožňuje radikálne znížiť čas potrebný pre tvorbu konečno-prvkovej siete. Výpočtové modely boli porovnávané nielen medzi sebou, ale aj voči experimentu. Preto vzniklo niekoľko sérií výpočtov a vzájomných porovnaní:

1. Redukcia chyby prútového voči objemovému výpočtovému modelu:
 - Referenčný objemový model (BCC, FLU, DIA)
 - Prútový model bez optimalizácie (BCC)
 - Prútový model s optimalizáciou spevnením uzlov podľa Guo a spol. [10] (BCC)
 - Prútový model s vlastnou modifikáciou (BCC, FLU, DIA)

Tento súbor výpočtov využíval materiálové vlastnosti oceli S316L prevzaté z dostupných publikácií a tabuliek softwaru Ansys Workbench.

2. Porovnanie prútového výpočtu voči experimentu:
 - Prútový model so skutočnými vlastnosťami vzoriek (BCC, FLU, DIA)

Druhá časť výpočtov uvažovala skutočné materiálové charakteristiky, určené sekundárnymi experimentami. Vo všetkých výpočtoch boli skúmané a porovnávané najmä prvé vlastné frekvencie.

4.5 Sekundárne metódy

K priblíženiu výsledkov výpočtových modelov k reálnym hodnotám rezonančných frekvencií bolo nutné presnejšie definovať ďalšie charakteristiky vyrobených štruktúr. Vzhľadom na to, že vlastná frekvencia závisí na hmotnosti, rozmiestnení hmoty a tuhosti, boli využité sekundárne metódy determinujúce hustotu materiálu, Youngov modul pružnosti a skutočný tvar vyrobených vzoriek.

4.5.1 Meranie hustoty Archimedovým zákonom

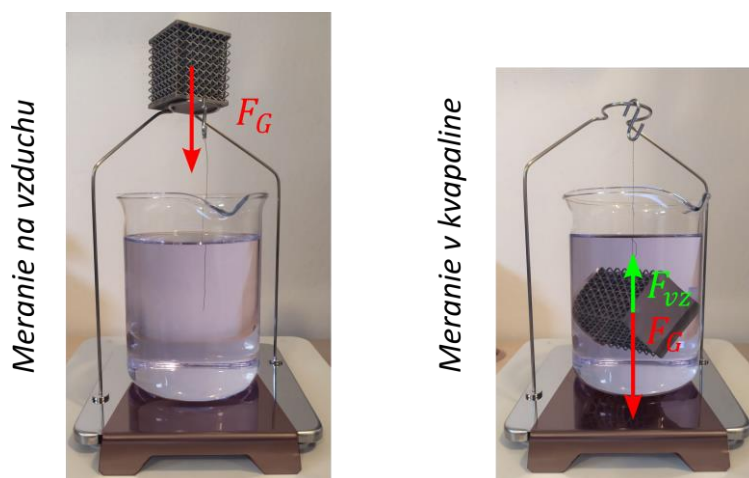
Hustota materiálu bola determinovaná meraním hmotnosti vzoriek na špeciálnych váhach využívajúcich Archimedov zákon. Tieto váhy umožňujú určiť hustotu materiálu na základe vztlakovej sily po ponorení telesa do kvapaliny. Postup experimentu prebieha v nasledujúcich krokoch:

1. Inicializačné vynulovanie a kalibrácia váh po spustení
2. Určenie hustoty kvapaliny pomocou ciachovaného ponorného telesa
3. Určenie hmotnosti telesa na vzduchu
4. Určenie hmotnosti telesa nadnášaného kvapalinou
5. Automatický prepočet hustoty materiálu

Prepočet uvažuje, že je teleso ponorené celým objemom. Potom je možné použiť jednoduchý výpočet na zistenie hustoty pevného materiálu [34]:

$$\rho_s = \rho_k \frac{F_G}{F_{vz}} \quad (4.8)$$

kde ρ_s je zisťovaná hustota materiálu, ρ_k je hustota kvapaliny a F_G je tiažová sila telesa (zmeraná na vzduchu) a F_{vz} je vztlaková sila (zmeraná pri ponorení telesa).



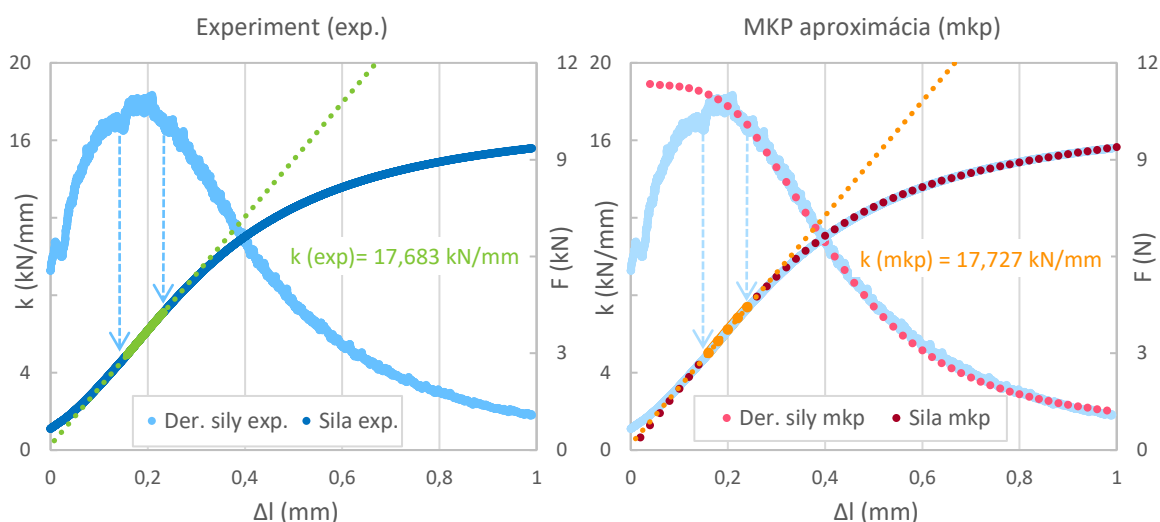
Obr. 4-13 Meranie hustoty materiálu na váhach s využitím Archimedovho zákona.

Nádoba s kvapalinou je vždy umiestnená na oddelenej podložke aby nebola do merania zahrnutá ich hmotnosť. Pre zvýšenie presnosti bol zvolenou kvapalinou acetón, ktorý vďaka nižšiemu povrchovému napätiu preniká hlbšie do nerovností povrchu. Takto bol vplyv povrchových vzduchových mikro bublín minimalizovaný. Záves telesa bol počas oboch meraní hmotností ponorený v kvapaline (či už pri meraní vzorky na vzduchu alebo v kvapaline). Tým sa eliminoval jeho vplyv na výslednú hustotu meraných vzoriek (viď Obr. 4-13).

4.5.2 Určovanie tuhosti materiálu tlakovou skúškou

Modul pružnosti materiálu bol určený pomocou tlakovej skúšky, stlačením vyrobených vzoriek. Výsledkom experimentu boli dáta vo forme závislostí sily a deformácie. Vzhľadom na to, že sa nejednalo o bežné normované testovacie telesá, nebolo možné vypočítať modul pružnosti analyticky. Naopak bolo nutné vytvoriť MKP analýzu simulujúcu tlakovú skúšku.

Numerický výpočet využíval statickú analýzu zahŕňajúcu aproximovanú skutočnú geometriu testovaných vzoriek získanú 3D skenovaním a bilineárny materiálový model. Vo výpočte bol povolený parameter veľkých deformácií, pretože prúty vykazovali v rámci svojej dĺžky značné deformácie a prekročili na mnohých miestach medzu klzu. V prípade, že bol uvažovaný lineárny výpočet s lineárnym materiálom, došlo k zdanlivému navýšeniu tuhosti vzorky a preto bol tento model už v počiatku zavrhnutý. Výpočet využil osminovú symetriu, čo umožnilo zahustiť sieť s veľkosťou elementu predstavujúcou štvrtinu priemeru prútu. Sledovanou výstupnou veličinou bola reakčná sila, ktorá bola použitá pri porovnaní experimentu s výpočtom.

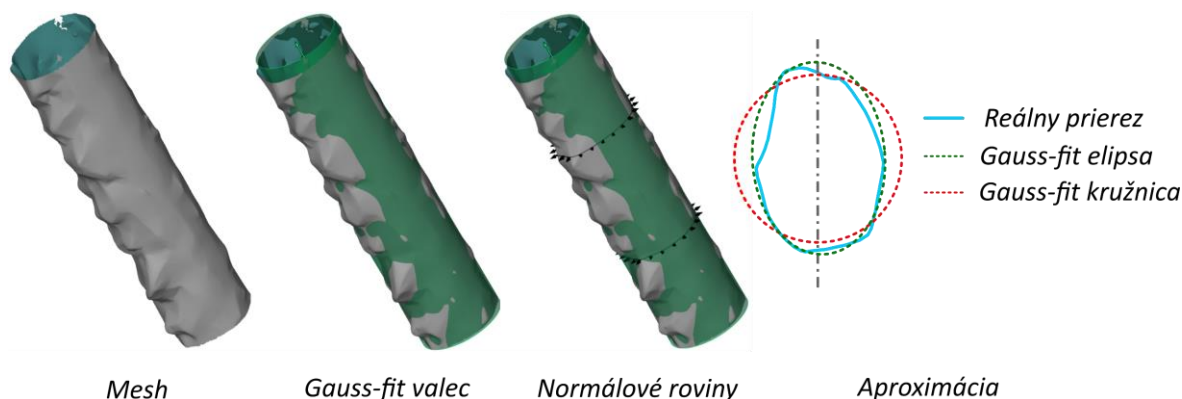


Obr. 4-14 Porovnanie dát experimentálnej tlakovej skúšky a numerickej simulácie.

V rámci simulácie bol iteratívne optimalizovaný bilineárny materiálový model. Ten bol definovaný Youngovým modulom pružnosti, medzou klzu a tangenciálnym modulom pružnosti. Parametre bilineárneho materiálu boli upravované, až kým experiment a výpočet nedosiahli uspokojivú zhodu (viď Obr. 4-14). Experimentálne a výpočtové dáta boli porovnávané z priebehov reakčných síl, ich prvej derivácie a lineárnej tuhosti (derivácia reakčnej sily pomohla určiť lineárnu oblasť priebehu experimentálnych dát). Nezhoda dát na začiatku priebehov bola spôsobená ustáľovaním vzorky v čeľustiach, kvôli nedokonalému povrchu stien vzoriek. Preto bola táto časť priebehu sily ignorovaná. Výsledky experimentu a výpočtu boli zrovnávané na celkovej deformácii 1 mm.

4.5.3 Meranie skutočnej geometrie 3D skenovaním

Zhodnotenie výrobných nepresností prútov bolo vykonané 3D skenovaním, pomocou zariadenia ATOS TripleScan 8M. Nasnímaná geometria bola exportovaná vo formáte „.stl“ a spracovaná v softwari GOM Inspect.



Obr. 4-15 Vyhodnotenie skutočnej geometrie prútov.

Z geometrie boli vybraní vhodní kandidáti spomedzi prútov s dostatočne kvalitnou triangulačnou sieťou. Obálkovou plochou bol preložený aproximačný Gauss-fit valec. Jeho osou boli vedené normálové plochy vytvárajúce kolmé rezy. Skúmaný bol skutočný prierez prútu a vlastnosti aproximačných geometrií. V prípade Gauss-fit kružnice bol zaznamenávaný jej priemer a plocha, pri Gauss-fit elipse boli sledované rozmery hlavnej a vedľajšej polosi spolu s jej plochou. Do analýzy boli zahrnuté aj priemery vpísanej kružnice spolu s plochou skutočného prierezu. Z naskenovanej geometrie bola tiež vyhodnotená skutočná hrúbka stien.

4.6 Testované predikcie

Kritická rešerš spolu s exploračnými výpočtami pomohli vysloviť prvé predikcie. Vzhľadom nato že zvolené skupiny vzoriek umožňujú sledovať niekoľko závislostí naraz, bolo nutné predpovedať chovanie na základne viacerých premenných. Z pohľadu prvej výskumnej otázky bolo teda možné predikovať:

- 1.A. Zväčšovanie základnej bunky bude znižovať prvú vlastnú frekvenciu (pri uvažovaní konštantného priemeru prútov).
- 1.B. Zväčšovanie priemeru prútov bude zvyšovať prvú vlastnú frekvenciu (pri uvažovaní konštantnej veľkosti základnej bunky).
- 1.C. Vlastná frekvencia bude konštantná pri konštantnej relatívnej hustote (veľkosť základnej bunky a priemer prútov sú premenné).
- 1.D. Štruktúry s jemnejšou štruktúrou (s menšou základnou bunkou a tenšími prútmi) pri konštantnej relatívnej hustote budú vykazovať vyšší pomerný útlm.

V prípade druhej výskumnej otázky bolo možné očakávať výrazné nezhody objemového a zjednodušeného prútového výpočtového modelu. Napriek tomu bolo možné predpovedať:

- 2.A. Korekcia chyby zjednodušeného výpočtového modelu zvýšením priemeru prútov o 40 % v uzloch, podľa Guo a spol. [10], bude nedostatočná.
- 2.B. Korekciu chyby zjednodušeného výpočtového modelu bude možné zaručiť zmenou materiálových charakteristík v uzloch.
- 2.C. Nezrovnalosť výpočtu a experimentu bude možné korigovať spresnením materiálových, geometrických a mechanických vlastností skutočných vzoriek.

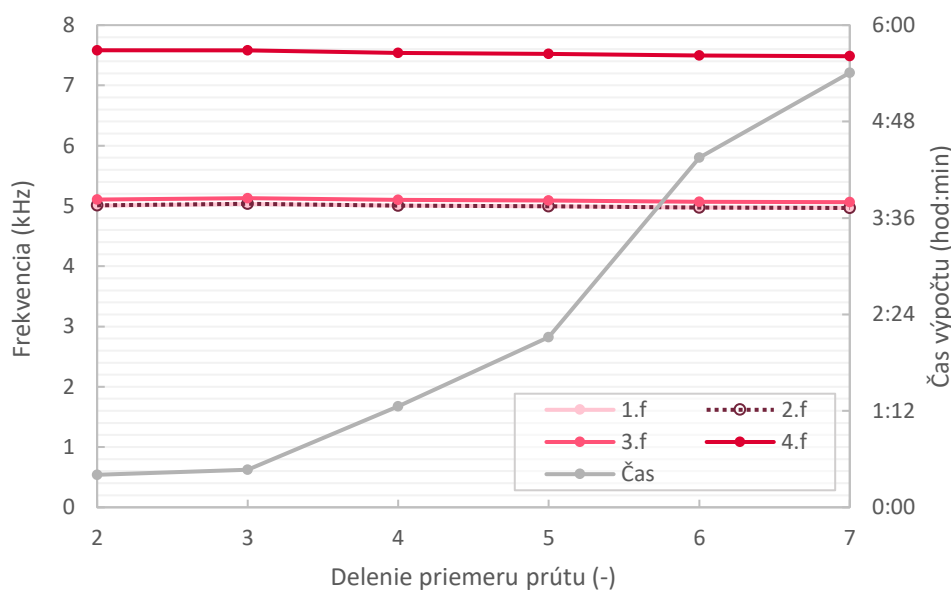
Vyslovené predikcie boli skúmané najmä na skupine vzoriek so štruktúrou BCC a správnosť navrhnutých korekcií bola overovaná na ďalších štruktúrach FLU a DIA.

5 VÝSLEDKY

5.1 Numerická modálna analýza – overenie dostupného riešenia zjednodušeného prúťového MKP modelu

5.1.1 Referenčný objemový model

Prvou zo simulácií bol výpočet štruktúr BCC uvažujúci objemové elementy. Geometria bola vytvorená v softvare Autodesk Inventor a importovaná do Ansys Workbench. Jemnosť siete bola určená na základe citlivostnej analýzy, ktorá nepreukázala významný vplyv veľkosti elementov na výslednú rezonančnú frekvenciu. Tento výpočet uvažoval CAD model s najjemnejšou štruktúrou ($D = 0,65 \text{ mm}$; $L = 4,5 \text{ mm}$) a tabuľkové materiálové charakteristiky ($\rho = 7750 \text{ kg/m}^3$; $E = 193 \text{ GPa}$). Veľkosť elementu bola určovaná ako delenec priemeru prúťov.



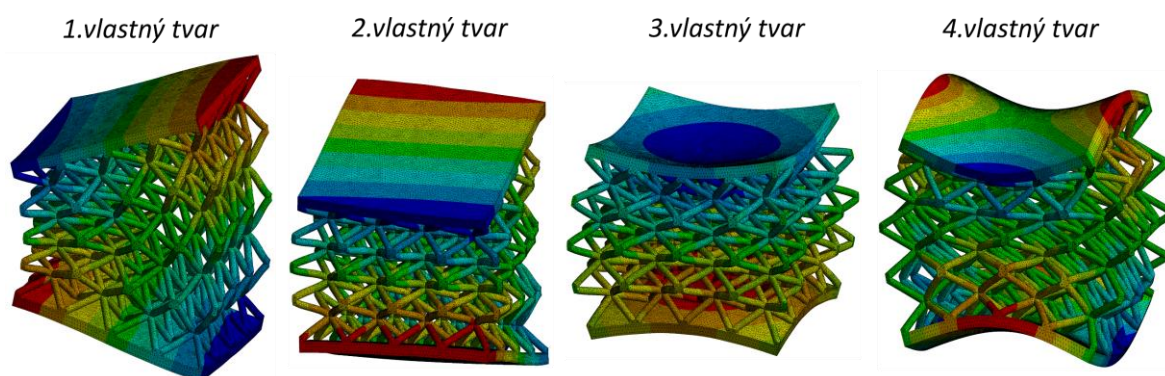
Obr. 5-1 Citlivostná analýza veľkosti elementov na vlastnú frekvenciu. Veľkosť elementu bola vždy definovaná ako delenec priemeru prúťov.

Referenčný výpočtový model, popísaný nižšie, teda uvažoval tetrahedrálne elementy, vždy menšie než jedna pätina priemeru prúťov a materiálové charakteristiky oceli S316L spresnené z publikácií. Youngov modul pružnosti bol určený podľa [9] na hodnotu $E = 94 \text{ GPa}$ a hustota materiálu bola ponechaná na hodnote $\rho = 7750 \text{ kg/m}^3$. Výpočet bol vykonaný na deviatich vybraných štruktúrach, kvôli vysokej hardwarovej a teda aj časovej náročnosti simulácie.

Tab. 5-1 Výsledky výpočtu štruktúry BCC pri uvažovaní objemových elementov (viď prílohu V-A001); červenou sú vyznačené hodnoty s požadovaným vlastným tvarom.

ρ (-)	D (mm)	L (mm)	1.f (Hz)	2.f (Hz)	3.f (Hz)	4.f (Hz)
9,9%	0,65	4,5	3486,9	3487,1	3553	5250,3
20,7%	0,98		6876,8	6877,7	7105,6	8840
33,6%	1,3		11025	11026	11824	13691
9,9%	0,87	6	3513,4	3513,9	3589,4	5292,4
20,6%	1,3		6801,1	6801,9	7050,3	8797,1
33,8%	1,74		11041	11042	11895	13783
9,9%	1,3	9	3493,7	3494	3595,7	5321,9
20,7%	1,96		6819,1	6820,7	7127,2	8924,1
33,8%	2,61		10949	10951	11869	13812

Výsledky ukazujú veľmi podobné hodnoty prvých dvoch vlastných frekvencií. Z vykreslenia deformácie je zrejmé, že prvé dva vlastné tvary sú takmer totožné (viď Obr. 5-2). Tento efekt bol potlačený po pridaní dodatočnej hmotnosti, predstavujúcej akcelerometer, kedy sa vlastné frekvencie oddelili (viď Obr. 4-5). Tieto poznatky viedli k vytvoreniu experimentálneho postupu merania rezonančných frekvencií a pomohli určiť polohu akcelerometra (viď kapitolu 4.3.2). Ovplyvnenie akcelerometrom sa preukázalo ako nie príliš značné. Zahnutie geometrie a hmotnosti akcelerometra pri najľahších vzorkách, viedlo k zníženiu sledovanej rezonančnej frekvencii maximálne o 6 %.



