



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MODEL GEOMETRIE MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR PRO METODU KONEČNÝCH PRVKŮ

MODEL OF GEOMETRY OF MICRO-LATTICE STRUCTURES FOR FINITE ELEMENT METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Javorský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Červínek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Dominik Javorský**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Červínek, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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:

Model geometrie mikro–prutových struktur pro metodu konečných prvků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

K efektivnímu využití mikro–prutových struktur vyrobených aditivními technologiemi je nutné experimentální testování doplnit o numerické výpočty, které poskytují bližší poznatky o deformačním chování struktur. Za účelem vytvoření těchto simulací je mimo jiné zapotřebí sestavit model geometrie reflektující stav struktur po výrobě včetně imperfekcí. V průběhu výroby technologií selective laser melting se objevují imperfekce několika typů s odlišným vlivem na mechanické vlastnosti struktur. Pomocí metod konečných prvků lze tento vliv pozorovat a stanovit jeho význam.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je vytvořit přesný model geometrie mikro–prutové struktury s využitím experimentálních dat pro MKP analýzu, která umožní posoudit vliv geometrických imperfekcí technologie SLM na mechanické vlastnosti.

Dílčí cíle diplomové práce:

- vytvořit rešeršní studii geometrických imperfekcí vznikajících při výrobě technologií SLM, včetně možností jejich implementace do výpočtového modelu geometrie,
- implementovat zkoumané geometrické imperfekce a materiálový model do MKP analýzy,
- navrhnout model geometrie mikro–prutové struktury, který umožní podrobně studovat dopad zkoumaných geometrických imperfekcí (na lokální úrovni),
- navrhnout a provést měření na získání reálné geometrie prostřednictvím metody optického skenování,
- posoudit vliv geometrických imperfekcí a porovnat výsledky MKP simulací s experimentem.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, 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://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

AMANI, Yasin, Sylvain DANCETTE, Pauline DELROISSE, Aude SIMAR, Eric MAIRE, Xiaoyu ZHANG, Panding WANG a Daining FANG. Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Acta Materialia*. 2018, 159. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2018.08.030

LEI, Hongshuai, Chuanlei LI, Jinxin MENG, Hao ZHOU, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Panding WANG a Daining FANG. Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Acta Materialia*. 2019, 169. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.107685

LOZANOVSKI, Bill, David DOWNING, Rance TINO, et al. Non-destructive simulation of node defects in additively manufactured lattice structures: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Additive Manufacturing*. 2020, 36. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101593

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Rastúcou dostupnosťou technológie aditívnej výroby ako napríklad SLM, je umožnená tvorba inovatívnych konštrukčných návrhov. Príkladom sú aj tvarovo náročné mikro-prútové štruktúry, ktoré sú využívané z dôvodu výborných mechanických vlastností vzťahnutých na jednotku hmotnosti. Veľkým problémom sú tolerancie výroby, ktorých výskyt u väčšiny komponentov nie je kľúčový. Nakoľko pri mikro-prútových štruktúrach hovoríme o tenkostenej geometrii, výrobné tolerancie spôsobujú výrazné odchýlky v mechanických vlastnostiach. Proces návrhu štruktúr a dosiahnutie výsledkov porovnateľných s experimentom vyžaduje použitie neštandardných metód. Hovoríme o časovo a finančne náročných postupoch na získanie reálnej geometrie, ktoré sú následne použité pre numerické simulácie založené na princípe MKP. Táto práca sa zaoberá dopadom geometrických imperfekcií vyskytujúcich sa v štruktúrach typu BCC, ktoré sú tvorené z nerezovej ocele 316L. Počas riešenia bola získaná reálna geometria prostredníctvom optickej digitalizácie s využitím skeneru ATOS Triple Scan. Súčasťou bola aj dynamická skúška na pádovom testeri z ktorého boli použité výsledky pri úprave modelu geometrie v kombinácii so získanou reálnou geometriou. Z dôvodu minimalizácie odchýlky výsledkov z experimentu a numerickej simulácie pod úroveň 5 % boli získané poznatky využité pri simuláciách skúmajúcich dopad geometrických imperfekcií. V oblasti simulácií zaoberajúcich sa dopadom imperfekcií boli stanovené odchýlky až do 30 %. Tieto je možné minimalizovať pri zahrnutí poznatkov reálnej geometrie do návrhu. Z výsledkov je taktiež možné stanoviť rozsah priemeru, kedy je zahrnutie geometrických imperfekcií do návrhu nerelevantné. Taktiež bol pozorovaný veľký dopad geometrie uzla na výsledky z numerickej simulácie, čo prispelo priblíženiu sa hodnotám z experimentu. Dôležitým prínosom práce je aj zjednodušený model geometrie, ktorý v budúcnosti umožní študovať dopad ďalších imperfekcií v rozsahu ktorý doteraz nebol možný.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Selective laser melting (SLM), metóda konečných prvkov (MKP), mikro-prútová štruktúra, geometrické imperfekcie, BCC, nerezová oceľ 316L, optická digitalizácia

ABSTRACT

The growing availability of additive manufacturing technology, such as SLM, enables the creation of innovative structural designs. An example of these are complex lattice structures which are used because of their excellent mechanical properties relative to weight. One significant challenge lies in production tolerances. These are not crucial for the majority of components. However, when dealing with lattice structures and their thin-walled geometry, manufacturing tolerances lead to substantial deviations in mechanical properties. The process of designing such structures and achieving results comparable to the experiment requires the use of non-standard methods. These methods are time-consuming and costly for obtaining real geometry. The real geometry is then used for numerical simulations based on the FEM principle. This thesis focuses on the impact of geometric imperfections occurring in BCC-type structures made of stainless steel 316L. During the solution, the real geometry was obtained through optical digitization using the ATOS Triple Scan scanner. Dynamic drop-weight tests were also conducted, and the obtained results were used to modify the geometry model in combination with the acquired real geometry. The aim was to minimize the deviation between experimental and numerical simulation results below 5%. The knowledge gained from this process was then applied in simulations investigating the impact of geometric imperfections. Deviations up to 30% were observed in simulations investigating the impact of geometric imperfections. These deviations can be minimized by incorporating the knowledge of real geometry into the design. The results also help determine the diameter range within which including geometric imperfections in the design is irrelevant. Furthermore, a significant impact of the node geometry on the results of numerical simulations was observed. This knowledge brought the values closer to the experimental data. Another important contribution of this work is the simplified geometry model. This model will enable the study of the impact of additional imperfections in a range that was previously unattainable.

KEYWORDS

Selective laser melting (SLM), finite element method (FEM), lattice structure, geometric imperfections, BCC, stainless steel 316L, optical digitization

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

JAVORSKÝ, Dominik. *Model geometrie mikro-prutových struktur pro metodu konečných prvků*. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145694>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Ondřej Červínek, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce pánovi Ing. Ondrejovi Červinkovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady a trpezlivosť pri tvorbe tejto diplomovej práce. Vďaka patrí aj pánovi Ing. Tomášovi Kouteckému, Ph.D. za pomoc pri vyhodnocovaní dát. Ďalej mojej rodine a kamarátom za všetku podporu pri štúdiu.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	15
2.1	Rešeršné metódy	15
2.2	Kritická rešerš	16
2.2.1	Mikro-prútové štruktúry tvorené technológiou SLM	16
2.2.2	Imperfekcie spôsobené technológiou SLM	18
2.2.3	Geometrické imperfekcie	22
2.2.4	Prístupy v numerických simuláciách	27
2.2.5	Získanie reálnej geometrie	30
2.3	Zhrnutie hlavných zistení	30
2.4	Medzera v poznaní	32
3	CIELE PRÁCE	34
3.1	Výskumné otázky	34
3.2	Ciele výskumu	34
3.3	Hypotézy	35
4	MATERIÁL A METODY	36
4.1	Metodika	36
4.2	Tvorba vzoriek	37
4.2.1	Prístrojové vybavenie SLM tlače	37
4.2.2	Základný materiál pre technológiu SLM	38
4.2.3	Špecifikácia vzoriek	39
4.2.4	Softvérové vybavenie	39
4.3	Experimentálna časť	40
4.3.1	Experiment získania reálnej geometrie	40
4.3.2	Experiment mechanickej skúšky	41
4.3.3	Softvérové vybavenie	42
4.3.4	Metódy získania reálnej geometrie vzoriek	42
4.4	Analytický prístup	45
4.5	Numerické simulácie	47
4.5.1	Softvérové vybavenie	47
4.5.2	Skúšobný materiálový model	48
4.5.3	Metódy využité v Numerických simuláciách – metóda konečných prvkov	48

4.5.4	Numerická simulácia – Rozmerová analýza štruktúry	49
4.5.5	Numerická simulácia – Zjednodušenie modelu geometrie	50
4.5.6	Numerická simulácia – Elementárna bunka	55
4.5.7	Numerická simulácia – Elementárna bunka – analýza vzperu	55
4.5.8	Numerické simulácie pre štúdium dopadu geometrických imperfekcií	56
4.5.9	Numerická simulácia – Mechanickej skúšky	57
4.6	Testované predikcie	59
5	VÝSLEDKY	60
5.1	Porovnanie analytického prístupu a numerickej simulácie	60
5.1.1	Porovnanie síl analytického prístupu a numerickej simulácie	60
5.1.2	Numerická simulácia – Elementárna bunka – Analýza vzperu	62
5.2	Numerická simulácia – Rozmerová analýza štruktúry	63
5.3	Numerická simulácia - Zjednodušenie modelu geometrie	64
5.3.1	Zníženie výpočtovej náročnosti	64
5.3.2	Konečno prvková sieť Solid geometrického modelu	65
5.3.3	Problematika priameho kontaktu dvoch typov geometrie	66
5.3.4	Analýza citlivosti modelu geometrie B-S-S-modifikovaný	68
5.3.5	Výsledky napäťovo deformačnej analýzy geometrických modelov	69
5.3.6	Tvar deformácie prostrednej elementárnej bunky	73
5.4	Experiment reálnej geometrie	73
5.4.1	Výsledky priemeru prútov	73
5.4.2	Výsledky rozmeru uzlov	75
5.5	Experiment mechanickej skúšky	77
5.5.1	Hmotnosť vytvorených a otestovaných vzoriek	77
5.5.2	Dosiahnuté podmienky pri experimente	78
5.5.3	Získané veličiny z priebehu merania	78
5.6	Porovnanie MKP a experimentu mechanickej skúšky	78
5.6.1	Porovnanie výsledkov absorbovanej energie s experimentom	79
5.6.2	Porovnanie numerických prístupov	81
5.6.3	Porovnanie absorbovanej energie štruktúrami	83
5.7	Numerické simulácie pre štúdium dopadu geometrických imperfekcií – Elementárna bunka	84
5.7.1	Kvalita konečno prvkovej siete	84
5.7.2	Princíp vyhodnocovania výsledkov	85
5.7.3	Výsledky priebehu sily	86

5.8	Numerické simulácie pre štúdium dopadu geometrických imperfekcií – Mikro-prútová štruktúra	88
5.8.1	Kvalita konečno prvkovej siete	88
5.8.2	Silová analýza	89
5.8.3	Deformačná analýza elementárnej bunky	89
6	DISKUSIA	91
6.1	Interpretácia výsledkov	91
6.1.1	Numerická simulácia – Rozmerová analýza štruktúry	91
6.1.2	Experiment reálnej geometrie:	91
6.1.3	Experiment mechanickej skúšky – porovnanie výsledkov s experimentom	93
6.1.4	Simulácie dopadu imperfekcií –Elementárna bunka	94
6.1.5	Simulácie dopadu imperfekcií – Mikro-prútová štruktúra	95
6.2	Verifikácia hypotéz	96
6.2.1	Výskumná otázka č. 1:	96
6.2.2	Výskumná otázka č. 2:	96
7	ZÁVER	97
8	VÝSEDK VÝSKUMU PODĽA RIV	99
9	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	100
10	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	103
11	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	104
12	ZOZNAM TABULIEK	108
13	ZOZNAM PRÍLOH	109

1 ÚVOD

Aditívna technológia Selective Laser Melting (SLM) otvára nové oblasti využitia komplexnej geometrie u kovových dielov, ktorých výroba by s dostupnými konvenčnými procesmi nebola možná. Jedným z príkladov zvýšenej flexibility sú aj mikro-prútové štruktúry s geometriou vzoru kryštalickej mriežky. Komponenty využívajúce mikro-prútové štruktúry dosahujú výborné charakteristiky v oblasti absorpcie energie, tepelnej vodivosti ale aj pevnosti. Preto ich aplikácie môžeme vidieť vo viacerých oblastiach, ako je napríklad vesmírny, letecký, automobilový priemysel a energetika. Ďalšou oblasťou je tiež medicína, kde implantáty obsahujúce mikro-prútové štruktúry môžu byť upravené potrebám pacienta v oblasti tvaru alebo vlastností.

V strojárstve, ale aj v iných oblastiach, kde dochádza k návrhu dielov alebo súčastí strojov je nutné predpovedať ich chovanie a vlastnosti. Táto skutočnosť môže predstavovať problém, nakoľko pri mikro-prútových štruktúrach dochádza k imperfekciám. Ide o imperfekcie spojené priamo s aditívnou výrobou, ktoré spôsobujú odchýlku v hmotnosti alebo v rozmeroch tvorených dielov. Ďalšou oblasťou problematiky je odchýlka od numerických simulácií založená na princípe metódy konečných prvkov (MKP). Aktuálny výskum dosiahol pokrok v oblasti tvorby materiálového modelu pre mikro-prútové štruktúry. V uplynulých rokoch bola pozornosť venovaná taktiež úprave geometrie, čo umožnilo implementovať geometrické imperfekcie do modelu geometrie pre numerické simulácie. Súčasný stav poznania ale nedisponuje poznatkami o dopade geometrických imperfekcií na vlastnosti štruktúr, čo komplikuje návrhu komponentov s mikro-prútovými štruktúrami.

Diplomová práca si dáva za cieľ študovať dopad geometrických imperfekcií, konkrétne zmenu veľkosti priemeru prúta a zmenu tvaru prierezu prúta na ich mechanické vlastnosti. Súčasťou práce je aj vytvorenie zjednodušeného modelu, ktorý umožní študovať dopad geometrických imperfekcií v rozsahu celej štruktúry. Vykonanie experimentu mechanickej skúšky a experimentu reálnej geometrie štruktúry (optická digitalizácia) prispeje k zhode výsledkov medzi experimentom a numerickou simuláciou.

Nadobudnuté znalosti o dopade geometrických imperfekcií vyskytujúcich sa v mikro-prútových štruktúrach umožnia zjednodušenie procesov pri návrhu, ako aj zníženie finančnej a časovej náročnosti. Konkrétne hovoríme o stanovení hraníc rozmeru prúta, kedy je nutné využiť eliptickú / kružnicovú aproximáciu, ale aj o stanovení oblastí kedy je možné využiť nominálne hodnoty, nakoľko geometrické imperfekcie nemajú významný dopad na vlastnosti štruktúr. Zníženie finančnej a časovej náročnosti pri vývoji komponentov obsahujúcich mikro-prútové štruktúry je do budúcnosti veľkou výhodou. Pri zvýšení množstva aplikácií mikro-prútových štruktúr a ich implementácii do bežného života to bude dokonca nutnosťou.

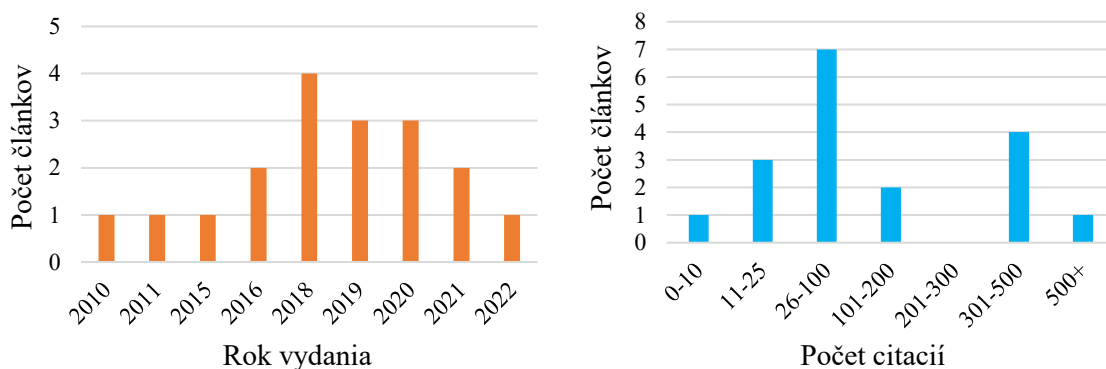
2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Nasledujúca kapitola popisuje proces vyhľadávania, získania a triedenia zdrojov, ktoré boli následne využité pri tvorbe kritickej rešerše. V počiatku bolo nutné identifikovať relevantné zdroje, ktoré boli prepojené so skúmanou problematikou. Nasledovalo spresnenie zamerania diplomovej práce, ktoré vychádzalo zo zistených medzier v poznaní.

2.1 Rešeršné metódy

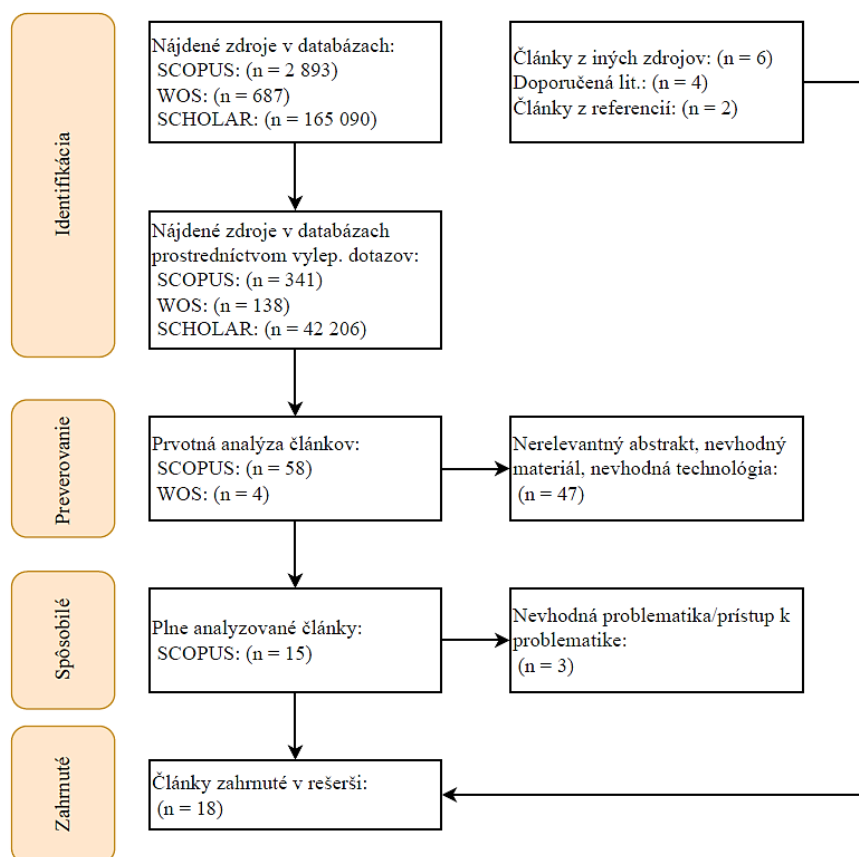
Vyhľadávanie zdrojov prebehlo prostredníctvom kľúčových slov, ktoré reflektovali obsah stanovených výskumných otázok. Počas vyhľadávania pri niektorých otázkach bolo využité filtrovanie prostredníctvom obdobia, nakoľko ide o dynamicky sa vyvíjajúcu oblasť a niektoré staršie články by neboli relevantné. Taktiež bola snaha zamerať sa pri niektorých otázkach priamo na materiál 316L (nerezová oceľ), nakoľko bude využitá pri riešení diplomovej práce. Niektoré oblasti boli zamerané skôr všeobecne, preto boli využité aj články s materiálmi Ti6Al4V a AlSi10Mg (zliatina titánu a hliníka).

Vyhľadávanie prebiehalo v troch databázach (SCOPUS, WOS A SCHOLAR), pričom následne boli články vybrané z databázy SCOPUS. Okrem vyhľadanej literatúry bola používaná aj doporučená literatúra a literatúra ktorá pochádzala z referencií niektorých článkov. Súčasťou preverovania bolo aj posudzovanie článkov na základe scientometrických údajov, pričom výsledky vybraných článkov zobrazuje Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Rozdelenie článkov na základe scientometrických údajov.

Po vyfiltrovaní všetkých článkov a plnej analýze (prečítanie článkov) bol výsledný počet 15. Po prečítaní taktiež došlo k zisteniu, že sa medzi nimi nachádzajú 3 články, ktoré nemajú prínos pre diplomovú prácu (z dôvodu akým spôsobom riešia problematiku). Tieto 3 články boli vypustené a nahradené 6 článkami, ktoré boli získané v minulosti ako doporučená literatúra a články z referencií. Vo finálnej verzii sa nachádzalo 18 článkov, ktoré prispievali k diplomovej práci (viď Obr. 2-2).



Obr. 2-2 PRISMA diagram.

2.2 Kritická rešerš

2.2.1 Mikro-prútové štruktúry tvorené technológiou SLM

Mikro-prútové štruktúry sú rozmerovo malé štruktúry s priemerom prúta pohybujúcim sa rádovo v stovkách mikrometrov, ktoré využívajú rozloženie materiálu do tvaru základných buniek typu triple periodic¹. Dôvodom využívania mikro-prútvých štruktúr sú ich mechanické vlastnosti vzťahnuté na jednotku hmotnosti. Z dôvodu nemožnosti vytvorenia mikro-prútvých štruktúr konvenčnými spôsobmi obrábania, vďaka svojmu rozmachu vývoju aditívnych technológií ako je napríklad SLM (Selective Laser Melting).

Mikro-prútové štruktúry sú štruktúry ktoré sa skladajú s prútv stretávajúcich sa v uzloch. Na základe počtu prútv a uzlov v štruktúre je možné predpovedať prevládajúce deformačné chovanie [1]. Mikro-prútové štruktúry posudzujeme prostredníctvom Maxwellovho čísla M , a vzorec na jeho stanovenie popisuje rovnica (1) a (2):

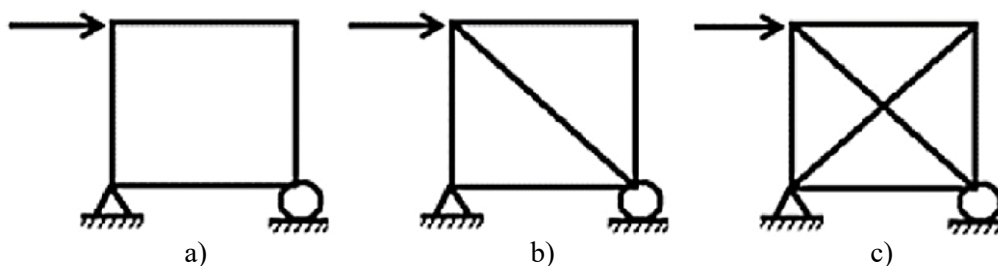
$$M_{2D} = s - 2n + 3 \quad (1)$$

$$M_{3D} = s - 3n + 6 \quad (2)$$

¹ povrchy s minimálnou veľkosťou, ktoré majú kryštalickú štruktúru opakujúcu sa v troch rozmeroch priestoru

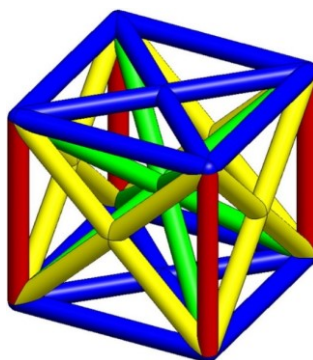
kde, M_{2D} / M_{3D} – je Maxwellovo číslo pre dvojrozmerný / trojrozmerný prestor [-], s – počet prútov v sústave [-] a n počet uzlov v sústave [-]. Maxwellovo číslo M môže dosahovať 3 typy hodnôt:

- $M < 0$: Nedostatočne tuhá štruktúra – nastáva pri nedostatočnom počte prútov. sústava pôsobí ako mechanizmus, jedná sa o nedostatočne tuhú sústavu s dominantným ohybom, vysokou poddajnosťou a relatívne nízkou pevnosťou – viditeľné na Obr. 2-3 a)
- $M > 0$: Príliš tuhá štruktúra – nastáva pri počte prútov väčšom ako je potrebný pre dosiahnutie statickej rovnováhy. Jedná sa o príliš tuhú štruktúru s vysokou pevnosťou, ktorej správanie sa prejavuje natiahnutím – viditeľné na Obr. 2-3 b)
- $M = 0$: Dostatočne tuhá štruktúra – nastáva pri presnom počte prútov potrebných pre dosiahnutie statickej rovnováhy. Štruktúra dosahuje pri vysokej efektívite relatívne dobrú tuhosť a pevnosť, správanie štruktúry sa prejavuje prevažne natiahnutím – viditeľné na Obr. 2-3 c)



Obr. 2-3 Typy prútových sústav a) Nedostatočne tuhá, b) Príliš tuhá a c) Dostatočne tuhá [1].

Vo všeobecnosti dosahujeme v mikro-prútových štruktúrach rozloženie prútov ktoré je možné vidieť na Obr. 2-4 [1]. Pri tvorbe rôznych typov buniek (BCC, BCCZ, FCC, FCCZ a Cubic) sú prúty v elementárnej bunke situované pod uhlami 0° ; $35,26^\circ$; 45° a 90° . Čo sa týka priemeru prútov v mikro-prútových štruktúrach, Van Beal et al. [2] dosiahol prúty s priemerom 0,1 mm z materiálu Ti6Al4V. Pri tvorbe mikro-prútových štruktúr sa vyskytujú imperfekcie – chyby, ktoré spôsobujú odlišnosti medzi reálnou - vytvorenou geometriou a navrhnutou geometriou. Týmito imperfekciami sa zaoberajú nasledujúce kapitoly.



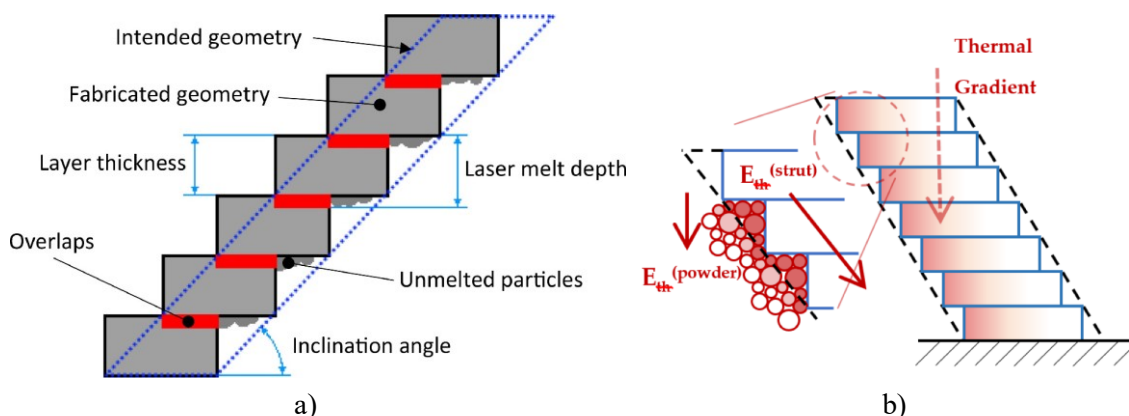
Obr. 2-4 Rozloženie prútov v mikro-prútových štruktúrach: modré 0° , zelené $35,26^\circ$, žlté 45° a červené 90° [1].

2.2.2 Imperfekcie spôsobené technológiou SLM

Nakoľko technológia SLM je aditívny typ technológie, prináša so sebou výhody aj nevýhody. Najväčšou výhodou je, že môžeme vyrobiť tvary, ktoré by nebolo možné vytvoriť konvenčnými technológiami. Nevýhody sú spôsobené samotným princípom, tzn. tvorbou súčastí po vrstvách, orientáciou súčastí v zástavovom priestore a iné, ktoré budú riešené postupne.

Staircase effect

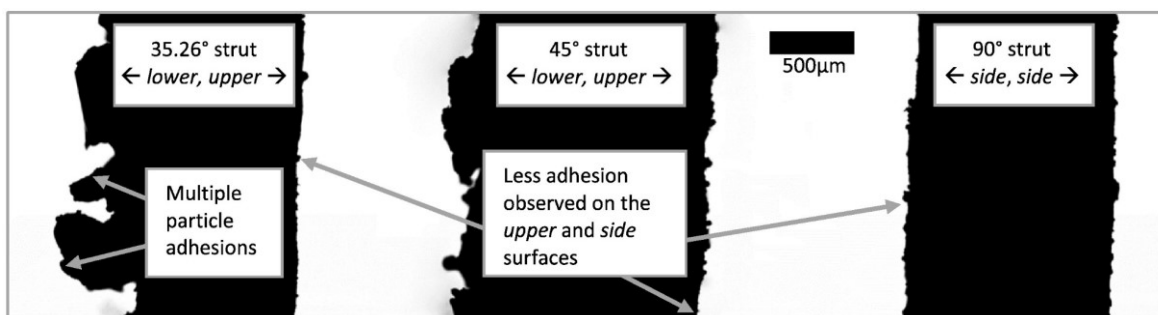
Schodiskový efekt (z anglického: Staircase effect) ktorý je vyobrazený na Obr. 2-5 a) je jav vyskytujúci sa pri technológiách aditívnej výroby, nakoľko komponenty sú vyrábané vo vrstvách [3]. Tento jav je výraznejší na plochách (častiach súčastí), ktoré sú tvorené pod menším uhlom sklonu. Práve mikro-prútové štruktúry dosahujú nízkych hodnôt uhlu sklonu, pričom u mikro-prútvových štruktúr typu BCC hovoríme o uhle $34,26^\circ$. Výskyt tohto javu taktiež spôsobuje odchýlku medzi navrhnutou a vytvorenou geometriou, a preto je následne nutné výrobný proces doplniť o kroky následného spracovania.



Obr. 2-5 Javy spojené s technológiou SLM a) Staircase effect a b) Odvod tepla [3, 4].

Prichytenie nenatavených častíc na povrch štruktúry

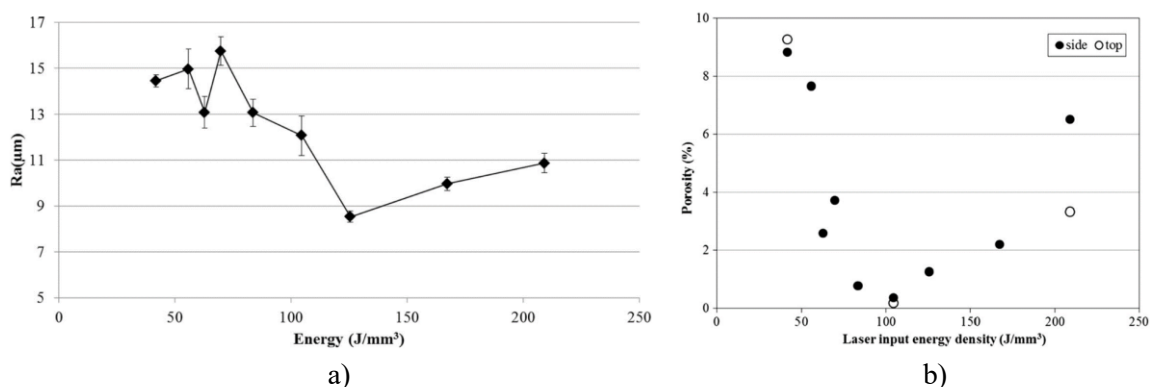
Okrem odchýlok v rozmeroch od požadovanej geometrie je schodiskový efekt spojený aj s prichytením nenatavených častíc základového materiálu na tvorenú súčasť [3]. Tento jav je spôsobený nedostatočným odvodom tepla z oblastí súčastí, ktoré sú obklopené základovým materiálom (spodná časť prútov vid' Obr. 2-5 b)) [3]. Leary et al. vo svojom článku popísal, že s klesajúcou hodnotou uhla od podložky a rastúcou výškou vrstvy, boli dopady tohto javu výraznejšie (Obr. 2-6) [1]. Popísaný jav má negatívny dopad pri zaťažovaní mikro-prútovej štruktúry, nakoľko reálny nosný prierez prútu je menší ako prierez prútu stanovený na základe vonkajšej obalovej plochy.



Obr. 2-6 Prichytenie nenatavených častíc na povrchu prútov tvorených pod uhlom 35,26°, 45° a 90° [1].