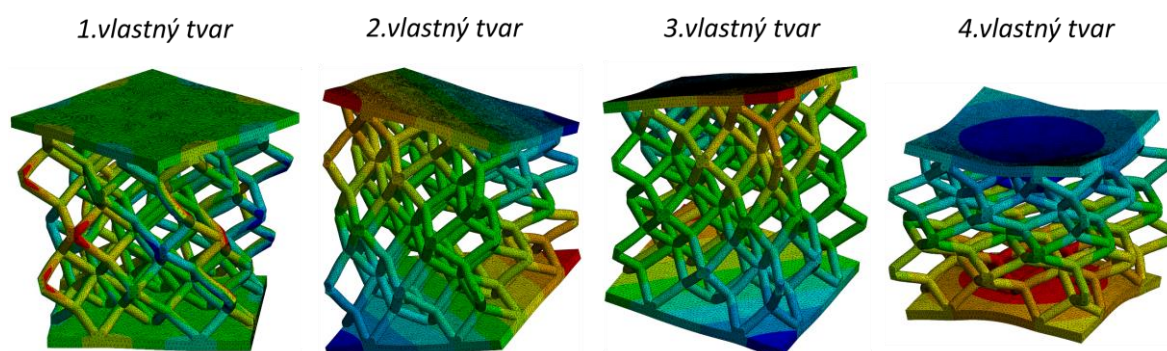
Obr. 5-2 Vlastné tvary štruktúry BCC (farebne je vykreslená smerová deformácia v zvislom smere totožná so smerom snímania zrýchlenia akcelerometrom).

Podobný výpočet bol vykonaný na ostatných typoch vzoriek FLU a DIA. Materiálové charakteristiky boli zachované, aby bolo možné vlastné frekvencie navzájom porovnať. Výsledky naznačujú, že je v oboch prípadoch vyššia než pri štruktúre BCC.

Tab. 5-2 Výsledky výpočtu štruktúry FLU pri uvažovaní objemových elementov (viď prílohu V-A002); červenou sú vyznačené hodnoty s požadovaným vlastným tvarom.

ρ (-)	D (mm)	L (mm)	1.f (Hz)	2.f (Hz)	3.f (Hz)	4.f (Hz)
9,8%	0,92	9	4071,9	4254	4254,4	4657
20,8%	1,4		8202,8	8544,1	8545,5	9450,9
33,8%	1,87		12272	13478	13479	15185
9,9%	1,23	12	4055,9	4267,9	4268,5	4682,4
20,7%	1,86		8061,7	8439,8	8440,5	9371,6
33,7%	2,49		12125	13353	13354	15101
9,9%	1,85	18	3917,2	4251,4	4252,5	4702
20,7%	2,79		7767,3	8300,3	8301	9290
33,7%	3,73		11745	13095	13101	14903

V prípade štruktúry FLU simulácia naznačila, že charakter prvého vlastného tvaru je iná než prvý vlastný tvar štruktúry BCC. Vzhľadom na to, aby boli dodržané rovnaké podmienky experimentu, v porovnaníach výpočtov sa u štruktúry FLU uvažuje až druhá vlastná frekvencia vzoriek.



Obr. 5-3 Vlastné tvary štruktúry FLU (farebne je vykreslená smerová deformácia v zvislom smere totožná so smerom snímania zrýchlenia akcelerometrom).

Chovanie vlastných tvarov štruktúry DIA bolo komplikovanejšie. Požadovaný rezonančný tvar bol zväčša zaznamenaný na prvej vlastnej frekvencii (podobne ako pri štruktúre BCC). Pri veľkosti základnej bunky $L = 18 \text{ mm}$ sa však dvakrát (podobne ako pri štruktúre FLU) vyskytol tento tvar pri druhej vlastnej frekvencii (viď Tab. 5-3).

Tab. 5-3 Výsledky výpočtu štruktúry DIA pri uvažovaní objemových elementov (viď prílohu V-A003); červenou sú vyznačené hodnoty s požadovaným vlastným tvarom.

ρ (-)	D (mm)	L (mm)	1.f (Hz)	2.f (Hz)	3.f (Hz)	4.f (Hz)
9,8%	1,31	9	4850,8	4851,2	5042,8	5654,4
20,8%	1,98		8973,6	8974,2	9499,4	10586
33,8%	2,64		13132	13132	13428	15654
9,9%	1,77	12	4736	4736,2	4897,4	5694,7
20,7%	2,66		8673,6	8674,1	9146,9	10560
33,7%	3,55		12726	12729	13011	15620
9,9%	2,7	18	4356,8	4366,4	4367,6	5649,6
20,7%	4,08		8015	8017,6	8166,2	10488
33,7%	5,45		11733	11779	11783	15355

5.1.2 Prúťový model – bez optimalizácie

Prúťový model, vytvorený v software nTopology bol overený na niekoľkých konfiguráciách rovnakým prúťovým modelom v programe Ansys. Po dosiahnutí totožných výsledkov nebol výpočtový model v Ansys ďalej používaný, kvôli jeho náročnosti na prípravu dát. Naopak nTopology, vďaka jednoduchej parametrizácii, umožnil pomerne rýchlo získať dáta v zúženom rozsahu vzoriek BCC a porovnávať ich s objemovým výpočtovým modelom popísaným v predošlej kapitole.

Úspechom tohto výpočtového modelu bol fakt, že výsledky vlastných tvarov sa zhodovali s objemovým modelom. Naopak, pri hodnotách rezonančných frekvencií bola zaznamenaná výrazná nezhoda výsledkov objemového a prúťového modelu bez optimalizácie (viď Tab. 5-4). Preto nebol tento typ modelu vytváraný pre ďalšie typy štruktúr. Ďalším krokom bolo vyšetriť túto nezhodu a pokúsiť sa ju redukovať.

Tab. 5-4 Porovnanie výsledkov vlastných frekvencií BCC štruktúry: prútový model voči objemovému modelu bez optimalizácie (viď prílohu V-n001).

ρ (-)	D (mm)	L (mm)	1.f (Hz)	2.f (Hz)	3.f (Hz)	4.f (Hz)
9,9%	0,65	4,5	-19,6%	-19,6%	-19,0%	-18,0%
20,7%	0,98		-32,0%	-31,3%	-33,5%	-35,2%
33,6%	1,3		-42,3%	-41,9%	-45,9%	-47,4%
9,9%	0,87	6	-19,5%	-19,5%	-19,1%	-18,1%
20,6%	1,3		-31,4%	-31,0%	-33,5%	-34,7%
33,8%	1,74		-42,0%	-42,0%	-46,1%	-47,2%
9,9%	1,3	9	-19,4%	-19,4%	-18,9%	-17,8%
20,7%	1,96		-31,4%	-31,4%	-33,8%	-34,3%
33,8%	2,61		-42,3%	-42,3%	-45,7%	-46,3%

5.1.3 Prútový model – overenie dostupnej optimalizácie

Prvou z analyzovaných optimalizácií prútového výpočtového modelu bola úprava prútov v oblasti ich spojov zvýšením ich priemeru. Touto modifikáciou sa zaoberal Guo a spol. [10] pri statickej analýze BCC štruktúry a Scalzo a spol. [23] pri modálnej numerickej analýze FBCCZ štruktúry. Navrhovaná úprava bola aplikovaná navýšením priemeru prútu o 40 % na jednej desatine dĺžky každého konca prútu. Prúty bolo teda nutné rozdeliť a priradiť im rozdielne parametre.

Výsledky výpočtu preukázali priblíženie vlastných frekvencií najmä pri nízkych relatívnych hustotách. Naopak, pri vyšších relatívnych hustotách bol rozdiel výsledkov stále značný. Tento nedostatok v prípade tuhosti predikoval aj sám autor jednej zo spomenutých publikácií [10]. Výsledky tiež naznačili, že nezhoda objemového a prútového modelu je zrejme závislá na relatívnej hustote (viď Tab. 5-5).

Tab. 5-5 Porovnanie výsledkov vlastných frekvencií: prúťový model voči objemovému modelu s optimalizáciou spevnení uzlov podľa Guo a spol [10] (viď prílohu V-n002).

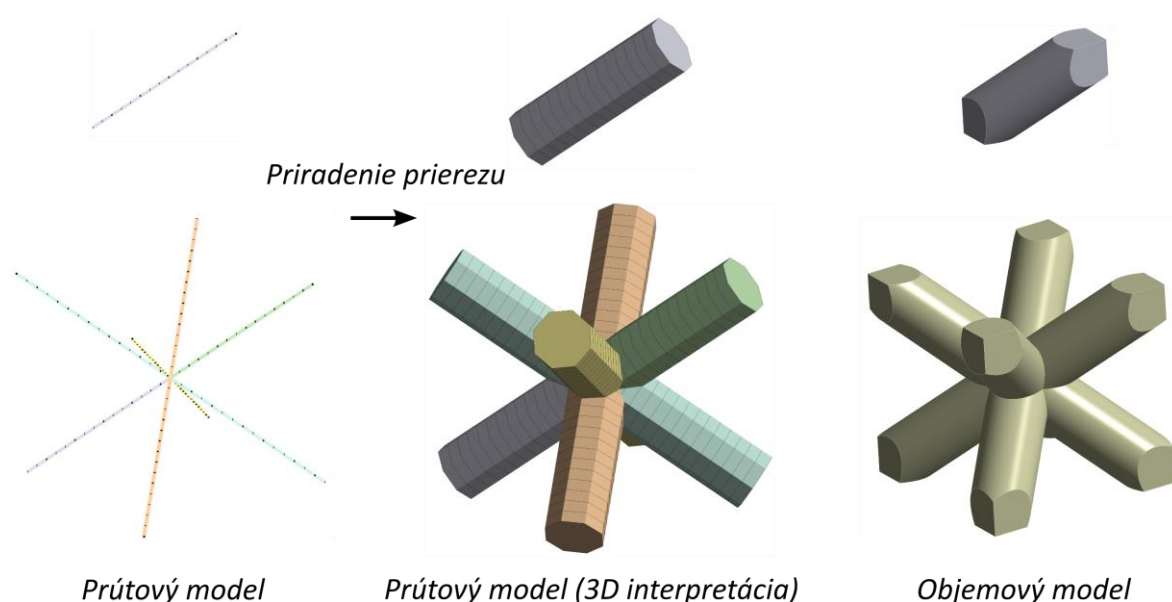
ρ (-)	D (mm)	L (mm)	1.f (Hz)	2.f (Hz)	3.f (Hz)	4.f (Hz)
9,9%	0,65	4,5	-3,1%	-3,1%	-3,5%	-4,6%
20,7%	0,98		-18,2%	-18,2%	-20,6%	-22,3%
33,6%	1,3		-31,2%	-31,8%	-35,6%	-37,2%
9,9%	0,87	6	-3,3%	-3,2%	-3,7%	-4,8%
20,6%	1,3		-18,1%	-18,1%	-20,4%	-21,9%
33,8%	1,74		-32,0%	-32,0%	-35,7%	-37,0%
9,9%	1,3	9	-3,6%	-3,6%	-3,8%	-4,6%
20,7%	1,96		-19,0%	-19,0%	-20,6%	-21,7%
33,8%	2,61		-32,9%	-32,8%	-35,5%	-36,3%

5.2 Numerická modálna analýza – návrh a overenie vlastnej optimalizácie zjednodušeného prúťového MKP modelu

Prúťové elementy prinášajú mnoho výhod, najmä nižšiu výpočtovú náročnosť komplexných sústav. Avšak pri vysokom počte prúťov mikro-prúťovej štruktúry zjednodušenie vnáša do výpočtu príliš veľké skreslenia. Ako vyplýva z Tab. 5-5, navrhnutá optimalizácia prúťového modelu zväčšením priemeru prúťov v oblasti uzlov všeobecne nespĺňa požiadavky pre modálnu analýzu a pre širokú škálu relatívnych hustôt. Snahou teda bolo navrhnuť vlastnú optimalizáciu výpočtu. Z vedomostí dynamiky je známe, že vlastné frekvencie systému závisia najmä na tuhosti a rozložení hmotnosti systému. Preto bolo nutné vyšetriť dielčie vplyvy prúťového zjednodušenia na tieto veličiny.

5.2.1 Ovplyvnenie hmotnosti prúťovými elementami

Pokiaľ uvažujeme prúťové elementy, je zřejmé, že sa jedná o úsečkami previazané body s priradenými prierezovými charakteristikami. Tým vytvárajú požadovaný valcovitý tvar prúťu. Objemový prúť je však v skutočnosti na svojich koncoch skosený. Tento tvarový prvok zaručuje správne spojenie s ostatnými prúťmi štruktúry (viď Obr. 5-4).



Obr. 5-4 Porovnanie geometrie prúťového a objemového modelu BCC štruktúry pri rovnakých parametroch.

Ak porovnáme objem prúťového a objemového modelu na Obr. 5-4, je možné vidieť značný rozdiel. Výsledky analýzy preukázali, že tento rozdiel je závislý na pomere D/L štruktúry (viď Tab. 5-6). Zvyšovanie tohto pomeru (teda aj relatívnej hustoty) vedie k zvyšovaniu hmotnostnej chyby prúťového modelu.

Tab. 5-6 Porovnanie objemu BCC štruktúry: prúťový model voči objemovému modelu.

Priemer prútu D (mm)	Veľkosť bunky L (mm)	Pomer D/L (-)	Objem objemovej bunky V (mm ³)	Objem prúťovej bunky V (mm ³)	Percentuálny rozdiel (-)
0,87	6	0,145	21,48	24,71	+13,07 %
1,3	6	0,217	44,41	55,17	+19,5 %
1,74	6	0,290	73,04	98,84	+26,1 %

5.2.2 Ovplynvenie tuhosti prúťovými elementami

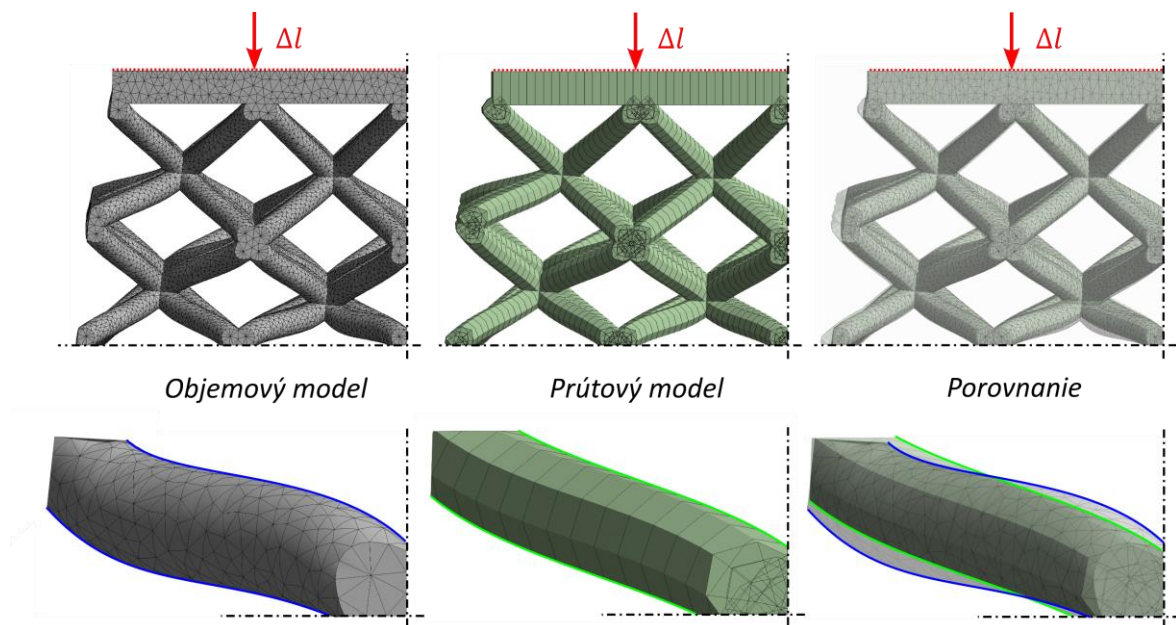
Vzhľadom na to, že prúťové zjednodušenie výrazne ovplyvňuje výslednú hmotnosť štruktúr, bolo možné domnievať sa, že podobné ovplyvnenie bude badateľné aj v prípade tuhosti. Za týmto účelom bola vytvorená analýza, porovnávajúca tuhosť prúťových a objemových elementov BCC štruktúry. Výpočet uvažoval stlačenie vzorky o $\Delta l = 0,1 \text{ mm}$, pričom bola sledovaná reakčná sila. Z týchto veličín bola prepočítaná tuhosť vzorky. Všetky vzorky uvažovali lineárny izotropný materiál s Youngovým modulom pružnosti $E = 94 \text{ GPa}$. Z porovnania výsledkov objemového a prúťového modelu vyplynulo, že ovplyvnenie výslednej tuhosti taktiež závisí na pomere D/L . Ako naznačuje Tab. 5-7, vyšší

pomer D/L (teda aj relatívna hustota štruktúry) spôsobuje zväčšovanie chyby prútového modelu. Výsledky tiež naznačili, že vplyv ostatných parametrov (pri dodržaní rovnakého pomeru D/L) nie je významný.

Tab. 5-7 Porovnanie tuhosti BCC štruktúry: prútový model voči objemovému modelu (viď prílohu V-A004).

Priemer prútu D (mm)	Veľkosť bunky L (mm)	Pomer D/L (-)	Tuhosť objemového modelu k (kN/mm)	Tuhosť prútového modelu k (kN/mm)	Percentuálny rozdiel (-)
0,98	4,5	0,218	53,224	30,726	-42,3%
1,3	6	0,217	52,936	31,107	-41,2 %
1,96	9	0,218	55,792	33,508	-39,9 %
0,87	6	0,145	12,452	9,424	-24,3 %
1,3	6	0,217	52,936	31,107	-41,2 %
1,74	6	0,290	166,756	74,323	-55,4 %

Porovnanie deformácií objemového modelu a prútového modelu naznačilo, že prútové zjednodušenie spôsobuje podhodnotenie tuhosti mikro-prútovej štruktúry najmä v oblasti uzlov (viď Obr. 5-5). Dokazuje to vyššia poddajnosť v uzloch prútového modelu, pozorovateľná predovšetkým pri porovnaní kontúr prútov pri deformácii v strede vzorky.



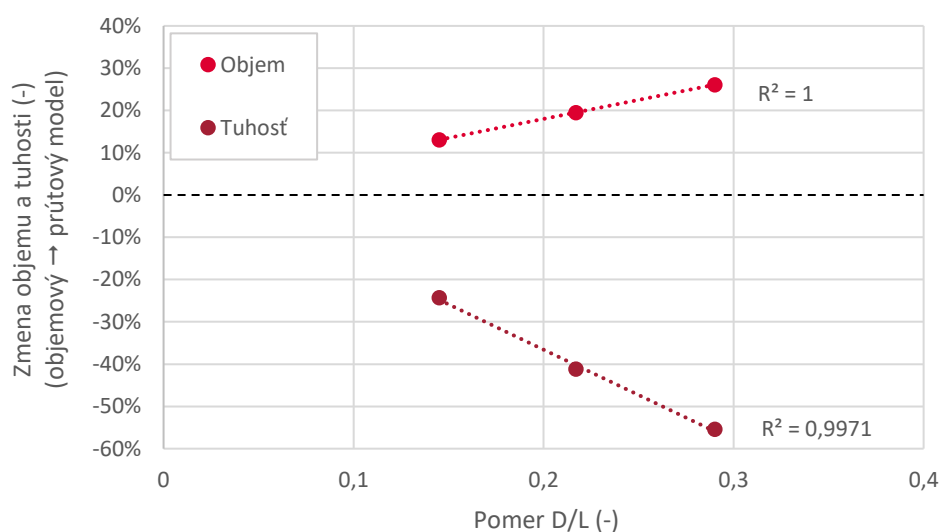
Obr. 5-5 Porovnanie deformácií prútu v strede BCC štruktúry prútového a objemového modelu.

5.2.3 Návrh vlastnej optimalizácie

Ako je zrejmé z predošlých analýz ovplyvnenia základných vlastností prútovým modelom, navyšovanie pomeru D/L (resp. relatívnej hustoty) viedlo k výraznej zmene objemu (resp. hmotnosti) a tuhosti. Uvažujme skutočnosť, že vlastné frekvencie f_n závisia na tuhosti k a hmotnosti m podľa Syam a spol. [17]:

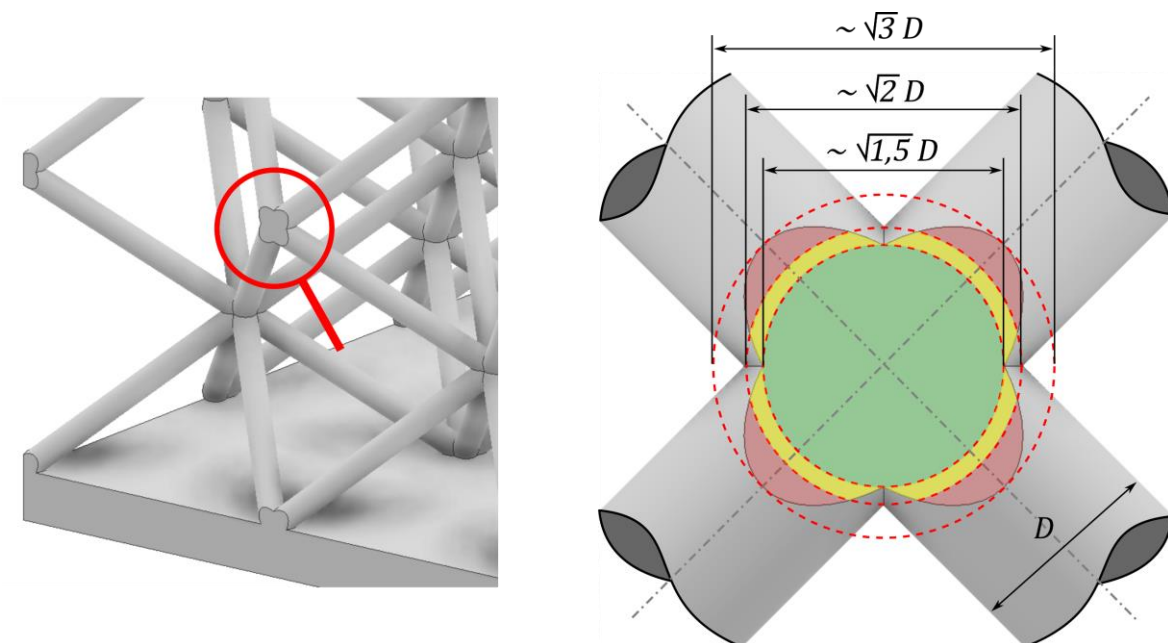
$$f_n \sim \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.1)$$

Z tohto vzťahu je zrejmé, že zníženie tuhosti a súčasné zvýšenie hmotnosti prútového modelu musí nutne viesť k nižším vlastným frekvenciám prútového modelu než toho objemového. Po vynesení dát do grafu objemovej a tuhostnej zmeny prútového modelu sa preukázala lineárna závislosť týchto veličín na pomere D/L .



Obr. 5-6 Závislosť zmeny objemu a tuhosti BCC štruktúry: prútový model voči objemovému modelu.

Tento poznatok viedol k myšlienke optimalizovať prútový výpočtový model znížením hustoty materiálu a zvýšením Youngovho modulu pružnosti v oblasti uzlov. Oblasť ovplyvnenia bola zvolená ako sféra s priemerom závislým na nominálnom priemere prútov. Keďže je tvar spojenia prútov nepravidelný, priemer sféry bol zvolený tak, aby zároveň zahrnul túto nepravidelnosť, ale aby ju nenadhodnotil (viď Obr. 5-7 zelená a žltá oblasť). Priemer sféry ovplyvnenia teda nadobúda hodnoty $D_{uzol} = \sqrt{2}D$.



Obr. 5-7 Zvolená oblasť ovplyvnenia uzlov prútového modelu (zelená a žltá oblasť).

Následná skupina výpočtov načrtla potrebnú zmenu materiálových vlastností v uzlových oblastiach (viď Tab. 5-8). Na základe týchto dát bolo možné vytvoriť korekčné rovnice upravujúce hustotu a Youngov modul pružnosti v uzloch.

Tab. 5-8 Požadovaná zmena materiálových vlastností v uzloch optimalizovaného prútového modelu BCC štruktúry v porovnaní s objemovým modelom.

Priemer prútu D (mm)	Veľkosť bunky L (mm)	Pomer D/L (-)	Zníženie hustoty (-)	Zvýšenie modulu pružnosti (-)
0,87	6	0,145	44,8%	250%
1,3	6	0,217	44,8%	375%
1,74	6	0,290	44,8%	525%

Výsledky ukázali, že zmenu hmotnosti je možné korigovať vo zvolenej uzlovej oblasti znížením hustoty na 44,8 % jej pôvodnej hodnoty. Potrebná zmena Youngovho modulu vykazovala s pomerom D/L lineárnu závislosť. Preto bolo možné vytvoriť korekčné vzťahy:

$$\rho_{uzol} = 0,448 \rho_{nom} \quad (5.2)$$

$$E_{uzol} = (18,970 D/L - 0,287)E_{nom} \quad (5.3)$$

kde E_{uzol} a ρ_{uzol} sú Youngov modul pružnosti a hustota v korigovanej uzlovej oblasti prútového modelu, E_{nom} a ρ_{nom} sú nominálny Youngov modul pružnosti a nominálna hustota, D je priemer prútov a L je veľkosť základnej bunky.

Výpočtový prúťový model po aplikácii vyššie spomenutej optimalizácie hustoty a Youngovho modulu pružnosti sa výrazne priblížil hodnotami vlastných frekvencií objemovému referenčnému výpočtu (vid' Tab. 5-9).

Tab. 5-9 Porovnanie výsledkov vlastných frekvencií štruktúry BCC: prúťový model voči objemovému modelu po návrhu vlastnej optimalizácie (vid' prílohu V-n003).

ρ (-)	D (mm)	L (mm)	1.f (Hz)	2.f (Hz)	3.f (Hz)	4.f (Hz)
9,9%	0,65	4,5	-2,0%	-2,0%	-2,4%	-0,9%
20,7%	0,98		-0,3%	-0,3%	-2,0%	-1,4%
33,6%	1,3		-1,2%	-1,2%	-3,5%	-2,8%
9,9%	0,87	6	-1,9%	-1,9%	-3,9%	-0,8%
20,6%	1,3		-0,7%	-0,7%	-2,1%	-1,2%
33,8%	1,74		-1,9%	-1,9%	-3,8%	-2,5%
9,9%	1,3	9	-2,3%	-2,3%	-2,7%	-0,6%
20,7%	1,96		-2,4%	-2,4%	-2,7%	-0,9%
33,8%	2,61		-5,4%	-5,4%	-5,7%	-2,5%

Vzhľadom na tieto pozitívne výsledky bol rovnaký postup aplikovaný pre štruktúry FLU a DIA. Pre obe štruktúry teda boli rovnakou procedúrou navrhnuté samostatné korekčné rovnice pre úpravu hustoty a tuhosti v uzlových oblastiach. Ich tvary sú zhrnuté v Tab. 5-10:

Tab. 5-10 Korekčné vzťahy v uzlových oblastiach prúťov pre štruktúry BCC, FLU a DIA.

Typ	Oblasť ovplyvnenia	Zmena hustoty	Zmena modulu pružnosti
BCC	$D_{uzol} = \sqrt{2}D$	$\rho_{uzol} = 0,448 \rho_{nom}$	$E_{uzol} = (18,97 D/L - 0,287)E_{nom}$
FLU	$D_{uzol} = \sqrt{2}D$	$\rho_{uzol} = 0,584 \rho_{nom}$	$E_{uzol} = (11,143 D/L + 0,986)E_{nom}$
DIA	$D_{uzol} = \sqrt{2}D$	$\rho_{uzol} = 0,718 \rho_{nom}$	$E_{uzol} = (2,494 D/L + 1,410)E_{nom}$

Takto upravené výpočtové prúťové modely mohli byť porovnané s referenčným objemovým MKP výpočtom. Odchýlka výpočtovo zistených vlastných frekvencií je zhrnutá v Tab. 5-11. Výsledky naznačujú, že zvýšená chybovosť prúťového modelu štruktúr FLU a DIA je zrejme spôsobená príliš nízkym počtom opakovaní základnej bunky vo vzorke.

Tab. 5-11 Porovnanie výsledkov prvých vlastných frekvencií štruktúr BCC, FLU a DIA: prútový model voči objemovému modelu, po návrhu vlastnej optimalizácie; tabuľka porovnáva výsledky pri totožnom vlastnom tvare, typ písma označuje vlastnosti pre štruktúry FLU a DIA (viď prílohy V-n003, V-n004 a V-n005).

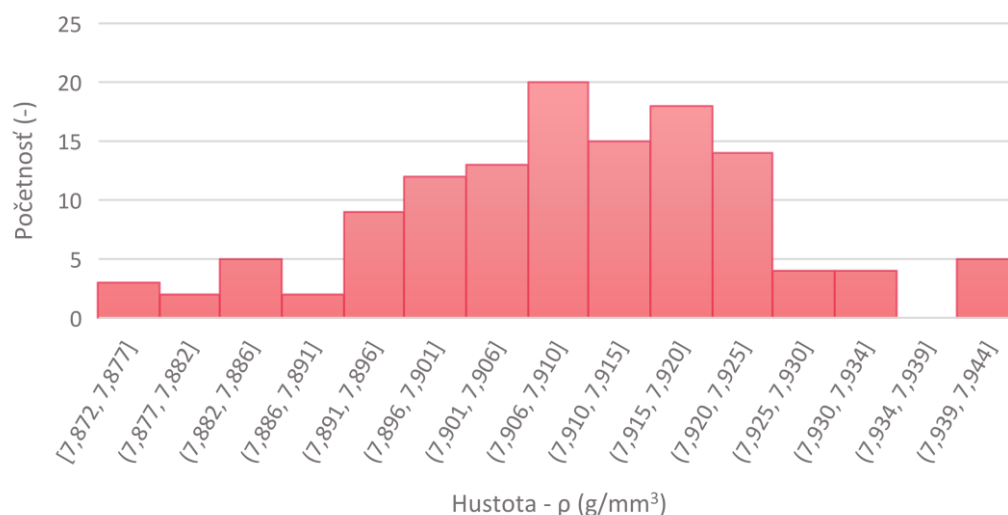
$\rho_{rel} (-)$	L (mm)	$n_{buniek} (-)$	BCC	FLU	DIA
9,9%	4,5 (<u>9</u>)	512 (<u>64</u>)	-2,0%	-0,4%	0,2%
20,7%			-0,3%	-1,7%	-2,0%
33,6%			-1,2%	-3,6%	-1,2%
9,9%	6 (<u>12</u>)	216 (<u>27</u>)	-1,9%	-0,8%	-1,2%
20,6%			-0,7%	-2,8%	-3,9%
33,8%			-1,9%	-5,9%	-3,6%
9,9%	9 (<u>18</u>)	64 (<u>8</u>)	-2,3%	-2,2%	-4,3%
20,7%			-2,4%	-8,5%	-8,7%
33,8%			-5,4%	-16,4%	-11,4%

5.3 Sekundárne experimenty – implementácia skutočných vlastností vzoriek do MKP výpočtu

Aby bolo možné porovnať numerické výpočty s experimentálne získanými vlastnými frekvenciami, bolo nutné určiť materiálové vlastnosti spolu so skutočnou geometriou. K tomu poslužil sekundárne experimenty determinujúce hustotu, tuhosť materiálu a skutočné rozmery vzoriek.

5.3.1 Hustota materiálu – Archimedov zákon

Touto experimentálnou metódou bola spracovaná väčšina vzoriek štruktúry BCC. Vzhľadom na štatistickú relevantnosť bolo meranie opakované na vybraných vzorkách päťkrát. Spolu bolo vykonaných 122 meraní (viď prílohu L-A001), pričom namerané hodnoty naznačujú normálové rozloženie (viď Obr. 5-8). To naznačilo prvotnú domnienku o nezávislosti nameraných hustôt aditívne vyrobeného materiálu S316L na základných parametroch štruktúry.



Obr. 5-8 Histogram – zmeraná hustota materiálu.

Celkový súbor dát bol analyzovaný štatisticky, pričom boli určené základné štatistické parametre, uvedené v Tab. 5-12 (koeficient disperzie vyjadruje priemernú percentuálnu odchýlku od priemernej hodnoty alebo mediánu):

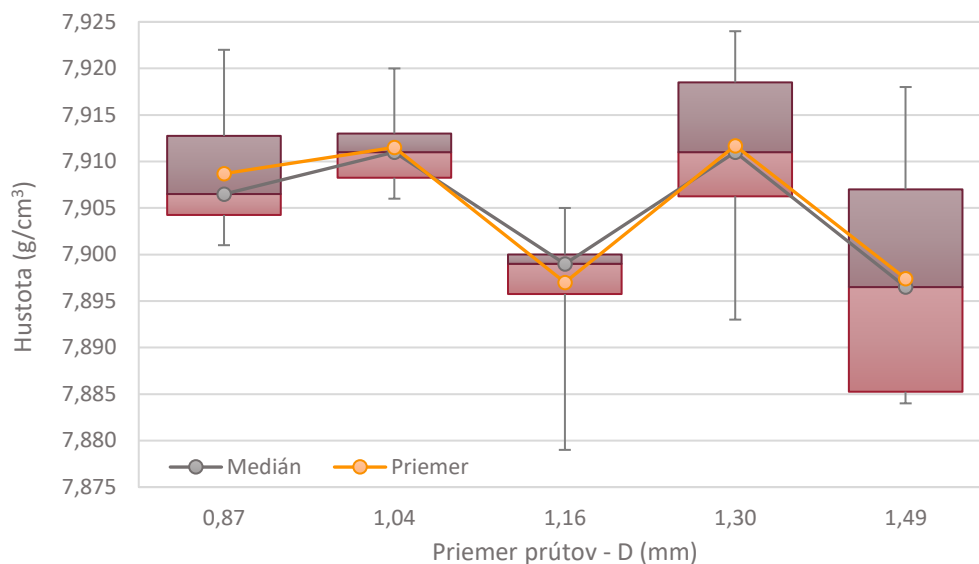
Tab. 5-12 Štatistické parametre merania – experimentálne určovanie hustoty materiálu.

Parameter	Hodnota
Aritmetický priemer	7,9092 g/cm ³
Medián	7,9090 g/cm ³
Priemerná absolútna odchýlka (od priemeru)	0,011 g/cm ³
Koeficient disperzie (od priemeru)	0,142 %
Priemerná absolútna odchýlka (od mediánu)	0,010 g/cm ³
Koeficient disperzie (od mediánu)	0,126 %

Následne bol analyzovaný vplyv veľkosti základnej bunky L a priemeru prútov D na výslednú hustotu materiálu. Aby nebol pri vyhodnotení priemeru prútov vnášaný vplyv veľkosti základnej bunky a obrátene, musel byť štatistický súbor vybraný s určitou rozvahou. V prípade analýzy vplyvu priemeru prútov, bolo vybraných päť skupín (každá s konštantným priemerom prútov), pričom všetky skupiny obsahovali vzorky s rovnakým výberom veľkostí základnej bunky (viď Tab. 5-13). Výsledky boli štatisticky vykreslené v podobe krabicového grafu (viď Obr. 5-9).

Tab. 5-13 Zúžený výber vzoriek pre vyšetrenie vplyvu priemeru prútov na hustotu materiálu (šípka vyznačuje rozsah skúmanej závislosti).

D↓ \ L→	5,14 mm	6 mm
1,49 mm	1. skupina	
1,30 mm	2. skupina	
1,16 mm	3. skupina	
1,04 mm	4. skupina	
0,87 mm	5. skupina	



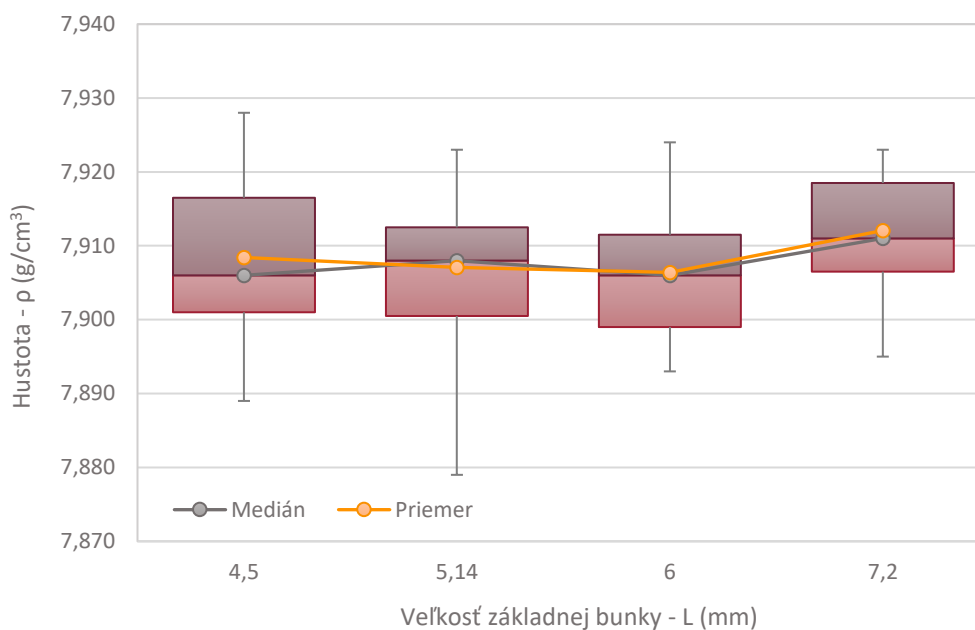
Obr. 5-9 Vplyv priemeru prútov na hustotu pevného materiálu.

V druhom prípade, pri skúmaní vplyvu veľkosti základnej bunky, boli vybrané štyri skupiny (každá s konštantnou veľkosťou bunky), pričom každá skupina obsahovala rovnaký výber vzoriek podľa priemeru prútov (viď Tab. 5-14). Výsledky boli taktiež spracované štatisticky (viď Obr. 5-10).

Tab. 5-14 Zúžený výber vzoriek pre vyšetrenie vplyvu veľkosti základnej bunky na hustotu materiálu (šípka vyznačuje rozsah skúmanej závislosti).

D↓ \ L→	4,5 mm	5,14 mm	6 mm	7,2 mm
1,30 mm	1. skupina	2. skupina	3. skupina	4. skupina
1,16 mm				
1,04 mm				





Obr. 5-10 Vplyv veľkosti základnej bunky na hustotu pevného materiálu

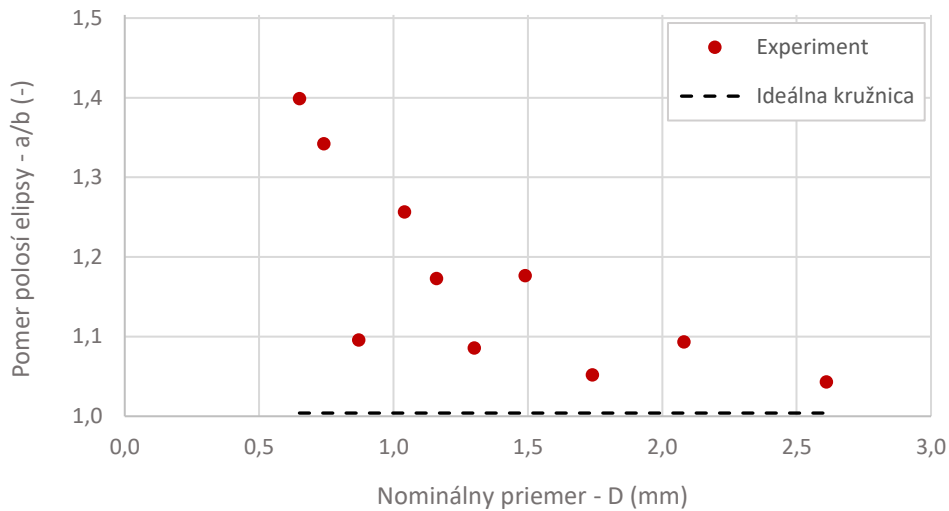
Štatistická analýza nepreukázala významnú závislosť hustoty materiálu ani na zmene priemeru prútov, ani na zmene veľkosti základnej bunky. Fluktuácia hodnôt dosahuje koeficient disperzie (od mediánu) $d = 0,126 \%$, čo je možné považovať za zanedbateľnú odchýlku. Preto do výsledného výpočtu bol uvažovaný medián nameraných hustôt $\rho = 7,909 \text{ g/cm}^3$.