Nastavenie procesných parametrov

Drsnosť povrchu nie je závislá len od uhlu sklonu. Ako popísal Cherry [5] vo svojej štúdií, z pohľadu procesných parametrov má vplyv na drsnosť povrchu aj vstupná energia lasera, expozičný čas a veľkosť ohniskového bodu. Štúdiá prebiehala na materiáli nerezovej ocele - 316L. Z grafu na Obr. 2-7 a) je možné vidieť, že najmenšia drsnosť bola nameraná pri vstupnej energii 125,4 J/mm³, zatiaľ čo najväčšej drsnosti bolo dosiahnuté pri vstupnej energii 69,6 J/mm³. Je nutné spomenúť, že najmenšia drsnosť bola dosiahnutá pri expozičnom čase 75 µs a veľkosti ohniskového bodu 25 µm, respektíve 125 µs a 75 µm pri najväčšej drsnosti.



Obr. 2-7 Grafy závislosti vlastností a procesn. parametrov a) Drsnosť – Energia a b) Pórovitosť – Energia [5].

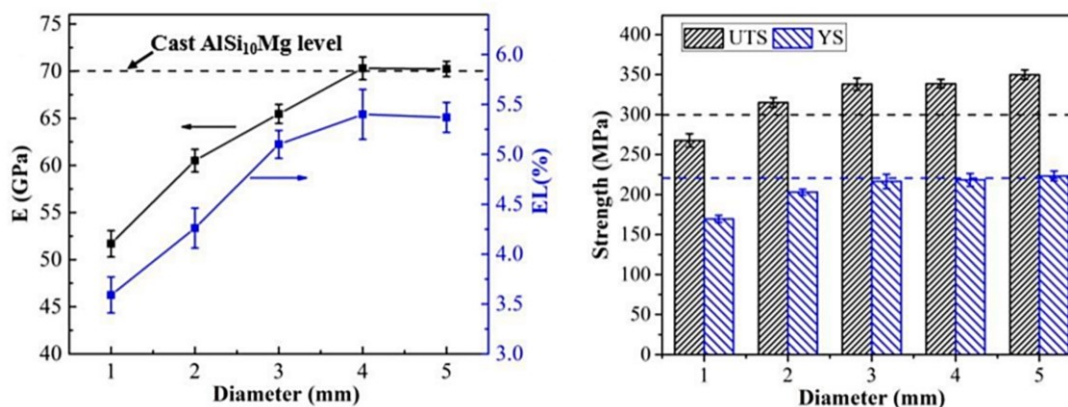
Cherry taktiež v článku popisuje spojitosť medzi vstupnou energiou lasera a pórovitosťou vzniknutého komponentu [5]. Závislosť pórovitosti od vstupnej energie lasera zobrazuje Obr. 2-7 b). Autor spomína, že ideálne podmienky boli dosiahnuté pri vstupnej energii lasera o hodnote 104,5 J/mm³, pričom bola dosiahnutá pórovitosť na úrovni 0,38 %. Pri nižšej hodnote vstupnej energie lasera (41,8 J/mm³) boli trajektórie lasera nespojité a obsahovali medzi sebou medzery.

Orientácia a veľkosť vyrábaných komponentov

V dvoch štúdiách pochádzajúcich od Donga sa autor zaoberal dopadom orientácie a veľkosti vzorky na mechanické vlastnosti. Konkrétne boli štúdie vykonané na materiáli AlSi10Mg. V prvej štúdií [6] bolo vytvorených 5 vzoriek o priemere 1, 2, 3, 4 a 5 mm. Nakoľko boli vzorky tvorené súhlasne so smerom tvorby (smer kolmý na platformu), niesli najmä

imperfekcie pórovitosti a zmeny priemeru vytvorenej súčasti od navrhnujetej geometrie. Tieto dáta boli získané vďaka skenovaniu prostredníctvom röntgenovej mikrotomografie. Bolo zistené, že so znižujúcim sa priemerom dochádza k nárastu pórovitosti, i keď pri tvorbe vzoriek boli použité rovnaké procesné parametre. Konkrétne hovoríme o hodnotách pórovitosti 1,87 % pri priemere 1 mm, 0,57 % a 0,10 % pri hodnotách priemeru 3 mm, respektíve 5 mm.

Zmena priemeru od navrhnujetej geometrie taktiež nebola u všetkých vzoriek rovnaká [6]. V prípade veľkosti navrhnutého priemeru 1 mm sa pohybujeme v rozmedzí odchýlky od -4 % do -1 %. U priemeru vzorky 5 mm boli dosiahnuté hodnoty odchýlky 3 % až 4,3 %. Článok priamo poukazuje na skutočnosť ovplyvnenia mechanických vlastností, konkrétne u Youngovho modulu, ako môžeme vidieť na Obr. 2-8. Zatiaľ čo pri 1 mm priemere hovoríme o 51,7 GPa, so zväčšujúcim sa priemerom sa postupne dostávame na hodnotu 70,4 GPa pri 5 mm priemere. Okrem Youngovho modulu boli ovplyvnené aj hodnoty medze pevnosti a medze sklzu. **Celkovo bolo dosiahnutého rozdielu v mechanických vlastnostiach medzi 1 a 5 mm priemerom približne 30 %.**



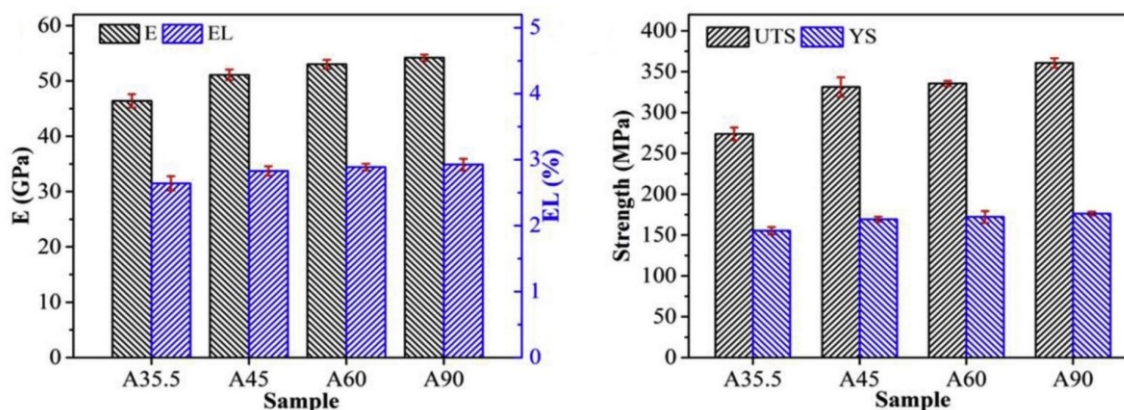
Obr. 2-8 Grafy zobrazujúce vplyv na mechanické vlastnosti pri rôznych prieroch prúta [6].

Dong sa v druhej štúdií zameril na uhol sklonu od podložky pri tvorbe komponentov [7]. Použil rovnaký materiál ako v predchádzajúcej štúdií (AlSi10Mg) a priemer testovacích vzoriek bol 1 mm. V tomto prípade boli vzorky pre ťahovú skúšku tvorené pod štyrmi rôznymi uhlami. Išlo o uhly vyskytujúce sa v mikro-prúťových štruktúrach založených na princípe kryštalickej mriežky, s konkrétnymi hodnotami: 35,5°; 45°; 60° a 90°.

Autor sa zaoberal nielen vzorkami ako jedným celkom ale aj časťami jednotlivých vzoriek [7]. Konkrétne hovoríme o vrhnej a spodnej strane vzoriek (voči smeru tvorby). Dong zistil, že vrchná a spodná časť sa líši v štruktúre, chemickom zložení materiálu alebo napríklad i v pórovitosti. Konkrétne pri vzorke tvorenej pod uhlom 35,5° hovoríme o pórovitosti 0,14 % vo vrhnej časti prúta a 3,75 % v spodnej časti prúta. Pri vzorke tvorenej kolmo od podložky bolo dosiahnutých hodnôt 0,1 % a 0,11 % medzi dvoma stranami prúta, tzn. že s rastúcim uhlom dosiahol autor čoraz menšej odchýlky v pórovitosti.

Zmena od nominálneho rozmeru prúta bola taktiež závislá od uhla vzorky. V prípade vzoriek so sklonom $35,5^\circ$ bola dosiahnutá odchýlka v rozmedzí od -4% do 5% [7]. Pri vzorkách s uhlom sklonu 90° boli dosiahnuté hodnoty odchýlky $-2,7\%$ až $-0,4\%$ [7].

Vyššie popísané odchýlky v jednotlivých vzorkách mali dopad na mechanické vlastnosti. **Vo všeobecnosti je z výsledkov možné pozorovať nárast mechanických vlastností o viac ako 12 %.** V prípade Youngovho modulu sa pohybujeme na hodnotách 46,4 GPa a 54,2 GPa pri uhloch $35,5^\circ$ a 90° . V prípade medze pevnosti bolo dosiahnutých hodnôt 278,4 MPa pri sklone $35,5^\circ$, respektíve 360,7 MPa pri sklone 90° . Spomenuté závislosti je možné pozorovať na Obr. 2-9.



Obr. 2-9 Grafy zobrazujúce vplyv na mechanické vlastnosti pri rôznych uhloch tvorby vzoriek [7].

Červinek vo svojej štúdií vykonal podobný experiment na materiály nerezovej ocele 316L [8]. Porovnal mechanické vlastnosti rovnakého materiálu s rovnakými procesnými parametrami na dvoch rôznych typoch vzoriek. Prvá séria vzoriek bola vytvorená z predváľkov vytvorených pod 90° uhlom vzhľadom na platformu a opracovaných podľa DIN 50125 (Forma B, s rozmermi $\varnothing 6 \times 30$ mm). Druhá séria vzoriek sa snažila čo najviac priblížiť ku podmienkam vyskytujúcim sa v mikro-prúťových štruktúrach typu BCC. Jednalo sa o mnoho prúťové testovacie vzorky s priemerom 0,6 mm. Mnoho prúťové testovacie vzorky boli vytvorené pod uhlom sklonu 35° vzhľadom od platformy. Výsledné mechanické vlastnosti sú zapísané v Tab. 2-1, pričom bolo dosiahnutého poklesu o 43 % v prípade Youngovho modulu pružnosti medzi mnohoprúťovými a konvenčnými vzorkami. V prípade medze sklzu hovoríme o hodnotách 338 MPa a 450 MPa pri mnohoprúťových a konvenčných vzorkách, čo predstavuje rozdiel o 25 %.

Tab. 2-1 Tabuľka mechanických vlastností dvoch typov vzoriek [8].

	E [GPa]	R _{p0,2%} [MPa]	E _t [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
Mnohoprúťové vzorky	94 ± 10	338 ± 20	787	397	5,3
Konvenčné vzorky	166 ± 15	450 ± 5	89	541	40,7

2.2.3 Geometrické imperfekcie

Ako bolo už spomenuté v predchádzajúcej kapitole, rôzne parazitné javy vyskytujúce sa pri využití technológie SLM spôsobujú imperfekcie. Prítomnosť imperfekcií má následne dopad na vlastnosti vytvorených komponentov. V oblasti fyzikálnych vlastností hovoríme o rozmeroch, hmotnosti a hustote, zatiaľ čo v oblasti mechanických vlastností majú mať imperfekcie dopad napríklad na Youngov modul pružnosti alebo medze sklzu.

V prípade mikro-prútvých štruktúr hovoríme o rozsiahlom zastúpení geometrických imperfekcií. **Geometrické imperfekcie spôsobujú zmenu, respektíve odchýlku geometrie vzniknutého komponentu od navrhovaného predpokladu.** V prípade mikro-prútvých štruktúr je nevedomosť základných poznatkov o vytvorenej súčasti umocnená o skutočnosť, že mikro-prútvé štruktúry sú tenkostenné súčasti a dochádza k významnému ovplyvneniu vlastností. Vo všeobecnosti sa v mikro-prútvých štruktúrach stretávame s nasledujúcimi geometrickými imperfekciami:

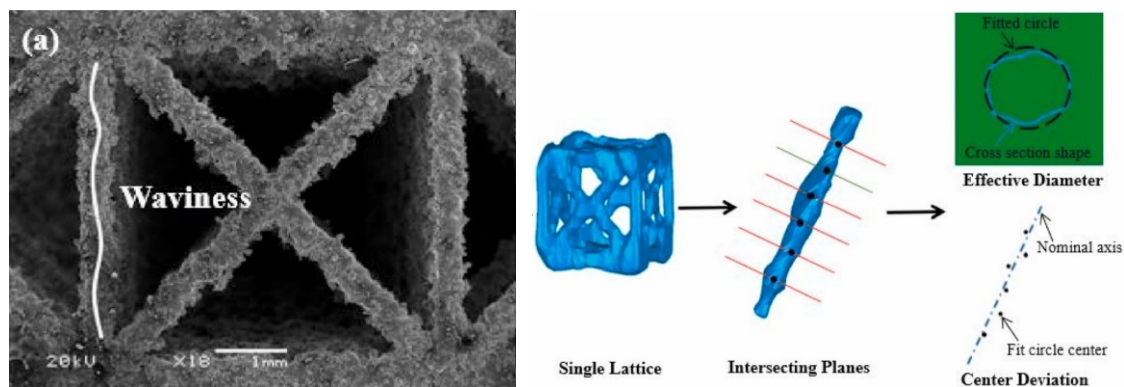
- Vyosenie prierezu od osy prúta [9, 10]
- Zmena priemeru prúta [6–9, 11]
- Zmena tvaru prierezu prúta [7, 8, 11]
- Vysoká drsnosť povrchu [1, 3, 5]
- Nespojitosť prútov s uzlami [4, 12]

Liu popísal 3 typy geometrických imperfekcií ktoré majú zásadný dopad na výsledné mechanické vlastnosti vytvorených mikro-prútvých štruktúr [4]: 1. Vyosenie prierezu od osy prúta; 2. Odchýlka priemeru prúta – čo spôsobuje nepravidelnosť v ploche prierezu prúta; 3. Zväčšenie alebo zmenšenie veľkosti prierezu prútov v závislosti od smeru tvorby mikro-prútovej štruktúry.

Vyosenie prierezu od osy prúta

Hovoríme o geometrickej imperfekcii, kedy je možné pozorovať vyosenie stredu prierezu prúta (časti prierezu prúta) od osy prúta (viď Obr. 2-10.). Na prútoch je tento jav možné pozorovať, nakoľko spôsobuje vlnitý povrch prúta. Tento jav je výraznejší u dlhších prútov s menším priemerom prúta [4]

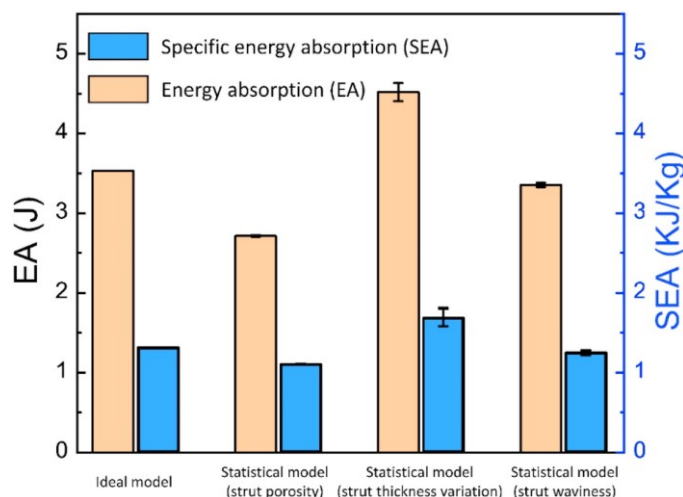
Li sa vo svojom článku zaoberal výskytom popísaného javu a aj jeho dopadom na štruktúru pri zaťažovaní [9]. Svoje pozorovanie uskutočnil na štruktúre s typom kryštalickej mriežky FCC (Face-centered – kubická plošne stredená), čo umožnilo tento jav skúmať pri prútoch pod 0°, 45° a 90° uhlom. Na obrázku nižšie je zobrazený princíp vyhodnotenia vyosenia prútov. Z vytvorenej mikro-prútovej štruktúry bola získaná reálna geometria prostredníctvom röntgenovej mikrotomografie. Následne bol prút rozdelený do niekoľkých častí na ktorých bol skúmaný prierez prúta. Prierez prúta bol preložený kružnicou a následne bolo určené vyosenie stredu kružnice od osi prúta, postup je znázornený na Obr. 2-10.



Obr. 2-10 Vyosenie prierezu od osy prúta a princíp vyhodnocovania [9].

Z výsledkov je možné pozorovať, že vyosenie bolo najväčšie u horizontálnych prútoch so smerodajnou odchýlkou 0,105, zatiaľ čo pri diagonálnych a vertikálnych prútoch boli dosiahnuté hodnoty 0,094, respektíve 0,053 [9]. Z následných vykonaných skúšok absorpcie energie bolo zistené, že vyosenie na vertikálnych prútoch zvyšuje schopnosť absorpcie energie, zatiaľ čo pri diagonálnych prútoch dochádza k zníženiu schopnosti absorpcie energie.

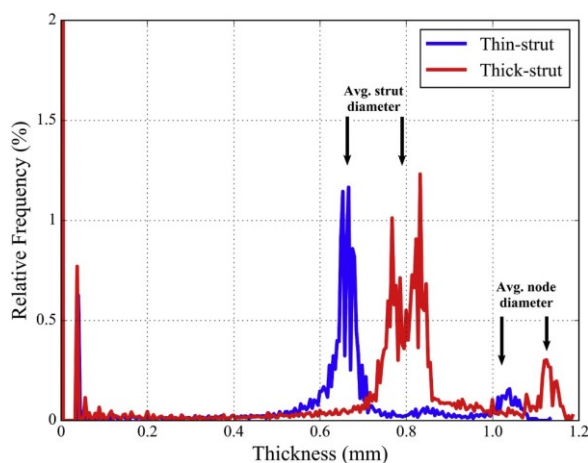
Podobné výsledky dosiahol aj Cao [10], vo svojej štúdií vykonanej na mikro-prútoch štruktúrach typu FBCCXYZ (kryštalická mriežka ktorá obsahuje prúty pod uhlami 0° , 35° , 45° a 90°). Štúdia sa zaoberala vplyvom pórovitosti, vyosenia prierezu a zmenou priemeru prútu. Bolo zistené, že pórovitosť nie je závislá od smeru tvorby štruktúry, tzn. pórovitosť pri prútoch v rôznych uhloch dosahovala rovnakých hodnôt. Taktiež bolo preukázané, že s rastúcim uhlom sklonu prútoch sa smerodajná odchýlka vyosenia prierezu a zmena priemeru prúta znižuje. Je možné poznamenať, že horizontálne tvorené prúty obsahujú viac geometrických imperfekcií ako prúty diagonálne a vertikálne [9, 10]. **Výsledky z práce Cao taktiež preukázali, že imperfekcia zmeny priemeru prútu má väčší dopad na výsledky absorpcie energie ako vyosenie priemeru a pórovitosť** [10] Túto skutočnosť potvrdzuje graf na Obr. 2-11, kde sú porovnané výsledky absorpcie energie (EA) a mernej absorpcie energie (SEA) z rôznych výpočtových modelov. Konkrétne medzi ideálnym modelom – bez imperfekcií, model s pórovitosťou, model so zmenou priemeru prúta a model s vyosením prierezu.



Obr. 2-11 Graf výsledkov absorpcie energie a mernej absorpcie energie z rôznych výpočtových modelov [10].

Zmena veľkosti priemeru a tvaru prierezu prúta

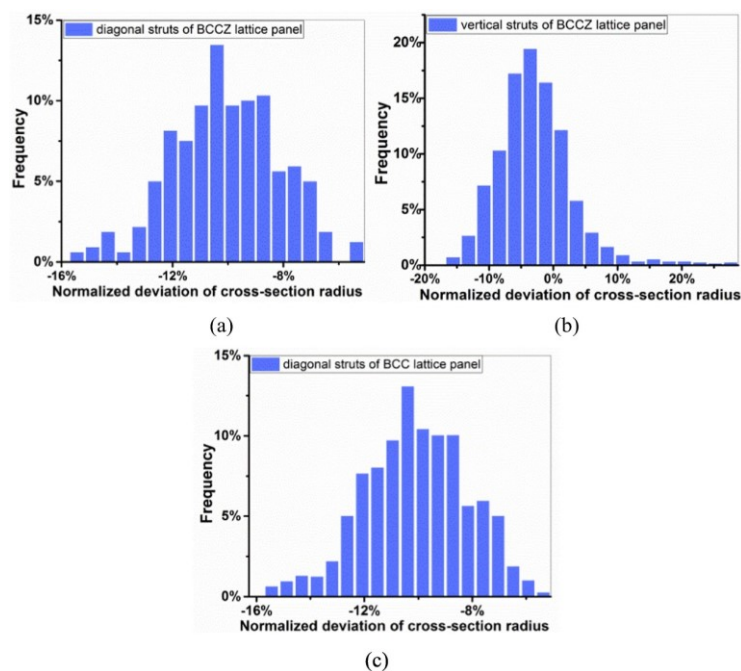
Ako bolo už popísané vyššie zmena veľkosti priemeru a tvaru prierezu prúta sa považuje za imperfekcie s najväčším dopadom na vlastnosti štruktúry. Amani sa v článku zaoberal dvoma mikro-prúťovými štruktúrami typu FCC [13], ktoré sa od seba líšili iba vo veľkosti priemeru prúťov. Po vytvorení štruktúr bola získaná reálna geometria prostredníctvom röntgenovej mikrotomografie a výsledky môžeme vidieť na Obr. 2-12. Okrem dosiahnutých priemerných hodnôt prúťov 0,66 mm a 0,79 mm, je možné z grafu pozorovať priemerné hodnoty uzlov v štruktúre – 1,02 mm a 1,13 mm. Z grafu je taktiež možné vidieť relatívne početné zastúpenie pri jednotlivých hodnotách priemeru, ako i nejednoznačnosť rozptylu nameraných hodnôt pri rôznom priemere prúta.



Obr. 2-12 Rozloženie veľkostí priemeru prúta a uzlov [13].

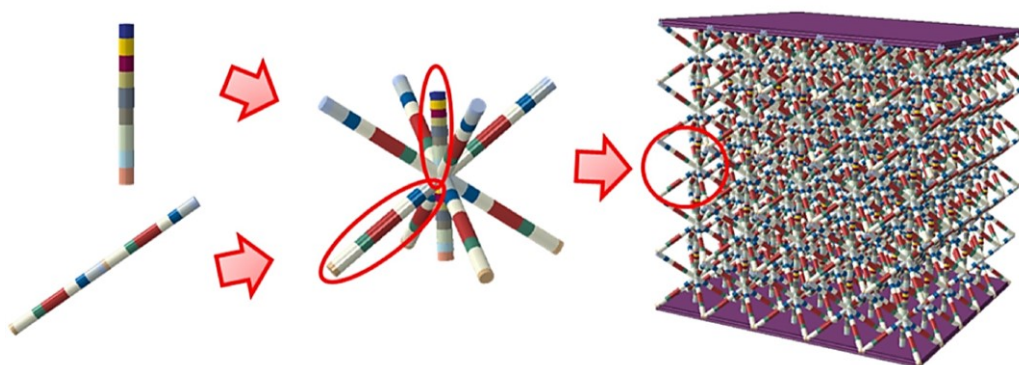
Podobné výsledky dosiahol i Lei [14], ktorý vytvoril sériu mikro-prúťových štruktúr typu BCC a BCCZ. Z každého typu boli vytvorené štruktúry s 1, 3, 5 a 7 vrstvami. Navrhnutý nominálny priemer všetkých prúťov bol 0,5 mm. Na Obr. 2-13 môžeme vidieť dosiahnuté rozmery diagonálnych a vertikálnych prúťov. V prípade diagonálnych prúťov bolo dosiahnutej priemernej hodnoty 0,449 mm a rozptylu 0,014 mm v prípade štruktúry typu BCC. U štruktúry BCCZ sa priemerná hodnota pohybovala na úrovni 0,448 mm s rozptylom

0,012 mm. Taktiež je nutné poznamenať, že 75 % odchýlok bolo v rozsahu -12,5 % a -7,5 % pre oba prípady. Pri vertikálnom prúte bola priemerná hodnota 0,483 mm s rozptylom 0,38 mm. Až 88 % hodnôt odchýlok sa nachádzalo v intervale -10,5 % a 0,5 %. Z výsledkov je možné pozorovať, že zmena rozmeru priemeru prúta je závislá na smere tvorby štruktúry.



Obr. 2-13 Rozptyl hodnôt priemeru prúta pri štruktúrach BCC a BCCZ a) Diagonálny prút BCCZ štruktúry b) Vertikálny prút BCCZ štruktúry a c) Vertikálny prút BCC štruktúry [14].

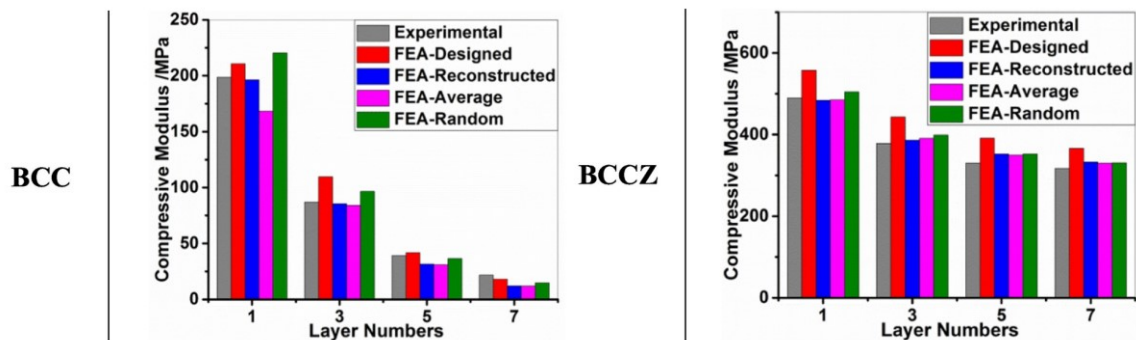
Lei získané poznatky o geometrii následne využil pri tvorbe modelu geometrie pre numerické simulácie ktoré prebehli v programe ABAQUS [14]. Z Obr. 2-14 môžeme vidieť, že prúty boli rozdelené do častí a následne im bola priradená rôzna hodnota priemeru. Následne boli porovnávané tri modely: 1. Designed – využíval ideálne navrhnuté priemery geometrie, 2. Average – využíval priemerné hodnoty zo získanej geometrie a 3. Random – využíval hodnoty získané Gaussovou funkciou.



Obr. 2-14 Geometria pre numerické simulácie obohatená o poznatky zmeny priemeru prúta [14].

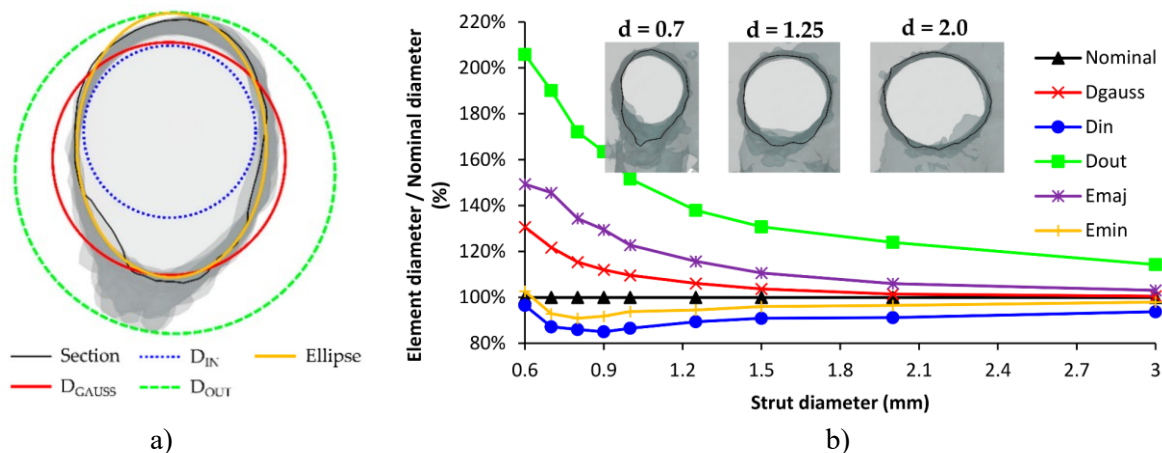
Obr. 2-15 zobrazuje výsledky z numerického prístupu a porovnáva ich s experimentom. Autor vyčíslil aj porovnanie medzi experimentom a Reconstructed numerickým modelom a taktiež porovnanie experimentu a Random numerického modelu. V prípade prvého

porovnania boli dosiahnuté odchýlky -1,11 % a -1,59 % v prípade jeden a trojvrstvovej štruktúry typu BCC, respektíve hodnoty -1,26 % a 2,14 % pri type BCCZ. Pri piatich a siedmych vrstvách bola odchýlka väčšia, na úrovni -19,6 % a -44,49 % pri BCC štruktúre, zatiaľ čo pri štruktúre typu BCCZ bolo dosiahnutých hodnôt 6,74 % a 4,83 %. Pri porovnaní s Random modelom bolo pri štruktúre typu BCC dosiahnutých odchýlok 10,98 %; 10,78 %; -6,99 % a -32,34 % pri počte vrstiev 1 až 7. Pri štruktúre typu BCCZ bolo dosiahnutých hodnôt 2,99 %; 5,51 %; 6,81 % a 4,39 % pri počte vrstiev 1 až 7.



Obr. 2-15 Grafy s výsledkami modulu tlaku z numerických simulácií a experimentu [14].

K zaujímavým výsledkom prišiel aj Vrána vo svojej štúdiu [15], kde sa zaoberal zmenou rozmeru prierezu, respektíve zmenou tvaru prierezu. Vzorky BCC štruktúry zdigitalizoval pomocou röntgenovej mikrotomografie a následne sa zaoberal tvarom prierezu prúta. Na Obr. 2-16 a) môžeme vidieť, že bolo zvolených niekoľko prístupov: D_{GAUSS} – Preloženie prúta Gaussovým valcom, D_{IN} a D_{OUT} – Opísaný a vpísaný valec a Ellipse – Preloženie prierezu elipsou. Následne boli získané hodnoty vložené do grafu na Obr. 2-16 b) pre vytvorené prierezy, pričom boli porovnané s nominálnym rozmerom.

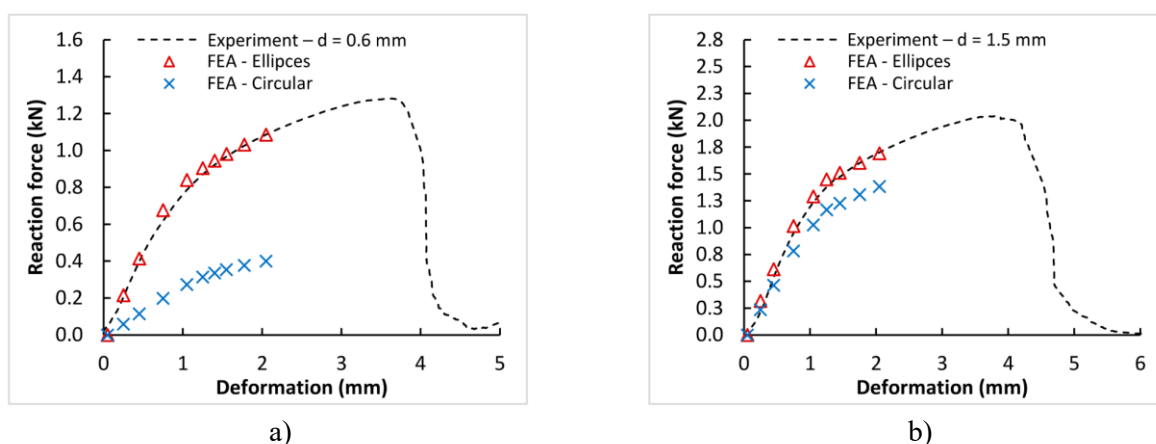


Obr. 2-16 Obrázok poukazujúci na zmenu tvaru prierezu a) Vyhodnocovacie kritéria a b) Graf výsledkov pri jednotlivých rozmeroch [15].

Z výsledkov zobrazených na Obr. 2-16 b) je možné konštatovať, že so zväčšujúcim sa priemerom došlo k priblíženiu sa k nominálnej hodnote všetkými prístupmi [15]. Taktiež bolo z výsledkov možné vidieť, ako sa s narastajúcim priemerom mení tvar prierezu z elipsovitého na kruhový. Graf ďalej zobrazuje, že D_{gauss} a E_{min} sú závislosti hodnotovo

najbližšie k nominálnemu rozmeru. Emaj a Dgauss majú podobný priebeh a najväčší dosiahnutý odklon dosiahol dvojnásobnej hodnoty.