5.3.2 Skutočná geometria – 3D skenovanie

Posúdenie výrobných nepresností bolo analyzované 3D skenovaním skutočnej geometrie vzoriek. Skúmané boli vlastnosti aproximačných kružníc a elíps preložených cez skutočný prierez prútov a skutočná hrúbka steny (viď prílohu L-S001).

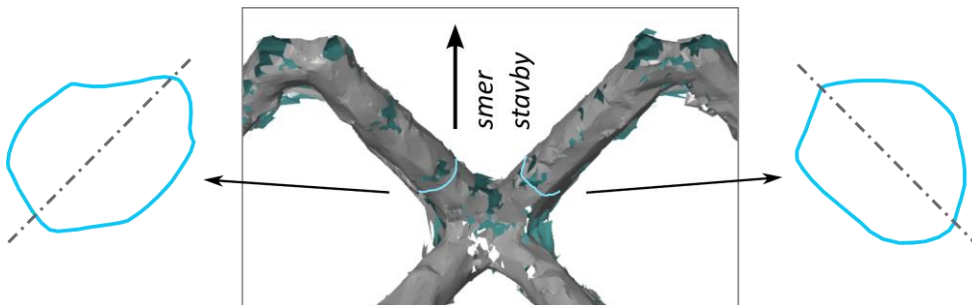
Prúty boli analyzované pri nominálnych priemeroch $D_{nom} = 0,65 \text{ mm}; 0,74 \text{ mm}; 0,87 \text{ mm}; 1,04 \text{ mm}; 1,16 \text{ mm}; 1,3 \text{ mm}; 1,49 \text{ mm}; 1,74 \text{ mm}; 2,08 \text{ mm}$ a $2,61 \text{ mm}$, pričom bolo vždy vyhodnotených desať prierezov pre každý nominálny priemer. Analyzovaný bol priemer vpísanej kružnice, priemer a plocha Gauss-fit aproximačnej kružnice, rozmery hlavnej a vedľajšej osi spolu s plochou aproximačnej Gauss-fit elipsy a na koniec plocha skutočného prierezu.

Vyhodnotenie parametrov preloženej elipsy naznačilo vznik výraznej elipticity najmä pri malom priemere prútov. Ovplyvnenie výslednej geometrie prútu bolo možné popísať vzájomným porovnaním hlavnej a vedľajšej polosi aproximačnej Gauss-fit elipsy (viď Obr. 5-11 na nasledujúcej strane):



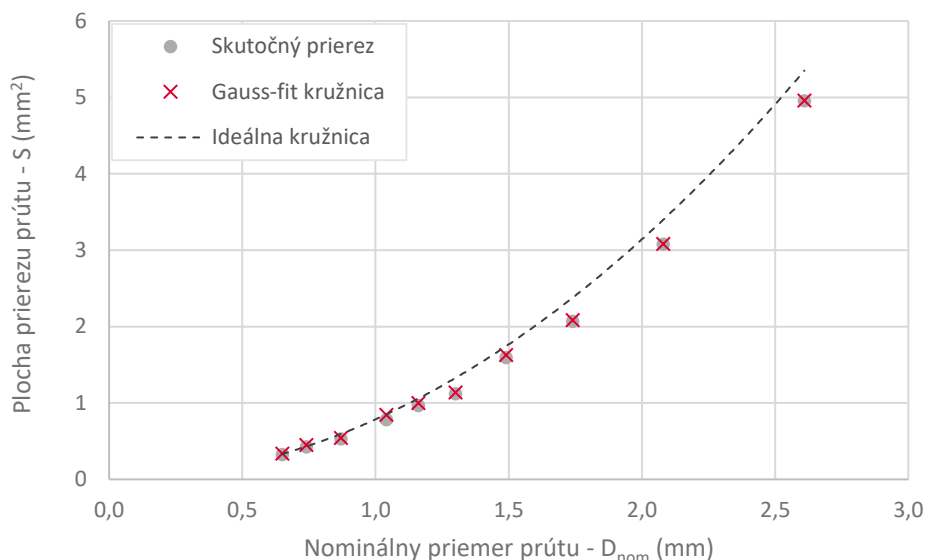
Obr. 5-11 Vyhodnotenie elipticity prútov.

Z tohto dôvodu bolo vhodné vyhodnotiť priestorovú orientáciu eliptických prierezov voči smeru stavby. 3D analýza prekvapivo preukázala, že hlavná polos skutočného prierezu nie je orientovaná v smere stavby, ale je naklonená. Navyše osi prierezov susedných prútov boli voči sebe priestorovo orientované pod uhlom $\approx 90^\circ$. To znamená, že orientácia elipticity sa v rámci štruktúry strieda a nemá jeden prevažujúci charakter.



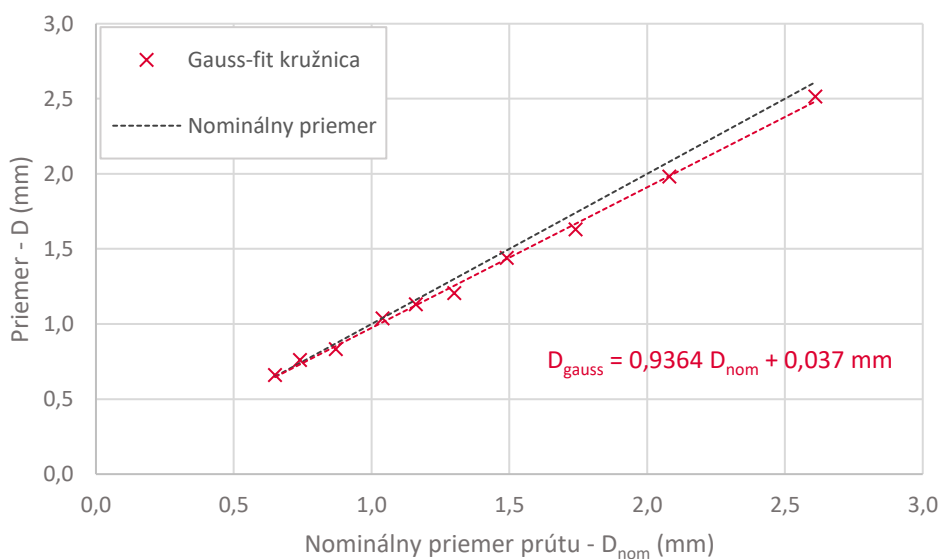
Obr. 5-12 Orientácia elipticity skutočných prierezov.

Ďalšie vyhodnotenie ukázalo, že skutočný prierez a jeho plocha je pri zvyšujúcom sa nominálnom priemere prútov menšia než plocha skutočného prierezu. Výsledky však poukazujú na to, že plocha Gauss-fit kružnice a skutočného prierezu je veľmi podobná. Naznačuje to vzájomné porovnanie plôch prierezov vynesných do grafu (vid' Obr. 5-13).



Obr. 5-13 Porovnanie plôch prierezov.

Tieto fakty súhrnne umožnili vytvoriť domnienku, že eliptický tvar prútov môže byť vďaka striedavej orientácii v priestore zjednodušený a do výpočtu zahrnutý aproximačnou Gauss-fit kružnicou. Navyše sa ukázalo, že priemer Gauss-fit kružnice vykazuje voči nominálnemu priemeru prútov lineárnu závislosť (viď Obr. 5-14). Preto bolo možné implementovať do výpočtov korekčný vzťah zahŕňajúci túto zmenu priemeru prútov:



Obr. 5-14 Porovnanie priemeru nominálnej a Gauss-fit kružnice.

Vyhodnotenie skutočnej hrúbky stien preukázalo podobné chovanie ako predošlá analýza v prípade prútov. Vo výsledku je možno povedať, že reálna hrúbka stien je mierne nižšia ako nominálna hodnota $t = 2 \text{ mm}$ a dosahuje v priemere hodnotu $t_{real} = 1,87 \text{ mm}$. Táto zmena geometrie bola rovnako vnesená do výpočtového modelu.

5.3.3 Tuhosť materiálu – Tlaková skúška

Tlakovou skúškou a numerickou analýzou boli určené skutočné materiálové charakteristiky oceli S316L, z ktorej boli aditívne vyrobené všetky vzorky. Výsledkom tohto experimentu je teda bilineárny materiálový model definovaný Youngovým modulom pružnosti E , tangenciálnym modulom pružnosti E_t a medzou klzu σ_k . Vyhodnocované boli štyri vzorky (viď prílohu L-T001 a Tab. 5-15), pričom geometria vstupujúca do MKP výpočtu využila aproximáciu skutočnej geometrie prútov Gauss-fit kružnicou, popísanú v predošlej kapitole.

Tab. 5-15 Experimentálne určené materiálové charakteristiky bilineárneho materiálového modelu.

Štruktúra	Youngov modul pružnosti – E (GPa)	Tangenciálny modul – E_t (GPa)	Medza klzu – σ_k (MPa)
1GF	95	4,5	440
1GF 2	96	4	460
1DB	99,5	3,5	400
1DB 2	101	4,125	440
Priemerné hodnoty	97,875	4,5	435

Najdôležitejšou charakteristikou bol zistený Youngov modul pružnosti prútov ($E_{prúty} = 97,875 \text{ GPa}$), ktorý vstupoval do optimalizovaného MKP výpočtu. Vďaka veľmi blízkej podobnosti Youngovho modulu pružnosti štruktúrovaného materiálu s publikáciou [29] bol modul pružnosti plného materiálu z tohto článku prevzatý ($E_{steny} = 166 \text{ GPa}$). Táto materiálová charakteristika bola priradená vo finálnom MKP výpočte plno-materiálovým stenám.

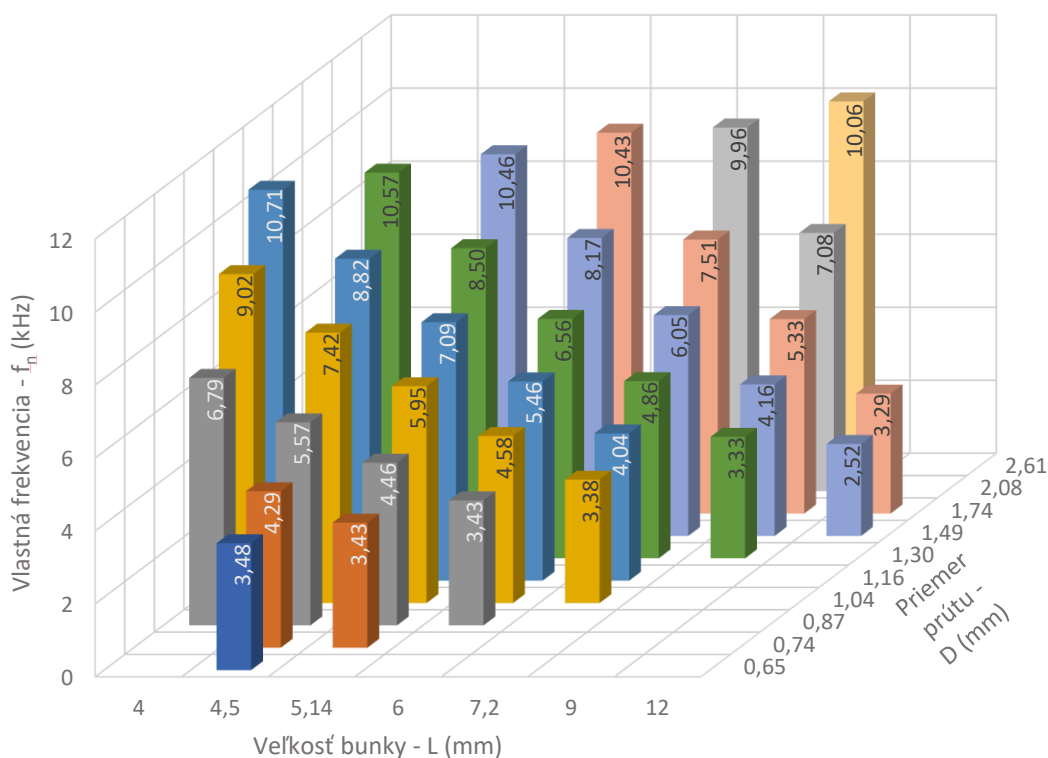
5.3.4 Implementácia skutočných vlastností vzoriek do zjednodušeného výpočtového modelu

Po vykonaní sekundárnych experimentov a určení materiálových a geometrických vlastností vzoriek, bolo možné implementovať tieto informácie do parametrizácie zjednodušeného výpočtového modelu. Ten bol optimalizovaný formou konštánt alebo korekčných rovníc, zhrnutých v Tab. 5-16.

Tab. 5-16 Parametre a rovnice upravujúce výpočet podľa skutočných vlastností vzoriek.

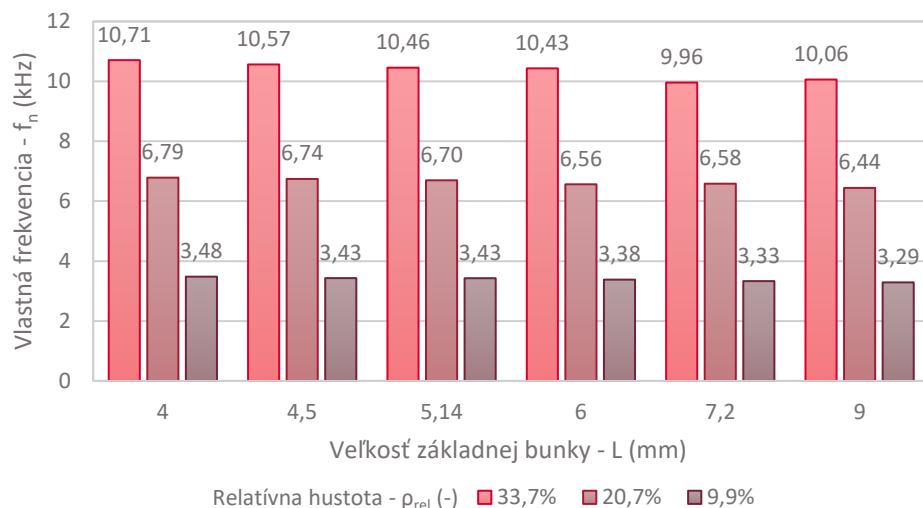
Parameter	Úprava
Hustota materiálu	$\rho = 7,909 \text{ g/cm}^3$
Youngov modul pružnosti prútov	$E_{prúty} = 97,875 \text{ GPa}$
Youngov modul pružnosti stien	$E_{steny} = 166 \text{ GPa}$ [29]
Priemer prútov	$D_{gauss} = 0,9364 D_{nom} + 0,037 \text{ mm}$
Hrúbka stien	$t_{real} = 1,87 \text{ mm}$

Vďaka zahrnutiu skutočných vlastností vzoriek bolo možné vykonať výpočet na celom rozsahu štruktúry BCC. Výsledky ukazujú jednoznačný vplyv základných parametrov štruktúry, čiže veľkosti základnej bunky a priemeru prútov na výsledné vlastné frekvencie. To znamená, že vlastné frekvencie štruktúry BCC je možné zvýšiť zmenšením veľkosti základnej bunky alebo zväčšením priemeru prútov.



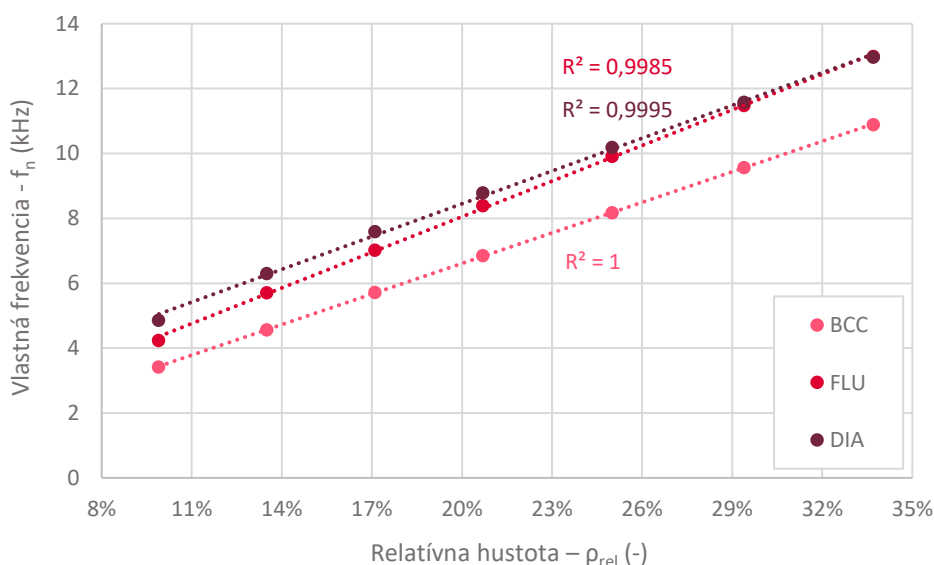
Obr. 5-15 Výsledky numericky predikovaných vlastných frekvencií pre štruktúru BCC v celom rozsahu vzoriek.

Výpočet vlastných frekvencií širokého rozsahu vzoriek štruktúry BCC tiež umožnil nahliadnuť na rezonančné vlastnosti štruktúr s konštantnou relatívnou hustotou. Výsledky naznačujú že vlastná frekvencia je konštantná. Fluktuácia hodnôt v rámci jednej relatívnej hustoty je zanedbateľná a je zrejme spôsobená drobnou zmenou relatívnej hustoty medzi vzorkami (viď Obr. 5-16).



Obr. 5-16 Numerická predikcia rezonancie BCC štruktúry pri konštantných relatívnych hustotách.

Zaujímavým výsledkom je aj porovnanie vlastných frekvencií rôznych typov štruktúr. Tieto dáta ukazujú, že vlastné frekvencie skúmaných štruktúr sú lineárne závislé na relatívnej hustote. Tá je priamo ovplyvňovaná zmenou veľkosti základnej bunky alebo priemerom prútov. Výsledky tiež naznačujú, že vlastné frekvencie môžu byť ovplyvnené zmenou typu štruktúry bez nutnosti zmeny relatívnej hustoty (viď Obr. 5-17).



Obr. 5-17 Porovnanie vlastných frekvencií pri zmene typu štruktúry (veľkosť základnej bunky je 4,5 mm pre BCC štruktúru a 9 mm pre FLU a DIA štruktúry).

Rovnaké porovnanie všetkých troch typov štruktúr by mohlo byť rozšírené pre ďalšie veľkosti základných buniek, avšak vzhľadom na zväčšenú chybu zjednodušeného výpočtového modelu, by výsledky neboli relevantné.

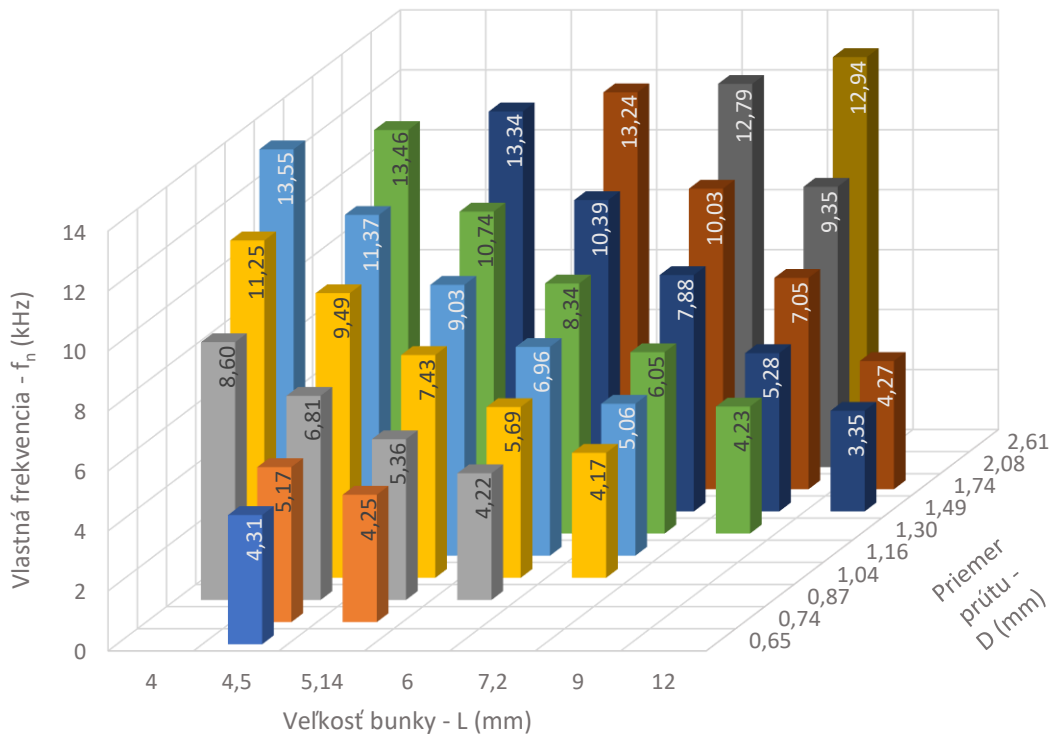
5.4 Experimentálna modálna analýza

Výroba širokého rozsahu vzoriek štruktúry BCC umožnila experimentálne overiť predikované rezonančné chovanie štruktúr. Experiment tiež umožnil získať informácie o útlmových charakteristikách BCC štruktúry (viď prílohu L-M001). Výroba zúženej skupiny vzoriek pre štruktúry FLU (viď prílohu L-M002) a DIA (viď prílohu L-M003) bola úspešná len z časti. Stavba vzoriek s najväčšou veľkosťou bunky $L = 18 \text{ mm}$, musela byť prerušená kvôli prílišnému vystupovaniu prútov nad nanášanú vrstvu kovového prášku. Zúžená skupina vzoriek však dostatočne poslúžila na overenie numerického riešenia rezonančných charakteristík.

Vibračno-dynamické vlastnosti vzoriek boli vyhodnotené z rozsiahleho súboru dát. Vlastné frekvencie boli určené pre každú vzorku 32 krát. Extrakcia pomerného útlmu bola časovo náročnejšia. Preto bola pre každú zo skúmaných konfigurácií zopakovaná 16 krát. V nasledujúcej kapitole je pri grafickom zobrazení (okrem krabicových grafov) pre experimentálne dáta vždy uvádzaná priemerná hodnota. Odchýlky nebolo nutné vzhľadom na malý rozptyl dát zachytiť. Toto zjednodušenie naopak umožnilo názornejšie zachytenie trendov chovania pri zmene základných parametrov štruktúr.

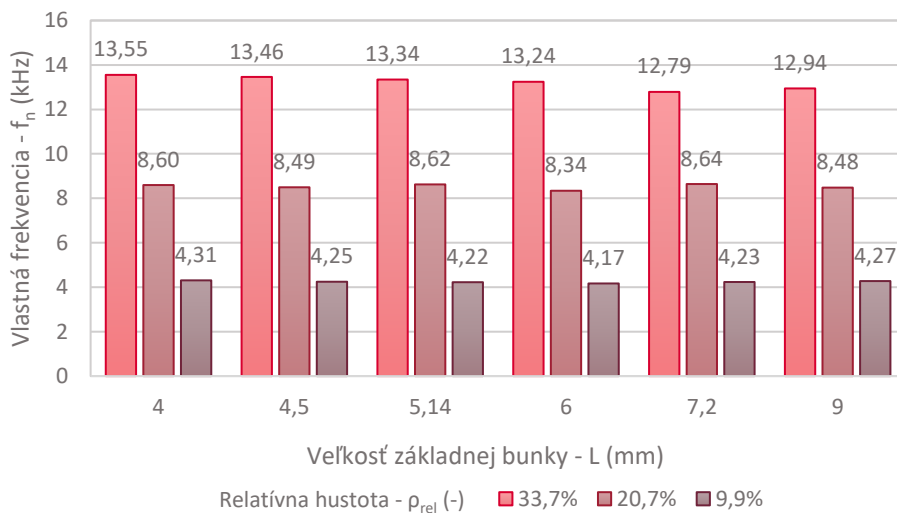
5.4.1 Rezonančné vlastnosti

Výsledky experimentu štruktúry BCC z pohľadu rezonancie potvrdili vplyv základných parametrov, teda veľkosti základnej bunky a priemeru prútov na vlastnú frekvenciu. Nárast rezonančnej frekvencie je možné pozorovať pri zväčšovaní priemeru prútov alebo zmenšovaní veľkosti základnej bunky (viď Obr. 5-18).



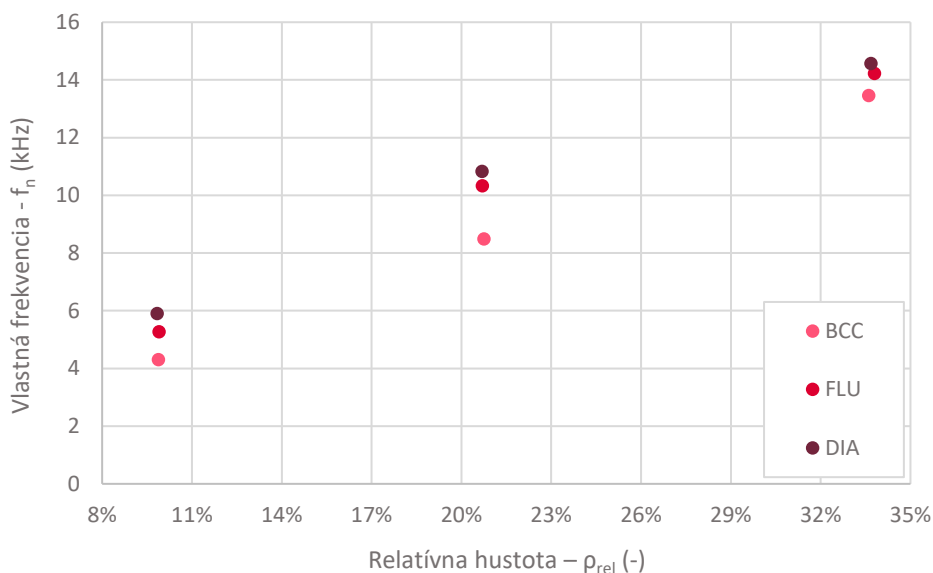
Obr. 5-18 Výsledky experimentálne určených vlastných frekvencií pre štruktúru BCC v celom rozsahu vzoriek (V grafe sú uvedené priemerné hodnoty).

Experiment tiež určil skutočné rezonančné charakteristiky BCC štruktúr pri konštantných relatívnych hustotách. Výsledky preukázali obdobné chovanie ako bolo predikované výpočtom, teda vlastná frekvencia sa v rámci jednej relatívnej hustoty výrazne nemení (viď Obr. 5-19).



Obr. 5-19 Experimentálne určená rezonancia BCC štruktúry pri konštantných relatívnych hustotách (V grafe sú uvedené priemerné hodnoty).

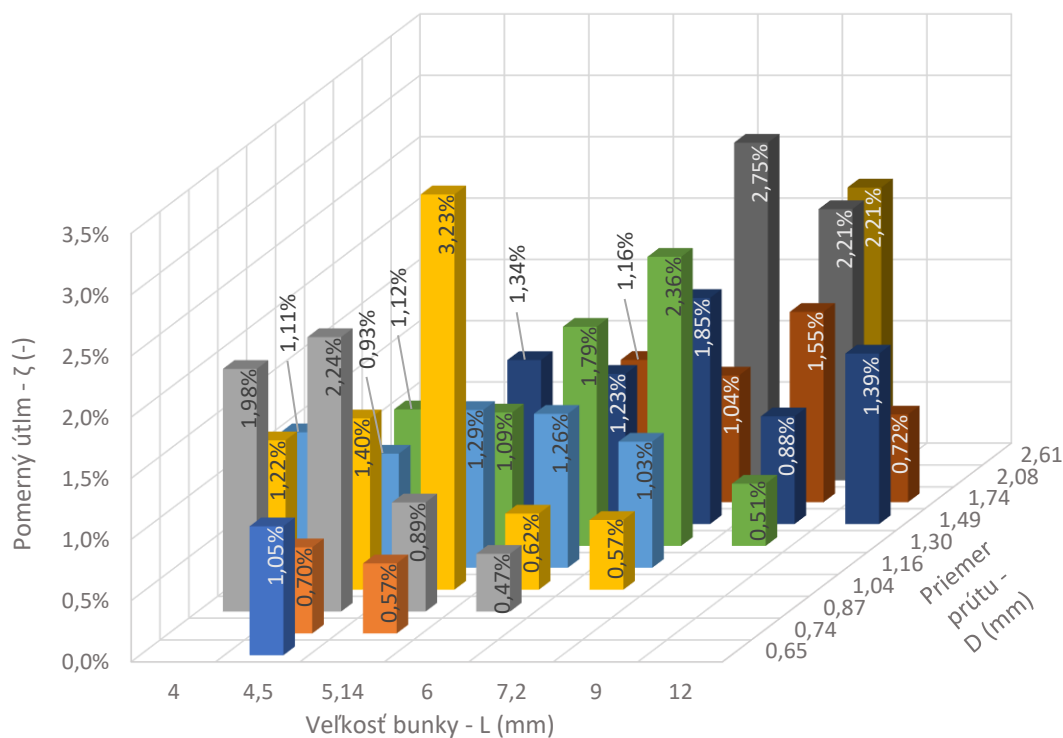
Rovnako tak bolo možné porovnať experimentálne určené rezonančné charakteristiky rôznych typov štruktúr na zúženom výbere (vid' Obr. 5-20). Vzhľadom na zmenšený štatistický súbor nebolo možné jednoznačne potvrdiť lineárne chovanie, avšak bolo možné potvrdiť zmenu vlastnej frekvencie po zmene typu štruktúry (pri konštantnej relatívnej hustote).



Obr. 5-20 Porovnanie vlastných frekvencií pri zmene typu štruktúry (veľkosť základnej bunky je 4,5 mm pre BCC štruktúru a 9 mm pre FLU a DIA štruktúry).

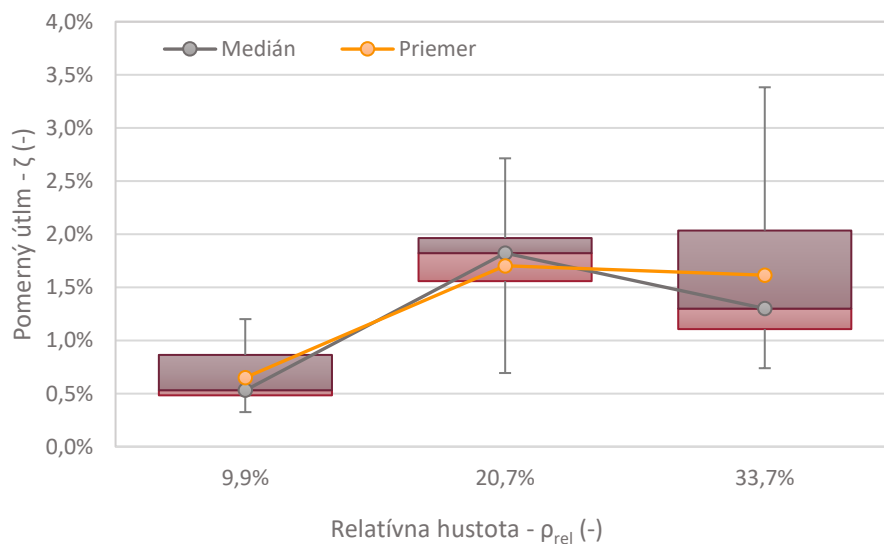
5.4.2 Útlmové vlastnosti

Vplyv základných parametrov na útlmové charakteristiky bol vyšetřovaný najmä na skupine vzoriek BCC štruktúry. Na prvý pohľad nebolo možné jednoznačne určiť akúkoľvek závislosť útlmu na základných parametroch (vid' Obr. 5-21). Preto boli dáta spracované štatisticky.



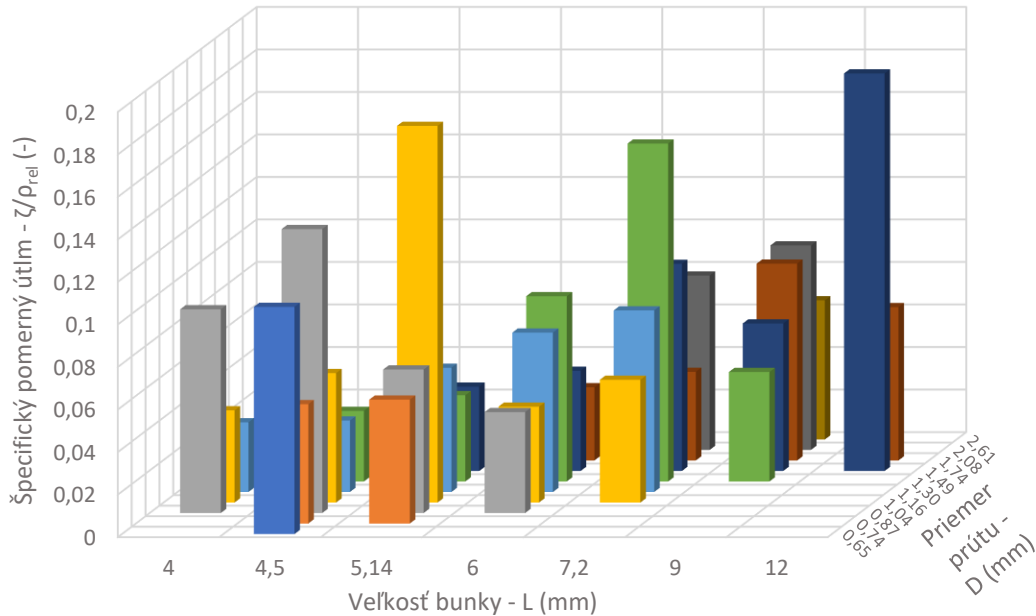
Obr. 5-21 Výsledky experimentálne určených útlmových charakteristík pre štruktúru BCC v celom rozsahu vzoriek (V grafe sú uvedené priemerné hodnoty).

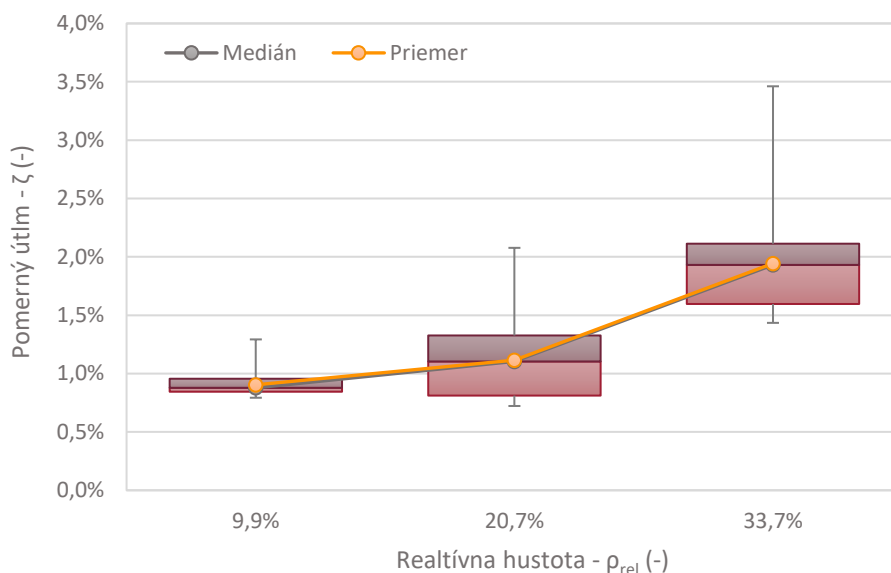
Po štatistickej analýze sa však preukázala určitá miera závislosti pomerného útlmu na relatívnej hustote. Výsledky teda naznačili, že pri vyšších relatívnych hustotách je možné očakávať vyšší útlmový pomer. Zvyšujúcou sa relatívnou hustotou však stúpa aj rozptyl nameraných hodnôt (viď Obr. 5-22).



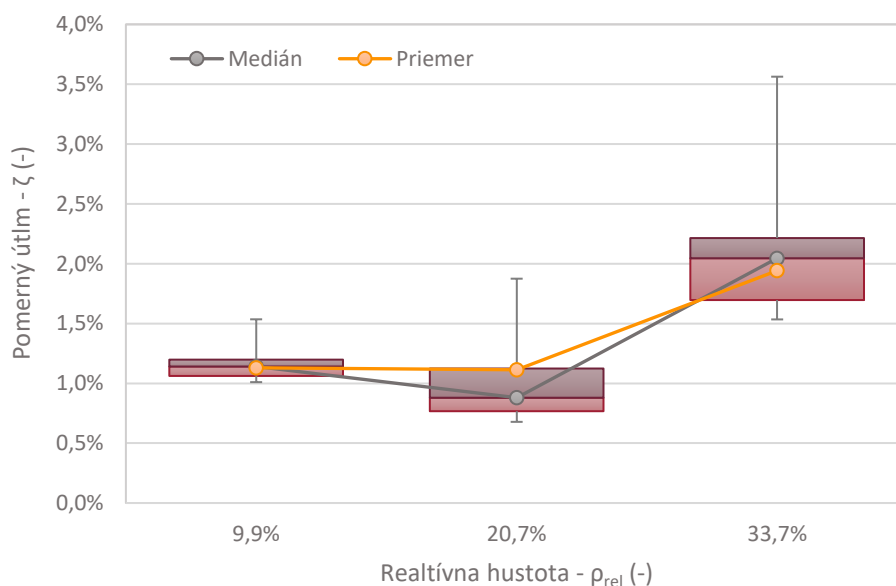
Obr. 5-22 Závislosť experimentálne zisteného pomerného útlmu na relatívnej hustote BCC štruktúry (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).

Po vylúčení vplyvu relatívnej hustoty na útlm podelením nameraných hodnôt útlmového pomeru relatívnou hustotou, nebolo možné jednoznačne preukázať akúkoľvek závislosť pomerného útlmu na základných parametroch štruktúry. Dôkazom je grafické znázornenie špecifického pomerného útlmu (viď Obr. 5-23). Artefakty v podobe vysokých hodnôt útlmu je náhodný jav a je zrejme spôsobený nedôkladným upevnením akcelerometra.



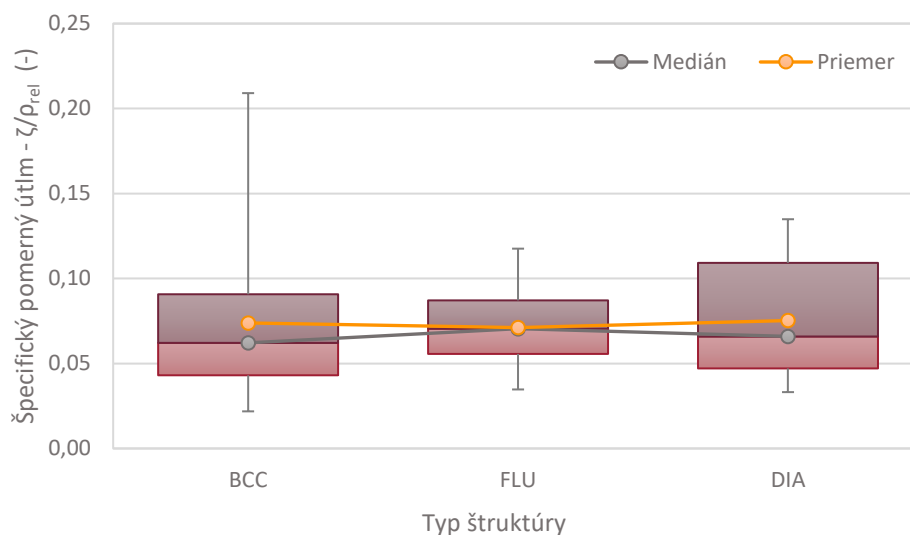


Obr. 5-24 Závislosť experimentálne zisteného pomerného útlmu na relatívnej hustote FLU štruktúry (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).