Následne boli vzorky otestované pomocou kompresnej mechanickej skúšky rýchlosťou stláčania 2 mm / min [15]. Obr. 2-17 zobrazuje experimentálne získané hodnoty a porovnáva ich s numerickou simuláciou vytvorenou pomocou dvoch modelov, eliptického a kružnicového. Z grafu reakčnej sily a deformácie môžeme pozorovať, že u priemeru 0,6 mm má využitie eliptického prierezu dopad na výrazné zvýšenie presnosti. U priemeru 1,5 mm je možné pozorovať zvýšenie presnosti tiež, ale už v menšej miere.



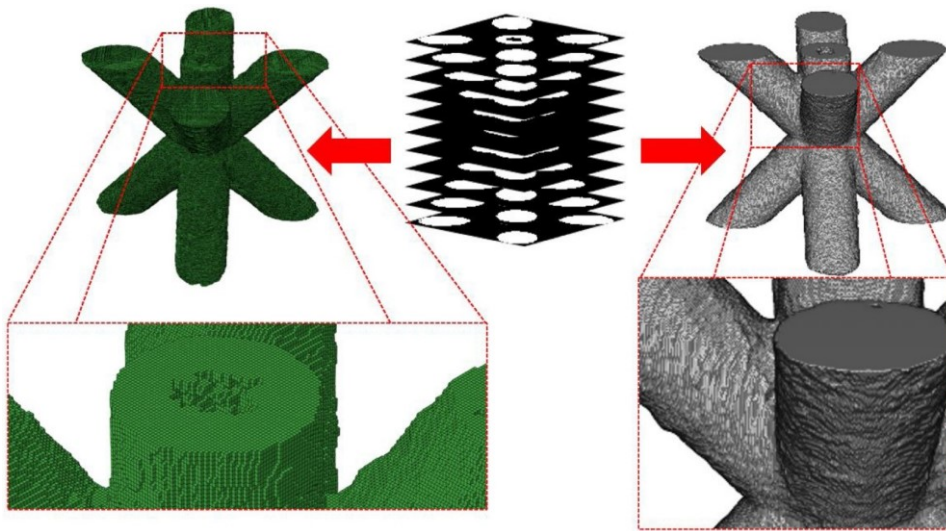
Obr. 2-17 Grafy porovnávajúce experiment a numerickú simuláciu a) Priemer 0,6 mm a b) Priemer 1,5 mm [15].

2.2.4 Prístupy v numerických simuláciách

Využitie reálnej geometrie mikro-prútovej štruktúry:

Pri porovnávaní výsledkov z experimentov a numerického prístupu bola často využívaná aj zrekonštruovaná geometria, ktorá vzniká pomocou röntgenovej mikrotomografie [12, 14]. Tento postup umožňuje získať objemovú geometriu vytvorených vzoriek s veľkou presnosťou. Veľkou výhodou takto digitalizovaných vzoriek je, že okrem rozmerovej informácie o priemere prúta získavame aj informácie o pórovitosti vyskytujúcej sa v štruktúre.

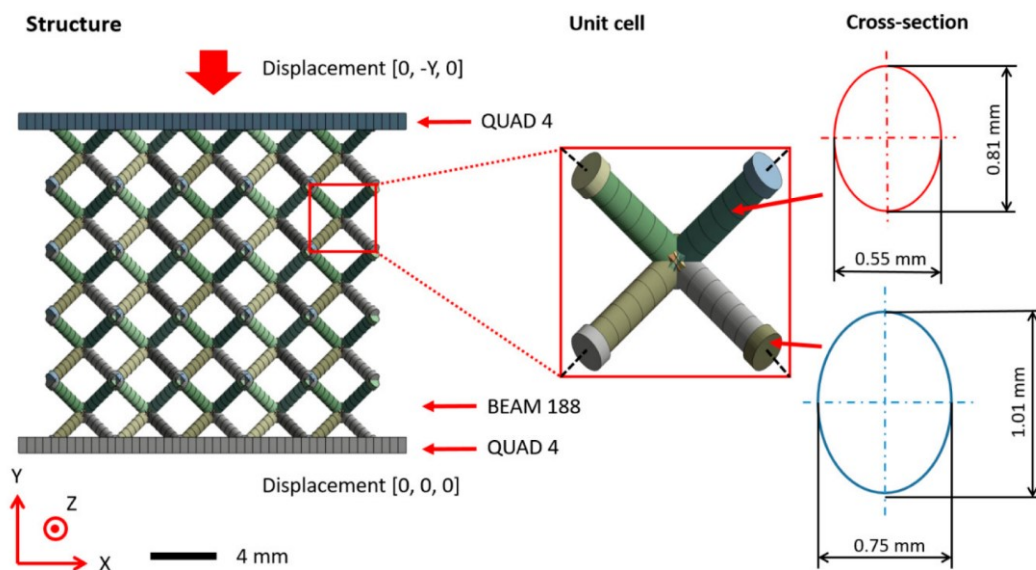
Výstupom po nasnímaní vzoriek boli prierezové binárne obrázky [12]. Tieto obrázky boli následne pomocou algoritmu v MATLABe prevedené do konečno prvkovej siete tvorenej šesťstennými prvkami [12]. Vzniknuté šesťstény tvorili voxely o veľkosti 0,035 mm (viď Obr. 2-18 vľavo). Prítomnosť pórovitosti v konečno prvkovej sieti umožnila vykonať presnejšie numerické simulácie. Pravá časť obrázka obsahuje objemové zobrazenie povrchu, ktoré je možné použiť na štúdium drsnosti povrchu.



Obr. 2-18 Obrázok zobrazujúci zrekonštruovanú geometriu pomocou röntgenovej mikrotomografie [12].

Úprava prútových elementov v geometrii mikro-prútovej štruktúry:

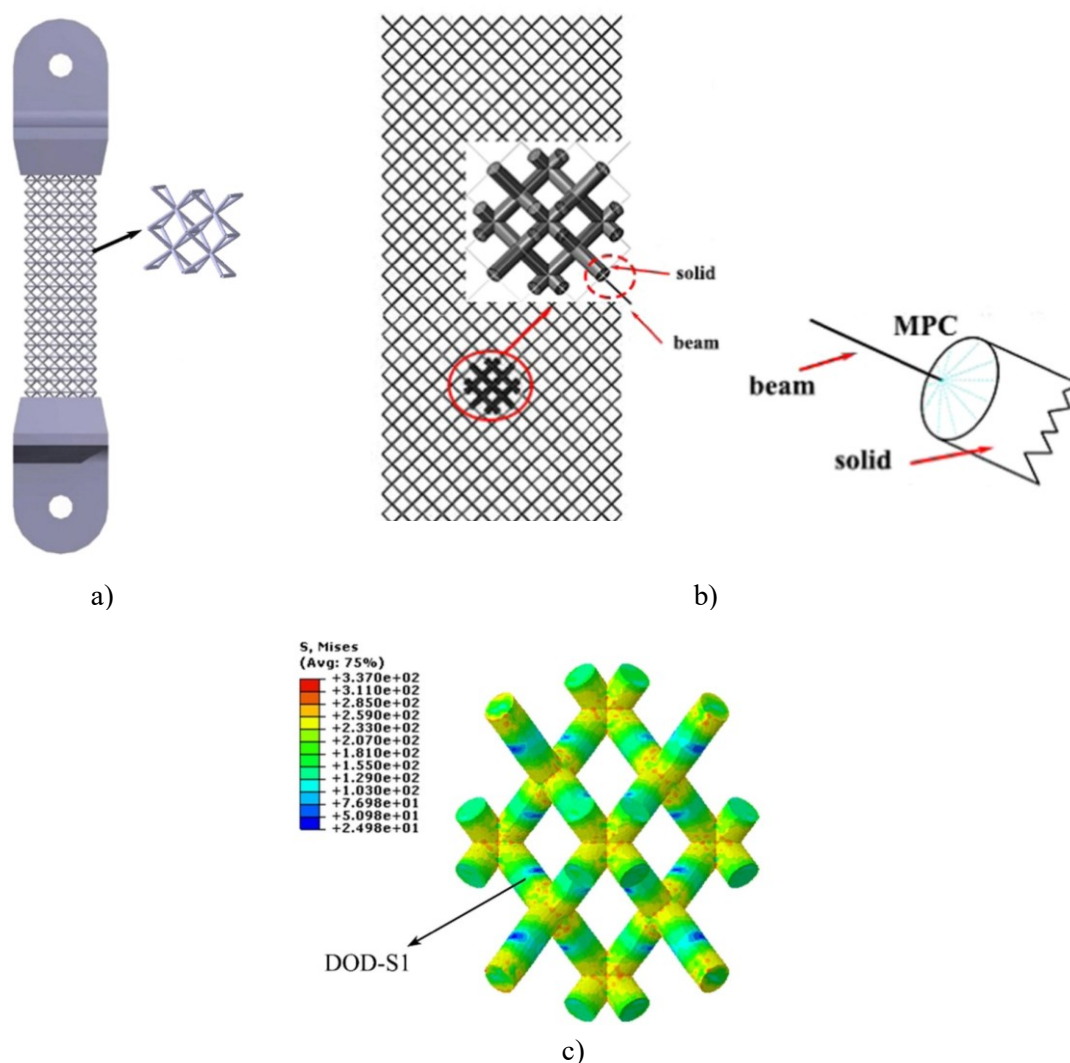
Z dôvodu zníženia výpočtovej náročnosti použil Červinek modifikáciu prútových elementov pri výpočte [8]. Táto modifikácia pomohla pri odzrkadľovaní reálneho namáhania v mikro-prútových štruktúrach. Modifikácia prebiehala v oblasti uzlov, kde dochádza k akumulácii nadmerného materiálu počas procesu výroby, čo spôsobuje lokálne zvýšenie tuhosti. Prvá časť modifikácie riešila zvýšenie tuhosti, a to konkrétne navýšením hodnoty tuhosti materiálu na 1000 násobok nominálnej hodnoty. Druhá časť modifikácie riešila problematiku s väčším množstvom materiálu pomocou úpravy prierezu o 0,2 mm, tzn. v oblasti uzlov bol prierez rovný $d + 0,2$ mm. Taktiež je nutné podotknúť, že na základe analýzy citlivosti bola využívaná veľkosť konečno prvkovej siete, ktorá obsahovala aspoň 5 elementov medzi oblasťami zväčšeného priemeru. Podobný problém riešil aj Labeas, ktorý geometriu modifikoval zmenou veľkosti prierezu v oblasti uzlov o 40 % do vzdialenosti $1/10$ dĺžky prútu pri oboch uzloch, bez úpravy tuhosti materiálu [16].



Obr. 2-19 Obrázok zobrazujúci modifikáciu elementov v oblasti uzlov mikro-prútovej štruktúry [8].

Kombinovaná geometria:

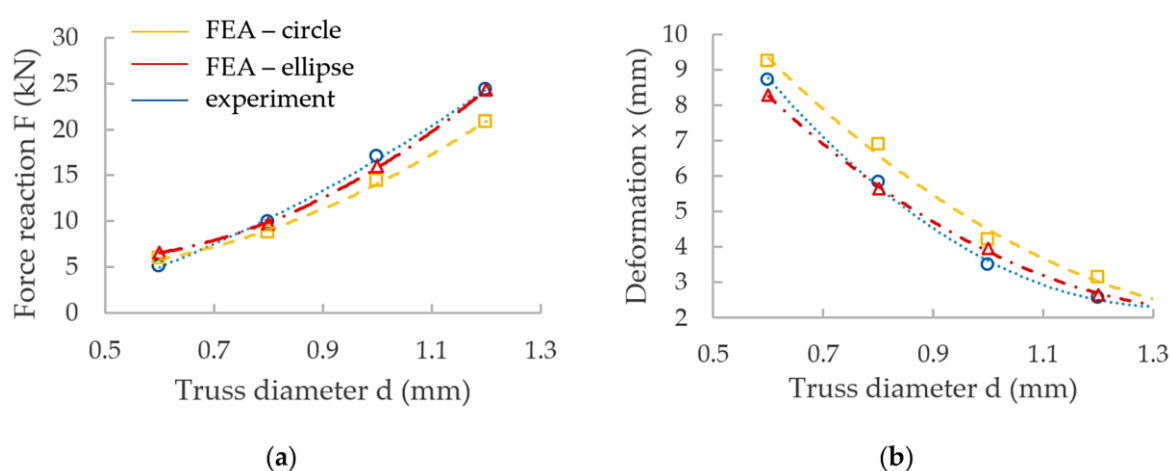
Geng vo svojej práci vytvoril vzorky troch rôznych typov štruktúr pre mechanickú ťahovú skúšku (viditeľné na Obr. 2-20 a)) [17]. Výsledky z experimentu boli následne porovnané s numerickými simuláciami vykonanými v programe ABAQUS. Jednalo sa o model geometrie tvorený prútovými elementami konečno prvkovej siete, pričom jedna bunka bola tvorená objemovým typom geometrie. Prepojenie prútových a objemových elementov bolo zabezpečené pomocou kontaktu typu MPC (multipoint constraint – viacbodové napojenie – Obr. 2-20 b)). Popísaná modifikácia geometrie priniesla zvýšenie presnosti pri vyhodnocovaní na lokálnej úrovni u redukovaného napätia a predĺženia. Ďalšou výhodou je, že s pomerne malým zvýšením výpočtovej náročnosti boli dosiahnuté kvalitné výsledky, ktoré by samostatne model prútovej geometrie neumožňoval (Obr. 2-20 c)).



Obr. 2-20 Obrázok s kombinovanou geometriou a) Navrhnuté ťahové vzorky, b) Popis MPC a c) Výsledky na elementárnej bunke (objemová geometria): Ekvivalentné napätie [17].

2.2.5 Získanie reálnej geometrie

Ako bolo popísane v kapitolách vyššie na získanie reálnej geometrie sa často využíva röntgenová mikrotomografia [2, 6, 14]. Vo všeobecnosti hovoríme o pomerne cenovo a časovo náročnom procese. Vrána vo svojom článku [11], pri digitalizácii mikro-prútových štruktúr typu BCC použil optickú digitalizáciu. Na rozdiel od röntgenovej mikrotomografie z optickej digitalizácie nie je možné získať informáciu o pórovitosti vzoriek, ale získané dáta boli dostačujúce pre modifikáciu geometrie na numerické simulácie. Ako zobrazuje graf na Obr. 2-21, s modifikovanými rozmermi geometrie bolo možné dosiahnuť kvalitných výsledkov. Z grafu je taktiež možné pozorovať, že boli využité 2 prístupy, a to konkrétne s kruhovým a eliptickým tvarom prierezu, rovnako ako bolo popísane v kapitole 2.2.3. S využitím eliptického tvaru prierezu bolo následne možné dosiahnuť presnejších výsledkov.



Obr. 2-21 Grafy porovnávajúce výsledkov z experimentu a numerických simulácií a) Reakčná sila a b) Deformácia v ose X [11].

2.3 Zhrnutie hlavných zistení

S rastúcou dostupnosťou technológie aditívnej výroby vznikajú možnosti nahradenia konvenčne vyrábaných produktov novými, lepšími produktami, ktoré profitujú z tejto technológie. Jedným z príkladov využitia sú mikro-prútové štruktúry tvorené technológiou SLM, ktoré majú výborné mechanické vlastnosti vzhľadom k svojej hmotnosti. Samotný princíp fungovania technológie SLM ale vnáša do výroby nepresnosti – imperfekcie, ktoré spôsobujú odchýlku medzi vytvorenou a navrhnutou geometriou [1, 3, 4]. Neznalosť základných informácií o vzniknutých súčiastiach využívajúcich mikro-prútové štruktúry spôsobuje odchýlku hodnôt získaných z experimentov a numerických simulácií založených na princípe MKP [14]. Ide o najväčšiu prekážku využívania mikro-prútových štruktúr napríklad v automobilovom alebo leteckom priemysle. V súčasnosti sú využívané hlavne vo vesmírnom priemysle, kde vysoké časové a finančné náklady pri návrhu súčastí nepredstavujú problém.

V prípade imperfekcií vyskytujúcich sa v mikro-prútoch štruktúrach hovoríme o dvoch kategóriách. O imperfekciách spojených so samotnou technológiou AM (additive manufacturing), ako napríklad staircase effect (Obr. 2-5) a o imperfekciách spôsobených procesnými parametrami [1, 3, 5]. Staircase effect je spôsobený samotným princípom technológie, konkrétne rozdelením súčastí na vrstvy o istej hrúbke [1, 4]. Tento efekt prispieva k vzniku drsnosti povrchu, ktorá je výraznejšia v oblastiach s menším uhlom od podložky [1, 4, 10]. Pri drsnosti je taktiež nutné spomenúť i dopad nastavenia procesných parametrov tlačiarne, na ktorej sú mikro-prútové štruktúry vytvárané (Obr. 2-7) [5]. Nastavením procesných parametrov dochádza taktiež k ovplyvneniu pórovitosti, ktorá je v mikro-prútoch štruktúrach prítomná a má dopad na mechanické vlastnosti súčastí [13].

V skupine vlastností ktoré ovplyvňujú samotný typ aditívnej výroby sú aj materiálové vlastnosti [6, 7]. Z vykonaných štúdií bolo možné pozorovať, že orientácia komponentu v zástavovom priestore tlačiarne môže výrazne ovplyvniť mechanické vlastnosti. Ako bolo dokázané pri zliatine hliníka [7], konkrétne hovoríme o odchýlke na úrovni 10 % pri uhle $35,3^\circ$ a 90° vzhľadom na rovinu platformy (Obr. 2-9). Odchýlku v materiáli je možné pozorovať aj pri rôznej hrúbke súčastí – prútoch. Bola potvrdená výrazná odchýlka mechanických vlastností medzi ťahovými vzorkami s rôznymi priermi [6]. Konkrétne odchýlka dosahovala úroveň 30 %, v rozsahu priemeru 1 až 5 mm. Tieto tvrdenia sú v prípade mikro-prútoch štruktúr dôležitejšie, nakoľko sa jedná o tenkostenné štruktúry ktoré dosahujú rôznej variácie priemeru prútoch.

Druhá skupina geometrických imperfekcií je priamo spojená s odchýlkami vytvorenej geometrie od navrhovaného predpokladu. Medzi najčastejšie geometrické imperfekcie s ktorými je možné stretnúť sa v mikro-prútoch štruktúrach sú [4, 9, 10]: Vyosenie prierezu od osy prúta (Obr. 2-10), zmena priemeru prúta, zmena tvaru prierezu prúta (Obr. 2-16), vysoká drsnosť povrchu a spojitosť prútoch s uzlami. Z doterajšieho výskumu boli zmena priemeru prúta a zmena tvaru prierezu prúta popísané ako imperfekcie ktoré majú najväčší dopad na výsledné mechanické vlastnosti mikro-prútoch štruktúr [10].

V prípade zmeny veľkosti priemeru prúta bola popísaná nejednoznačná odchýlka ktorá je závislá od veľkosti nominálneho priemeru [13, 14]. Taktiež je nutné spomenúť, že odchýlka je priamo závislá na orientácii prúta vzhľadom na smer tvorby súčastí (vertikálny, diagonálny a horizontálny). Komplexnejšie štruktúry ktoré obsahujú prúty s rôznym uhlom v elementárnej bunke, dosahujú rôznej odchýlky pri jednotlivých prútoch (Obr. 2-13) [14]. S popísanou imperfekciou je spojený ďalší jav, a to zmena tvaru prierezu prúta. Bolo pozorované [11, 15], že prúty pri menších prieroch dosahujú tvar prierezu pripomínajúci elipsu (Obr. 2-16). Prierez prútoch so zväčšujúcim sa prierom prechádza naspäť do kruhového tvaru.

Spomenuté imperfekcie spôsobujú odchýlky medzi experimentmi a následnými numerickými simuláciami vykonanými na princípe metódy konečných prvkov [10, 13, 14]. Aby bolo možné priblížiť sa k výsledkom experimentu, je používaná metóda získania reálnej

geometrie prostredníctvom röntgenovej mikrotomografie [4, 13, 14]. Zo získaných dát je možné vytvoriť virtuálny model reálnej súčasti, ktorý môže byť následne analyzovaný prostredníctvom numerických simulácií, čo dopomáha k zjednoteniu hodnôt s experimentom [13–15]. Najväčšou výhodou sú vysoká presnosť získanej geometrie alebo aj informácie o pórovitosti štruktúry. Na druhej strane veľkými nedostatkami tejto technológie sú vysoká časová a finančná náročnosť. Aby bolo možné odstrániť tieto nedostatky, niektoré štúdie pri digitalizácii využili metódu optického skenovania [11]. Jedná sa o časovo a finančne menej náročnú metódu, ktorá umožňuje efektívnejšie získať potrebné poznatky. Nevýhodou optickej digitalizácie sú ale nižšia presnosť získanej geometrie a absencia poznatkov o pórovitosti štruktúry.

2.4 Medzera v poznaní

Z kritickej rešerše je možné pozorovať, že mikro-prútové štruktúry majú svoje uplatnenie aj keď sú spojené s mnohými nedostatkami. Nedostatky ktoré sú priamo spojené so samotným princípom fungovania aditívnej výroby je nutné akceptovať, respektíve minimalizovať ich dopad a výskyt pri výrobe. Jedná sa najmä o výskyt pórovitosti a Staircase efektu. Ich dopad je možné znížiť napríklad vytvorením špecifického materiálového modelu. V prípade geometrických imperfekcií je nutné s vyskytujúcimi sa javmi počítať, nakoľko výrazne ovplyvňujú vlastnosti štruktúr.

Dôvody vzniku geometrických imperfekcií boli popísané niekoľkými autormi. Väčšina štúdií sa snaží o priblíženie výsledkov medzi experimentmi a numerickými simuláciami. Jedným z dnes hojne využívaných prostriedkov je röntgenová mikrotomografia, ktorá slúži na získanie reálnej geometrie (zahrňujúca imperfekcie). Vo všeobecnosti sa štúdie zaoberajú „mapovaním“ hodnôt, získaných z numerických simulácií na experimentálne získané hodnoty prostredníctvom úpravy geometrie. V portfóliu vykonaných štúdií ale nenájdeme štúdie, ktoré by sa priamo zaoberali dopadom geometrických imperfekcií na vlastnosti štruktúr pri zaťažovaní.

Štúdium dopadu geometrických imperfekcií a predikcia vlastností mikro-prútvových štruktúr pomocou numerických simulácií je problematická. Vytvorenie objemového modelu síce prinesie kvalitné výsledky, avšak pri reálnych rozmeroch štruktúr vyskytujúcich sa pri rôznych aplikáciách, je ich využitie nereálne z dôvodu veľkej náročnosti na výpočtový výkon. Zlepšenie v tejto oblasti prebieha v dvoch rovinách: 1. Úprava jednoduchých prútvových elementov, ktoré následne lepšie odzrkadľujú chovanie pri namáhaní. 2. Tvorba kombinovaných modelov geometrie, ktoré pri malom zvýšení výpočtovej náročnosti dokážu priniesť kvalitné výsledky v lokálnej oblasti záujmu. Hovoríme o nástrojoch, ktoré umožnia študovať dopad geometrických imperfekcií. Konkrétne hovoríme o získaní poznatkov, keď zahrnutie zmeny tvaru prierezu je kritické pri návrhu súčasti, a kedy uspokojivé výsledky prinesie úprava na reálne hodnoty priemeru. Hranica priemeru prúta pri ktorej zahrnutie

geometrických imperfekcií prinesie nevýznamnú zmenu v odchýlke medzi výsledkami experimentu a numerických simulácií. Tieto poznatky sú kľúčové pri budúcom zjednodušení návrhu a zlepšení použiteľnosti štruktúr v bežných aplikáciách.

3 CIELE PRÁCE

3.1 Výskumné otázky

Otázka č. 1 - Akým spôsobom je možné znížiť odchýlku vo výsledkoch absorbovanej energie medzi MKP simuláciami a experimentom, spôsobenú zmenou tvaru prierezu a zmenou veľkosti priemeru prútu na štruktúre BCC s rozsahom priemeru prútu 0,5 – 1,5 mm.

Otázka č. 2 - Pri akej hodnote priemeru prútu v rozsahu 0,5 – 3 mm, ktorý využíva geometrické predpoklady BCC štruktúr, je zahrnutie geometrických imperfekcií nerelevantné pri vyhodnotení výsledkov absorbovanej energie medzi MKP simuláciami a experimentom?

3.2 Ciele výskumu

Cieľom diplomovej práce je vytvoriť presný model geometrie mikro-prútovej štruktúry s využitím experimentálnych dát pre MKP analýzu, ktorá umožní posúdiť vplyv geometrických imperfekcií technológie SLM na mechanické vlastnosti.

- Vytvoriť rešeršnú štúdiu geometrických imperfekcií vznikajúcich pri výrobe technológiou SLM, vrátane štúdia možností ich implementácie do výpočtového modelu geometrie.
- Implementovať skúmané geometrické imperfekcie a materiálový model do MKP analýzy.
- Navrhnuť model geometrie mikro-prútovej štruktúry, ktorý umožní podrobne študovať dopad skúmaných geometrických imperfekcií (na lokálnej úrovni).
- Navrhnuť a previesť merania na získanie reálnej geometrie prostredníctvom metódy optického skenovania.
- Posúdiť vplyv geometrických imperfekcií a porovnať výsledky MKP simulácií s experimentom.

3.3 Hypotézy

Z analýzy súčasného stavu poznania a využívaných metód pri implementácii geometrických imperfekcií do modelu geometrie bolo možné vysloviť hypotézy na stanovené výskumné otázky:

Hypotéza č. 1.1 - Nepresnosť vo výsledkoch absorbovanej energie medzi MKP simuláciami a experimentom je možné minimalizovať na úroveň menšiu ako 5 % pri súčasnom zahrnutí imperfekcií (zmena tvaru prierezu a veľkosti priemeru prútu) do modelu geometrie, s využitím metódy optického skenovania pre stanovený rozsah.

Využitie metódy optického skenovania použil vo svojej práci Vrána [11]. Dokázanie pravdivosti prvej hypotézy by potvrdilo, že využitie metódy optického skenovania na získanie reálnej geometrie prinesie uspokojivé výsledky pri posúdení vplyvu skúmaných geometrických imperfekcií.

Hypotéza č. 1.2 - Nepresnosť vo výsledkoch absorbovanej energie medzi MKP simuláciami a experimentom je možné minimalizovať na úroveň menšiu ako 5 % pri súčasnom zahrnutí imperfekcií (oba typy) do modelu geometrie, s premenlivým prierezom po celej dĺžke strednice prútu, vychádzajúc z poznatkov získaných z metódy optického skenovania pre stanovený rozsah.

Hypotéza číslo 1.2 kombinuje prístup ktorý využil Vrána a Lei [11, 14], pričom vychádza z predpokladov hypotézy číslo 1 a je obohatená o dodatočnú úpravu geometrie v prípade, že samotná hypotéza číslo 1 sa preukáže ako nepravdivá.

Hypotéza č. 2.1 - Pri prútoch obsahujúcich spomenuté geometrické imperfekcie je možné dosiahnuť hraničnej hodnoty priemeru prútu, kedy odchýlka vo výsledkoch absorbovanej energie medzi MKP simuláciami a experimentom je menšia ako 5 %.

Podobnú problematiku popísal Dong vo svojej práci ktorá bola vykonaná na zliatine hliníka AlSi10Mg, pričom rovnaké hodnoty medze sklzu ako u konvenčne vyrábaných vzoriek boli dosiahnuté pri priemere 3 mm [6]. Potvrdenie hypotézy by umožnilo stanoviť hraničnú hodnotu pri ktorej vplyv zahrnutých geometrických imperfekcií nie je významný.

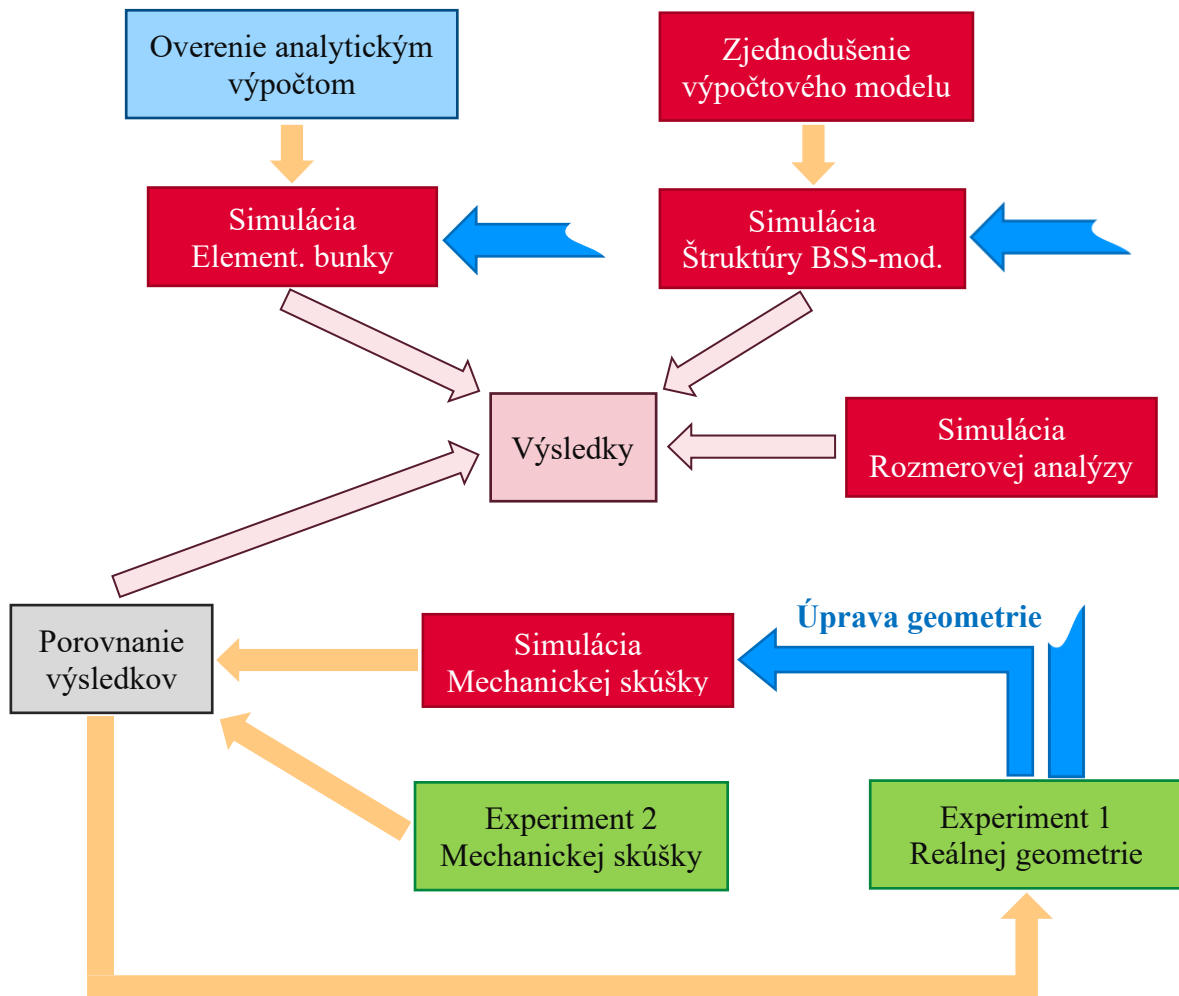
4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

Celú prácu je možné rozdeliť do dvoch hlavných celkov. Prvou časťou je súbor vykonaných **numerických simulácií** fungujúcich na princípe metódy konečných prvkov. Druhá hlavná časť diplomovej práce pozostávala z **experimentov**. Okrem rozdelenia práce na simulačnú a experimentálnu časť môžeme z Obr. 4-1 vidieť rozdelenie do dvoch vedľajších častí. Prvá časť sa zaoberala tvorbou geometrie pre simulácie zjednodušeného výpočtového modelu. Ďalšie simulácie riešili rozmerovú analýzu štruktúry. Taktiež bol využitý analytický prístup, ktorý slúžil na pochopenie namáhania vyskytujúceho sa v štruktúrach a overenie výsledkov.

Druhá časť práce (spodná časť obrázka), zobrazuje proces „mapovania“ výsledkov medzi experimentom 2 (Mechanická skúška) a numerickými simuláciami. Z obrázka je možné pozorovať, že sa jednalo o iteračný proces, kedy došlo k porovnávaniu výsledkov. Ak nebolo dosiahnuté žiadanej presnosti, došlo k úprave geometrie na základe poznatkov z experimentu 1 (Získanie reálnej geometrie) a celý proces sa následne opakoval. Rovnaká geometria bola následne využitá aj v simuláciách elementárnej bunky a štruktúry BSS-mod., ktoré slúžili na štúdium dopadu geometrických imperfekcií.

Z výsledkov boli následne potvrdené, respektíve vyvrátené hypotézy. Nakoľko bolo nutné vykonať pozorovania, merania a experimentálne overovanie výsledkov, bola diplomová práca predurčená ako výskumná s empirickými metódami. Podľa typu spracovávaných výsledkov je možné povedať, že sa jednalo o kvantitatívny výskum s deduktívnym prístupom riešenia. O práci je možné taktiež povedať, že rieši relačný typ problému.