Obr. 5-25 Závislosť experimentálne zisteného pomerného útlmu na relatívnej hustote DIA štruktúry (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).

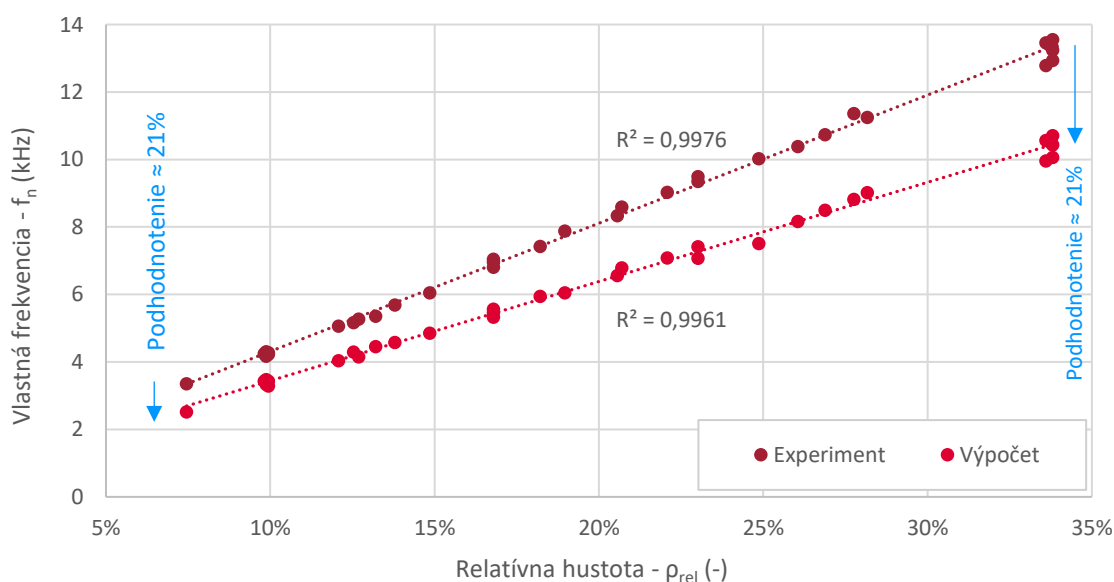
Po vylúčení vplyvu relatívnej hustoty určením špecifického pomerného útlmu, bolo možné porovnať vplyv zmeny typu štruktúry na útlmové charakteristiky. Po vynesení nameraných dát do krabicového grafu je však zrejmé, že zmena geometrického usporiadania prútov nemá výrazný účinok na zmenu tlmiacich vlastností (vid' Obr. 5-26).



Obr. 5-26 Porovnanie špecifického útlmu rôznych typov štruktúr (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).

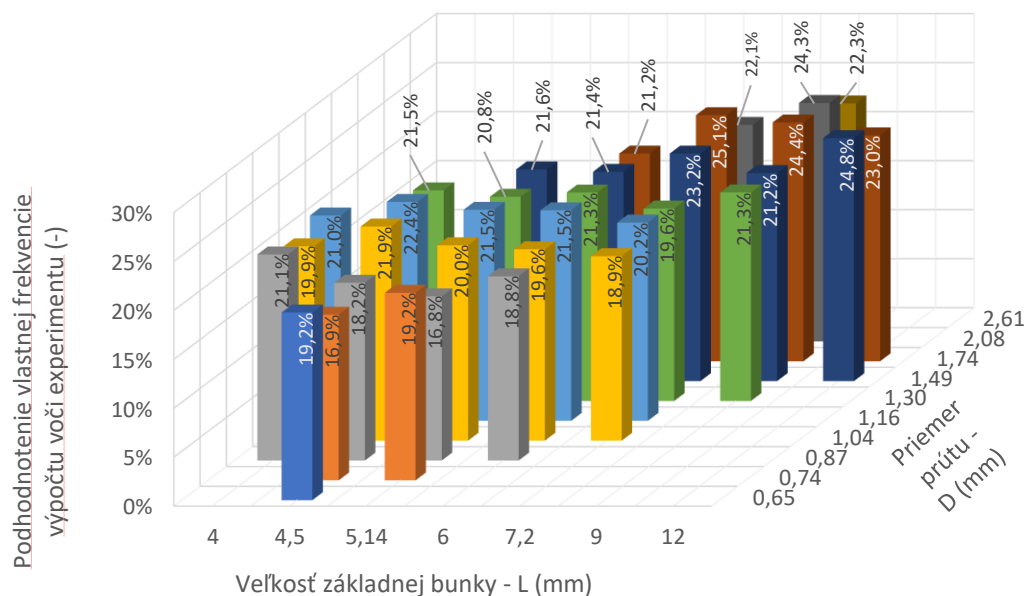
5.5 Porovnanie experimentálne a numericky zistených rezonančných vlastností

Najzaujímavejšie výsledky poskytlo vzájomné porovnanie numerickej predikcie zjednodušeného prútového modelu a experimentálneho popisu rezonančných vlastností, najmä na širokom rozsahu vyrobených BCC štruktúr. Získané dáta naznačili, že vlastné frekvencie získané oboma metódami vykazujú lineárnu závislosť na relatívnej hustote. Toto chovanie potvrdzuje aj grafické znázornenie (viď Obr. 5-27).



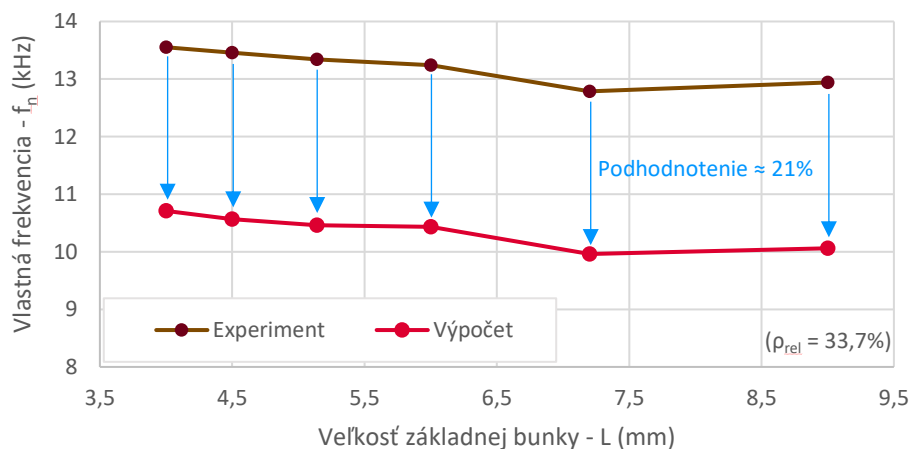
Obr. 5-27 Porovnanie závislostí vlastnej frekvencie na relatívnej hustote experimentálne a numericky získaných dát (V grafe sú uvedené priemerné experimentálne hodnoty).

Porovnanie výsledkov taktiež ukázalo, že chyba numerickej predikcie zjednodušeným prútvým výpočtovým modelom je aj napriek spresneniu materiálových charakteristík v priemere 21 %, pričom výpočet podhodnocuje hodnoty vlastných frekvencií. Presnejšie zobrazenie celého rozsahu vzoriek BCC ukázalo, že tento rozdiel sa pohybuje v rozsahu 16,8 % – 25,1 %. Chyba však nevykazuje žiadnu významnú závislosť na zmene priemeru prútov alebo na zmene veľkosti základnej bunky.



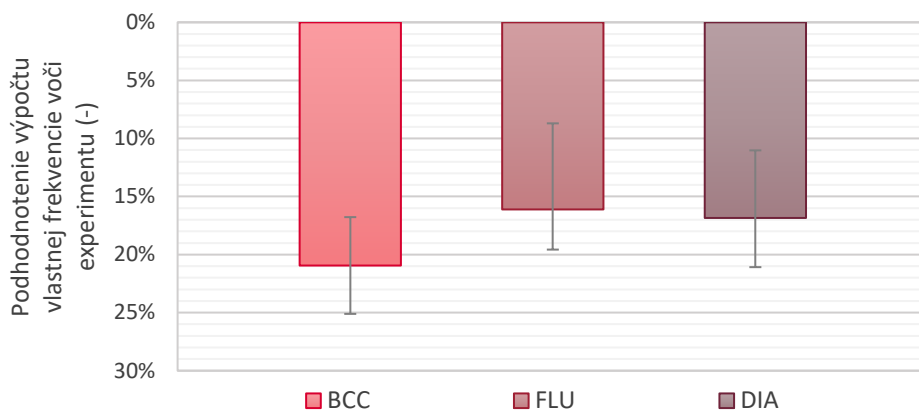
Obr. 5-28 Porovnanie numerickej predikcie a experimentálne určených vlastných frekvencií štruktúr BCC.

Pri vyšetrení chovania vlastných frekvencií pri konštantnej relatívnej hustote je možné pozorovať, aj napriek celkovej chybe výpočtu o 21 %, že zjednodušený výpočtový model po navrhutej modifikácii uzlov zachycuje veľmi jemné zmeny rezonančných frekvencií pri zmene základných parametrov štruktúr. Toto chovanie bolo možné spozorovať a potvrdiť experimentálne získanými dátami (vid' Obr. 5-29).



Obr. 5-29 Porovnanie vlastnej frekvencie zistenej výpočtom a experimentálne pri konštantnej relatívnej hustote $\rho_{rel} = 33,7\%$ (V grafe sú uvedené priemerné experimentálne hodnoty).

Porovnanie výsledkov výpočtu a experimentu ostatných štruktúr (FLU a DIA) dosahuje podobnú chybovosť. Výpočtový model ďalších štruktúr rovnako ako v prípade štruktúry BCC podhodnocuje vlastné frekvencie. Priemerná chyba zjednodušených výpočtových modelov pre všetky skúmané štruktúry dosahuje hodnoty od 16 % po 21 %. Rozptyl chyby je pri všetkých typoch štruktúr takmer rovnaký a dosahuje hodnotu približne 10 %. Tieto výsledky sú graficky znázornené na Obr. 5-30.



Obr. 5-30 Porovnanie chybovosti (podhodnotenia) predikcie vlastnej frekvencie zjednodušených výpočtových modelov voči experimentu pre rôzne typy mikro-prúťových štruktúr. Výsledky zahrňujú všetky vyrobené testovacie telesá.

6 DISKUSIA

V nasledujúcej kapitole sú diskutované najzaujímavejšie výsledky a sú zdôvodnené možné príčiny nezhôd experimentu a zjednodušeného modelu. Táto časť tiež prepája dosiahnuté výsledky s vyslovenými hypotézami a vyjadruje sa o ich verifikácii.

6.1 Interpretácia výsledkov

6.1.1 Zjednodušený prútový model

Analýza súčasného stavu poznania už v počiatoch diplomovej práce naznačila, že presnosť výsledkov numerických simulácií pri použití zjednodušených MKP modelov je nedostatočná. Preto boli navrhnuté optimalizácie, ktoré ovplyvňujú prútové elementy v oblastiach vzájomných spojov. Táto úprava však nebola doteraz overená na širšom spektre relatívnych hustôt. Až modálna analýza vykonaná počas riešenia tejto diplomovej práce dokázala, že optimalizácia zjednodušeného prútového modelu, navrhnutá podľa Guo a spol. pre štruktúru BCC [10], je úspešná len pri nízkych hodnotách relatívnej hustoty ($\rho_{rel} < 10\%$) (viď Tab. 5-5).

Preto došlo k analýze, ktorá skúmala rozdiel hmotnosti a tuhosti zjednodušeného prútového MKP modelu a referenčného MKP objemového modelu BCC štruktúry. Výsledky preukázali výrazné zvyšovanie objemu a znižovanie tuhosti prútového modelu. Objem prútového modelu je vyšší kvôli zanedbaniu skosenia prútov v oblastiach uzlov a naopak, tuhosť je nižšia kvôli zanedbaniu materiálového prepojenia v oblastiach spojov. Prútové elementy prútov sú totiž prepojené len na koncoch, avšak v skutočnosti, objemový model prepája elementy v rámci celej oblasti uzlu. Tieto zmeny tuhosti a hmotnosti (resp. objemu) sa preukázali ako lineárne závislé na relatívnej hustote (resp. pomere D/L , viď Obr. 5-6). To znamená, že z pohľadu rezonancie musí nutne dochádzať k výraznému podhodnocovaniu vlastných frekvencií zjednodušeného prútového modelu, pričom toto podhodnotenie rastie so zvyšujúcou sa relatívnou hustotou (viď Tab. 5-5).

Tieto novozískané poznatky sa stali základom pre návrh vlastnej optimalizácie, ktorá by zohľadnila chyby výpočtu spôsobené zmenou hmotnosti a tuhosti zjednodušeného prútového modelu. Séria výpočtov umožnila vytvoriť korekčné rovnice upravujúce hustotu a Youngov modul pružnosti v oblastiach uzlov (viď Tab. 5-10). Rovnice poukázali na fakt, že hustotu v uzloch je možné korigovať korekčným koeficientom. Ten je pre každý typ štruktúry iný. Ich odlišnosť je zrejme spôsobená rozdielnym počtom vstupujúcich prútov do uzla. Tuhosť bolo nutné korigovať pomocou lineárnej závislosti Youngovho modulu na pomere D/L , určenej pre každú štruktúru zvlášť. Zistená linearita bol neočakávaný poznatok.

Je zrejme spôsobená nedodržaním prútových predpokladov modelu, pretože strednica prútu má zrovnateľnú veľkosť s veľkosťou priečného prierezu. Na druhú stranu, je možné vidieť, že korekčné rovnice chybu tohto efektu eliminujú. Po implementácii optimalizácie hustoty a tuhosti v uzloch je možné pozorovať výrazné priblíženie výsledkov zjednodušeného prútového modelu v celom rozsahu BCC štruktúry (viď Tab. 5-11 stĺpec BCC). Optimalizácia bola úspešná aj pri ostatných dvoch štruktúrach FLU a DIA, najmä pri porovnaní testovacích telies s najmenšou veľkosťou základnej bunky $L = 9 \text{ mm}$. Z výsledkov je možné vidieť, že chyba pri všetkých troch štruktúrach narastá pri poklese počtu buniek vo vzorke. Tento efekt je pozorovateľný najmä pri štruktúrach FLU a DIA, ktoré obsahujú pri najhrubšej konfigurácii len 8 buniek (viď Tab. 5-11 stĺpec FLU a DIA). Je však nutné podotknúť, že v pri skutočnom návrhu súčasti sa využívajú stovky až tisíce buniek a preto by sa táto chyba nemala prejavovať.

6.1.2 Skutočné materiálové a mechanické charakteristiky vzoriek

Aby bolo možné porovnať numerické simulácie s vyrobenými vzorkami, došlo k určeniu skutočných materiálových a mechanických vlastností vzoriek. Väčšina skúmaných parametrov priniesla očakávané výsledky.

Experiment využívajúci Archimedov zákon určil hustotu materiálu S316L, použitého pre výrobu vzoriek. Skúmaná bola na celom rozsahu štruktúry BCC, pričom vplyv zmeny veľkosti základnej bunky (viď Obr. 5-10) je možné považovať za zanedbateľný. Fluktuácia hustoty pri zmene priemeru prútov (viď Obr. 5-9) je značnejšia a je zrejme spôsobená rôznou skenovacou stratégiou lasera. Koeficient disperzie (od mediánu) všetkých hodnôt bol $d = 0,126 \%$. Preto bola táto odchýlka zanedbaná a do výpočtu vstupovala pre všetky konfigurácie hodnota mediánu nameraných hustôt $\rho = 7,909 \text{ g/cm}^3$. Získanú hodnotu hustoty je možné potvrdiť aj inými zdrojmi, ktoré uvádzajú, že nominálna hustota materiálu S316L je $\rho = 8,0 \text{ g/cm}^3$ [35], pričom plný, aditívne vyrobený materiál oceli S316L dosahuje relatívnu hustotu $\rho_{rel} = 99,8 \%$ [36]. To je v súlade s prepočítanou relatívnou hustotou plného materiálu $\rho_{rel} = 98,8 \%$, určenou v tejto diplomovej práci.

3D skenovanie súčastí poskytlo pohľad na skutočné geometrické vlastnosti vzoriek. Podobne ako publikoval vo svojej práci Koutný [6], bolo v rámci tejto práce zistené, že plocha skutočného prierezu prútov je pre materiál S316L nižšia než je plocha nominálneho prierezu. Podobne tak bolo možné potvrdiť predpoklady, ktoré vyslovil Vrána [8], že eliptický prierez je z pohľadu obsahu plochy možné nahradiť kružnicou Gauss-fit (viď Obr. 5-13). Najzaujímavejším výsledkom skenovania mikro-prútových štruktúr je fakt, že eliptické prierezy sú voči sebe v priestore pravidelne naklonené pod uhlom $\approx 90^\circ$. To by malo viesť k rovnomernej tuhosti štruktúry, bez ohľadu na umiestnenie vzorky voči stavebnej platforme. Preto bol do výpočtu implementovaný experimentálne určený vzťah prepočítavajúci nominálny priemer prútov na priemer Gauss-fit kružnice (viď Obr. 5-14).

Podobne bola určená aj skutočná hrúbka plno-materiálových stien, ktorá vykazovala nižšie hodnoty oproti nominálnej geometrii. Výpočet hmotnosti (pri uvažovaní aproximačnej geometrie spolu s nameranou hustotou materiálu) a jeho následné porovnanie s nameranou hmotnosťou vzoriek potvrdil správnosť vykonania 3D skenovania a Archimedovho experimentu.

Youngov modul pružnosti materiálu S316L bol určovaný na základe tlakovej skúšky. Jej prevedenie muselo byť simulované MKP výpočtom, kvôli nenormalizovanému tvaru vzoriek. Simuláciou tak bol určený hlavne Youngov modul pružnosti prútov štruktúry. Jeho hodnota $E_{prúty} = 97,875 \text{ GPa}$, súhlasí s hodnotami nameranými Červinkom [29], preto bola hodnota modulu pružnosti pre plný materiál $E_{steny} = 166 \text{ GPa}$ prevzatá. Obe hodnoty Youngovho modulu boli do výpočtu implementované.

Všetky tieto sekundárne experimenty viedli k spresneniu výpočtového modelu z pohľadu materiálových charakteristík. Preto ho bolo následne možné porovnať s experimentálne určenými rezonančnými charakteristikami a vylúčiť tak prípadné nepresnosti spôsobené rozdielnou hustotou a tuhosťou materiálu alebo nepresnosťami geometrie.

6.1.3 Rezonančné vlastnosti – predikcia a experiment

Spresnený a zjednodušený prúťový výpočtový model BCC štruktúr umožnil veľmi rýchlo vypočítať vlastné frekvencie celého navrhnutého rozsahu vzoriek. Preto bolo možné predikovať a pozorovať chovanie rezonančných vlastností pri zmenách základných parametrov štruktúr. Ako naznačujú výsledky, vlastnú frekvenciu je možné zvýšiť zmenšením veľkosti základnej bunky alebo zväčšením priemeru prúťov (viď Obr. 5-15). Ďalšie porovnanie rezonančných charakteristík naznačilo (viď Obr. 5-16), že sa vlastná frekvencia pri konštantných relatívnych hustotách výrazne nemení (jemná fluktuácia hodnôt medzi vzorkami je zrejme spôsobená drobnou zmenou relatívnej hustoty). To viedlo k domnienke, že vlastná frekvencia závisí najmä na relatívnej hustote, ktorá je priamo určená veľkosťou základnej bunky a priemerom prúťov. Tento predpoklad bol potvrdený (viď Obr. 5-17). Výsledky výpočtov ďalších štruktúr, zobrazených na rovnakom grafe tiež naznačili, že je možné modulovať vlastné frekvencie pri zachovaní relatívnej hustoty (tzn. bez zmeny hmotnosti). Tento efekt je dosiahnutý vďaka zmene tuhosti rôznych typov štruktúr pri zachovaní rovnakej hmotnosti.

Rezonančné chovanie mikro-prúťových štruktúr bolo overené aj experimentálnou modálnou analýzou. Získané dáta naznačili rovnaký vplyv základných parametrov BCC štruktúry na vlastnú frekvenciu, ako bolo predikované výpočtom (viď Obr. 5-18). Rovnako tak bolo potvrdené, že pri konštantnej relatívnej hustote nedochádza k výraznej zmene vlastných frekvencií (viď Obr. 5-19). Následná analýza ďalších štruktúr FLU a DIA

dokázali, že je možné zmeniť vlastnú frekvenciu vzorky zmenou typu štruktúry, pri zachovaní rovnakej hmotnosti (vid' Obr. 5-20).

Porovnanie výsledkov však poukázalo na podhodnotenie výpočtovej predikcie bez ohľadu na jej zjednodušenie prútovými elementami. Zaujímavým fenoménom je, že porovnanie všetkých štruktúr vykazuje priemerné podhodnotenie výpočtovo zistených vlastných frekvencií v rozsahu 16 – 21 % (vid' Obr. 5-30). Táto konzistentná chyba výpočtu je zrejme spôsobená nezachytením vnútorných zvyškových napätostí po výrobe vo výpočtovom modeli. Vplyv zvyškového napätia na rezonančné charakteristiky aditívne vyrobených súčastí nie je preskúmanou oblasťou, avšak v oblasti vyhodnotenia napätosti v zvaroch je táto metodika v súčasnosti aktívne skúmaná. Ako dokazujú výsledky publikácie Dasa a spol. [37], nárast zvyškového napätia v zvare a jeho vplyv na výsledné vlastné frekvencie súčasti je výrazný (dokázaný bol pokles frekvencie až o 50 %). Zaujímavým faktom je, že túto zmenu rezonančných vlastností je možné použiť v opačnom postupe na determináciu zvyškového napätia. Článok Yadroitseva a spol. [38] tiež dokazuje, že súčasti po aditívnej výrobe z materiálu S316L môžu obsahovať výraznú ťahovú napätosť (až 300 MPa) v kolmom smere na smer výstavby. Súhrn spomenutých predpokladov by mal viesť, v prípade skúmaných vzoriek v tejto diplomovej práci, ku zvýšeniu ich vlastných frekvencií po výrobe technológiou SLM. Tento efekt však nie je možné numericky overiť, pretože MKP simulácia nedokáže zahrnúť vplyv napätia v materiáli na vlastné frekvencie.

V prípade, že prehliadneme konzistentnú chybu výpočtu, je možné považovať presnosť zjednodušeného výpočtového modelu za uspokojivú. Rozptyl chyby je pri všetkých typoch štruktúr takmer rovnaký a dosahuje rozsah približne 10 % (vid' Obr. 5-30). Zaujímavé je chovanie výpočtového modelu, pretože zachytáva veľmi jemné zmeny vlastných frekvencií v rámci konštantnej relatívnej hustoty, ktoré boli potvrdené aj experimentálne (vid' Obr. 5-29).

6.1.4 Útlmové vlastnosti

Experimentálna modálna analýza tiež poskytla informácie o útlmových vlastnostiach mikro-prútových štruktúr. Rozbor dát bol vykonávaný najmä na najširšom rozsahu vzoriek, ktoré boli vyrobené so štruktúrou BCC. Výsledky poukazujú, po štatistickom vyhodnotení, na vplyv najmä relatívnej hustoty na pomerný útlm (vid' Obr. 5-22). Po vyradení vplyvu relatívnej hustoty na útlmový pomer, podelením nameraných útlmov relatívnou hustotou, nebol dokázaný vplyv veľkosti základnej bunky, ani vplyv priemeru prútov (vid' Obr. 5-23). Podobné chovanie bolo badateľné aj pri ostatných štruktúrach FLU a DIA (vid' Obr. 5-24 a Obr. 5-25). Porovnanie špecifických útlmov celých rozsahov všetkých typov štruktúr preukázalo, že zmeny geometrického usporiadania prútov štruktúr nemajú vplyv na výsledné útlmové charakteristiky (vid' Obr. 5-26).

Vplyv relatívnej hustoty na útlmové charakteristiky je podľa výsledkov očividný. Je však nutné zamyslieť sa nad týmito výsledkami skrze hmotnosť testovaných vzoriek. Tá je totiž pri súčasnom tvare vzoriek výrazne ovplyvňovaná relatívnou hustotou. Aby bolo možné tieto vzájomné vplyvy oddeliť, bolo by vhodné upraviť tvar vzoriek, a to tak, aby obsahovali veľké časti neštruktúrovanej hmoty. Potom by bol vplyv relatívnej hustoty na celkovú hmotnosť vzorky zanedbateľný. V tomto momente by bolo možné potvrdiť chovanie útlmových charakteristík v závislosti na relatívnej hustote. Ak by boli výsledky vyvrátené, bolo by možné domnievať sa, že útlm je ovplyvňovaný najmä výslednou hmotnosťou vzoriek.

Zistené poznatky o útlme bohužiaľ nie je možné efektívne porovnať so súčasnými publikáciami. Autori vo svojich prácach často krát využívajú dynamickú mechanickú analýzu, neporovnateľnú s modálnou analýzou. V prípade, že používajú modálnu analýzu, podobne ako v tejto diplomovej práci, ich spôsob návrhu a zvolený rozsah vzoriek neumožňuje efektívne vyradenie rôznych vzájomných vplyvov základných parametrov štruktúr. Takisto rozdielny tvar testovacích telies znemožňuje porovnanie výsledkov s diplomovou prácou.

6.2 Verifikácia hypotéz

6.2.1 Hypotéza č.1

Dosiahnuté výsledky v tejto diplomovej práci skutočne potvrdzujú vyslovené predpoklady spojené s rezonančnými charakteristikami mikro-prútových štruktúr. Numerické výpočty a experimentálne dáta získané pri BCC štruktúre potvrdzujú vplyv základných parametrov štruktúr na rezonančné charakteristiky. Vlastné frekvencie je podľa výsledkov možné cielene modulovať veľkosťou základnej bunky alebo priemerom prútov (čím je zároveň ovplyvňovaná relatívna hustota). Tiež bolo potvrdené, že pri konštantnej relatívnej hustote rovnakého typu štruktúry sa vlastné frekvencie výrazne nemenia. Podobné chovanie bolo pozorované aj pri ďalších štruktúrach FLU a DIA. Rovnako tak bolo dokázané, že vlastnú frekvenciu je možné meniť výberom vhodného typu štruktúry, teda zmenou geometrického usporiadania prútov (v tomto prípade nie je ovplyvňovaná relatívna hustota a teda aj hmotnosť vzoriek).

Výsledky tiež potvrdzujú, že útlmové charakteristiky je možné ovplyvniť zmenou základných parametrov štruktúry. Štatisticky získané závislosti preukázali najmä vplyv relatívnej hustoty na pomerný útlm bez ohľadu na zvolený typ štruktúry. Vplyv jemnosti štruktúry však nebolo možné z pohľadu útlmu potvrdiť.

Prvú hypotézu je aj napriek jednej nepotvrdenej predikcii možné považovať za potvrdenú takmer v celom rozsahu. Výsledky práce odpovedajú na doposiaľ neznáme rezonančné a útlmové chovanie mikro-prútvých štruktúr a možnosti ich ovplyvňovania. Útlmové a rezonančné charakteristiky teda môžu byť upravované do požadovanej podoby výberom vhodného typu mikro-prútovej štruktúry a správnou kombináciou základných parametrov štruktúry, teda optimalizáciou veľkosti základnej bunky a priemeru prútov, ktoré spolu určujú relatívnu hustotu zvolenej štruktúry.

6.2.2 Hypotéza č.2

Porovnanie objemového a zjednodušeného prútovej modelu po návrhu vlastnej optimalizácie dosiahlo uspokojivé výsledky. Chybovosť vnášaná zjednodušenými prútovejmi elementami bola úspešne eliminovaná korekciou materiálových charakteristík uzlových oblastí.

Porovnanie výpočtu s experimentom však nie je možné považovať za uspokojivé aj napriek tomu, že boli určené a do výpočtu implementované skutočné materiálové a mechanické vlastnosti vzoriek. Takmer konštantné podhodnotenie vlastných frekvencií výpočtom je zrejme možné zdôvodniť zvyškovým napätím, ktoré nebolo v rámci práce určované ani eliminované.

Druhú hypotézu teda je možné považovať za potvrdenú len z polovice svojho rozsahu. Prútovej model je možné upraviť tak, aby sa zhodoval s tým objemovým, avšak oba tieto modely je potrebné upraviť tak, aby sa zhodovali s experimentom. Vzhľadom na vyššie uvedené fakty je možné vysloviť novú hypotézu:

Hypotéza – Podhodnotenie výpočtovo získaných vlastných frekvencií voči experimentu je spôsobené zvyškovými napätiami po výrobe.

Potvrdenie tejto hypotézy by nielen vysvetlilo podhodnotenie MKP simulácií voči experimentu, no poukázalo by na možnosť určovať vnútornú napätosť aditívne vyrobených súčastí novou experimentálnou metódou (modálnou analýzou). Ďalší výskum by teda mohol viesť ku skúmaniu závislostí zvyškového napätia a vlastnej frekvencie.

7 ZÁVER

Diplomová práca riešila problematiku rezonančných a útlmových charakteristík mikro-prútových štruktúr vyrobených technológiou SLM. Ako naznačil súčasný stav poznania, táto téma je záujmom výskumu mnohých skupín. Ich dosiahnuté výsledky však ukázali, že sa jedná o pomerne komplikovaný, multidisciplinárny vedecký problém. Preto, po analýze dostupných informácií bolo zrejmé, že v súčasnosti nie je možné efektívne predikovať vlastné frekvencie odľahčených mikro-prútových súčastí a jednoznačne pomenovať parametre ovplyvňujúce výsledné rezonančné a útlmové charakteristiky.

Hlavným cieľom diplomovej práce teda bolo vyšetriť vibračno-dynamické chovanie štruktúr pri zmene základných parametrov ako je priemer prútov, veľkosť základnej bunky, relatívna hustota alebo geometrické usporiadanie prútov. Dielčimi cieľmi bolo vyšetriť tieto vlastnosti skrze konečno-prvkové zjednodušené výpočtové modely a porovnať ich s experimentálnymi metódami. Za týmto účelom vznikla široká skupina vzoriek štruktúry BCC spolu s užšími skupinami štruktúr FLU a DIA. Tvar a rozsah testovacích telies všetkých skúmaných štruktúr bol volený tak, aby bolo možné vyšetriť a porovnať vplyvy všetkých parametrov osobitne, bez vzájomného ovplyvňovania.

Výsledky dosiahnuté pri návrhu zjednodušeného prútového konečno-prvkového výpočtového modelu je možné považovať za veľmi úspešné. V rámci šetrenia tejto problematiky bol zvolený systematický postup a boli zistené dielčie účinky zjednodušenia prútovými elementami na celkovú hmotnosť (resp. objem) a tuhosť simulovaných vzoriek. Vzniknuté chyby boli lokalizované vo vzájomných spojoch prútov. Preto bolo možné navrhnuť optimalizáciu hustoty a Youngovho modulu v uzloch simulovanej štruktúry. Vysvetlenie dielčích vplyvov a novonadobudnuté poznatky je možné využiť aj pri iných analýzach, zameraných či už na predikciu absorpcie nárazovej práce alebo odhad statickej únosnosti mikro-prútových štruktúr. Je však nutné dodať, že zjednodušenie výpočtového modelu nemá slúžiť na to, aby nahradilo objemový výpočtový model. Prútové elementy výrazne znižujú výpočtovú náročnosť, umožňujú rýchlu parametrizáciu a v celku tak zefektívňujú optimalizáciu súčastí. Avšak, po návrhu vhodných parametrov danej súčasti zjednodušenou simuláciou, by mal byť konečný dizajn vždy overený objemovým konečno-prvkovým modelom.

Parametrizácia zjednodušeného MKP výpočtu spolu so zahrnutím skutočných materiálových charakteristík umožnili predikovať rezonančné vlastnosti v širokom rozsahu navrhnutých testovacích telies. Následné vyšetrovanie dát preukázalo výrazný vplyv základných parametrov na rezonančné charakteristiky. Toto chovanie bolo potvrdené experimentálnou modálnou analýzou. Experiment taktiež poskytol informácie o útlmových charakteristikách. Tieto výsledky ukazujú rezonančné a útlmové vlastnosti zvolených štruktúr a možnosti ich úprav po zmene relatívnej hustoty štruktúr.

Ciele diplomovej práce možno považovať za splnené v plnom rozsahu. Navyše táto práca, v celkovom kontexte, poskytuje doposiaľ nedostupný, komplexný balík informácií o rezonančných a útlmových charakteristikách štruktúr vyrobených technológiou SLM. Novonadobudnuté a prezentované vedomosti popisujú možnosti optimalizácie a numerickej predikcie zjednodušeným MKP výpočtom. Výsledky jednoznačne ukazujú, že mikro-prúťové štruktúry je možné využiť na návrh optimalizovaných ultraľahkých konštrukcií s cielene definovanou vlastnou frekvenciou a pomerným útlmom.

Je zrejmé, že aditívne vyrábané mikro-prúťové štruktúry ponúkajú využiteľnosť v mnohých aplikáciách a odvetviach strojného inžinierstva. Je však nutné dodať, že tieto štruktúry a ich útlmovo-rezonančné vlastnosti vyžadujú ešte výraznejšiu pozornosť vedeckej komunity. V nadväznosti na dosiahnuté výsledky, by ďalší výskum mohol smerovať ku vyšetreniu vplyvu zvyškových napätí na rezonančné vlastnosti týchto štruktúr. Tým by došlo nielen ku spresneniu MKP simulácií, ale v opačnom ponímaní, by zrejme bolo možné určovať mieru zvyškových napätí experimentálnou modálnou analýzou. Po dosiahnutí uspokojivých výsledkov, by bolo vhodné pokračovať prípadovou štúdiou optimalizovanej súčasti z pohľadu rezonančných a útlmových vlastností. Vrcholom budúceho výskumu by napokon mohol byť presný a úspešný návrh optimalizovaných dielov pri použití rôznych typov štruktúr súčasne a pri využití premenlivých základných parametrov týchto štruktúr.

8 VÝSLEDOK VÝSKUMU PODĽA RIV

Výsledky dosiahnuté v tejto diplomovej práci je možné publikovať. Za týmto účelom vznikol anglický preklad práce v skrátenej verzii. Manuskript pre odborný článok sa nachádza vo finalizovanej forme.

Názov článku: Resonance and Damping Behavior of Lattice Structures Produced by Selective Laser Melting

Autori: A. Lagiň, D. Koutný, M. Klapka, O. Červinek, V. Šreibr

Abstrakt (Anglická verzia):

The uptrend of additive manufacturing, especially Selective Laser Melting (SLM), allows the production of lightweight structured metallic parts, which are not manufacturable by conventional approaches. This technique opens new opportunities for the micro-truss structures, which were successfully used for the adjustment of the various mechanical properties. Therefore, the optimization of resonance or damping could be also assumed as possible. For this purpose, several finite element analysis approaches were used, including the referent solid element model and simplified beam models. Obtained results were verified experimentally via pulse modal analysis. Material and mechanical properties of samples for FEA results and experimental results comparison were unified through secondary experiments. The results from both, numerical and experimental approaches confirm that the eigenfrequency and the damping ratio of the structure can be affected by the change in the truss diameter, cell size, or type of structure. The work also presents the successful methods for simplified beam model optimization, which guarantees its high precision in the wide field of tested samples. This newly obtained knowledge creates a comprehensive overview of micro-truss structures, which can be used for the conscious design of lightweight components with the required eigenfrequency and damping ratio.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] KOUTNÝ, D. Ultralehká konzola komunikačních antén satelitu „vypečená“ 3D tiskem. In: *Zprávy z VUT* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://zvut.cz/napady-objevy/napady-a-objevy-f38103/vypecena-konzola-miri-z-tiskarny-do-vesmiru-d103894>
- [2] ASHBY, M. F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2006, **364**(1838), 15-30. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2005.1678
- [3] GIBSON, L. J. a M. F. ASHBY. *Cellular solids: structure and properties*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. Cambridge solid state science series. ISBN 05-214-9911-9.
- [4] VRÁNA, R., J. JAROŠ, D. KOUTNÝ, et al. Contour laser strategy and its benefits for lattice structure manufacturing by selective laser melting technology. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, **74**, 640-657. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.12.006
- [5] YADROITSEV, I., I. YADROITSAVA, P. BERTRAND, et al. Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks. *Rapid Prototyping Journal*. 2012, **18**(3), 201-208. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552541211218117
- [6] KOUTNÝ, D., R. VRÁNA a D. PALOUŠEK. Dimensional accuracy of single beams of AlSi10Mg alloy and 316L stainless steel manufactured by SLM. In: DRSTVENŠEK, I., ed. *5th International Conference on Additive Technologies iCAT2014*. Ljubljana: Interesansa - zavod, 2014, s. 142–147. ISBN 978-961-281-579-0.
- [7] PYKA, G., G. KERCKHOFS, I. PAPANTONIOU, et al. Surface Roughness and Morphology Customization of Additive Manufactured Open Porous Ti6Al4V Structures. *Materials*. 2013, **6**(10), 4737-4757. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma6104737
- [8] VRÁNA, R., O. ČERVINEK, P. MAŇAS, et al. Dynamic Loading of Lattice Structure Made by Selective Laser Melting-Numerical Model with Substitution of Geometrical Imperfections. *Materials*. 2018, **11**(11). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11112129

- [9] ČERVINEK, O., B. WERNER, D. KOUTNÝ, et al. Computational Approaches of Quasi-Static Compression Loading of SS316L Lattice Structures Made by Selective Laser Melting. *Materials*. 2021, **14**(9). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14092462
- [10] GUO, H., Ai. TAKEZAWA, M. HONDA, et al. Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured lattice structures with large diameters. *Computational Materials Science*. 2020, **175**. ISSN 0927-0256. Dostupné z: doi:10.1016/j.commatsci.2020.109610
- [11] ARGON, A. S. *The physics of deformation and fracture of polymers: 5 - Linear viscoelasticity of polymers*. New York: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-0521821841.
- [12] LAKES, R. S. *Viscoelastic solids*. Boca Raton: CRC Press, 1998. ISBN 978-0849396588.
- [13] *The Fundamentals of Modal Testing: Application Note 243-3*. USA: Hewlett-Packard Co., 1997. Dostupné z: https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an_243-3.pdf
- [14] EWINS, D. J. *Modal testing: Theory, practice and application*. 2. Baldock: Research Studies Press, 2000. Mechanical engineering research studies. ISBN 0-86380-218-4.
- [15] BILOŠOVÁ, A. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: Část modální zkoušky*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2758-2.
- [16] AVITABILE, P. *Modal Testing: A Practitioner's Guide*. Hoboken: John Wiley, 2018. ISBN 781119222897.
- [17] SYAM, W. P., W. JIANWEI, B. ZHAO, et al. Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation. *Precision Engineering*. 2018, **52**, 494-506. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2017.09.010
- [18] IBRAHIM, Y., Z. LI, C. M. DAVIES, et al. Acoustic resonance testing of additive manufactured lattice structures. *Additive Manufacturing*. 2018, **24**, 566-576. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.10.034
- [19] ROSA, F., S. MANZONI a R. CASATI. Damping behavior of 316L lattice structures produced by Selective Laser Melting. *Materials & Design*. 2018, **160**, 1010-1018. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.10.035
- [20] FIOCCHI, J., C. A. BIFFI, D. SCACCABAROZZI, et al. Enhancement of the Damping Behavior of Ti 6 Al 4 V Alloy through the Use of Trabecular Structure Produced by Selective Laser Melting. *Advanced Engineering Materials*. 2019, **22**(2), 1-6. ISSN 1438-1656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201900722