Obr. 4-1 Obrázok postupu riešenia diplomovej práce.

4.2 Tvorba vzoriek

4.2.1 Prístrojové vybavenie SLM tlače

Všetky testované vzorky segmentov štruktúr a mikro-prúťových štruktúr v experimentoch boli zhotovené pomocou technológie Selective Laser Melting (SLM). Výroba prebehla na zariadení SLM 280HL (SLM Solutions, Lübeck, Nemecko), s rozmermi pracovnej komory 280 x 280 x 350 mm. K taveniu materiálu bol využívaný jeden Ytterbium vláknový laser s výkonom 400 W. Laser vytvoril zameraný bod s priemerom 82 μm , pričom intenzita laserového lúča dosahovala Gaussovského rozloženia. Konkrétne nastavenia parametrov výroby uvedené v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Tabuľka použitých procesných parametrov.

	Výkon lasera [W]	Skenovacia rýchlosť [mm/s]
Border – Volume	100	300
Fill Contour – Volume	150	400
Hatch – Volume	275	700
Hatch – Down Skin	100	1 200
Border - Down Skin	100	1 200
Fill Contour – Down Skin	150	625
Predohrev komory		100 °C
Výška vrstvy		50 µm
Inertná atmosféra	N ₂	O ₂ : < 0,2%
Sušenie prášku	16 hodín	60 °C

4.2.2 Základný materiál pre technológiu SLM

Základový materiál vstupujúci do prístroja SLM 280HL bol vo forme prášku, vytvorený prostredníctvom metódy plynovej atomizácie. Konkrétne sa jednalo o nerezovú oceľ s označením 316L (1.4404). Veľkosť častíc prášku bola $Q_{10}=10,07 \mu\text{m}$, $Q_{50} = 29,44 \mu\text{m}$ a $Q_{90} = 48,21 \mu\text{m}$ (Q – distribúcia počtu častíc) [8]. Chemické zloženie je popísané v Tab. 4-2.

Tab. 4-2 Tabuľka chemického zloženia kovového prášku [8].

Prvok	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Hm.%	66,37	0,03	0,8	1,8	17,5	2,2	11,3

Počas simulácií bol využívaný materiálový model z predchádzajúcich štúdií, vykonaný na ťahových prútoch vzorkách s priemerom 0,6 mm [8]. Používané materiálové mechanické vlastnosti je možné vidieť v Tab. 4-3.

Tab. 4-3 Tabuľka mechanických vlastností použitého materiálu [8].

E [GPa]	R _{p0,2%} [MPa]	E _t [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	μ [-]
94 ± 10	338 ± 20	787	397	5,3	0,31

Nakoľko súčasťou diplomovej práce bola aj mechanická skúška vykonaná na pádovom testeri a následné porovnanie s numerickou simuláciou, bolo nutné pre niektoré simulácie doplniť model materiálu o dynamickú zložku. Modifikácia prebehla prostredníctvom Cowper - Symondsovej teórie, čo vyžadovalo použitie koeficientov ktoré obsahuje Tab. 4-4.

Kde, K_H – Strength coefficient, n_H – Hardening exponent. Model materiálu je možné aplikovať do rýchlosti pretvorenia 100 s^{-1} .

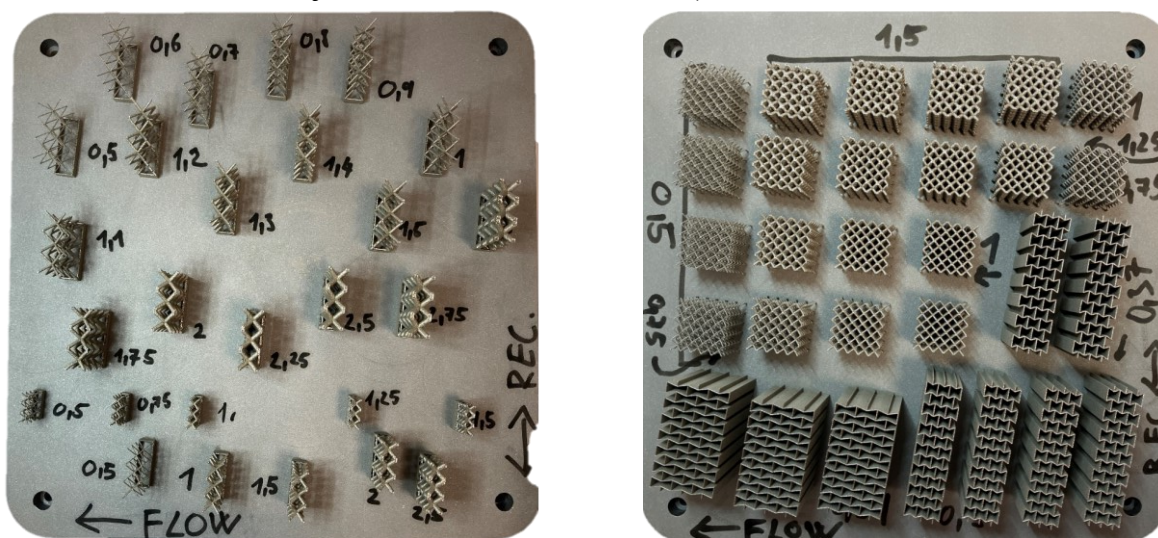
Tab. 4-4 Tabuľka doplňujúcich mechanických vlastností pre dynamické simulácie [8].

ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	K_H [MPa]	n_H [-]	D [s^{-1}]	q [-]
7 900	481,45	0,17	4 851,9	4,078

4.2.3 Špecifikácia vzoriek

Počas riešenia práce boli vytvorené dva typy vzoriek:

- Segmenty štruktúr: Celkovo 27 vzoriek pre experiment reálnej geometrie a rozloženie vzoriek je zobrazené na Obr. 4-2 a). Vzorky s veľkosťou elementárnej bunky 10 mm boli tvorené v rozsahu priemeru 0,5 – 1,5 mm s prírastkom 0,1 mm. Od priemeru 1,5 do 3 mm s prírastkom 0,25 mm na priemere. Vzorky s 8 mm elementárnou bunkou boli vytvorené s prírastkom 0,5 mm, v rozsahu 0,5 mm až 2,5 mm. V prípade 5 mm elementárnej bunky bol rozsah priemeru 0,5 – 1,5 mm s prírastkom 0,25 mm.
- Vzorky mikro-prúťových štruktúr: Celkovo bolo vytvorených 20 mikro-prúťových štruktúr typu BCC, s veľkosťou elementárnej bunky 5 mm a priemerom prúťov v rozsahu 0,5 – 1,5 mm s prírastkom 0,25 mm. Z každej konfigurácie boli vytvorené 4 vzorky a rozloženie vzoriek je možné vidieť na Obr. 4-2 b).



Obr. 4-2 Rozloženie vzoriek na platforme.

4.2.4 Softvérové vybavenie

Geometria vzoriek (segmenty štruktúr a mikro-prúťové štruktúry) využitých pri experimentoch, bola namodelovaná prostredníctvom CAD softvéru Autodesk Inventor Professional 2022. Využitý softvér umožnil jednoduchú parametrickú úpravu vzoriek a taktiež umožnil export dát do formátu STL. Vyexportované dáta boli zdrojové dáta pre

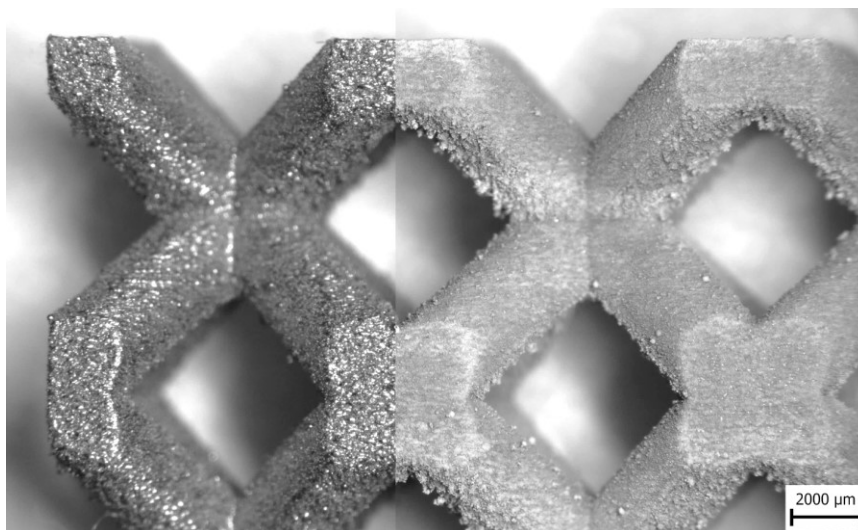
program Materialise Magics 23.01, ktorý slúžil na rozmiestnenie vzoriek do zástavového priestoru a vygenerovanie zdrojového kódu pre zariadenie SLM 280HL.

4.3 Experimentálna časť

Experimentálna časť práce bola rozdelená do dvoch hlavných celkov – experimentov. Prvý experiment sa zaoberal zberom dát reálnej geometrie vzorky mikro-prútovej štruktúry. O druhom experimente môžeme hovoriť ako o deštruktívnej skúške, kedy došlo k zničeniu vzoriek a to konkrétne v podobe dynamickej skúšky na pádovom testeri.

4.3.1 Experiment získania reálnej geometrie

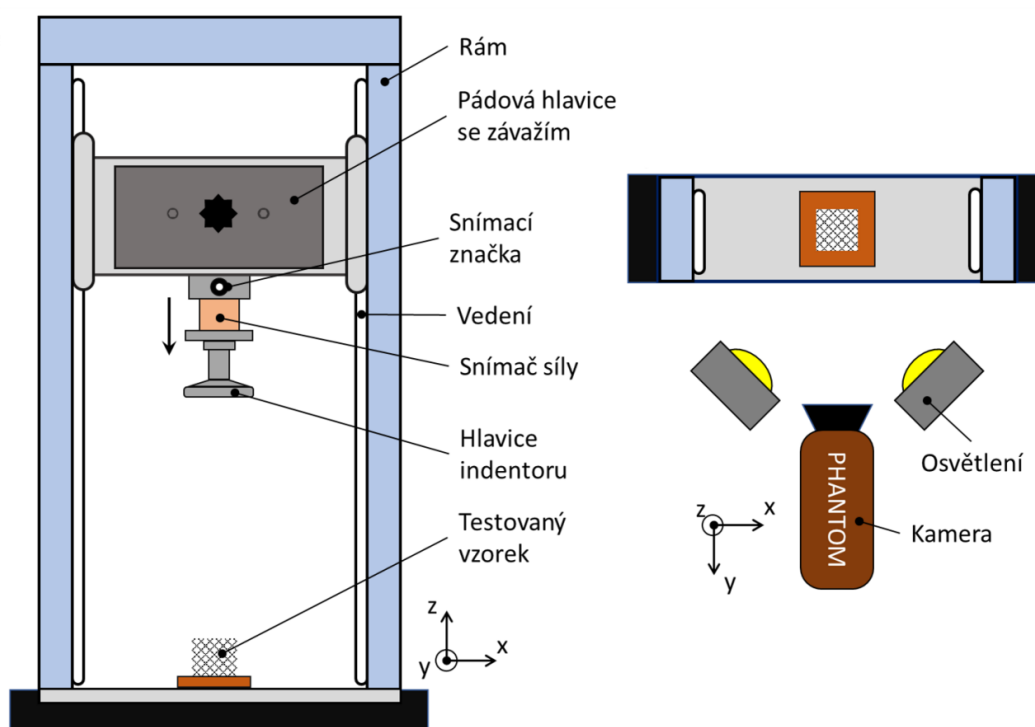
Reálna geometria vzorky mikro-prútovej štruktúry bola získaná prostredníctvom 3D optického skenovacieho zariadenia ATOS Triple Scan (GOM GmbH, Braunschweig, Nemecko). Počas merania bol využitý optický systém šošoviek MV170 [18], čo umožnilo vykonať meranie v objeme 170 x 130 x 130 mm v pracovnej vzdialenosti 490 mm. Skener využíval 2 kamery s rozlíšením 8 Mpx, pričom ohnisková vzdialenosť šošoviek kamery bola 40 mm. Rozlíšiteľnosť vzdialenosti medzi bodmi bola 0,055 mm a svetelný zdroj využíval LED technológiu, s ohniskovou vzdialenosťou šošovky projektora o hodnote 60 mm. Pred samotným skenovaním boli vzorky nastriekané zmatňujúcim sprejom na báze oxidu titaničitého, ktorý vytvoril na povrchu vrstvu hrubú približne 5 μm (Obr. 4-3; vľavo pred a vpravo po zmatnení vzoriek) [19]. Táto metóda umožnila zachytenie trojrozmerného povrchu vyrobenej súčasti – vzorky mikro-prútovej štruktúry v podobe segmentov štruktúr. Geometria segmentov štruktúr je popísaná v kapitole 4.3.4.



Obr. 4-3 Obrázok segmentov štruktúr pred a po zmatnení.

4.3.2 Experiment mechanickej skúšky

Experiment slúžil na porovnanie výsledkov z pádového testera a MKP simulácií, využívajúc poznatky z predchádzajúceho experimentu. Využitý pádový tester bol vyvinutý na VUT a bol vybavený vysokorýchlostnou kamerou Phantom V710 (Vision Research, Wayne, New Jersey) a tenzometrami XY31-3/120 zapojenými do plného mostíka. Tenzometre boli pripojené k meracej karte Quantum X MX410B (HBM GmbH, Darmstadt, Nemecko) a zápis z merania bol zaznamenávaný so vzorkovacou frekvenciou 96 kHz. Získané dáta boli vyhodnocované pomocou programu Catman Easy. Nastavenie vysokorýchlostnej kamery dosahovalo rozlíšenie 1 280 x 104 px. Dáta z vysokorýchlostnej kamery boli zaznamenávané so vzorkovacou frekvenciou 56 808 Hz, prostredníctvom programu PCC (Phantom Camera Control). Následne boli záznamy z tenzometrov a vysokorýchlostnej kamery spojené a vyhodnotené v programe MATLAB. Hmotnosť pádovej hlavy bola 13,45 kg s počiatočnou výškou 1 m, čo umožnilo uskutočniť testy s nárazovou energiou 60,5 J. Priebeh celého experimentu je zobrazený na Obr. 4-4.



Obr. 4-4 Obrázok prístrojového vybavenia experimentu mechanickej skúšky [20].

Príprava dát pre porovnanie s numerickou simuláciou:

Príprava dát pre porovnanie prebiehalo v niekoľkých krokoch:

- 1. Úprava dát z meraní do bodu maximálnej reakčnej sily.
- 2. Výpočet priemeru z meraní.
- 3. Doplnenie dát o výsledky z numerických simulácií.
- 4. Výpočet absorbovanej energie.

Doplnenie dát o výsledky z numerických simulácií:

Numerické simulácie využívali päť rôznych prístupov. Prvý využitý prístup využíval nominálne hodnoty priemeru, pričom veľkosť uzlov bola stanovená na základe prístupu od Labeas (popísaný v kapitole 2.2.4). Prístup od Labeas, vytvára uzly pomocou zväčšenia priemeru prúta o 40 % do 1/10 dĺžky prúta (**uzly 1,4**). Ďalšie využité prístupy (**kružnice** a **elipsy**) využívali dáta z experimentu reálnej geometrie, kde bol priemer prúta definovaný buď rozmerom priemeru kružnice alebo veľkosťou poloôs elipsy. V prístupoch numerických simulácií bol taktiež využitý aj typ geometrie uzly – **R uzly (skratka pre Reálne uzly)**. Jednalo sa o prístup ktorý využíval hodnoty veľkosti uzla z experimentu reálnej geometrie. Rozmer uzla (dĺžka využívajú časť prúta) bola rovná polomeru rozmeru kružnice, ktorou boli preložené uzly v experimente reálnej geometrie. Priemer prúta v oblasti uzlov bol stanovený na základe princípu popísaného v kapitole 4.3.4. Ako je možné vidieť aj na Obr. 5-21, simulácie využívajúce prístup R uzly sú v grafe zaznačené prerušovanou čiarou.

4.3.3 Softvérové vybavenie

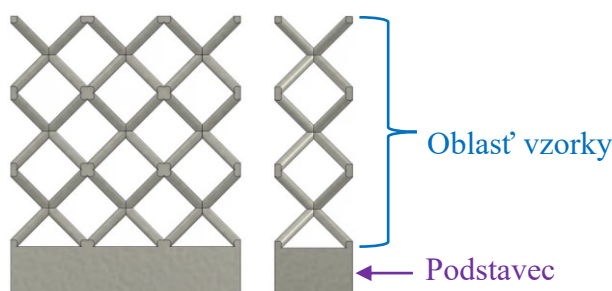
Vyhodnotenie získaných dát z experimentov vyžadovalo použitie dodatočného softvéru. Pri skenovaní reálnej geometrie pomocou optického skenera a vyhodnocovaní geometrie bol použitý program GOM Inspect 2018. Proces vyhodnotenia reálnej geometrie segmentov štruktúr bol automatizovaný pomocou skriptu vytvoreného v minulosti na Ústave konštruovania [15]. Použitie skriptu vyžadovalo nominálnu CAD geometriu, ktorá bola vytvorená v programe Autodesk Inventor Professional 2022 a následne exportovaná do formátu STEP. Pri vyhodnocovaní reálneho rozmeru uzlov bol taktiež využitý program Autodesk Inventor Professional 2022 na získanie zväčšeného priemeru v oblasti uzlov, ktorý bol následne využitý v numerických simuláciách, viac str. 44.

Experiment mechanickej skúšky bol zdrojom dát z tenzometra a vysokorýchlostnej kamery. Tenzometre boli využité na meranie reakčnej sily počas deformácie mikro-prútovej štruktúry. Pomocou vysokorýchlostnej kamery bola zachytávaná poloha značky na padajúcej hlave pádového testera (vid' Obr. 4-4), pričom tento záznam bol následne využitý na určenie deformácie vzorky v čase. Získané dáta boli jednotlivo spracované a uložené v programoch Catman Easy a Phantom. Na záver boli záznamy skombinované a vyhodnotené v programe MATLAB R2021a pomocou získaného skriptu.

4.3.4 Metódy získania reálnej geometrie vzoriek

Súčasťou experimentu reálnej geometrie bolo taktiež optické 3D skenovanie pomocou zariadenia ATOS Triple Scan 8M. Výsledkom zo skenovania bola triangulačná sieť vo formáte STL, ktorá bola následne spracovaná v programe GOM Inspect 2018. Počas skenovania boli zdigitalizované vzorky mikro-prútovej štruktúry v podobe segmentov, využívajúce predpoklady BCC štruktúr.

Segmenty boli tvorené ako vzorky mikro-prútových štruktúr s jednou vrstvou elementárnych buniek v jednom smere, konkrétne 3 x 3 x 1. Táto konfigurácia následne umožnila vzorky ľahšie zdigitalizovať. Segmenty štruktúr dosahovali rovnaké geometrické parametre (uhol od podložky, orientácia v zástavovom priestore), ako vzorky z experimentu 2. Segmenty štruktúr sa skladali z **podstavec** s výškou 5 mm, ktorý slúžil na uchytenie na platformu pri výrobe vzoriek a na ich uchytenie pri digitalizácii (viď Obr. 4-5). **Oblasť vzorky**, čo bola oblasť s meniacimi sa hodnotami priemeru prúta a veľkosti elementárnej bunky. Vyhodnocovanie prebiehalo v dvoch fázach: Vyhodnotenie rozmerov prútov a vyhodnotenie rozmerov uzlov.



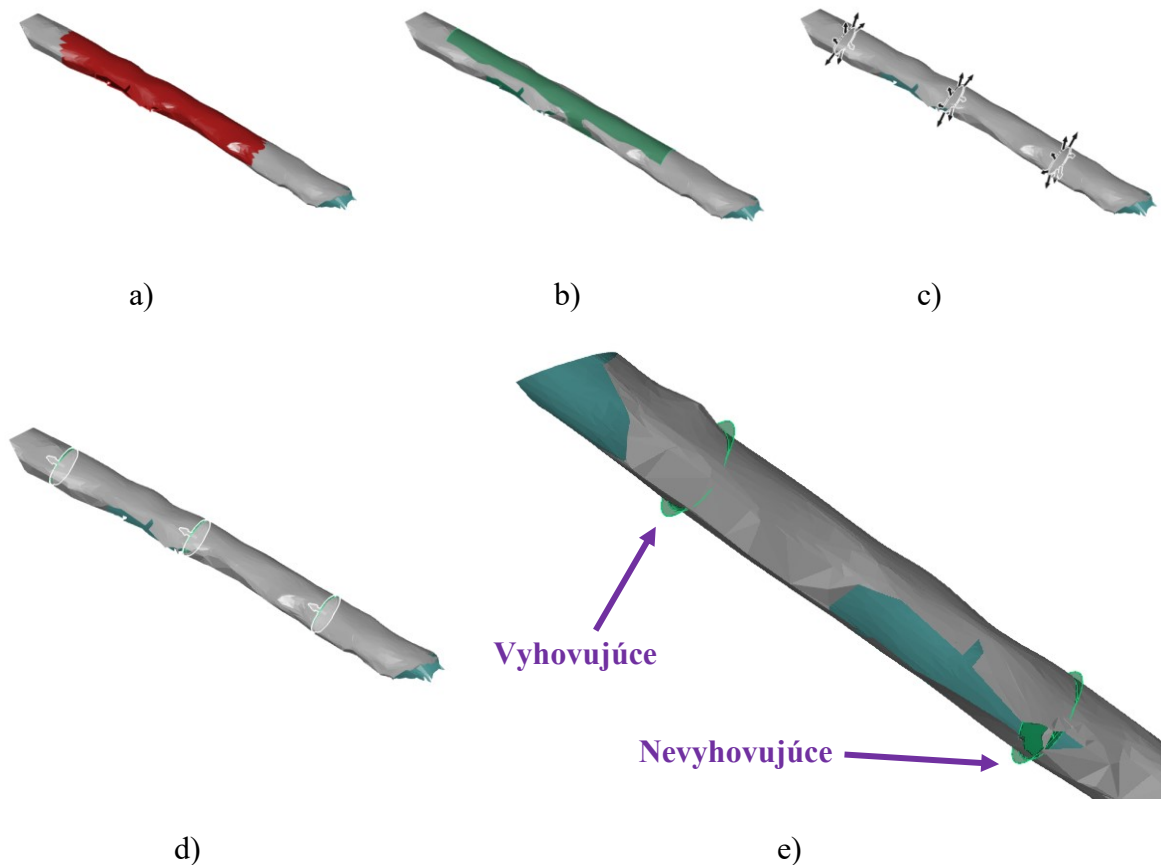
Obr. 4-5 Obrázok geometrie segmentov štruktúr.

Vyhodnotenie rozmerov prútov:

Skript fungoval v nasledujúcich krokoch, zobrazené Obr. 4-6:

- 1. Vytvorenie bodov uprostred všetkých prútov segmentov štruktúr
- 2. Zvolenie elementov z naskenovaných dát prostredníctvom gule s polomerom R – a)
- 3. Preloženie zvolených elementov: Valcom – Gauss-fit – b)
- 4. Vytvorenie 3 rezov prútom v oblasti: Začiatok, stred a koniec valca – c)
- 5. Preloženie rezov prostredníctvom **Kružnice – Gauss-fit** a Elipsy – Gauss-fit – d)
- 6. Získanie priemeru kružnice a priemeru hlavnej a vedľajšej polosi elipsy

Bod 5 obsahuje **zvýraznenú časť**, čo značí vlastnú modifikáciu voči získanému skriptu. Polomer R z bodu číslo 2 bola premenlivá hodnota závislá od veľkosti prúta a veľkosti elementárnej bunky. Konkrétna hodnota bola získaná ako rozmer minimálnej vzdialenosti medzi uzlami prúta, vynásobená hodnotou 0,55 => vyhodnocovaná oblasť na prúte bola približne polovica prúta. Toto opatrenie zabezpečovalo vyhnutie sa oblasti neúplných dát (diery v naskenovaných dátach) v miestach pod uzlami, a taktiež chybné preloženie kružnicou / elipsou z dôvodu výberu elementu susedných prútov. Po automatizovanom vyhodnotení boli kružnice a elipsy filtrované, aby do záverečného vyhodnocovania boli použité iba výsledky získané na plnej geometrii prúta Obr. 4-6 e).

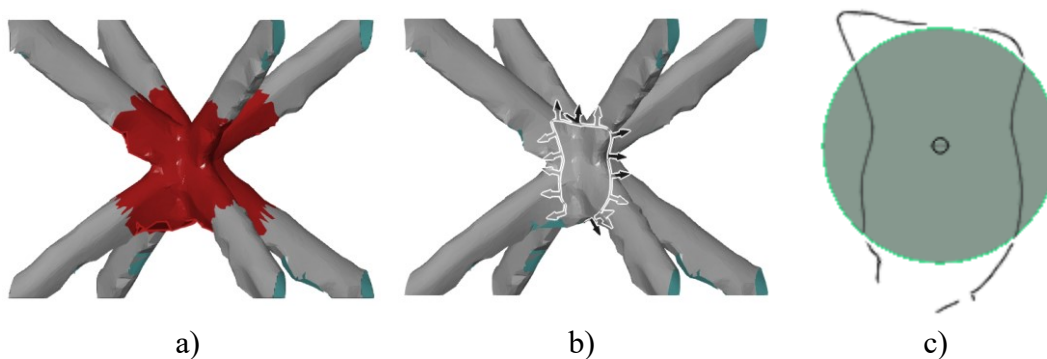


Obr. 4-6 Obrázok vyhodnocovania prútov.

Vyhodnotenie rozmeru uzlov:

Vyhodnotenie rozmerov uzlov prebehlo taktiež prostredníctvom skriptu. Skript fungoval pomocou nasledujúcich krokov, zobrazenie Obr. 4-7:

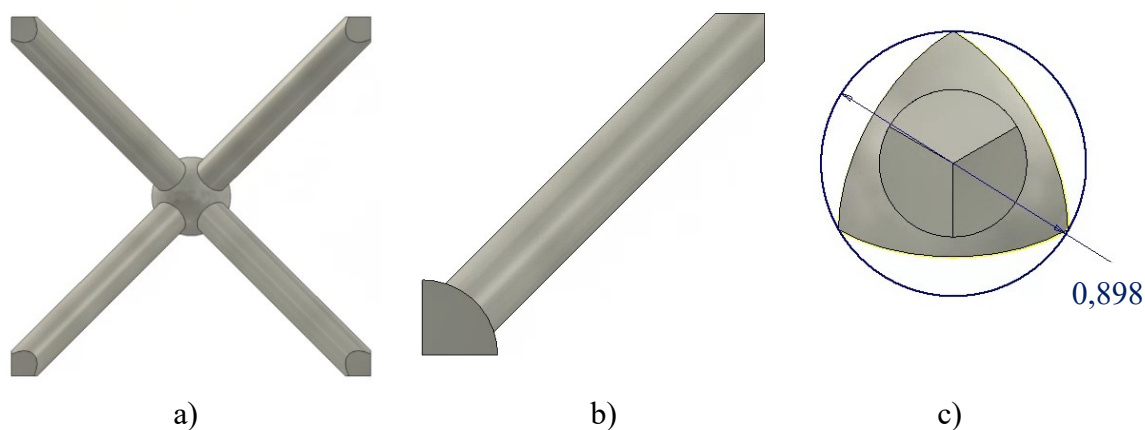
- 1. Vytvorenie bodov uprostred všetkých deviatich uzlov segmentov štruktúr
- 2. Zvolenie elementov z naskenovaných dát prostredníctvom gule s polomerom R – a)
- 3. Vytvorenie dvoch na seba kolmých rezov v spojnici valcových plôch prútov – b)
- 4. Preloženie rezov prostredníctvom Kružnice – Gauss-fit – c)
- 5. Získanie **priemeru kružnice**



Obr. 4-7 Obrázok vyhodnocovania uzlov.

Súčasťou procesu vyhodnotenia veľkosti uzlov, bolo aj získanie veľkosti priemeru prúta, ktorý bol následne využívaný v numerických simuláciách. Jednalo sa o hodnotu priemeru prúta ktorá sa nachádzala v oblasti uzlov. Na jej vyhodnotenie bol využitý program Inventor Professional 2022. Získanie rozmeru prebiehalo na elementárnej bunke prostredníctvom nasledujúcich krokov, zobrazenie Obr. 4-8:

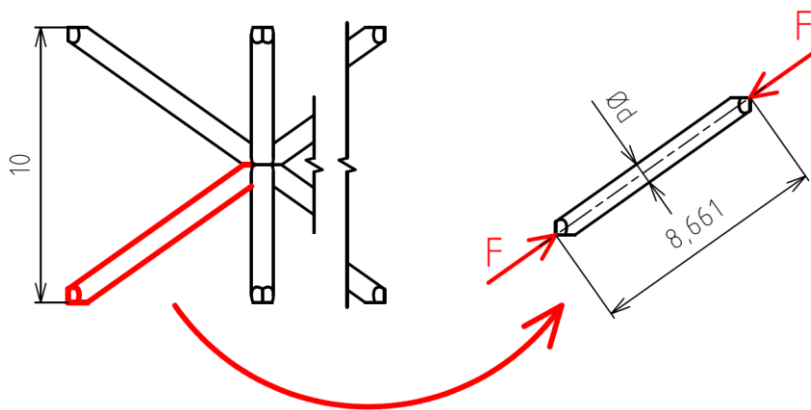
- a) Získaný rozmer uzla (*priemer kružnice*) bol využitý na vytvorenie gule v elementárnej bunke
- b) Rozdelenie elementárnej bunky do jednej osminy = veľkosť uzla prislúchajúca jednému prútu
- c) Preloženie kružnicou tromi vrcholov na povrchu gule a odčítanie hodnoty – c)



Obr. 4-8 Obrázok s princípom získania rozmeru uzla pre numerické simulácie.

4.4 Analytický prístup

Na začiatku riešenia diplomovej práce bol využitý aj analytický prístup, ktorý slúžil na overenie správneho postupu práce. Výpočet prebiehal pomocou skriptu vytvoreného v programe MATLAB R2021a. Centrom záujmu výpočtu bola zjednodušená situácia namáhania jedného prúta z elementárnej bunky typu BCC. Proces zjednodušenia je zobrazený na Obr. 4-9, z ktorého je taktiež možné vyčítať charakteristické rozmery. Veľkosť elementárnej bunky bola 10 mm, čo predstavovalo 8,661 mm u prútov vyskytujúcich sa v elementárnej bunke pod uhlom $35,26^\circ$. Analýza prebehla pri priemeroch prútov v rozmedzí 0,5-1,5 mm s prírastkom 0,05 mm. Analytické výpočty prebehli na **Skúšobnom materiálovom modeli** (viac v kapitole 4.5.2). Pomocou jednoduchej analytiky bola určená hodnota kritickej sily potrebnej k narušeniu vzpernej stability. Výpočet prebiehal v troch hlavných častiach:



Obr. 4-9 Prevedenie výpočtu do problematiky jedného prúta.

Ako prvé bolo nutné zistiť šťahosť prútov pri jednotlivých priemeroch a či dochádza k zlyhaniu z dôvodu straty vzpernej stability. Rovnica (3) uvádza vzťah na výpočet šťahlosti prútov [21, 22].

$$Sl = \frac{Le}{Rg} \quad (3)$$

kde, Sl – šťahosť prútov [-], Le – efektívna dĺžka prúta [mm] a Rg – polomer otáčania [mm].

Efektívna dĺžka prúta je počítaná rovnicou (4), pričom je nutné poznať faktor efektívnej dĺžky ktorý je možné určiť pomocou Obr. 4-10.

$$Le = K \cdot L \quad (4)$$

kde, Le – efektívna dĺžka [mm], L – dĺžka prúta [mm] a K – faktor efektívnej dĺžky [-].

End Condition:	Pinned-Pinned	Fixed-Fixed	Fixed-Pinned	Fixed-Free
Illustration:				
Theoretical Effective Length Factor, K :	1	0.5	0.699	2

Obr. 4-10 Obrázok s hodnotami faktoru efektívnej dĺžky [21].

Výpočet na posúdenie straty vzpernej stability prebiehal podľa nasledujúcej rovnice (5) [21, 22].

$$H_v = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} \quad (5)$$

kde, H_V – štíhlostná hranica narušenia vzpernej stability [-], E – modul pružnosti materiálu [MPa] a σ_k – medza klzu materiálu [MPa].

Druhá časť sa zaoberala výpočtom kritickej sily potrebnej k dosiahnutiu straty vzpernej stability. Najskôr bola posúdená nutnosť využitia Eulerovej alebo Johnsonovej teórie. Hranica využitia Johnsonovej teórie bola určená na základe štíhlosti prútov v nasledujúcej rovnici (6) [22].

$$C = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_k}} \quad (6)$$

kde, C – štíhlostná hranica využitia Johnsonovej teórie [-].