- [21] SORTINO, M., G. TOTIS, F. SCALZO, et al. Preliminary Investigation of Static and Dynamic Properties of SLM Lattice Structures for Robotic Applications. In: *Mechanism Design for Robotics: Proceedings of the 4th IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics*. Meder: Springer International Publishing, 2018, s. 260-267. ISBN 978-3-030-00364-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-00365-4_31
- [22] SCALZO, F., G. TOTIS, E. VAGLIO, et al. Passive Chatter Suppression of Thin-Walled Parts by Means of High-Damping Lattice Structures Obtained from Selective Laser Melting. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2020, **4**(4). ISSN 2504-4494. Dostupné z: doi:10.3390/jmmp4040117
- [23] SCALZO, F., G. TOTIS, E. VAGLIO, et al. Experimental study on the high-damping properties of metallic lattice structures obtained from SLM. *Precision Engineering*. 2021, **71**, 63-77. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2021.02.010
- [24] RAMADANI, R., A. BELSAK, M. KEGL, et al. Topology Optimization Based Design of Lightweight and Low Vibration Gear Bodies. *International Journal of Simulation Modelling*. 2018, **17**(1), 92-104. ISSN 1726-4529. Dostupné z: doi:10.2507/IJSIMM17(1)419
- [25] RAMADANI, R., M. KEGL. a J. PREDAN. Influence of Cellular Lattice Body Structure on Gear Vibration Induced by Meshing. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2018, **64**(10), 611-620. ISSN 0039-2480. Dostupné z: doi:10.5545/sv-jme.2018.5349
- [26] ANDRESEN, S., A. BÄGER a C. HAMM. Eigenfrequency maximisation by using irregular lattice structures. *Journal of Sound and Vibration*. 2020, **465**. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2019.115027
- [27] WEI, Y., B. YU, Q. YANG, et al. Damping behaviors of steel-based Kelvin lattice structures fabricated by indirect additive manufacture combining investment casting. *Smart Materials and Structures*. 2020, **29**(5). ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/ab78b8
- [28] COLOMBO, Ch., C. A. BIFFI, J. FIOCCHI, et al. Modulating the damping capacity of SLMed AlSi10Mg trough stress-relieving thermal treatments. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020, **107**. ISSN 0167-8442. Dostupné z: doi:10.1016/j.tafmec.2020.102537
- [29] WERNER, B., O. ČERVINEK, D. KOUTNÝ, et al. Numerical and experimental study on the collapse of a triangular cell under compression. *International Journal of Solids and Structures*. 2022, **236-237**. ISSN 0020-7683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2021.111295

- [30] RAMIREZ, R. W. *The FFT: Fundamentals and Concepts*. Hoboken: Prentice Hall, 1984. ISBN 978-0133143867.
- [31] PATTERSON, J. Spectrum Analysis Basics, Part 1 - What is a Spectrum Analyzer?. In: *Test & Measurement, Electronic Design, Network Test, Automation / Keysight* [online]. Keysight Technologies, © 2000–2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://blogs.keysight.com/blogs/tech/rfmw.entry.html/2020/05/01/spectrum_analysisba-8Axa.html
- [32] Spectral Windowing. In: *Igor Pro from WaveMetrics | Igor Pro by WaveMetrics* [online]. Portland: WaveMetrics [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.wavemetrics.com/products/igorpro/dataanalysis/signalprocessing/spectralwindowing>
- [33] ZIENKIEWICZ, O. C., R. L. TAYLOR a J. Z. ZHU. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 7th ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-1856176330.
- [34] Measuring Density with Laboratory Balance. *Mettler Toledo* [online]. Columbus: Mettler Toledo [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://www.mt.com/ch/en/home/applications/Laboratory_weighing/density-measurement.html
- [35] AISI Type 316L Stainless Steel, annealed bar. *Online Materials Information Resource - MatWeb* [online]. Blacksburg: MatWeb, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a2d0107bf958442e9f8db6dc9933fe31>
- [36] KAMATH, Ch., B. EL-DASHER, G. GALLEGOS, et al. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, **74**(1-4), 65-78. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-5954-9
- [37] DAS, Debasish, Dilip Kumar PRATI HAR a Gour Gopal ROY. Establishing a Correlation Between Residual Stress and Natural Frequency of Vibration for Electron Beam Butt Weld of AISI 304 Stainless Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020, **45**(7), 5769-5781. ISSN 2193-567X. Dostupné z: doi:10.1007/s13369-020-04560-0
- [38] YADROITSEV, I. a I. YADROITSAVA. Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015, **10**(2), 67-76. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2015.1026045

10 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

SLM	Selective Laser Melting
CAD	Computer-aided Design
BCC	Body Centered Cubic (typ štruktúry)
FLU	Fluorite (typ štruktúry)
DIA	Diamond (typ štruktúry)
FRF	Frequency Response Function
FFT	Fast Fourier Transform
MKP	Metódy konečných prvkov
ρ	Hustota
V	Objem
m	Hmotnosť
F	Sila
ε	Pretvorenie
ζ	Pomerný útlm
η	Stratový súčiniteľ
v	Logaritmický dekrement
δ	Fázový posun
ω, f	Frekvencia
$H(\omega)$	Prenosová funkcia
k	Tuhosť
$\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$	Matica hmotnosti, útlmu a tuhosti
$\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}, \mathbf{f}$	Vektor posuvu, rýchlosti, zrýchlenia a externých síl
E	Youngov modul pružnosti
L	Veľkosť základnej bunky
D	Priemer prútu

11 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1-1	Ultraľahká konzola antény pre satelit s využitím mikro-prútových štruktúr [1].	15
Obr. 2-1	PRISMA diagram – postup vyhľadávania informačných zdrojov	17
Obr. 2-2	Štruktúrovaný materiál vľavo, neštruktúrovaný materiál vpravo; oba uvažujú rovnaký základný objem (vyznačený červenou farbou).	19
Obr. 2-3	Schodovitý efekt a tepelný tok a.) pri kolmej, b.) naklonenej geometrii [7].	20
Obr. 2-4	Schéma skutočného prierezu nakloneného prútu vyrobeného technológiou SLM a jeho aproximácia elipsou a rôznymi kružnicami [8].	20
Obr. 2-5	Spôsob korekcie tuhosti uzlov prútového MKP modelu [10].	21
Obr. 2-6	Časový priebeh sily a pretvorenia viskózne-elastického materiálu pri cyklickom namáhaní.	22
Obr. 2-7	Zobrazenie prenosových funkcií premietnutých do odozvy a vlastného tvaru votknutého prútu.	23
Obr. 2-8	FRF systému zobrazená v priestore ω -Re-Im [14].	23
Obr. 2-9	Určenie nominálnej šírky frekvenčného rezonančného pásma z amplitúdovo-frekvenčnej charakteristiky [14].	24
Obr. 2-10	Spôsob predikcie vlastnej frekvencie tuhosťou [17].	25
Obr. 2-11	Nepresnosti výroby SLM - nalepený prášok na prútoch štruktúry [18].	26
Obr. 2-12	Stratový faktor závislý: a.) na amplitúde a frekvencii zaťaženia; b.) na tepelnom spracovaní (AS = As built, HT = Heat treated; 0.1 a 0.45 = pretvorenie 0,1% a 0,45%).	26
Obr. 2-13	Výsledky útlmu mikro-prútových vzoriek [21, 22].	27
Obr. 2-14	Pomerný útlm normalizovaný ku vzorke E-Al (E pre Obr. 2-13). Parametre vzoriek A-E sú totožné s tabuľkou na Obr. 2-13. Označenia materiálu sa značia: SS – S316L; Al – AlSi ₁₀ Mg [23].	28
Obr. 2-15	Aditívne vyrobené, topologicky optimalizované ozubené koleso [24].	28
Obr. 2-16	Frekvenčná charakteristika akustickej emisie chodu ozubeného kolesa [24].	29
Obr. 4-1	Metodický postup riešenia diplomovej práce.	35
Obr. 4-2	Schéma experimentálnej sústavy pre modálnu analýzu.	36
Obr. 4-3	Tvar a parametre definujúce vzorku.	37

Obr. 4-4	Geometria skúmaných typov štruktúr s rovnakou relatívnou hustotou 10 %. Bunky sú zoradené zostupne zľava podľa priemeru prútov.....	38
Obr. 4-5	Vlastné tvary štruktúry BCC pri uvažovaní vplyvu akcelerometra (farebne je vykreslená smerová deformácia v zvislom smere totožná so smerom snímania zrýchlenia akcelerometrom).....	41
Obr. 4-6	Umiestnenie akcelerometra na vzorke.....	41
Obr. 4-7	Princíp spektrálnej analýzy: transformácia z časovej do frekvenčnej domény [31].....	42
Obr. 4-8	Vplyv aplikácie váhovej funkcie (Hanningovo okno) na výsledné frekvenčné spektrum [32].....	43
Obr. 4-9	Okienkovanie (exponenciálnou) váhovou funkciou zaručuje periodicitu analyzovaného úseku [16].	43
Obr. 4-10	Tlmené kmitanie – preloženie extrémov časového priebehu exponenciálou. ...	44
Obr. 4-11	Aplikácia IIR filtra na elimináciu parazitných rezonančných frekvencií (modrou).	45
Obr. 4-12	Určenie stabilnej oblasti útlmu (log. dekrement zistený porovnaním amplitúd - vľavo) a výsledná determinácia pomerného útlmu (log. dekrement určený exponenciálou - vpravo).....	45
Obr. 4-13	Meranie hustoty materiálu na váhach s využitím Archimedovho zákona....	47
Obr. 4-14	Porovnanie dát experimentálnej tlakovej skúšky a numerickej simulácie...	48
Obr. 4-15	Vyhodnotenie skutočnej geometrie prútov.	49
Obr. 5-1	Citlivostná analýza veľkosti elementov na vlastnú frekvenciu. Veľkosť elementu bola vždy definovaná ako delenec priemeru prútov.	51
Obr. 5-2	Vlastné tvary štruktúry BCC (farebne je vykreslená smerová deformácia v zvislom smere totožná so smerom snímania zrýchlenia akcelerometrom).52	
Obr. 5-3	Vlastné tvary štruktúry FLU (farebne je vykreslená smerová deformácia v zvislom smere totožná so smerom snímania zrýchlenia akcelerometrom).53	
Obr. 5-4	Porovnanie geometrie prútového a objemového modelu BCC štruktúry pri rovnakých parametroch.	57
Obr. 5-5	Porovnanie deformácií prútu v strede BCC štruktúry prútového a objemového modelu.	58
Obr. 5-6	Závislosť zmeny objemu a tuhosti BCC štruktúry: prútový model voči objemovému modelu.	59

Obr. 5-7	Zvolená oblasť ovplyvnenia uzlov prútového modelu (zelená a žltá oblasť).	60
Obr. 5-8	Histogram – zmeraná hustota materiálu.....	63
Obr. 5-9	Vplyv priemeru prútov na hustotu pevného materiálu.	64
Obr. 5-10	Vplyv veľkosti základnej bunky na hustotu pevného materiálu.....	65
Obr. 5-11	Vyhodnotenie elipticity prútov.....	66
Obr. 5-12	Orientácia elpticity skutočných prierezov.	66
Obr. 5-13	Porovnanie plôch prierezov.	67
Obr. 5-14	Porovnanie priemeru nominálnej a Gauss-fit kružnice.	67
Obr. 5-15	Výsledky numericky predikovaných vlastných frekvencií pre štruktúru BCC v celom rozsahu vzoriek.	69
Obr. 5-16	Numerická predikcia rezonancie BCC štruktúry pri konštantných relatívnych hustotách.	70
Obr. 5-17	Porovnanie vlastných frekvencií pri zmene typu štruktúry (veľkosť základnej bunky je 4,5 mm pre BCC štruktúru a 9 mm pre FLU a DIA štruktúry).	70
Obr. 5-18	Výsledky experimentálne určených vlastných frekvencií pre štruktúru BCC v celom rozsahu vzoriek (V grafe sú uvedené priemerné hodnoty).	72
Obr. 5-19	Experimentálne určená rezonancia BCC štruktúry pri konštantných relatívnych hustotách (V grafe sú uvedené priemerné hodnoty).	72
Obr. 5-20	Porovnanie vlastných frekvencií pri zmene typu štruktúry (veľkosť základnej bunky je 4,5 mm pre BCC štruktúru a 9 mm pre FLU a DIA štruktúry).	73
Obr. 5-21	Výsledky experimentálne určených útlmových charakteristík pre štruktúru BCC v celom rozsahu vzoriek (V grafe sú uvedené priemerné hodnoty). ...	74
Obr. 5-22	Závislosť experimentálne zisteného pomerného útlu na relatívnej hustote BCC štruktúry (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).	74
Obr. 5-23	Výsledky experimentálne určených útlmových charakteristík pre štruktúru BCC v celom rozsahu vzoriek po vylúčení vplyvu relatívnej hustoty (V grafe sú uvedené priemerné hodnoty).	75
Obr. 5-24	Závislosť experimentálne zisteného pomerného útlu na relatívnej hustote FLU štruktúry (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).	76
Obr. 5-25	Závislosť experimentálne zisteného pomerného útlu na relatívnej hustote DIA štruktúry (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).	76

Obr. 5-26	Porovnanie špecifického útlmu rôznych typov štruktúr (V grafe sú zahrnuté všetky namerané vzorky).....	77
Obr. 5-27	Porovnanie závislostí vlastnej frekvencie na relatívnej hustote experimentálne a numericky získaných dát (V grafe sú uvedené priemerné experimentálne hodnoty).....	77
Obr. 5-28	Porovnanie numerickej predikcie a experimentálne určených vlastných frekvencií štruktúr BCC.	78
Obr. 5-29	Porovnanie vlastnej frekvencie zistenej výpočtom a experimentálne pri konštantnej relatívnej hustote $\rho_{rel} = 33,7 \%$ (V grafe sú uvedené priemerné experimentálne hodnoty).....	78
Obr. 5-30	Porovnanie chybovosti (podhodnotenia) predikcie vlastnej frekvencie zjednodušených výpočtových modelov voči experimentu pre rôzne typy mikro-prúťových štruktúr. Výsledky zahrňujú všetky vyrobené testovacie telesá.....	79

12 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1	Výsledky vyhľadávania primárnych informačných zdrojov	18
Tab. 2-2	Citačná analýza primárnych zdrojov	18
Tab. 2-3	Porovnanie prútového a objemového výpočtového modelu [26].	30
Tab. 2-4	Porovnanie numerického výpočtu a experimentu [26].....	30
Tab. 4-1	Zvolený rozsah vzoriek štruktúry BCC.	38
Tab. 4-2	Rozšírenie rozsahu vzoriek štruktúry BCC.	39
Tab. 4-3	Skupina vzoriek štruktúry FLU (rozdiel priemerov 1,85; 1,86 a 1,87 je pri skúmaní vplyvu veľkosti základnej bunky zanedbateľný).....	39
Tab. 4-4	Skupina vzoriek štruktúry DIA (rozdiel priemerov 2,64; 2,66 a 2,7 je pri skúmaní vplyvu veľkosti základnej bunky zanedbateľný).....	40
Tab. 5-1	Výsledky výpočtu štruktúry BCC pri uvažovaní objemových elementov (viď prílohu V-A001); červenou sú vyznačené hodnoty s požadovaným vlastným tvarom.....	52
Tab. 5-2	Výsledky výpočtu štruktúry FLU pri uvažovaní objemových elementov (viď prílohu V-A002); červenou sú vyznačené hodnoty s požadovaným vlastným tvarom.....	53
Tab. 5-3	Výsledky výpočtu štruktúry DIA pri uvažovaní objemových elementov (viď prílohu V-A003); červenou sú vyznačené hodnoty s požadovaným vlastným tvarom.....	54
Tab. 5-4	Porovnanie výsledkov vlastných frekvencií BCC štruktúry: prútový model voči objemovému modelu bez optimalizácie (viď prílohu V-n001).	55
Tab. 5-5	Porovnanie výsledkov vlastných frekvencií: prútový model voči objemovému modelu s optimalizáciou spevnení uzlov podľa Guo a spol [10] (viď prílohu V-n002).....	56
Tab. 5-6	Porovnanie objemu BCC štruktúry: prútový model voči objemovému modelu.	57
Tab. 5-7	Porovnanie tuhosti BCC štruktúry: prútový model voči objemovému modelu (viď prílohu V-A004).....	58
Tab. 5-8	Požadovaná zmena materiálových vlastností v uzloch optimalizovaného prútového modelu BCC štruktúry v porovnaní s objemovým modelom.	60

Tab. 5-9	Porovnanie výsledkov vlastných frekvencií štruktúry BCC: prútový model voči objemovému modelu po návrhu vlastnej optimalizácie (viď prílohu V-n003).	61
Tab. 5-10	Korekčné vzťahy v uzlových oblastiach prútov pre štruktúry BCC, FLU a DIA.....	61
Tab. 5-11	Porovnanie výsledkov prvých vlastných frekvencií štruktúr BCC, FLU a DIA: prútový model voči objemovému modelu, po návrhu vlastnej optimalizácie; tabuľka porovnáva výsledky pri totožnom vlastnom tvare, <i>typ písma</i> označuje vlastnosti pre štruktúry FLU a DIA (viď prílohy V-n003, V-n004 a V-n005).	62
Tab. 5-12	Štatistické parametre merania – experimentálne určovanie hustoty materiálu.	63
Tab. 5-13	Zúžený výber vzoriek pre vyšetrenie vplyvu priemeru prútov na hustotu materiálu (šípka vyznačuje rozsah skúmanej závislosti).....	64
Tab. 5-14	Zúžený výber vzoriek pre vyšetrenie vplyvu veľkosti základnej bunky na hustotu materiálu (šípka vyznačuje rozsah skúmanej závislosti).	64
Tab. 5-15	Experimentálne určené materiálové charakteristiky bilineárneho materiálového modelu.....	68
Tab. 5-16	Parametre a rovnice upravujúce výpočet podľa skutočných vlastností vzoriek.	69

13 ZOZNAM PRÍLOH

- V-A001 – Výpočtový protokol – Modálna analýza – objemový model – BCC
- V-A002 – Výpočtový protokol – Modálna analýza – objemový model – FLU
- V-A003 – Výpočtový protokol – Modálna analýza – objemový model – DIA
- V-A004 – Výpočtový protokol – Statická analýza – objemový / prúťový model – BCC
-
- V-n001 – Výpočtový protokol – Mod. analýza – prúťový model – bez optimalizácie – BCC
- V-n002 – Výpočtový protokol – Mod. analýza – prúťový model – zákl. optimalizácia – BCC
- V-n003 – Výpočtový protokol – Mod. analýza – prúťový model – vlastná optim. – BCC
- V-n004 – Výpočtový protokol – Mod. analýza – prúťový model – vlastná optim. – FLU
- V-n005 – Výpočtový protokol – Mod. analýza – prúťový model – vlastná optim. – DIA
-
- L-A001 – Laboratórny protokol – Achimedes – určenie hustoty materiálu – BCC
- L-S001 – Laboratórny protokol – 3D Skenovanie – určenie skutočnej geometrie – BCC
- L-T001 – Laboratórny protokol – Tlaková skúška – určenie tuhosti materiálu – BCC
-
- L-M001 – Laboratórny protokol – Exp . modálna analýza – vlastné frekvencie a útlm – BCC
- L-M002 – Laboratórny protokol – Exp . modálna analýza – vlastné frekvencie a útlm – FLU
- L-M003 – Laboratórny protokol – Exp . modálna analýza – vlastné frekvencie a útlm – DIA