Následne bola kritická sila dopočítaná prostredníctvom Eulerovej teórie (rovnica (7)), alebo pomocou Johnsonovej teórie (rovnica (8)) [21–23].

$$F_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{Le^2} \quad (7)$$

kde, F_E – kritická sila vzperu – Eulerova teória [N], J – kvadratický moment prierezu [mm⁴].

$$F_J = \sigma_k \cdot S \cdot \left(1 - \frac{(\sigma_k \cdot Sl^2)}{4 \cdot E \cdot \pi^2}\right) \quad (8)$$

kde, F_J – kritická sila vzperu – Johnsonova teória [N], S – prierez prútu [mm²].

Tretia časť výpočtu sa zaoberala maximálnou silou potrebnou pri namáhaní na prostý tlak (rovnica (9)), aby došlo k porušeniu materiálu (dosiahnutiu medze sklzu).

$$F_N = \sigma_k \cdot S \quad (9)$$

kde, F_N – Sila Namáhania [N].

4.5 Numerické simulácie

4.5.1 Softvérové vybavenie

Numerické simulácie prebehli v softvéri Ansys Workbench 2021 R2, ktorý pracoval na princípe metódy konečných prvkov. Konkrétne boli využité moduly:

- Static Structural – Statické výpočty skúmajúce dopad geometrických imperfekcií na úrovni elementárnej bunky a mikro-prútovej štruktúry + úvodná analýza minimálnej veľkosti mikro-prútovej štruktúry
- Eigenvalue Buckling – Úvodná analýza straty vzpernej stability
- Explicit Dynamics – Simulácie mechanickej skúšky vykonanej na pádovom testeri

Model geometrie pre numerické simulácie bol vytvorený pomocou programu DesignModeler, ktorý je súčasťou softvéru Ansys Workbench. Využitý program umožnil

jednoduchú úpravu geometrie pomocou parametrizácie a priame prepojenie na numerické simulácie.

4.5.2 Skúšobný materiálový model

Na začiatku riešenia diplomovej práce boli vykonané analytické výpočty a numerické simulácie, ktoré potvrdzovali platnosť a objasňovali fungovanie princípov v mikroprútových štruktúrach. Spomenuté simulácie využívali **Skúšobný nelineárny materiál** s hodnotami mechanických vlastností popísanými v Tab. 4-5. Následne v simuláciách študujúcich dopad geometrických imperfekcií a simuláciách mechanickej skúšky bol využitý model materiálu, ktorý bol získaný z prútových vzoriek tvorených technológiou SLM (viac v kapitole 4.2.2).

Tab. 4-5 Tabuľka mechanických vlastností Skúšobného materiálu.

E [GPa]	Re [MPa]	E_t [MPa]	μ [-]
193	210	1 800	0,31

4.5.3 Metódy využité v Numerických simuláciách – metóda konečných prvkov

Simulačný prístup sa opiera o numerické simulácie založené na metóde konečných prvkov, ktoré prebehli v programe ANSYS Workbench 2021 R2. Spomenutá metóda funguje na princípe rozdelenia telies na malé oblasti s konečným počtom, ktoré nazývame tiež elementy. K vytvoreniu uzlov dôjde v každom elemente pomocou aproximačnej funkcie. Následne je každému elementu priradený súbor vlastností, konkrétne matica tuhosti (k), vektor uzlových posuvov (u) a vektor sily v uzloch (F). Potom výpočet prebieha pomocou rovnice tuhosti (10) [24]:

$$k \cdot u = F(t) \quad (10)$$

Na princípe tejto rovnice fungoval modul Static structural a Equivalent buckling, ktoré boli využívané počas riešenia statických problémov diplomovej práce. Jedná sa o odvodenú rovnicu z rovnice (11) uvedenej nižšie, ktorá je doplnená o ďalšie premenné ako matica tuhosti (c), matica hmotnosti (m), vektor rýchlosti (u') a vektor zrýchlenia (u'') [24].

$$m \cdot u'' + c \cdot u' + k \cdot u = F(t) \quad (11)$$

Na princípe rovnice (11) fungoval modul Explicit dynamics [24], ktorý bol využitý na riešenie explicitných úloh pri rýchlych dejoch, tzn. simulácie – mechanickej skúšky. Explicitné analýzy sa využívajú pre riešenie úloh, kedy závisí na rýchlosti zaťažovania. Využíva sa tu metóda premeny energie z jednej formy na inú. Ide o rozdielny prístup od

predchádzajúcich modelov ktoré sú založené na rovnováhe síl a taktiež tu nebýva problém s konvergenciou riešenia.

Využitie typy elementov konečno prvkovej siete:

Počas simulácií boli využité tri druhy elementov konečno prvkovej siete geometrie: Prútové, plošné a objemové elementy. Konkrétne hovoríme o elementoch typu [24]:

Typ elementu **Tet10** boli využité objemové elementy. Štvorsteny sú definované prostredníctvom desiatich uzlov, pričom každý umožňuje posuvy vo smeroch x, y a z [24]. Objemové elementy typu Tet10 dokážu reagovať na plasticitu, hyperelasticitu, spevnenie materiálu ale aj veľké deformácie. Uzly využitých typov plošných elementov **Tri3** a **Quad4** umožňujú posuvy v smeroch x, y a z.

Elementy typu **Beam188** sú založené na princípe Tymošenkovej teórie nosníka. Spomenuté prútové elementy majú šesť respektíve sedem stupňov voľnosti v každom uzle [24]. Tri posuvy v smeroch x, y a z a rotácie okolo osi x, y a z. Siedmy stupeň voľnosti je voliteľný a hovoríme o veľkosti deformácie. Využitie prútových elementov je vhodné pre lineárne aplikácie, aplikácie s veľkou rotáciou a nelineárne aplikácie s veľkým namáhaním.

Nastavené kontakty:

Pri všetkých simuláciách boli využívané kontakty „Bonded“. Pri nastavení typu kontaktu boli využité dve možnosti: „Nodes On Edge“ a „Line Segments“.

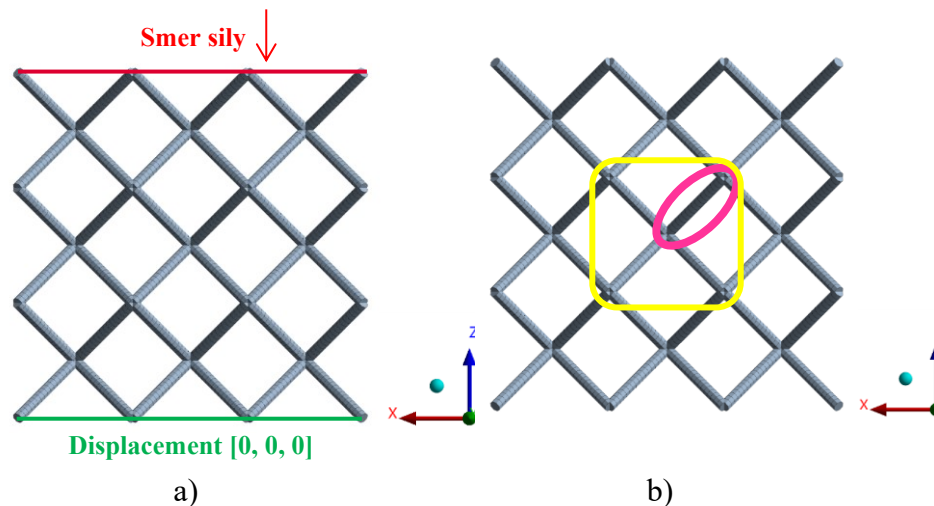
Kontakt typu **Nodes On Edge** [24], môže byť využitý na reprezentovanie kontaktu a sklzu medzi dvoma povrchmi. Povrchy môžu byť definované ako dvojice uzly-plocha a úsečka-plocha pre analýzy vykonané v 2D alebo 3D priestore. **Typ kontaktu Nodes On Edge využíva prepojenie uzlov jedného telesa s plochou druhého telesa.**

Druhý typ kontaktu **Line Segments** [24], môže byť taktiež využitý na reprezentovanie kontaktu sklzu medzi dvoma 3D povrchmi a deformovateľnými úsečkami. Typy využitej geometrie v kontakte sú prút-plocha, hrana-plocha a prút-prút alebo hrana-hrana pre analýzy vykonané v 3D priestore. V prípade prútového typu geometrie hovoríme o elementoch typu BEAM188 alebo BEAM189. **Typ kontaktu Line Segments využíva prepojenie úsečiek hrán na oboch telesách v kontakte.** Popísaný typ kontaktu je vhodnejší pri nelineárnych a nestabilných kontaktoch, a taktiež pri využití nehomogénnych materiálov.

4.5.4 Numerická simulácia – Rozmerová analýza štruktúry

Počiatkom simulačnej časti práce boli numerické simulácie zaoberajúce sa minimálnym rozmerom (počtom buniek v x, y a z smere) mikro-prútovej štruktúry. Simulácie prebehli na štruktúre využívajúcej prútovú geometriu, z dôvodu zníženia náročnosti na výpočtový výkon. Veľkosť elementov konečno prvkovej siete bola nastavená na 0,5 mm. Štruktúra typu BCC dosahovala veľkosti elementárnej bunky 10 mm a priemer prútu bol 1 mm. Simulácie prebehli s veľkosťou štruktúry vždy s rovnakým počtom buniek v každom smere (x, y a z),

napríklad 3 x 3 x 3. Simulácie prebiehali pri hodnotách 3 až 8 buniek. Nastavenie okrajových podmienok pri každom meraní bolo vždy rovnaké. V spodnej časti bola štruktúra ukotvená v uzloch pomocou väzby **Displacement**, ktorá zamedzila pohybu vo všetkých osiach (x, y a z). Vo vrchnej časti štruktúry pôsobila **Sila** v smere osi z (zložky x a y boli nulové), a tým samotnú štruktúru deformovala. Simulácia prebehla vždy pri siedmich rôznych hodnotách sily, pričom štruktúry boli vždy zaťažované iba do medze sklzu materiálu. Využitý bol **Skúšobný materiálový model**.



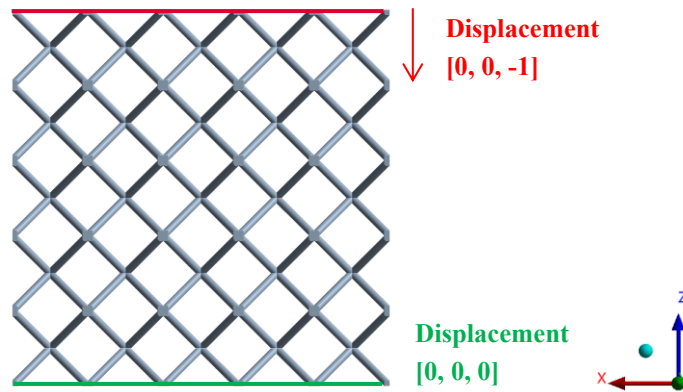
Obr. 4-11 Obrázok nastavenia a vyhodnotenia simulácie rozmerovej analýzy štruktúry.

Vyhodnocovanie výsledkov:

Sledovaný výsledok bol pomeru medzi axiálnou silou a ohybovým momentom pôsobiacim v prúte. Konkrétne hovoríme o prúte mikro-prútovej štruktúry, nachádzajúcom sa v prostrednej elementárnej bunke, v strednej vrstve štruktúry (v smere osi z) ako je možné vidieť na Obr. 4-11 b) (vyznačené žltým štvorcem). Vyhodnotené boli vždy výsledky **vrchného prúta bunky**.

4.5.5 Numerická simulácia – Zjednodušenie modelu geometrie

Súčasťou simulačnej časti bol súbor simulácii, ktorý slúžil na zjednodušenie modelu geometrie pre simulácie cez ktoré bol následne posúdený dopad geometrických imperfekcií. V spodnej časti bolo zamedzené pohybu väzbou **Displacement** vo všetkých smeroch [0; 0; 0], zatiaľ čo vo vrchnej časti boli štruktúry stláčané väzbou **Displacement** v osi z o 1 mm [0; 0; -1] (viď Obr. 4-12). Simulácie prebiehali taktiež s využitím **Skúšobného materiálového modelu**.



Obr. 4-12 Spôsob zaťaženia mikro-prútovej štruktúry.

Solid model:

Prvý využitý typ geometrie bol tvorený objemovými elementami, v celom objeme štruktúry. Výsledky boli východiskovým súborom poznatkov pri porovnávaní nasledujúcich zjednodušených modelov. Pri porovnaní bola využívaná prostredná elementárna bunka, ktorá bola vytvorená ako samostatné teleso (viditeľné na obrázku Obr. 4-14 a)). Simulácie vždy prebehli pri dvoch rôznych priemeroch prúta, konkrétne 1 mm a 1,5 mm.

Konečno prvková sieť bola tvorená prostredníctvom štvorstenov, pričom kvalita bola ovplyvnená dostupným výpočtovým výkonom. Konkrétne hovoríme o hodnotách veľkosti elementov 0,2 mm, respektíve 0,25 mm v prípade priemeru 1 mm, respektíve 1,5 mm. Vo všeobecnosti bolo dosiahnutých aspoň 4 elementov v priemere prúta.

Beam-Solid 2 x 2 model:

Hlavnou prednosťou druhého využitého modelu geometrie bolo zjednodušenie výpočtu, čo priamo umožnilo uskutočniť náročné simulácie skúmajúce dopad geometrických imperfekcií. Väčšina štruktúry je tvorená prútovým typom geometrie, čo znížilo výpočtovú náročnosť. V oblasti záujmu (stred štruktúry) je následne vložená geometria pozostávajúca z objemových elementov, konkrétne o veľkosti 2 x 2 elementárnych buniek (Obr. 4-14 b)). Kontakt v mieste napojenia prútových a objemových elementov bol nastavený na typ Bonded (Line segments – viac na str. 49). Podobne ako v prípade Solid modelu bola prostredná elementárna bunka vytvorená ako samostatné teleso.

Z dôvodu obmedzenia výpočtového výkonu bola konečno prvková sieť nastavená nasledovne: Pri priemere 1 mm bola veľkosť prútových elementov 0,35 mm. Vonkajšia časť objemovej geometrie 0,25 mm (aspoň štyri elementy v priemere: $1 / 4 = 0,25$) a prostredná elementárna bunka 0,2 mm (päť elementov v priemere: $1 / 5 = 0,2$). Veľkosť prútových elementov pri priemere 1,5 mm bola rovnaká ako v predchádzajúcom prípade. Následne boli uplatnené podobné podmienky tzn., vonkajšia časť objemovej geometrie 0,3 mm a prostredná elementárna bunka 0,2 mm.

Beam-Solid 1 x 1 model:

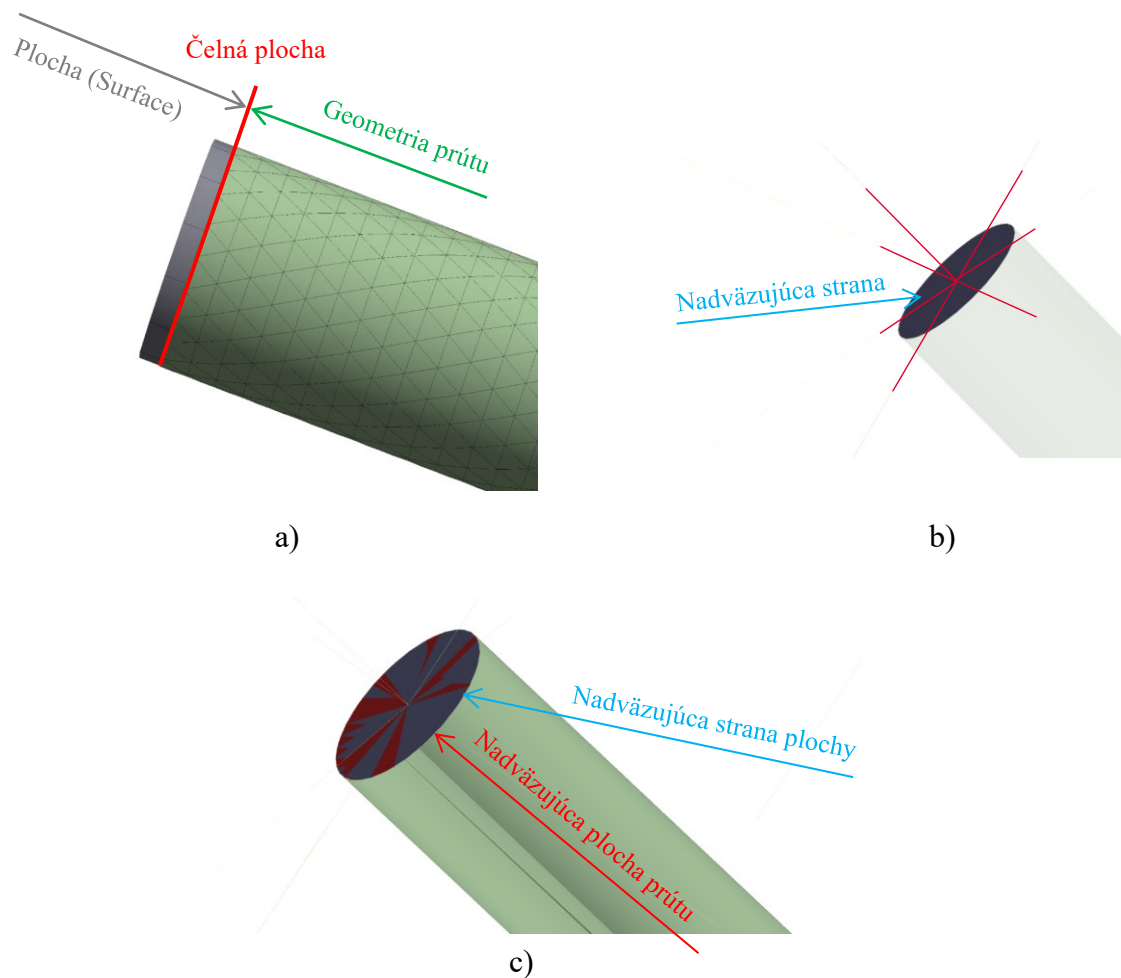
K zníženiu výpočtovej náročnosti bol vytvorený nový model geometrie, ktorý sa oproti predchádzajúcemu líši veľkosťou geometrie tvorenou objemovými elementmi (Obr. 4-14 c)). Namiesto veľkosti objemovej geometrie 2 x 2, bola využitá iba jedna elementárna bunka uprostred štruktúry. Zníženie počtu elementov v konečno prvkovej sieti umožnilo nastavenie s menšou veľkosťou štvorstenu, čo sa prejavilo pri hodnote priemernej kvality siete. Konkrétne hovoríme o hodnote veľkosti elementov 0,15 mm (priemer prúta 1 mm) a 0,22 mm (priemer 1,5 mm). Pri tomto nastavení bolo dosiahnutých osem elementov na priemere prúta. Konečno prvková sieť prúťových elementov mala veľkosť nastavenú na 0,35 mm.

Objemová elementárna bunka bola s okolitými prúťovými elementmi spojená prostredníctvom kontaktu Bonded. Z dôvodov popísaných v kapitole výsledkov (kapitola 5.3.3), boli nastavené 2 typy kontaktu. Nodes On Edge a Line Segments (viac na str. 49), pričom oba typy kontaktu spôsobovali výskyt lokálnych extrémov, ktorý bol vyriešený až nasledujúcim modelom geometrie.

Beam-Surface-Solid model:

Kritickým miestom bol kontakt spájajúci objemovú a prúťovú geometriu, preto bola do kontaktu vložená plocha (Surface). Plocha má veľmi malú hrúbku, konkrétne 0,1 mm, pričom bola osadená do vonkajšej strany na povrchu objemovej bunky (Obr. 4-13 a)). Materiálovo mala plocha nadefinovaný 10 krát väčší modul pružnosti. Následne vzniká dvojité kontakty: Prúťové elementy a vonkajší povrch plochy (obr. Obr. 4-13 b)). Druhá časť kontaktu je tvorená vnútornou stranou plochy a objemovou geometriou elementárnej bunky (Obr. 4-13 c)).

Z dôvodu rovnomerného rozloženia napätia bol kontakt nastavený typu Bonded – Line segments. Veľkosť konečno prvkovej siete plošných elementov bola 0,25 a 0,32 mm pre priemer 1 a 1,5 mm. Ostatné nastavenia konečno prvkovej siete boli rovnaké ako v predchádzajúcom modeli geometrie.

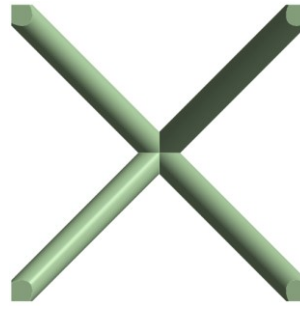
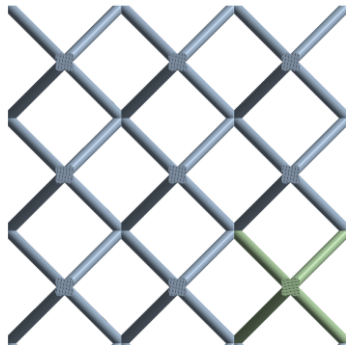


Obr. 4-13 Nastavenie kontaktu modelu geometrie Beam-Surface-Solid.

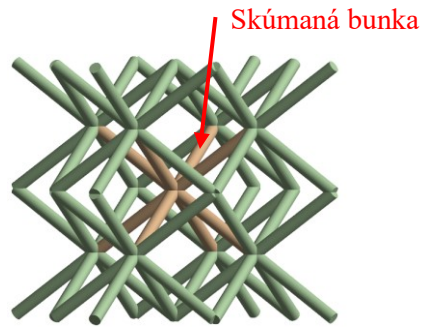
Beam-Surface-Solid-modifikovaný model:

Pre vierohodnejšie namodelovania zaťaženia vyskytujúceho sa v mikro-prútovej štruktúre bola časť štruktúry tvorená prútovými elementmi namodelovaná po vzore práce Labeas [16]. Zmena zahrňovala úpravu prútových elementov v mieste uzlov, o 40 % väčší priemer do vzdialenosti $1 / 10$ dĺžky prútu. Výsledné spracovanie geometrie modelu je možné vidieť na obrázku Obr. 4-14 e).

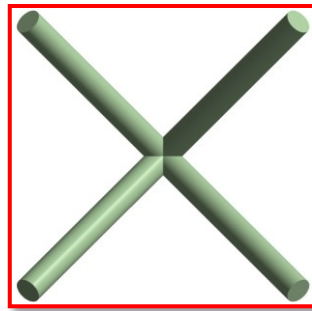
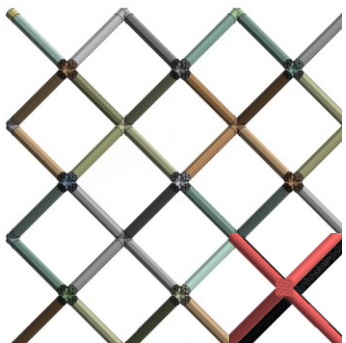
a) Solid



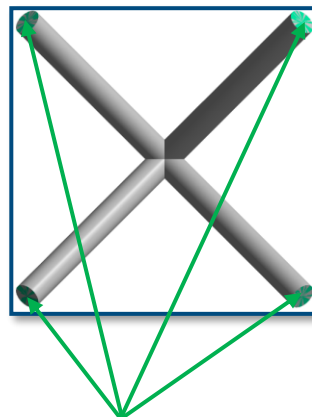
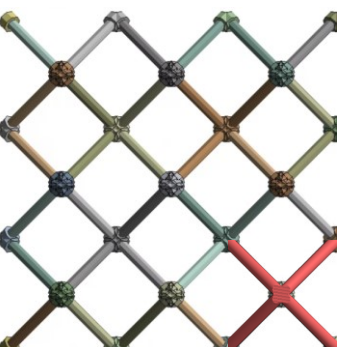
b) Beam-Solid
2 x 2



c) Beam-Solid
1 x 1



d) Beam-Surface-Solid



e) Beam-Surface-Solid-mod.

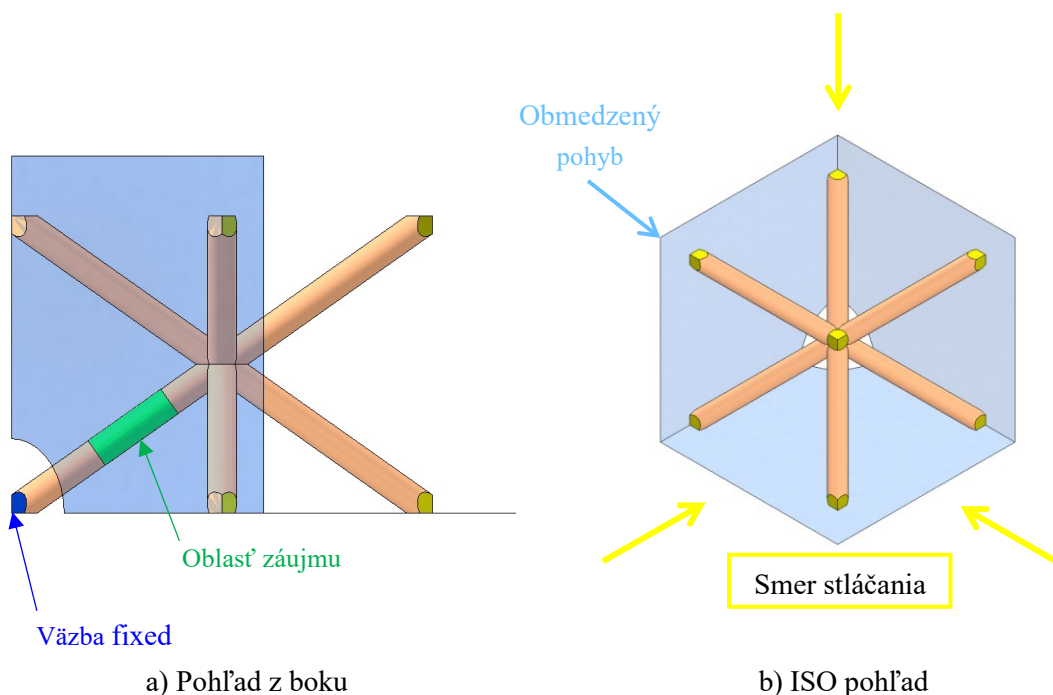
Plochy na povrchu bunky
(súčasť modelu B-S-S)

Obr. 4-14 Popísanie geometrických modelov zjednodušeného modelu.

4.5.6 Numerická simulácia – Elementárna bunka

Nasledujúcou častou simulačného prístupu boli simulácie na elementárnej bunke mikro-prútovej štruktúry. Geometria obsahovala bunku s veľkosťou 10 mm a priemer prútu sa postupne zvyšoval v hodnotách od 0,5 - 2 mm s 0,05 mm prírastkami.

Okrajové podmienky simulácie boli nastavené tak aby reprezentovali situáciu vyskytujúcu sa u buniek nachádzajúcich sa v centre mikro-prútovej štruktúry a nedochádzalo k ovplyvneniu od okraja štruktúry. Bunka bola rovnomerne stláčaná z troch strán pomocou väzby displacement aplikovanej na koncových plochách prúta, o hodnotu 0,1 – 0,15 mm (Obr. 4-15 b), 3 **žlté šípky** v závislosti od priemeru prúta. Trom stranám naproti pohybujúcim sa bol zamedzený pohyb pomocou väzby **Displacement** (Obr. 4-15 b), modré plochy) vždy v smere kolmom k pohybu. Prút ktorý prechádzal troma rovinami ktoré zamedzovali pohyb vo všetkých smeroch bol uchytený pomocou väzby **Fixed** (Obr. 4-15 a). Počas simulácie došlo k rovnomernému stlačeniu bunky, v smere žltých šípok vyznačených na Obr. 4-15 b). Ako môžeme vidieť, prút uchytený väzbou Fixed je rozdelený do troch telies. Toto rozdelenie umožnilo zamerať sa na výsledky v predpokladaných miestach zlyhania prúta a tak odfiltrovať rôzne singularities (Obr. 4-15 a), **zelená šípka – Oblasť záujmu**).



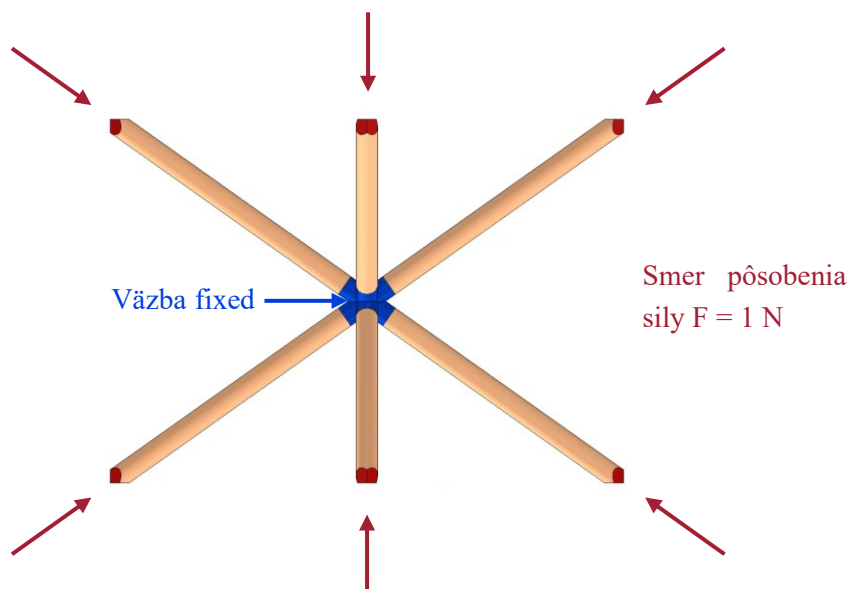
Obr. 4-15 Obrázok nastavenia simulácie elementárnej bunky.

4.5.7 Numerická simulácia – Elementárna bunka – analýza vzperu

K overeniu základných princípov namáhania vyskytujúcich sa na úrovni elementárnej bunky bola vykonaná analýza straty vzpernej stability. Samotná simulácia dopĺňa riešenie zjednodušeného modelu riešeného prostredníctvom analytického prístupu (kapitola 4.4).

Hlavnou náplňou simulácie bolo stanovenie faktoru efektívnej dĺžky, ktorý bol následne využitý v analytickom prístupe.

Základnou geometriou pre simuláciu bola elementárna bunka s veľkosťou 10 mm a priemerom prúta 0,6 mm. Bunka bola tvorená z geometrie využívajúcej objemových elementov. Samotná bunka bola rozdelená do viacerých častí, konkrétne 8 prútov a jedného uzla (vid. Obr. 4-16). Uchytenie prebehlo prostredníctvom väzby **Fixed** na vonkajšej ploche uzla, zatiaľ čo všetky prúty boli zaťažované **silou** o veľkosti **1 N** v osi prútov.



Obr. 4-16 Obrázok nastavenia simulácie analýzy vzperu.

4.5.8 Numerické simulácie pre štúdium dopadu geometrických imperfekcií

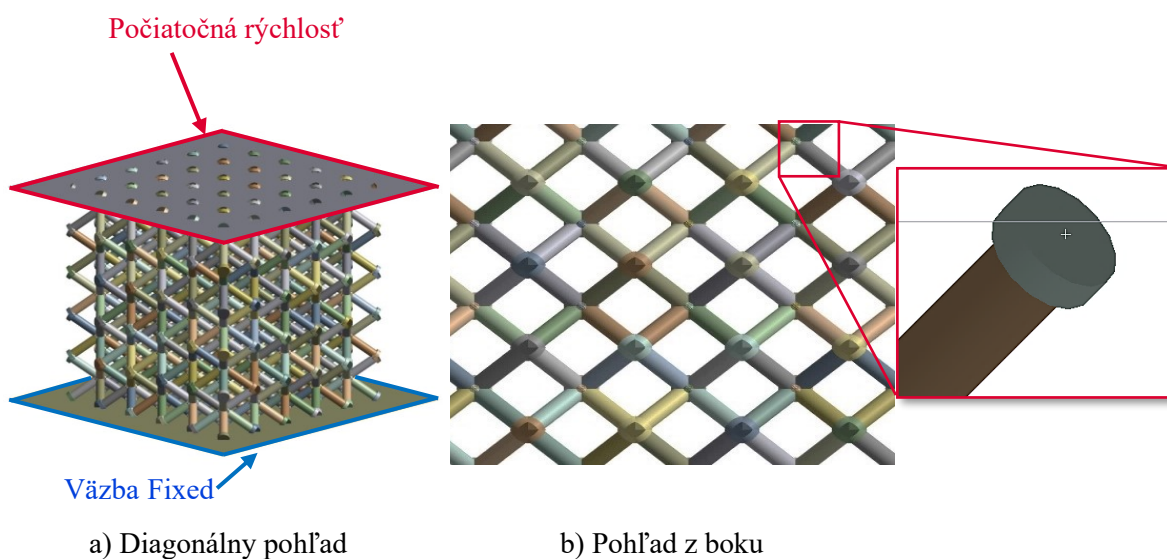
Najväčšou časťou numerických simulácií bola časť simulácií, ktoré sa zaoberali dopadom geometrických imperfekcií. Celý súbor simulácií prebiehal v dvoch rovinách:

- **Simulácie elementárnej bunky:** Simulácie ktorých okrajové podmienky boli rovnaké ako sú popísané v kapitole 4.5.6. Geometria bola upravovaná na základe dát získaných z experimentu č. 1 (priemer prierezu a tvar prierezu), pričom využitá metóda úpravy geometrie vychádzala z porovnania výsledkov medzi experimentom č. 2 a numerickými simuláciami – mechanickej skúšky.
- **Simulácie mikro-prútovej štruktúry:** Typ simulácií ktoré využívali model geometrie Beam-Surface-Solid-modifikovaný z kapitoly 4.5.5. Geometria prútov bola upravovaná rovnakým spôsobom ako pri simuláciách elementárnej bunky. Okrajové podmienky boli rovnaké ako v kapitole 4.5.5 až na mieru stlačenia štruktúry, ktorá sa pohybovala na úrovni 5+ mm v závislosti od priemeru prúta, aby došlo k zlyhaniu štruktúry (pokles reakčnej sily od podložky).

4.5.9 Numerická simulácia – Mechanickej skúšky

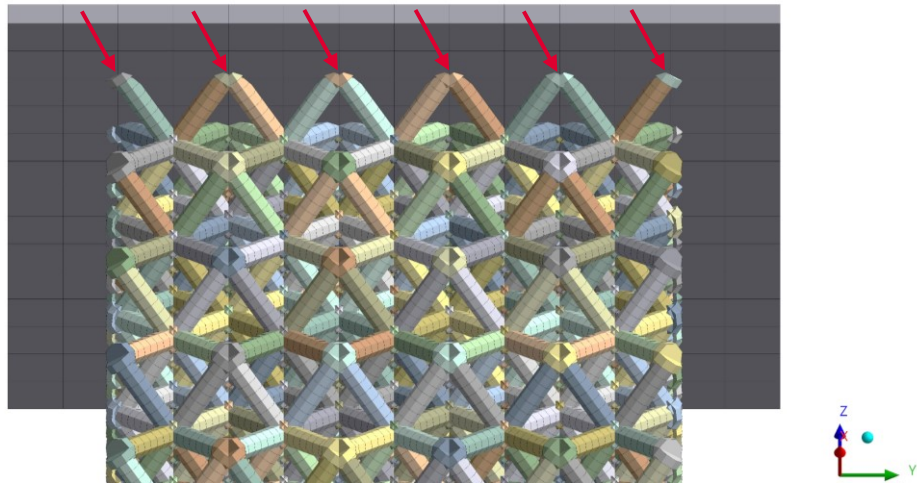
Jednalo sa o sériu simulácií, ktorá odzrkadľovala podmienky vyskytujúce sa pri mechanickej skúške, vykonanej na pádovom testerí. Simulácie využívali poznatky z oboch experimentov. Konkrétne z experimentu č. 1 boli využité dáta reálnej geometrie – hodnota priemeru prierezu a rozmery eliptického prierezu. Z experimentu č. 2 boli využívané informácie o veľkosti deformácie a reakčnej sily počas nárazu.

Geometria pre simuláciu bola tvorená z prútových a plošných elementov, aby bolo možné čo najviac znížiť nároky na výpočtový výkon (viď Obr. 4-17). Vrchná a spodná plocha reprezentovali **razník** a **podložku** (Obr. 4-17 a)). Jednalo sa o plochy s hrúbkou 1 mm, ktoré boli nadefinované ako tuhé (Rigid) telesá. Plocha razníka mala nadefinovanú hustotu aby dosahovala hmotnosti 13,45 kg, čo odpovedalo hmotnosti pádovej hlavy pri reálnych testoch. Priblíženie v Obr. 4-17 b) zobrazuje vôľu o veľkosti 0,01 mm medzi prútmi a plochami. Prítomnosť vôľe bola nevyhnutná aby nedochádzalo k prieniku uzlov jednotlivých elementov geometrie (prúty a plochy), čo spôsobovalo chybu v simulácii. Spodná plocha bola zaväzbená prostredníctvom väzby **Fixed**, zatiaľ čo vrchnej ploche bola nastavená **Počiatočná rýchlosť** na úrovni 3 m/s, pričom hodnoty v simuláciách vychádzali z priemerných hodnôt získaných z experimentu číslo 2. Medzi štruktúrou a plochami bol nastavený statický a dynamický súčiniteľ trenia na úrovni 0,15, respektíve 0,1.

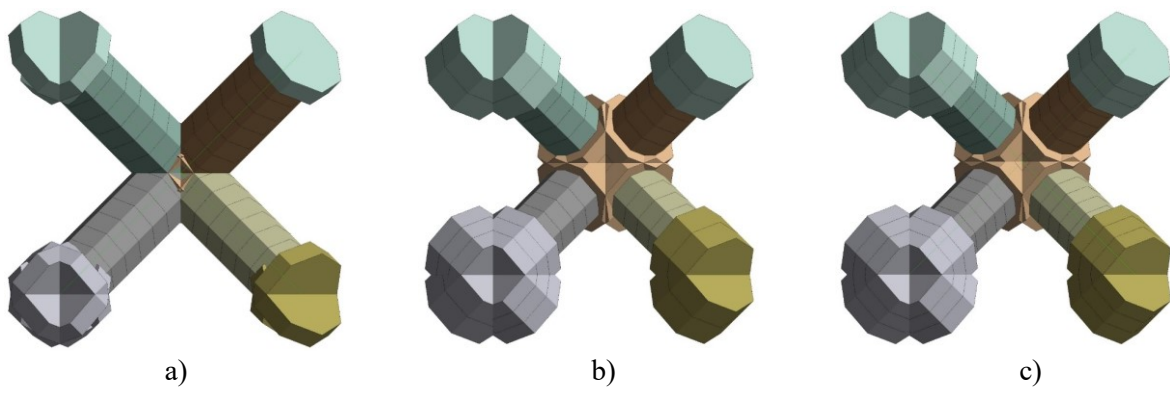


Obr. 4-17 Geometria simulácie mechanickej skúšky.

Nastavenie konečno prvkovej siete je možné vidieť na Obr. 4-18, s hodnotou 0,5 mm na prútoch štruktúry (podmienka aspoň 5 elementov medzi rozšírenými časťami viď Obr. 4-19 a), viac na str. 28) a 2,5 mm na vrchnej a spodnej ploche, ktoré neboli stredom záujmu. **Červené šípky** na Obr. 4-18 zobrazujú naviazanie uzlov konečno prvkovej siete prúta a vrchnej / spodnej plochy. Pri numerických simuláciách s reálnou veľkosťou uzlov (viď Obr. 4-19 b)), došlo k vytvoreniu iba štyroch elementov v oblasti medzi uzlami. Z tohto dôvodu bola hodnota konečno prvkovej siete zmenená na 0,4 mm (viď Obr. 4-19 c)).



Obr. 4-18 Nastavenie konečno prvkovej siete.



Obr. 4-19 Nastavenie konečno prvkovej siete.

4.6 Testované predikcie

Kritická rešerš a počiatočné numerické simulácie pomohli vysloviť predikcie k výskumnej otázke číslo 1.

A: Zväčšenie / zmenšenie priemeru prúta v geometrii pre numerické simulácie v závislosti z poznatkov získaných z experimentu č. 1, zníži odchýlku pod 5 % v hodnotách absorbovanej energie medzi simuláciami a experimentom. (Pri uvažovaní konštantného priemeru prútov).

B: Zväčšenie / zmenšenie priemeru prúta v geometrii pre numerické simulácie v závislosti z poznatkov získaných z experimentu č. 1 a s využitím modelu od Lei a kol., zníži odchýlku pod 5 % v hodnotách absorbovanej energie medzi simuláciami a experimentom. (Pri rozdelení prúta na úseky a konštantným priemerom prútov v jednotlivých častiach).

C: Úpravou tvaru prierezu prúta z ideálne kruhového na eliptický v geometrii pre numerické simulácie v závislosti z poznatkov získaných z experimentu č. 1, zníži odchýlku pod 5 % v hodnotách absorbovanej energie medzi simuláciami a experimentom.

V prípade druhej otázky, bola predikcia vytvorená na základe výsledkov od Dong a kol., pričom je nutné podotknúť, že ich výskum prebiehal na zliatine hliníka AlSi10Mg.

D: Zväčšovaním priemeru prúta v mikro-prútovej štruktúre je možné dosiahnuť hodnotu, kedy dostaneme odchýlku vo výsledkoch menšiu ako 5 % aj bez zahrnutia imperfekcií.

Vyslovené predikcie boli skúmané na skupine vzoriek mikro-prútových štruktúr typu BCC respektíve geometrii (segmenty štruktúr) spĺňajúcej predpoklady BCC štruktúr.

Tab. 4-3 Tabuľka závislých, nezávislých a kontrolovaných premenných.

	Nezávislé	Závisle	Kontrolované
Predikcia A	Priemer prúta	Absorbovaná energia	Mechanické vlastnosti materiálu, Procesné parametre výroby, Predpoklady geometrie BCC, Veľkosť elementárnej bunky, Veľkosť nárazovej energie
Predikcia B	Priemer prúta	Absorbovaná energia	
Predikcia C	Tvar prierezu prúta	Absorbovaná energia	
Predikcia D	Priemer prúta	Absorbovaná energia	

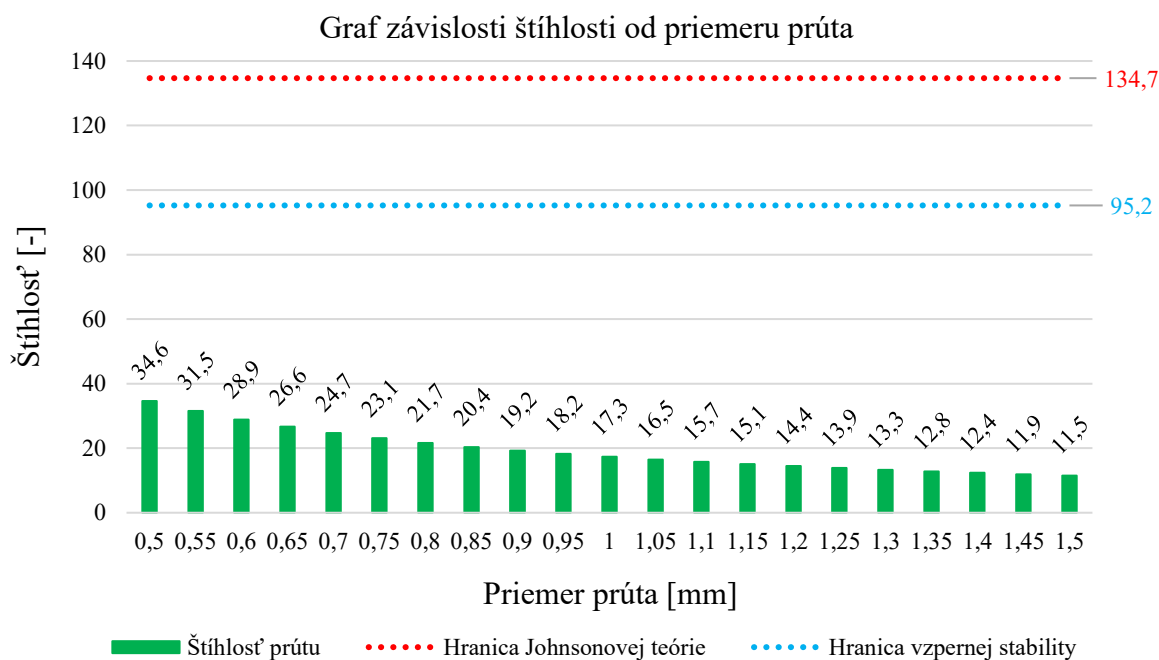
5 VÝSLEDKY

5.1 Porovnanie analytického prístupu a numerickej simulácie

5.1.1 Porovnanie síl analytického prístupu a numerickej simulácie

Súčasťou práce boli analytické výpočty, prostredníctvom ktorých bola získaná základná predstava o správaní sa štruktúr bez zahrnutia imperfekcií. Pozorovanými veličinami pri predikovanom zaťažovaní bola kritická sila pri strate vzpernej stability prútov, a taktiež sila spôsobujúca namáhanie na prostý tlak. Efektívna dĺžka odpovedala podmienkam pri zaťažovaní prúta s dvoma zafixovanými koncami (obmedzenie pohybu a rotácie) a bola zvolená na základe výsledkov z kapitoly 5.1.2.

Výsledky prvej časti analytického výpočtu sú zobrazené na Obr. 5-1, v podobe hodnôt štíhlosti prútov pre jednotlivé prierezy (vyznačené **zelenou farbou**). Ako môžeme vidieť bolo dosiahnutej maximálnej štíhlosti 34,6 pri priemere prúta 0,5 mm, ktorá klesá až na hodnotu 11,55 (pomocou rovnice (3) z kap. 4.4). V grafe je vyznačená i hranica straty vzpernej stability prostredníctvom **modrej farby**, ktorá dosahuje hodnoty 95,2 a pod ktorou už zlyhanie z dôvodu straty vzpernej stability nie je dominantné (pomocou rovnice (5) z kap. 4.4). Graf na Obr. 5-1 taktiež obsahuje hranicu využitia Johnsonovej teórie s hodnotou štíhlosti 134,7 (vyznačená **červenou farbou**), ktorá bola určená pomocou rovnice (6) z kap. 4.4. Jedná sa o medznú hodnotu, kedy by mal byť na výpočet kritickej sily využitý prístup vychádzajúci z Johnsonovej teórie.



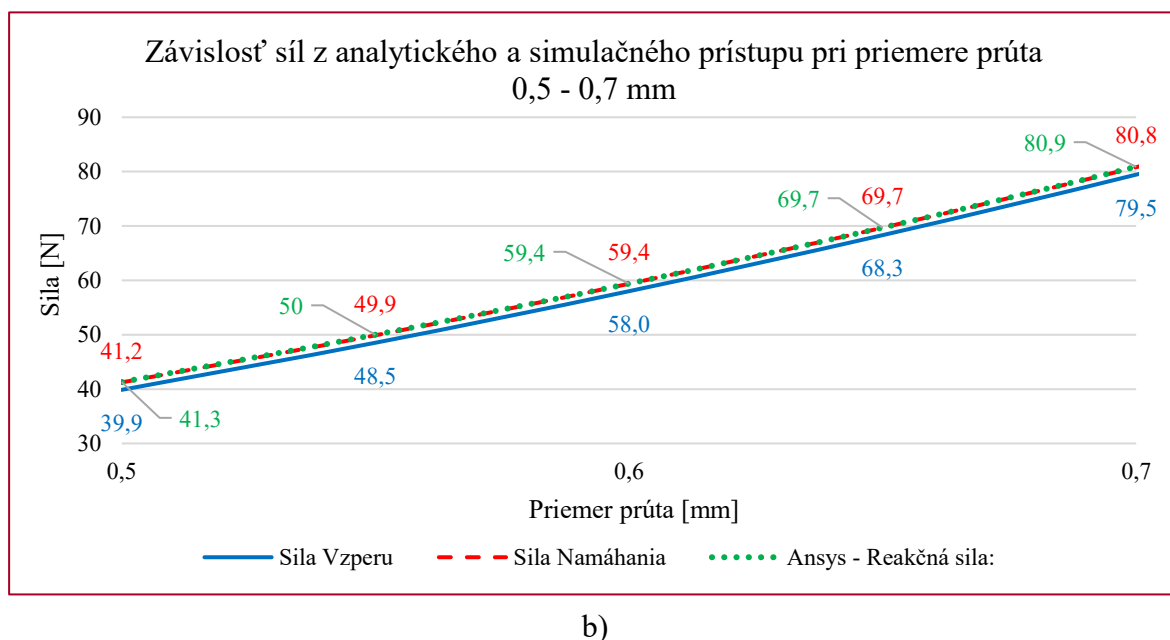
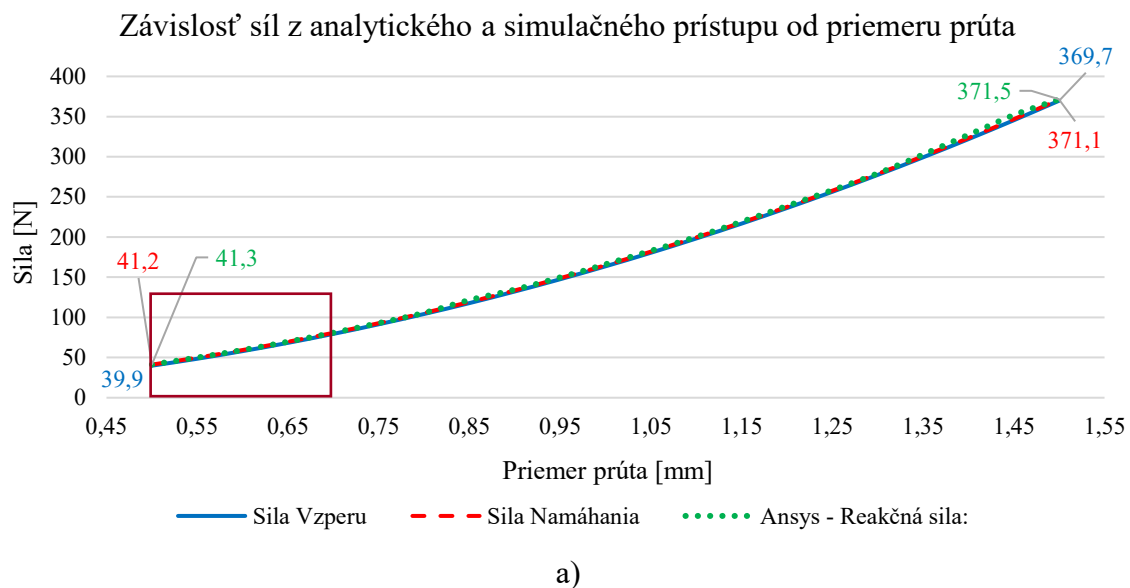
Obr. 5-1 Graf závislosti štíhlosti od priemeru prúta pri dĺžke 8,66 mm.

Druhá časť analytického výpočtu sa zaoberala veľkosťou kritickej sily potrebnej k dosiahnutiu straty **vzpernej stability** pri prútoch s vyššie popísanými predpokladmi (Obr. 5-2 **modrá závislosť**). Výpočet prebiehal s využitím Johnsonovej teórie, nakoľko z Obr. 5-1 je možné vidieť, že prúty dosahujú štihlosti v oblasti platnosti Johnsonovej teórie. V našom prípade sme došli pri priemere prútu 0,5 mm k hodnotám kritickej sily 39,87 N a pri hodnote priemeru 1,5 mm dosahujeme hodnôt 369,7 N.

Súčasťou tretej časti analytického výpočtu bol výpočet kritickej **Sily Namáhania** nutnej k dosiahnutiu medze sklzu v materiáli pri namáhaní prostým tlakom a následné porovnanie so **Silou Vzperu**. Tento typ zaťažovania odzrkadľoval situáciu pri numerických simuláciách vykonaných na elementárnej bunke. Obr. 5-2 a) zobrazuje priebeh kritickej sily potrebnej k dosiahnutiu straty vzpernej stability (Johnsonova teória) a maximálnu silu pri namáhaní prostým tlakom. Na Obr. 5-2 b) je zobrazená priblížená oblasť v rozsahu prútov 0,5 – 0,6 mm. Vo výsledku sme dosiahli pri priemere 0,5 mm hodnoty kritickej **Sily Vzperu** 39,9 N, zatiaľ čo 41,2 N pri **Sile od Namáhania** prostým tlakom. Pri priemere s hodnotou 1,5 mm sme sa pohybovali na hodnote 369,7 N respektíve 371,1 N.

V poslednej časti boli porovnané výsledky získané analytickými výpočtami s numerickými simuláciami elementárnej bunky. Z numerických simulácií bola porovnávaná Reakčná sila vznikajúca vo väzbe Fixed. Počas numerických simulácií sme došli pri priemere prútu 0,5 mm k hodnotám **Reakčnej sily** 41,3 N a pri hodnote priemeru 1,5 mm dosahujeme hodnôt 371,5 N.

Obr. 5-2 Obrázok 5-13 a) zobrazuje priebeh **Sily Vzperu** a **Sily Namáhania** (hodnoty získané analyticky), a taktiež **ANSYS - Reakčná sila** (získaná z numerických simulácií). Z Obr. 5-2 obrázku 5-13 b) ktorý je zväčšením v oblasti priemeru prútu 0,5 – 0,7 mm, je možné vidieť zhodnosť hodnôt ANSYS - Reakčná sila a Sily Namáhania. Sila Vzperu dosahuje nižších hodnôt.

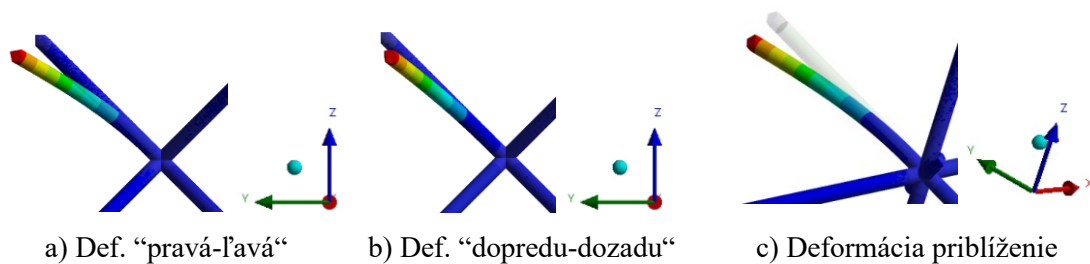


Obr. 5-2 Graf závislosti hodnôt síl z analytického a simulačného prístupu od priemeru prúta.

5.1.2 Numerická simulácia – Elementárna bunka – Analýza vzperu

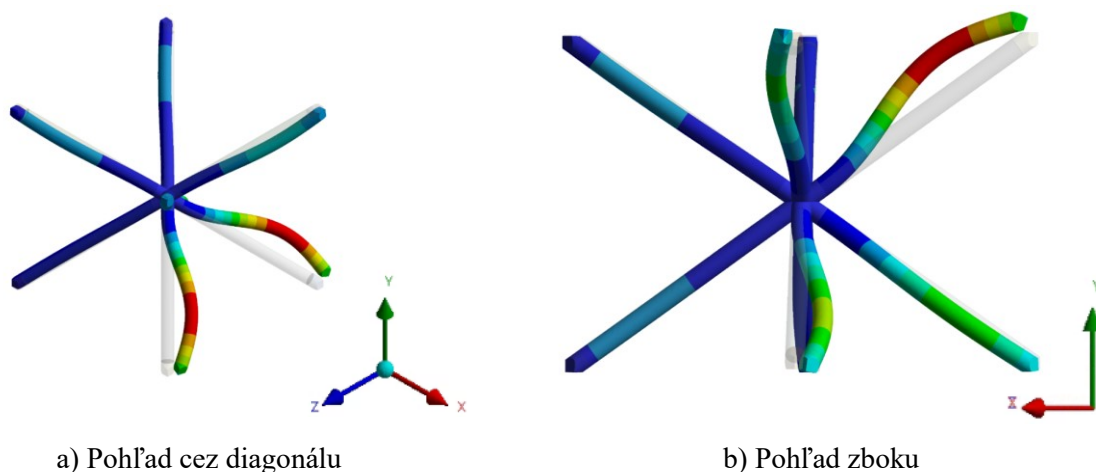
Na základe podmienok nadefinovaných v kapitole 4.5.7 bola vykonaná analýza tvaru deformácie elementárnej bunky z dôvodu straty vzpernej stability. Hľadaným výsledkom bol tvar zdeformovaných prútov, ktorý bol následne porovnaný s tabuľkovými hodnotami, čo slúžilo na určenie veľkosti efektívnej dĺžky prútu pre analytický výpočet.

Prvá séria deformácií (zobrazená na Obr. 5-3) zahrňovala deformácie každého prúta v dvoch smeroch, pričom veľkosť deformácie rástla smerom od uzla. Jednalo sa o deformácie v smere “pravá-ľavá“ (vid’ a)) a “dopredu-dozaďu“ (vid’ b)). Obr. 5-3 c) zobrazuje zdeformovaný a nezdeformovaný tvar prúta.



Obr. 5-3 Vyobrazenie tvaru deformácií.

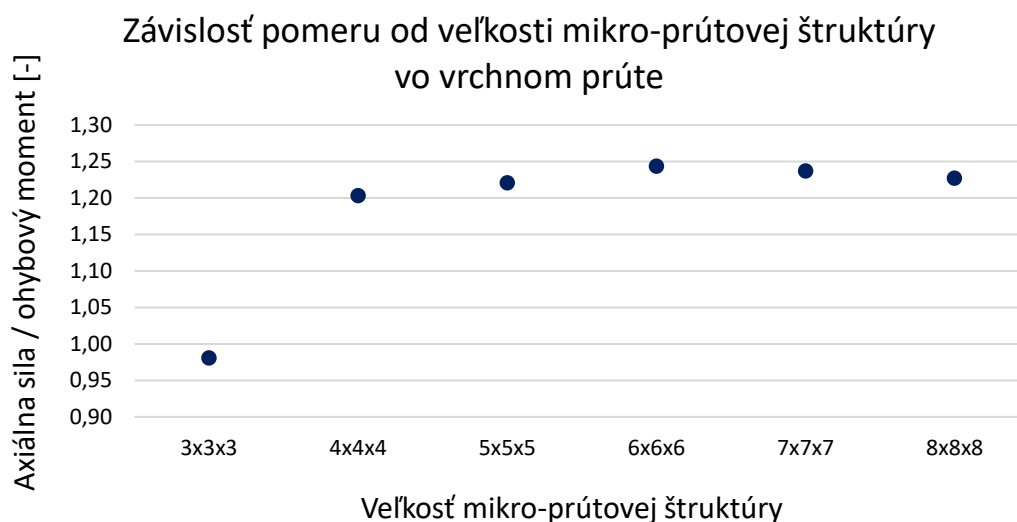
Druhá séria deformácií, formovala prúty elementárnej bunky do tvaru písmena “S“. Deformácie sú vyobrazené na Obr. 5-4. Z obrázka je možné vidieť, že deformácia narastá so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od uzla. Prút obsahuje aj inflexný bod deformácie ktorý spôsobí zahnutie prúta k pôvodnému tvaru, a to konkrétne v koncovej oblasti. Taktiež je možné povedať, že tvar deformácie je podobný s tvarom deformácie elementárnej bunky získaným pri deformačných skúškach vykonaných v minulosti (Obr. 5-12 d)).



Obr. 5-4 Vyobrazenie tvaru deformácie elementárnej bunky do písmena “S“.

5.2 Numerická simulácia – Rozmerová analýza štruktúry

Z výsledkov simulácie (viď Obr. 5-5) je možné pozorovať veľkú zmenu pomeru axiálnej sily a ohybového momentu pôsobiaceho v prúte. Pri veľkosti 3 elementárnych buniek na hrane sme dosiahli hodnotu pomeru 0,981, zatiaľ čo pri 8 bunkách sme dosiahli hodnoty 1,227. So zvyšujúcim počtom elementárnych buniek dochádza k zníženiu odchýlky pomeru. Najväčšia zmena pomeru nastala pri porovnaní výsledku pomeru mikro-prútových štruktúr s 3 a 4 elementárnymi bunkami na hrane, konkrétne až 0,222. Pri štruktúrach obsahujúcich 4 a viac buniek na hrane dochádza k zmene pomeru o 10 krát menšiu hodnotu ako v prípade 3 a 4 buniek na hrane. **Z tohto dôvodu nasledujúce simulácie prebiehali s piatimi bunkami na hrane.**



Obr. 5-5 Graf závislosti pomeru od veľkosti mikro-prútovej štruktúry vo vrchnom prúte.

5.3 Numerická simulácia - Zjednodušenie modelu geometrie

Ďalšia časť z kategórie numerických simulácií boli simulácie zaoberajúce sa zjednodušením modelu geometrie. Podmienkou bolo, aby výsledný zjednodušený model geometrie umožnil časovo efektívne skúmať dopad geometrických imperfekcií na úrovni mikro-prútovej štruktúry a elementárnej bunky. Počas procesu zjednodušenia boli riešené nasledujúce problémy:

5.3.1 Zníženie výpočtovej náročnosti

Počas tvorby zjednodušeného modelu bol kladený dôraz aj na zníženie výpočtovej náročnosti pri zachovaní kvality získaných výsledkov. Simulácie počas zjednodušovania geometrického modelu prebiehali vždy pre dve hodnoty priemeru. Konkrétne sa jednalo o priemery 1 a 1,5 mm. Hodnoty priemeru boli volené z ohľadom na dostupný výpočtový výkon.

Výpočty s využitím Solid geometrie slúžili k získaniu východiskového súboru poznatkov. Pri zjednodušených modeloch geometrie bolo kľúčové vytvorenie modelu geometrie s časovo efektívnym výpočtom. Dosiachnuté časy pri výpočtoch všetkých používaných geometrických modelov sú vypísané v Tab. 5-1.

Tab. 5-1 Tabuľka výpočtových časov pre rôzne geometrické modely.

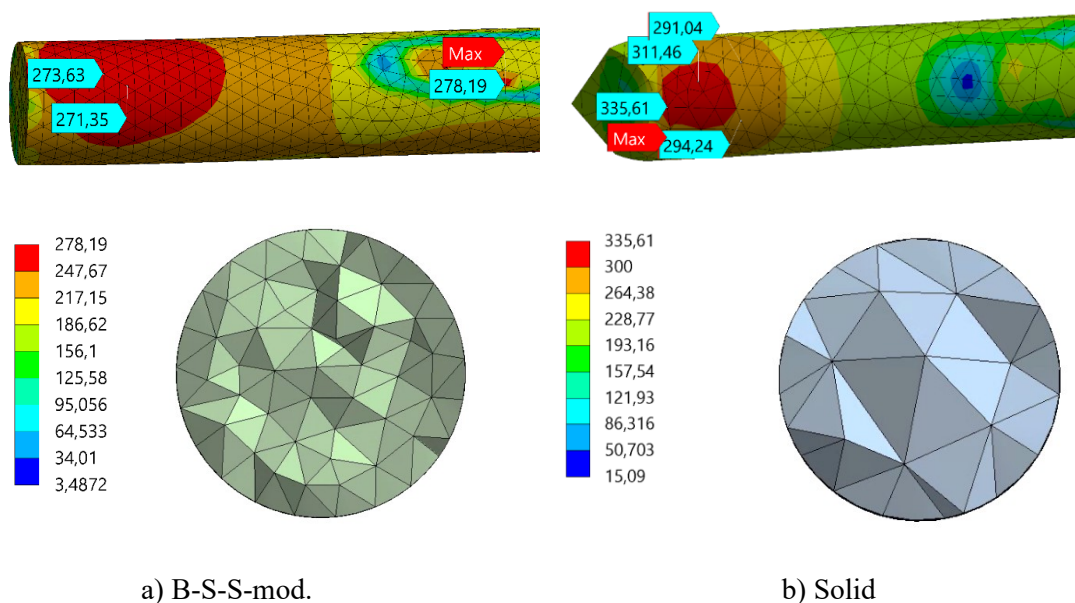
Geometrický model	Solid	B-S 2 x 2	B-S 1 x 1	B-S-S	B-S-S-mod.
Výpočtový čas					
d = 1 mm	8 hod	1 h 31 min	56 min	51 min	50 min
d = 1,5 mm	9 hod 7 min	4 h 51 min	34 min	32 min	52 min

5.3.2 Konečno prvková sieť Solid geometrického modelu

Výsledky Solid geometrického modelu boli považované za východiskový súbor poznatkov. Konkrétne bola u Solid modelu vytvorená konečno prvková sieť s aspoň 5 elementmi na priemere prúta, čo odpovedalo kvalite siete na priemernej úrovni 0,778 (z maximálne možnej 1) pre 1 mm priemer a 0,772 pri 1,5 mm priemere. V prípade modelu B-S-S-mod. bola konečno prvková sieť jemnejšia, čo odpovedalo priemernej kvalite 0,859 a 0,857 (z maximálne možnej 1) pre 1 mm a 1,5 mm priemer prúta. Rozloženie elementov v prútoch je možné vidieť na Obr. 5-6. Simulácie Solid modelu prebiehali pri horšej kvalite konečno prvkovej siete ako v prípade zjednodušených modelov, no aj napriek tomu išlo o kvalitné výsledky. Hodnoty konečno prvkovej siete pre jednotlivé modely geometrie sú vypísané v Tab. 5-2. Viac o nastavení konečno prvkovej siete je popísané v kapitole 4.5.5.

Tab. 5-2 Tabuľka priemernej hodnoty konečno prvkovej siete jednotlivých modelov geometrie.

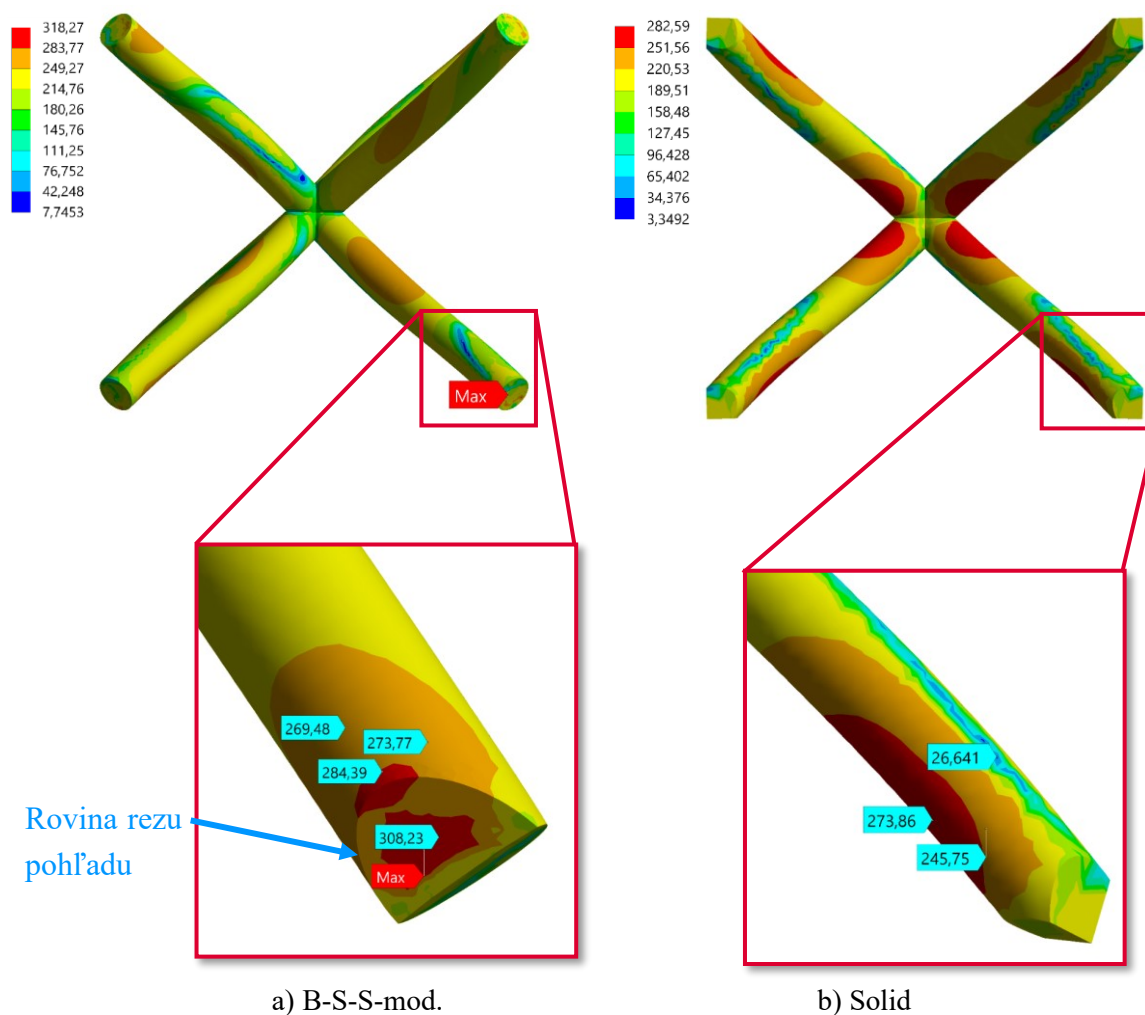
Priemer	Solid	B-S 2 x 2	B-S 1 x 1	B-S-S	B-S-S mod.
1 mm	0,778	0,86	0,859	0,859	0,859
1,5 mm	0,772	0,858	0,857	0,857	0,857



Obr. 5-6 Obrázok porovnania vznikajúcich extrémov redukovaného napätia a rozloženie elementov konečno prvkovej siete pri priemere prúta 1,5 mm.

Okrem rozloženia elementov na priemere prúta je taktiež na Obr. 5-6 možné vidieť vznikajúce singularity. V pravej časti obrázku je vyobrazený Solid model geometrie s lokálnymi hodnotami redukovaného napätia na úrovni 335,6 MPa, čo predstavovalo nárast voči okoliu o 20 MPa. V ľavej časti je vyobrazený priebeh napätia na prúte modelu B-S-S-mod. V pravej časti prúta došlo k lokálnemu extrému pri hodnote 278,2 MPa, zatiaľ čo ľavá časť prúta dosahuje maximálnu hodnotu na úrovni 273,6 MPa.

Vo výsledkoch geometrických modelov s priemerom 1 mm bolo taktiež možné pozorovať rozdielne rozloženie redukovaného napätia. Obr. 5-7 a) zobrazuje rozloženie napätia v geometrickom modeli B-S-S-mod. Môžeme vidieť, že hodnota maximálneho redukovaného napätia sa nachádza pod povrchom prúta. Taktiež bolo dosiahnutých väčších hodnôt napätia, konkrétne hovoríme o hodnote 318,3 MPa v extréme. V prípade geometrického modelu Solid bolo dosiahnutej najvyššej hodnoty 282,6 MPa, pričom sa jednalo o hodnotu redukovaného napätia na povrchu prúta (Obr. 5-7 b)).



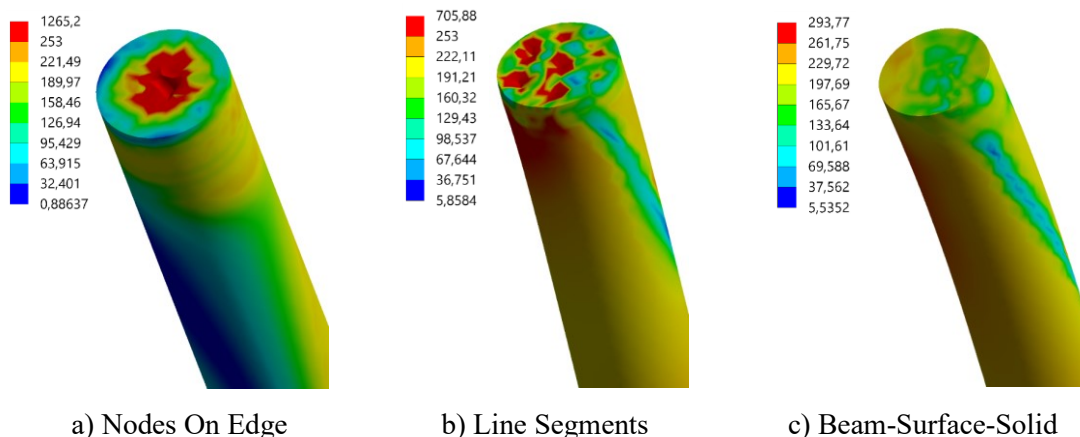
Obr. 5-7 Obrázok porovnania rozloženia redukovaného napätia pri priemere prúta 1 mm.

5.3.3 Problematika priameho kontaktu dvoch typov geometrie

Počas tvorby zjednodušeného modelu geometrie došlo vždy ku kontaktu objemovej a prútovej geometrie. Obr. 5-8 a) zobrazuje nežiadúci problém vyskytujúci sa v mieste napojenia, ktorý sa vyskytoval v modeloch geometrie Beam-Solid 2 x 2 a v nasledujúcich modeloch. V prípade modelu Beam-Solid 2 x 2 bolo možné popísaný problém sčasti zanedbať, nakoľko sa kontakt nenachádzal priamo v oblasti záujmu. V prípade geometrie Beam-Solid 1 x 1 vznik napät'ových špičiek ovplyvnil hodnoty redukovaného napätia, čo

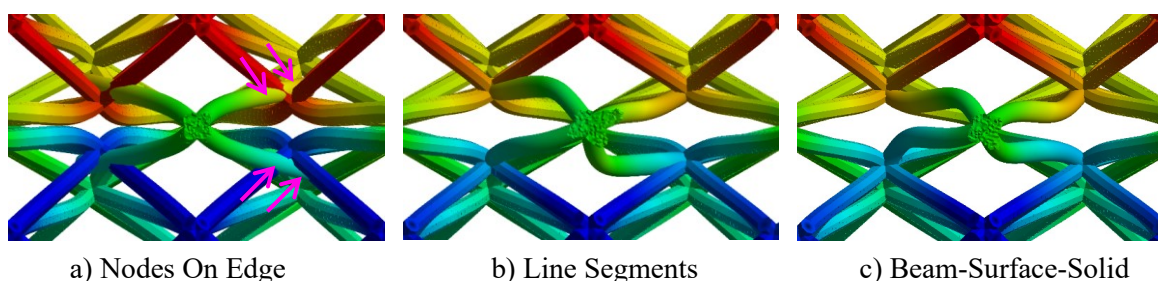
následne komplikovalo vyhodnocovanie výsledkov a následné porovnávanie získaných hodnôt.

Aby bolo možné zbaviť sa popísaného problému, bolo zmenené nastavenie kontaktu. Jednalo sa stále o kontakt typu Bonded, zatiaľ čo bolo zmenené nastavenie **Edge Contact type** – Nodes On Edge / Line Segments. Obr. 5-8 a) zobrazuje nastavenie Nodes On Edge a b) Line Segments. Z obrázku je možné vidieť, že bolo dosiahnuté zlepšenie, konkrétne zníženie hodnoty redukovaného napätia v mieste maxima z 1 265 MPa na 706 MPa.



Obr. 5-8 Obrázok priebehu redukovaného napätia v rôznych typoch kontaktu.

Kompletné odstránenie napät'ových špičiek a zamedzenie nežiadúceho pohybu prostrednej elementárnej bunky bolo možné dosiahnuť až s využitím modelu geometrie Beam-Surface-Solid. Nastavenie kontaktu je popísané v kapitole na strane 52. Zlepšenie výsledkov a odstránenie napät'ových špičiek je možné vidieť na obrázku Obr. 5-8 c). Úpravou bola dosiahnutá úroveň 290 MPa, čo približne odpovedalo výsledkom zo Solid modelu. Obr. 5-9 zobrazuje 2 krát zväčšenú deformáciu mikro-prútovej štruktúry, z ktorého je možné pozorovať relatívny pohyb elementárnej bunky v mikro-prútovej štruktúre – **hlavne v oblasti uzlov (ružové šípky)**. Zanedbanie tohto javu by mohlo v budúcnosti viesť odchýlku do získaných výsledkov a preto boli vykonané úpravy nastavenia kontaktu, ktoré vyústili až do úpravy geometrického modelu. Vymiznutie tohto javu je možné pozorovať so zmenou kontaktu a pri následnom upravení geometrie.



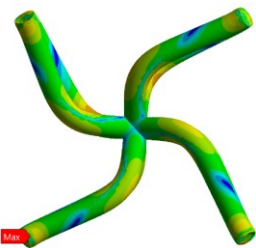
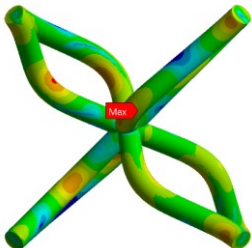
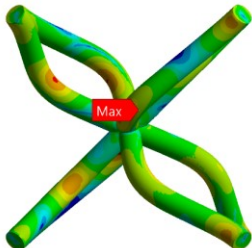
Obr. 5-9 Obrázok pohybu elementárnej bunky uprostred mikro-prútovej štruktúry.

5.3.4 Analýza citlivosti modelu geometrie B-S-S-modifikovaný

Z dôvodu zlyhania numerických simulácií počas výpočtu pri menších priemeroch prúta (0,6 mm až 0,8 mm) bola zmenená hrúbka plochy (Surface), ktorá sa nachádzala v kontakte medzi prútovým a objemovým typom geometrie. Počiatočná hrúbka plochy bola 0,1 mm, pričom následne bola zmenená na 0,3 mm a na 0,5 mm. Pri jednotlivých modifikáciách bol skúmaný dopad na reakčnú silu, celkovú deformáciu bunky, maximálne hodnoty redukovaného napätia a polohu maximálnej hodnoty redukovaného napätia.

Z výsledkov vypísaných v Tab. 5-3, je možné pozorovať rozdiel v reakčnej sile o 44,8 N medzi prístupom s hrúbkou plochy 0,1 mm a 0,5 mm. Hovoríme o odchýlke na úrovni 1,3 % voči ploche s hrúbkou 0,1 mm. Z pohľadu celkovej deformácie bola dosiahnutá odchýlka približne 0,5 mm. Obrázky zobrazujúce polohu redukovaného napätia predstavujú pohľad zhora (zo smeru zaťažovania štruktúry). Z obrázkov je možné pozorovať rozdielnu deformáciu bunky, ako aj polohu maximálnej hodnoty redukovaného napätia. Zatiaľ čo pri ploche s hrúbkou 0,1 mm sa maximum nachádzalo pod povrchom v koncovej oblasti prúta, pri väčšej hrúbke plochy sa maximálne hodnoty vyskytovali v oblasti zlomenia prúta. Rozdiel v hodnotách redukovaného napätia v oblasti zlomenia prúta dosahoval hodnoty 65,4 MPa. Výskyt pri jednotlivých modifikáciách, respektíve zníženie dopadu javu zobrazeného na Obr. 5-9 a) sa nepotvrdilo.

Tab. 5-3 Tabuľka analýzy citlivosti geometrického modelu.

Hrúbka plochy	0,1 mm	0,3 mm	0,5 mm
Reakčná sila [N]	3 426	3 468,6	3 470,8
Celková deformácia [mm]	4,934	5,428	5,439
Hodnoty redukovaného napätia [MPa]	676,3 (608,9 - ohnutie)	674,3	674,3
Poloha redukovaného napätia (Pohľad zhora)			

K zlyhaniu pravdepodobne dochádzalo z dôvodu veľkej deformácie vyskytujúcej sa na spomenutých plochách. Zo zmenou hrúbky plochy došlo aj ku zmene tvaru deformácie. Pravdivosť deformácie bude nutné v budúcnosti overiť prostredníctvom experimentov. Na druhej strane veľkosť zmeny reakčnej sily sa pohybuje na zanedbateľných hodnotách v porovnaní s množstvom výhod ktoré tento model geometrie prináša a umožňuje.

5.3.5 Výsledky napäťovo deformačnej analýzy geometrických modelov

Pri porovnávaní výsledkov jednotlivých zjednodušených geometrických modelov bol vytvorený systém pre elementárnu bunku a celú mikro-prúťovú štruktúru. V prípade elementárnej bunky boli porovnávané výsledky redukovaného napätia a celkovej deformácie. Pre porovnanie charakteristiky mikro-prúťovej štruktúry bola rozhodujúca reakčná sila vznikajú vo väzbe, ako je popísané v kapitole 4.5.5.

Obr. 5-10 zobrazuje výsledky pri priemere prúta 1 mm, zatiaľ čo Obr. 5-11 zobrazuje výsledky pri priemere 1,5 mm. Z pohľadu charakteristiky mikro-prúťovej štruktúry môžeme v oboch prípadoch vidieť pokles reakčnej sily pri zjednodušovaní modelu geometrie, čo je zobrazené v Tab. 5-4. Trend poklesu reakčnej sily dosiahol najväčšej odchýlky pri modeli Beam-Solid 2 x 2. Mierny nárast reakčnej sily nastal pri modeli Beam-Surface-Solid voči Beam-Solid 1 x 1. Nakoľko jediná úprava pri týchto dvoch modeloch bol kontakt medzi prúťovými a objemovými elementmi, pravdepodobne došlo k lepšiemu prenosu zaťaženia, pričom už nedochádzalo k lokálnej deformácii kontaktných plôch prostrednej elementárnej bunky. Zvýšenie hodnôt reakčnej sily priniesol až model Beam-Surface-Solid-modifikovaný, a to konkrétne v oboch prípadoch s odchýlkou voči Solid 4,59 % a -0,79 %, pre 1 mm a 1,5 mm priemer.

Posúdenie modelov na elementárnej bunke prebiehalo prostredníctvom výsledkov redukovaného napätia a celkovej deformácie. Z Obr. 5-10 je možné pozorovať zhodu výsledkov redukovaného napätia medzi modelom Solid a B-S 2 x 2. Je nutné podotknúť, že okrem zhody maximálnej hodnoty redukovaného napätia Solid model a B-S 2 x 2, dochádza taktiež k zhode rozloženia napätia v celom objeme elementárnej bunky. V prípade modelu B-S 1 x 1 bola stupnica značne ovplyvnená lokálnymi extrémami v mieste kontaktu, preto bola upravená do rozsahu vyplývajúceho z predchádzajúceho modelu geometrie (v simuláciách pre 1 aj 1,5 mm). V modeloch B-S 1 x 1 a novších je taktiež možné pozorovať odklon napäťového rozloženia voči modelu Solid. Pri porovnaní rozloženia napätia je možné spozorovať pootočenie oblastí maximálnych hodnôt v niektorých prúťoch medzi modelmi Solid a B-S-S-mod.

Tab. 5-4 Tabuľka reakčnej sily a odchýlky.

Názov modelu	Reakčná sila 1 mm [N]	Odchýlka k Solid [%]	Reakčná sila 1,5 mm [N]	Odchýlka k Solid [%]
Solid	2 396	-	7 351	-
Beam-Solid 2 x 2	2 352	-1,84	6 790	-7,63
Beam-Solid 1 x 1	2 281	-4,8	6 338	-13,78
Beam-Surface- Solid	2 294	-4,26	6 367	-13,39
Beam-Surface- Solid-mod.	2 506	4,59	7 293	-0,79
Názov modelu	Reduk. napätie 1 mm [N]	Odchýlka k Solid [%]	Reduk. napätie 1,5 mm [N]	Odchýlka k Solid [%]
Solid	282,59	-	335,61	-
Beam-Solid 2 x 2	284,08	0,53	341,29	1,69
Beam-Solid 1 x 1	705,88	149,79	661,38	97,07
Beam-Surface- Solid	293,77	3,96	312,01	-7,03
Beam-Surface- Solid-mod.	318,27	12,63	278,19	-17,11

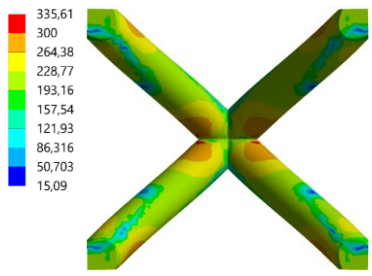
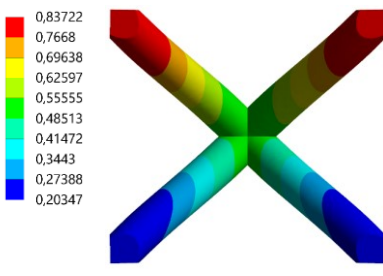
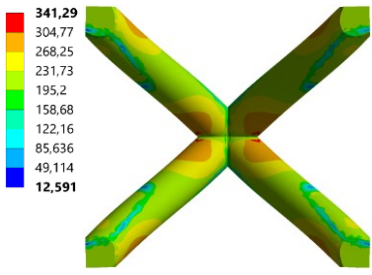
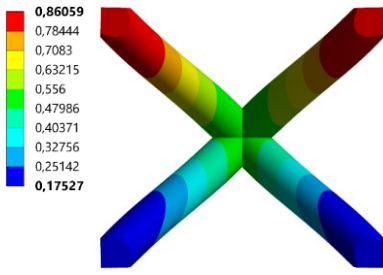
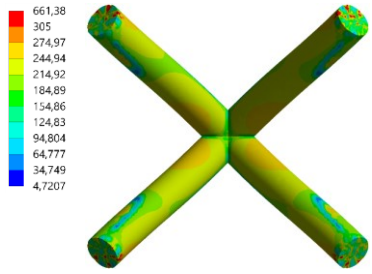
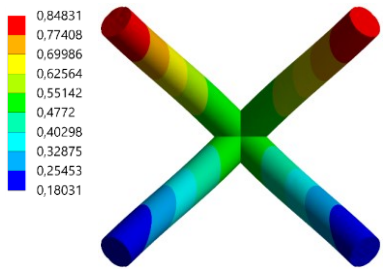
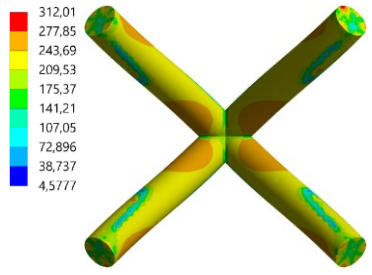
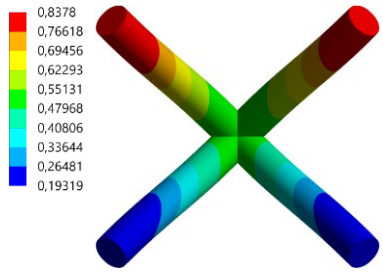
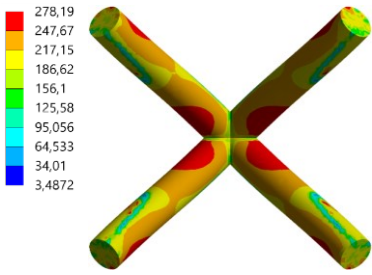
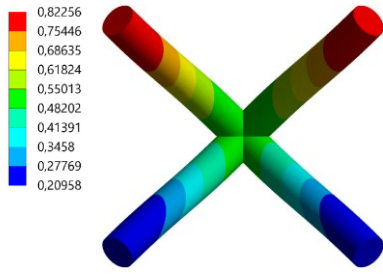
Z pohľadu celkovej deformácie (viď Tab. 5-5) došlo v geometrickom modeli B-S 2 x 2 a B-S 1 x 1 k väčšej deformácii ako pri modeli Solid. V prípadoch B-S-S a B-S-S-mod. hovoríme o menšej deformácii ako pri Solid modeli. Rozsah odchýlky voči Solid modelu sa pohyboval na úrovni 2,65 % až -1,27 % v prípade 1 mm priemeru a 2,8 % až -1,75 % pri priemere 1,5 mm.

Tab. 5-5 Tabuľka maximálnej hodnoty deformácie.

Priemer prúta	Solid	Beam-Solid 2 x 2	Beam-Solid 1 x 1	Beam- Surface-Solid	Beam- Surface-Solid- mod.
1 mm	0,856	0,879	0,861	0,843	0,845
1,5 mm	0,837	0,861	0,848	0,838	0,823

Názov modelu	Redukované napätie [MPa]	Celková deformácia [mm]
Solid	<p>282,59 251,56 220,53 189,51 158,48 127,45 96,428 65,402 34,376 3,3492</p>	<p>0,85586 0,7826 0,70933 0,63607 0,56281 0,48955 0,41628 0,34302 0,26976 0,1965</p>
Beam-Solid 2 x 2	<p>284,08 253,01 221,94 190,87 159,8 128,73 97,662 66,592 35,521 4,4509</p>	<p>0,87854 0,80035 0,72217 0,64399 0,5658 0,48762 0,40944 0,33126 0,25307 0,17489</p>
Beam-Solid 1 x 1	<p>705,88 253 222,11 191,21 160,32 129,43 98,537 67,644 36,751 5,8584</p>	<p>0,86094 0,78411 0,70728 0,63046 0,55363 0,4768 0,39998 0,32315 0,24632 0,1695</p>
Beam-Surface-Solid	<p>293,77 261,75 229,72 197,69 165,67 133,64 101,61 69,588 37,562 5,5352</p>	<p>0,84338 0,77095 0,69853 0,6261 0,55367 0,48124 0,40881 0,33638 0,26395 0,19152</p>
Beam-Surface-Solid-mod.	<p>318,27 260 228,47 196,94 165,4 133,87 102,34 70,809 39,277 7,7453</p>	<p>0,84497 0,772 0,69904 0,62608 0,55312 0,48016 0,40719 0,33423 0,26127 0,18831</p>

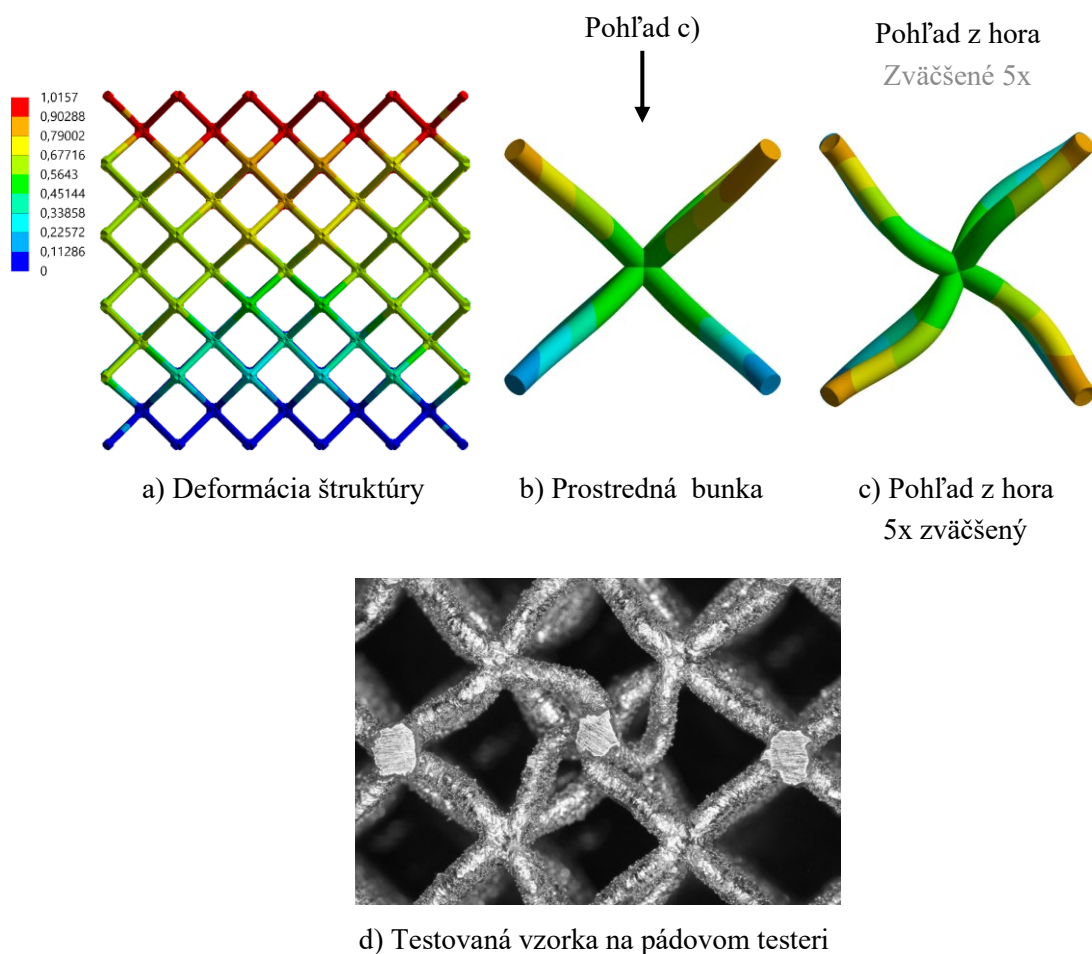
Obr. 5-10 Obrázok porovnania geometrických modelov pre 1 mm priemer prúta.

Názov modelu	Redukované napätie [MPa]	Celková deformácia [mm]
Solid		
Beam-Solid 2 x 2		
Beam-Solid 1 x 1		
Beam-Surface- Solid		
Beam-Surface- Solid-mod.		

Obr. 5-11 Obrázok porovnania geometrických modelov pre 1,5 mm priemer prúta.

5.3.6 Tvar deformácie prostrednej elementárnej bunky

Výsledky numerickej simulácie vykonané na modeli geometrie B-S-S-mod. zobrazujú jav, pri ktorom dochádza k stáčaniu prostrednej elementárnej bunky v mikro-prútovej štruktúre. Tento jav je zobrazený vo výsledkoch numerickej simulácie na Obr. 5-12 a-c). Obr. 5-12 c) zobrazuje pohľad na elementárnu bunku zvrchu, pričom mierka deformácie bola zväčšená, konkrétne 5x. Ako následne zobrazuje Obr. 5-12 d) rovnaký jav bol pozorovaný v minulosti pri experimentoch vykonaných na mikro-prútových štruktúrach. Tieto experimenty boli v minulosti vykonané na pádovom testeri.



Obr. 5-12 Obrázok zobrazujúci jav skrútenia elementárnej bunky.

5.4 Experiment reálnej geometrie

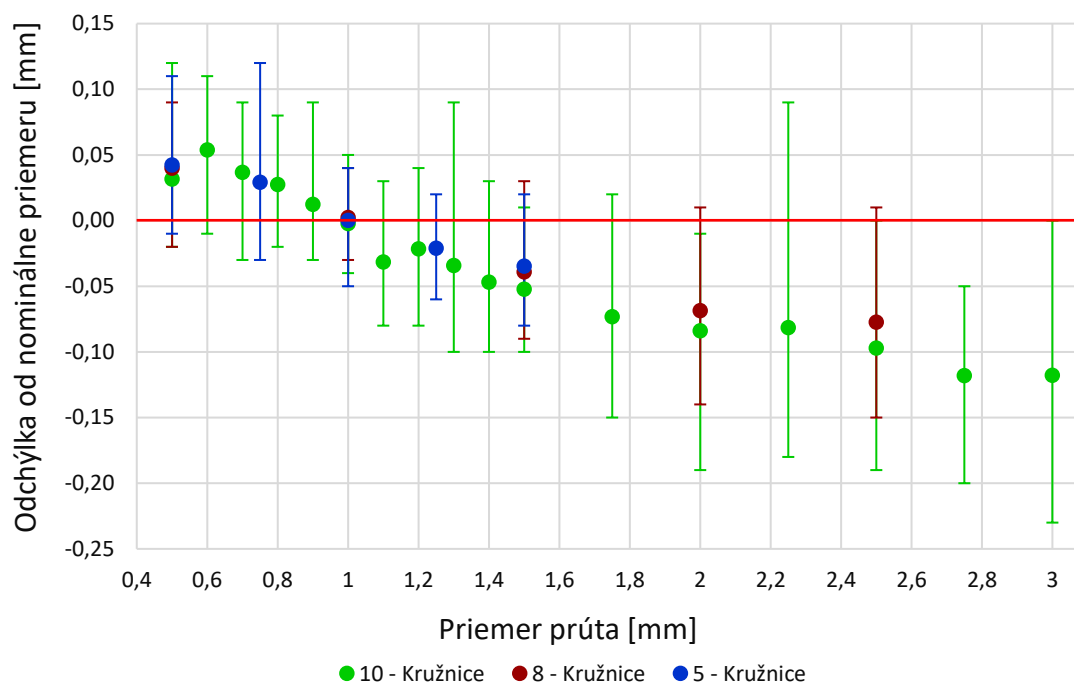
5.4.1 Výsledky priemeru prútov

Aproximácia kružnicou:

Z grafu na Obr. 5-13 môžeme vidieť zhodu výsledkov medzi segmentmi s veľkosťou elementárnej bunky 5 mm (5 - Kružnice), 8 mm (8 - Kružnice) a 10 mm (10 - Kružnice). Vo

všeobecnosti je možné pozorovať navýšenie hodnoty priemeru prúta pri menších priemeroch ako 1 mm. Maximálna hodnota odchýlky 8,97 % nastala pri prúte 0,6 mm a veľkosti elementárnej bunky 10 mm. So zväčšujúcim sa priemerom prúta až do hodnoty 1,75 mm nasledoval pokles odchýlky od nominálneho priemeru. Ustálenie nastalo medzi hodnotami priemeru 1,75 mm až 3 mm, s hodnotou odchýlky približne -4 %. Pri hodnote priemeru 1 mm, bola hodnota nominálneho priemeru totožná s hodnotou reálneho priemeru prúta.

Veľkosť chybových intervalov sa do hodnoty priemeru prúta 1,5 mm pohybovala v rozsahu 0,07 mm až 0,15 mm. Výnimka nastala pri priemere 1,3 mm, kedy veľkosť intervalu dosiahla 0,19 mm. Pri väčších hodnotách priemeru interval narástol až na hodnoty 0,27 mm a 0,23 mm pri priemeroch 2,25 mm a 3 mm.



Obr. 5-13 Graf intervalu nameraných hodnôt pri aproximácii kružnicou.

Aproximácia elipsou:

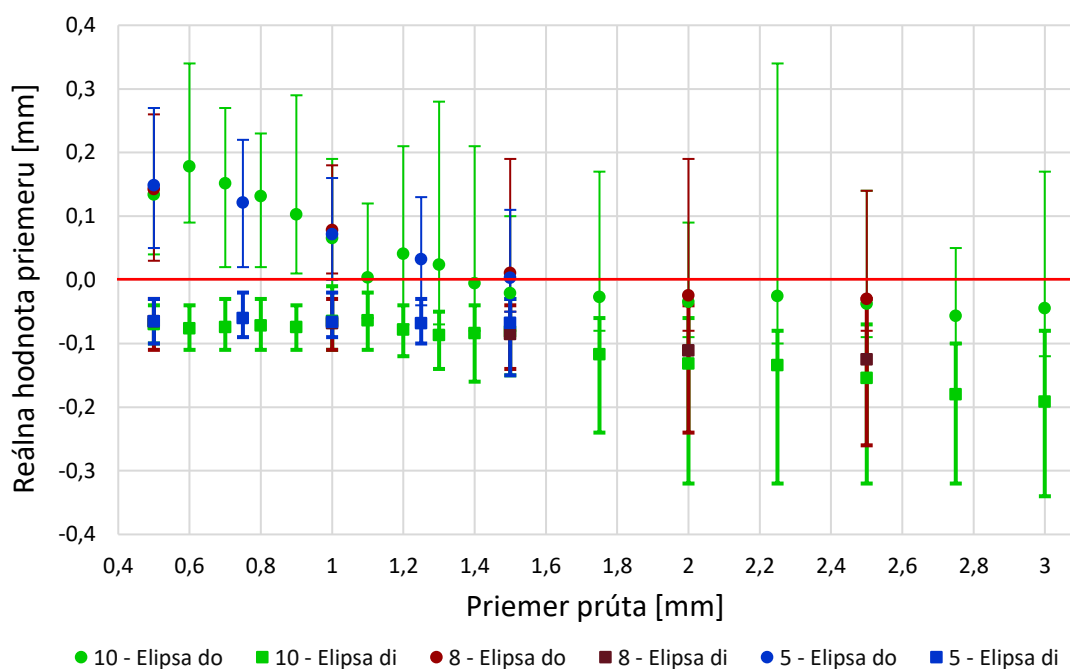
U výsledkov pri aproximácii elipsou môžeme pozorovať podobnú zhodu ako pri aproximácii kružnicou (viď Obr. 5-14). Závislosti s označením „do“ predstavujú rozmer hlavnej poloosi elipsy a „di“ označenie vedľajšie poloosi. Z grafu je možné pozorovať, že k priblíženiu nameraných hodnôt k nominálnym hodnotám dochádza so zväčšujúcim sa priemerom prúta. Pri hlavnej poloosi bola dosiahnutá maximálna odchýlka na úrovni 30 % pri priemere prúta 0,5 mm. Nasledoval pokles ktorý sa ustálil pri hodnote priemeru prúta 1,5 mm. Pri priemeroch väčších ako 1,5 mm dosahovala odchýlka približne -1,5 %.

V prípade vedľajšej poloosi bol pri menších priemeroch dosiahnutý opačný trend. Pri nominálnom priemere 0,5 mm pre segmenty s 10 mm bunkou bola dosiahnutá maximálna odchýlka -13,99 %. Nasledoval pokles odchýlky a ustálenie nastalo za hranicou priemeru

1 mm. Pri segmentoch s veľkosťou 5 a 8 mm elementárnej bunky bola dosiahnutá menšia odchýlka. Konkrétne hovoríme o hodnote -4,54 % pri priemere 1,5 mm elementárnej bunky 5 mm. U 10 mm elementárnej bunky bola najmenšia hodnota odchýlky -5,43 % pri priemere 1,5 mm.

Jedným z vyhodnocovaných kritérií bola aj excentricita elipsy. Dosiahnuté hodnoty boli 0,74 pri priemere 0,5 mm, následný pokles na hodnotu 0,61 (priemer 0,75 mm), resp. až na hodnotu približne 0,5 pri priemere 1 mm. So zväčšujúcim sa priemerom prúta nasledoval stabilný pokles približne na úroveň 0,3 pri priemere 1,5 mm, pričom táto hodnota bola zachovaná až do priemeru prúta 3 mm.

Z výsledkov intervalov nameraných hodnôt je možné konštatovať, že intervaly vedľajšej poloosi, sú menšie ako intervaly hlavnej poloosi. Veľkosť intervalov vedľajšej poloosi dosahovala rádovo stotín milimetra do priemeru 1,3 mm, konkrétne hovoríme o hodnotách do 0,1 mm. S narastajúcim priemerom hodnota intervalu rástla na maximálnu hodnotou 0,26 mm pri priemere prúta 2 a 3mm. Intervaly hlavnej poloosi dosahovali hodnotu nad 0,2 mm, s maximálnou hodnou 0,44 mm pri priemere 2,25 mm.



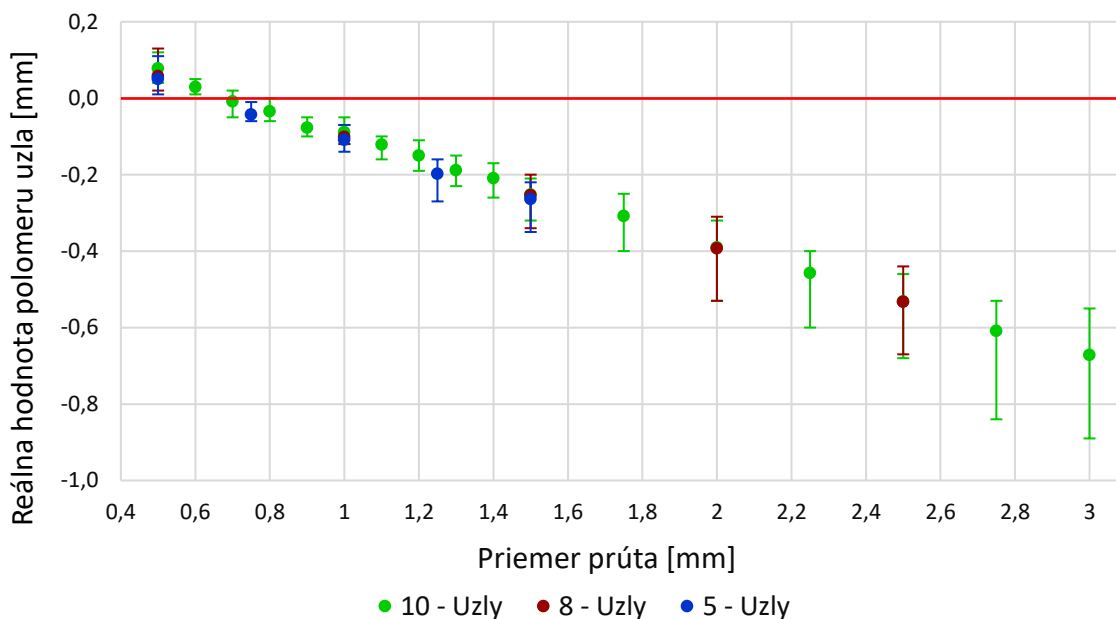
Obr. 5-14 Graf intervalu nameraných hodnôt pri aproximácii elipsou.

5.4.2 Výsledky rozmeru uzlov

Polomer uzla:

Aby bolo možné porovnávať výsledky geometrie reálneho uzla, namerané rozmery boli vzťahované k nominálnemu rozmeru prúta. Takže odchýlka zobrazená na obrázku nižšie je stanovená ako rozdiel polomeru aproximačnej kružnice uzla a nominálneho priemeru prúta.

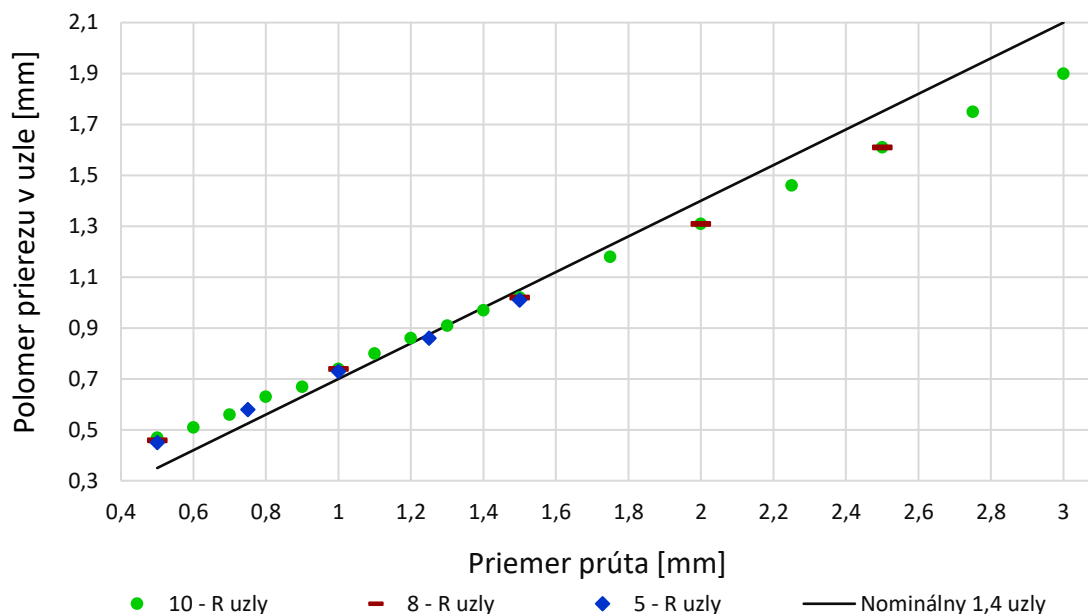
Obr. 5-15 zobrazuje rozmery polomeru uzla, ktorý dosahuje väčších hodnôt priemeru prierezu prúta. Je možné pozorovať, že s narastajúcim priemerom prúta dochádza k poklesu rozmeru uzla voči priemeru prúta. Maximálna hodnota odchýlky 15,56 % bola dosiahnutá pri hodnote priemeru 0,5 mm a minimálna hodnota odchýlky dosahovala -22,37 %. S narastajúcim priemerom prúta rastie aj veľkosť intervalu nameraných hodnôt. Zaujímavá je aj skutočnosť, že kladné hodnoty intervalu sú menšie ako záporné. Pri nominálnych prístupoch ktoré využívali v simuláciách 1,4 uzly boli tieto hodnoty fixné. Jednalo sa o 1/10 prúta, to znamená 0,43 mm 0,69 mm a 0,87 mm pre rozmery elementárnej bunky 5 mm, 8 mm a 10 mm.



Obr. 5-15 Graf intervalu nameraných hodnôt geometrie uzlov.

Polomer prúta v oblasti uzlov:

Z grafu na Obr. 5-16 môžeme pozorovať závislosti polomeru prierezu **Reálneho uzla** pri rôznych elementárnych bunkách a rozmer polomeru pre prístup **uzly 1,4**. Zaujímavá je hraničná hodnota priemeru prúta 1,3 mm. Pri menších priemeroch dosahovali R uzly väčšieho polomeru ako prístup 1,4 uzly. U priemerov väčších ako 1,3 mm zase naopak menších hodnôt. Z grafu je možné pozorovať rozdiel pri priemere 0,5 mm, pre 5 mm a 10 mm elementárnu bunku. Hovoríme o rozdieli 0,02 mm čo predstavuje odchýlku -4,26 % voči 10 mm elementárnej bunke.

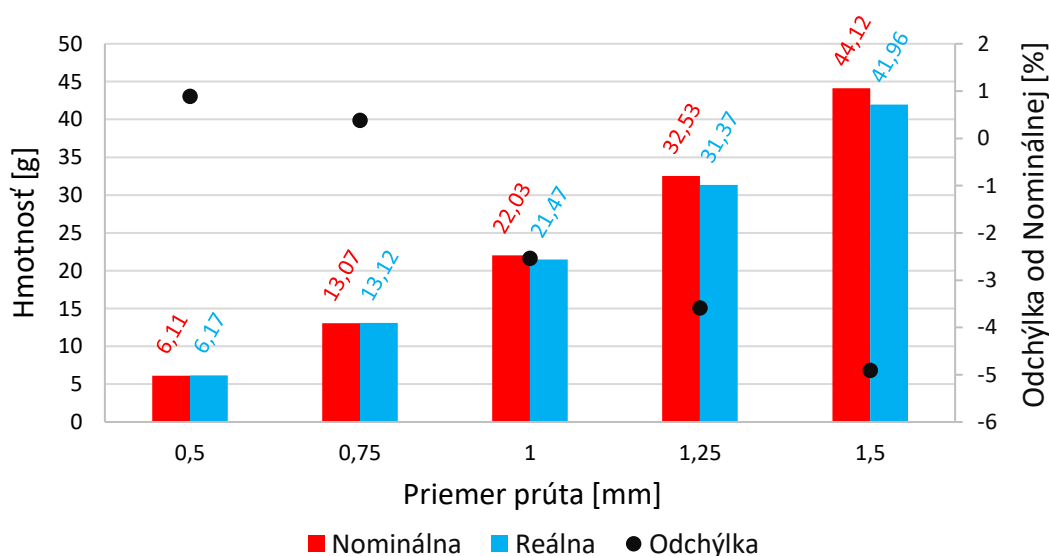


Obr. 5-16 Obrázok grafu polomeru prierezu uzlov.

5.5 Experiment mechanickej skúšky

5.5.1 Hmotnosť vytvorených a otestovaných vzoriek

Po spracovaní vzoriek po výrobe boli následne vzorky vážené. Výsledky z porovnania hmotnosti pred testom mechanickej skúšky sú zobrazené na Obr. 5-17. Porovnanie prebiehalo medzi **Reálnymi** dosiahnutými hodnotami a **Nominálnymi** hodnotami z CAD softvéru, pričom bola stanovená aj odchýlka. Vzorky boli druhý krát vážené aj po vykonaní mechanickej skúšky. **Zmena hmotnosti ale nebola významná s ohľadom na sledované veličiny.**



Obr. 5-17 Obrázok grafu závislosti hmotnosti od priemeru prúta.

5.5.2 Dosaiahnuté podmienky pri experimente

Hodnoty dosiahnutej rýchlosti pádovej hlavy pred dopadom na vzorky sú vypísané v Tab. 5-6. Celkovo bolo dosiahnutej odchýlky intervalu rýchlosti na úrovni 4,815 % voči priemernej rýchlosti.

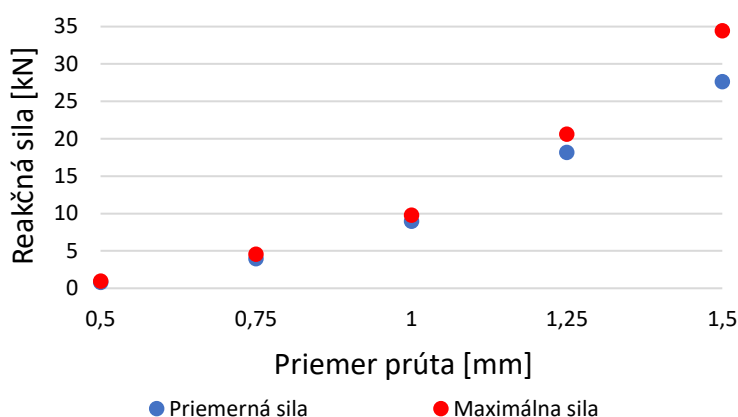
Tab. 5-6 Tabuľka hodnôt z experimentu pádového testera.

Priemerná rýchlosť [m/s]	Max. rýchlosť [m/s]	Min. rýchlosť [m/s]	Priemerná kinetická energia [J]
2,872	2,938	2,8	55,484

5.5.3 Získané veličiny z priebehu merania

Silová charakteristika merania

V grafe na Obr. 5-18 sú hodnoty priemernej a maximálnej sily, ako priemerné hodnoty zo všetkých meraní vykonaných pri experimente mechanickej skúšky. Hodnoty priemernej sily boli počítané do dosiahnutia maximálnej hodnoty sily. Z grafu je možné pozorovať nárast hodnôt sily so zväčšujúcim sa priemerom prúta.



Obr. 5-18 Obrázok grafu priemernej a maximálnej sily dosiahnutej pri experimente.

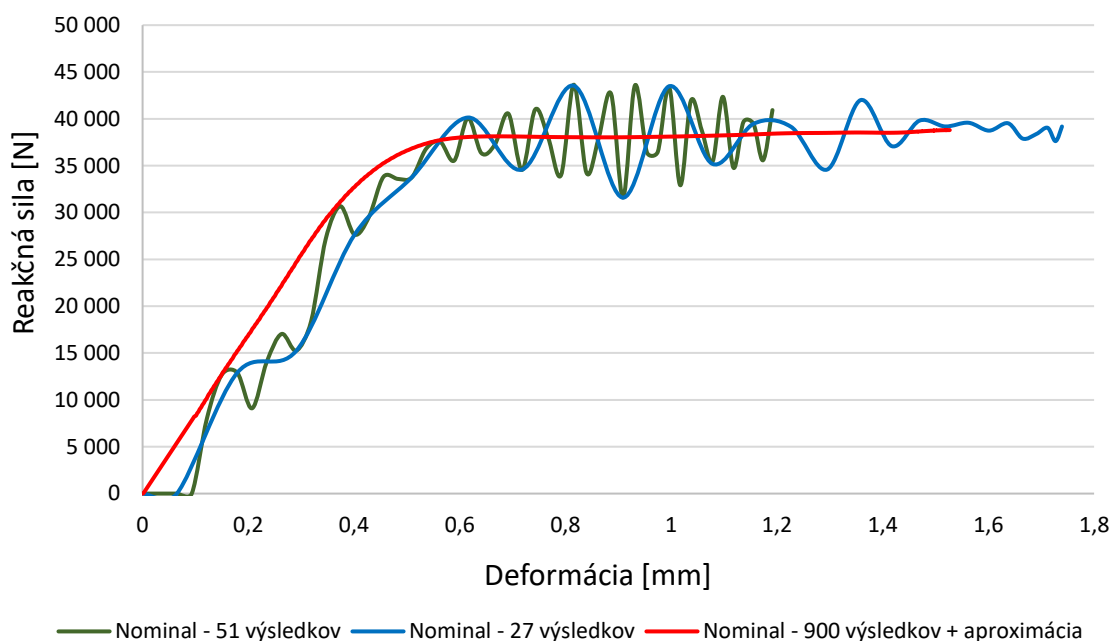
5.6 Porovnanie MKP a experimentu mechanickej skúšky

Výpočet priemeru z meraní:

Aby bolo možné následne porovnávať jednotlivé numerické prístupy s výsledkami z experimentu, bol stanovený priemer merania. Jedná sa o závislosť sily a deformácie, pričom sila je priemer zo všetkých štyroch meraní pri každej hodnote deformácie. **Priemer merania** bol počítaný do hodnoty maximálnej sily pri najmenšej dosiahnutej deformácii. Priebeh jednotlivých meraní (**Meranie 1 - 4**) a **Priemer merania** je možné vidieť v grafe na Obr. 5-21.

Počet výsledkov numerickej simulácie:

Modrou a **zelenou** farbou (Obr. 5-19) sú zobrazené nefiltrované výsledky. Zvýšenie množstva výsledkov (**zelená závislosť**) zlepšenie neprinieslo, iba zvýraznilo prítomnosť šumu. Riešenie prinieslo až následné filtrovanie, pri ktorom bol využitý Butterworthov filter nastavený na frekvenciu 4 000 Hz. Filtrovanie výsledkov spôsobilo „pomalší nábeh“ reakčnej sily, preto boli hodnoty v počiatočnej fáze získané aproximáciou. Pomalší nábeh **modrej** a **zelenej** závislosti je taktiež spôsobený aj vôľou v geometrii, ktorá bola vo finálnej verzii ešte upravená.



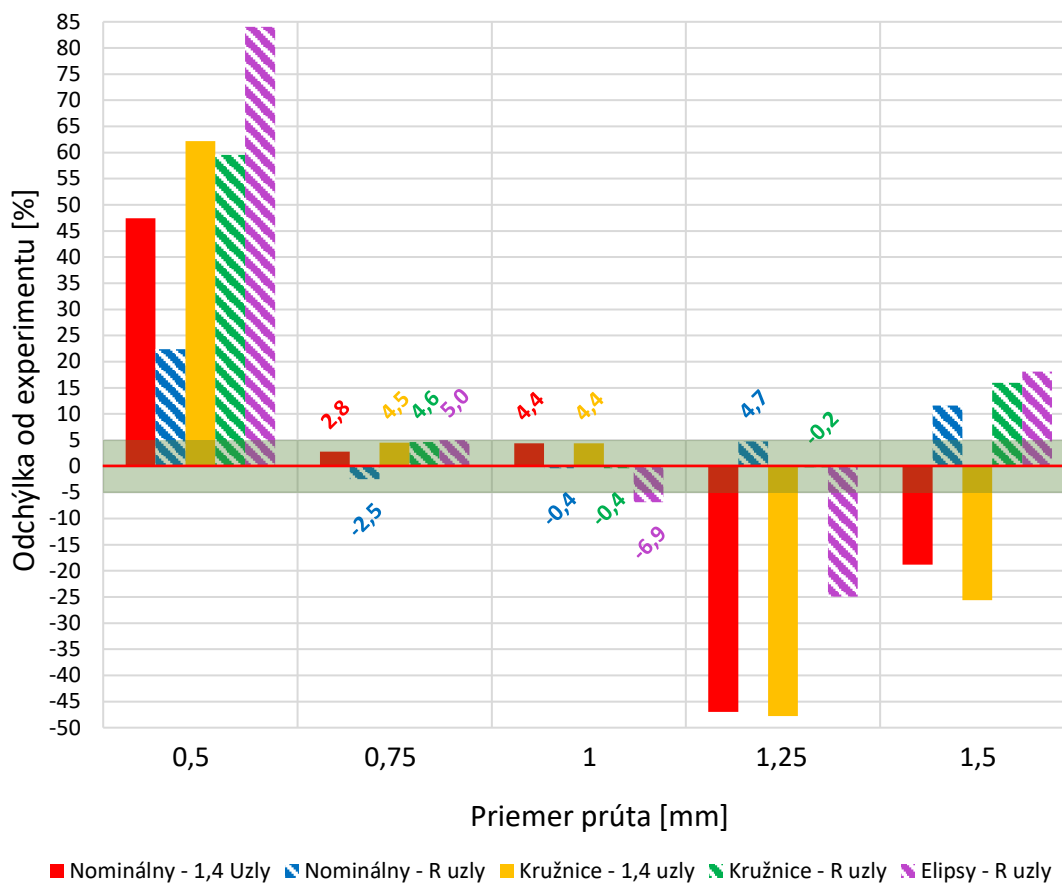
Obr. 5-19 Obrázok grafu zobrazujúci vznikajúci šum pri priemere prúta 1,5 mm.

Výpočet absorbovanej energie:

Aby bolo možné porovnať výsledky jednotlivých simulačných prístupov, ale aj výsledky medzi jednotlivými štruktúrami, bola spočítaná z kriviek grafov absorbovaná energia. Hodnoty absorbovanej energie boli spočítané k maximálnej hodnote reakčnej sily každého prístupu a do hodnoty deformácie 1,5 mm. Táto hranica bola stanovená na základe výsledkov pri priemere prúta 1,5 mm, kde numerický prístup **Nominálny – R uzly** dosiahol maximálnu hodnotu deformácie 1,527 mm, čo po zaokrúhlení predstavovalo 1,5 mm.

5.6.1 Porovnanie výsledkov absorbovanej energie s experimentom

Po určení absorbovanej energie (AE) zo závislostí jednotlivých numerických prístupov bola spočítaná odchýlka vzhľadom k priemeru meraní. Výsledky medzi jednotlivými prístupmi a pre každý priemer prúta je možné vidieť v grafe na Obr. 5-20. V grafe je taktiež vyznačená oblasť $\pm 5\%$, ktorá je predpokladom hypotézy číslo 1.1.



Obr. 5-20 Graf odchýlky absorbovanej energie numerických prístupov od experimentu.

Graf na Obr. 5-20 zobrazuje výsledky odchýlky celkovej absorbovanej energie (AE) jednotlivých numerických prístupov od experimentálnych hodnôt (priemer zo štyroch meraní). Pri priemere prúta 0,5 mm bolo dosiahnutej najmenšej odchýlky 22,4 % prístupom **Nominálny – 1,4 uzly**. Nominálny – 1,4 uzly dosahoval odchýlky 47,5 %, zatiaľ čo prístup kružníc – 1,4 / R uzly dosahovali odchýlky približne 60%. Najväčšiu odchýlku dosiahol prístup **Elipsy – R uzly** s hodnotou 84,1 %.

U výsledkov priemeru 0,75 mm dosiahli všetky prístupy maximálnej odchýlky 5 %. Najmenšia hodnota odchýlky bola dosiahnutá prístupom Nominálny – R uzly, zatiaľ čo výsledok s 5 % odchýlkou priniesol prístup **Elipsy – R uzly**.

Na základe reálneho experimentu boli pri priemere 1 mm hodnoty nominálneho priemeru a priemeru získaného prostredníctvom aproximácie kružníc totožné. Prakticky vznikli tri numerické prístupy, pričom najväčšej odchýlky -6,9 % dosiahol prístup **Elipsy – R uzly**. Na hodnote -0,4 % sa zastavila odchýlka **Nominálny – R uzly / Kružnice – R uzly**. Prístup Nominálny – 1,4 uzly / Kružnice – R uzly dosiahli odchýlky 4,4 %.

Pri priemere prúta 1,25 mm Nominálny a Kružnicový prístup s 1,4 uzlami dosiahli odchýlky približne -47%. V prípade **Eliptického** prístupu hovoríme o odchýlke -25 %. Odchýlka Nominálny a Kružnice s R uzlami prestavovala 4,8 % respektíve -0,2 %.

Výsledky priemeru prúta 1,5 mm dosahovali odchýlky -18,8 % a -25,6 % pri Nominálnom a Kružnicovom prístupe s 1,4 uzlami. Nominálny a Kružnicový prístup s R uzlami dosiahli odchýlky 11,6 %, respektíve 16 % a najväčšej odchýlky bolo dosiahnutej pri Eliptickom prístupe s 18,1 %.

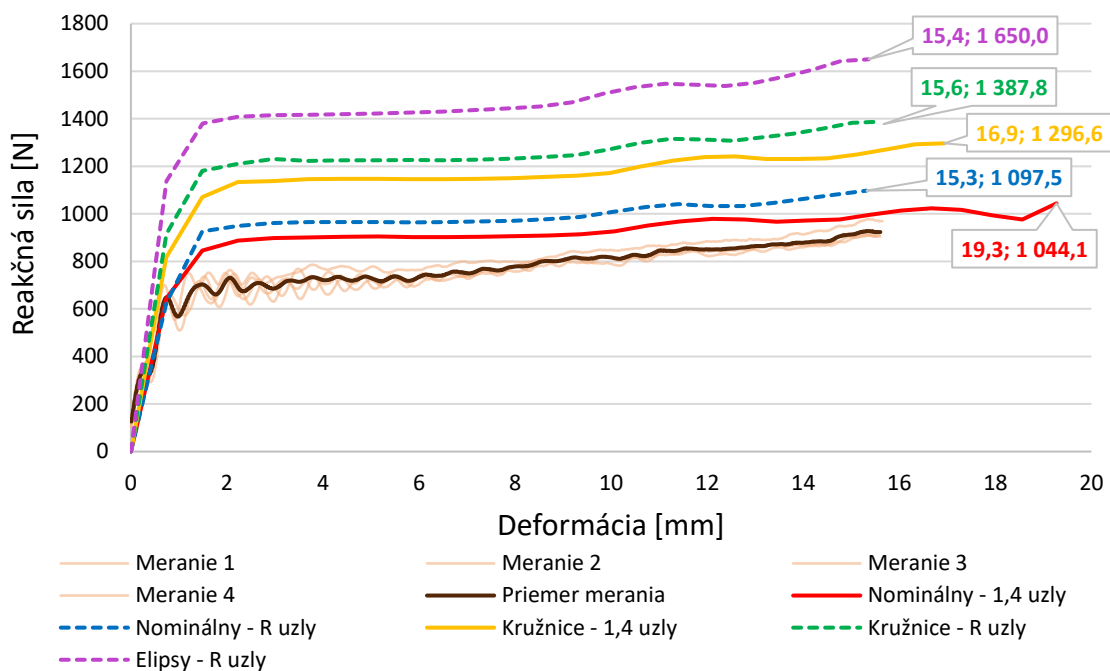
Z výsledkov je tiež možné konštatovať, že pri menších priemeroch prúta dochádza k problému, kedy prichytené častice základového materiálu ovplyvňujú hodnoty priemeru prúta. Tento predpoklad potvrdzuje tvrdenie, že pri priemere 0,5 mm a 0,75 mm bola najlepšia zhoda dosiahnutá pomocou numerického prístupu Nominálny – R uzly. Výsledky z experimentu reálnej geometrie vykazovali zväčšenie hodnôt priemeru voči nominálnym hodnotám. Pri priemere 1 mm a 1,25 mm bola najmenšia odchýlka dosiahnutá numerickým prístupom Kružnice – R uzly, tzn. zmenšenie priemeru voči nominálnym hodnotám.

5.6.2 Porovnanie numerických prístupov

Priemer prúta 0,5 mm:

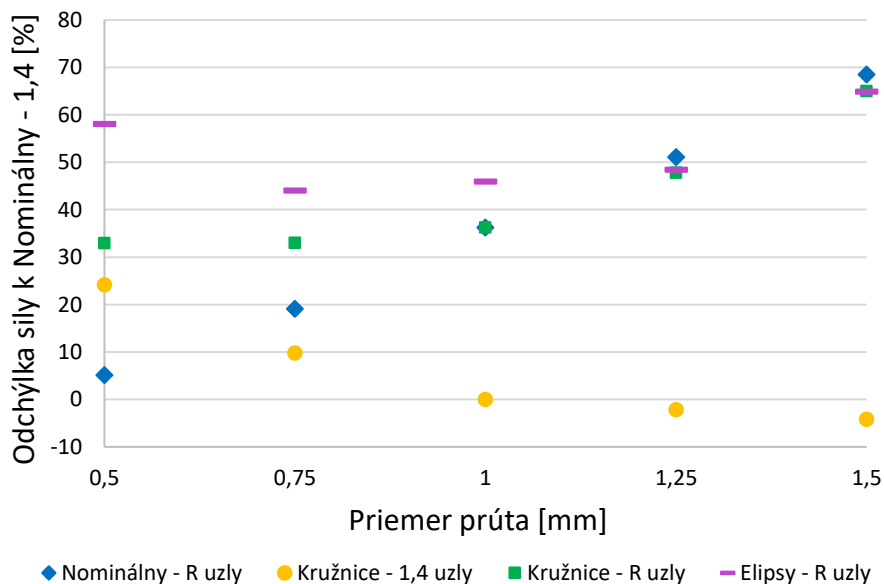
Z grafu na Obr. 5-21 vidíme, že prístupy ktoré využívali geometriu s Reálnymi uzlami dosiahli menšej deformácie ako prístupy s uzlami 1,4. Hovoríme približne o hodnote 15,5 mm, pričom pri prístupe Nominálny – 1,4 uzly bolo dosiahnutej deformácie 19,3 mm. Z pohľadu zmeny priemeru bolo dosiahnutých konzistentných výsledkov, kedy prístup Kružnice – 1,4 dosiahol väčších hodnôt maximálnej sily ako Nominálny – 1,4. Podobný trend sa objavil aj u prístupov s R uzlami. Aproximácia Kružnicami dosiahla väčšie hodnoty maximálnej sily ako Nominálny prístup, pričom najväčších hodnôt dosiahol prístup Elíps.

Z pohľadu AE hovoríme o odchýlke -17 % Nominálny – R uzly voči Nominálny – 1,4 uzly. Najmenšiu odchýlku pri prístupoch s reálnymi uzlami dosiahli Kružnice, konkrétne 8,2 % a odchýlka Elíps sa pohybovala na úrovni 24,8 %. Pri využití geometrie Kružníc – 1,4 uzly bola odchýlka 10 % voči Nominálny – 1,4.



Obr. 5-21 Obrázok grafu merania a numerických simulácií pri priemere prúta 0,5 mm.

Podobné výsledky boli dosiahnuté aj pri priemeroch väčších ako 0,5 mm. Prístupy s Reálnymi uzlami priniesli zmenšenie veľkosti deformácie. Prístupy s aproximovanými geometriami dosiahli väčších hodnôt maximálnych síl, čo je viditeľné v grafe na Obr. 5-22. Z grafu je taktiež možné pozorovať, že s narastajúcim priemerom prúta dochádza k nižšej odchýlke Kružnicových prístupov ako pri Nominálnych prístupoch, viditeľné na Obr. 5-23. Taktiež dochádza k zjednoteniu výsledkov pri prístupoch s reálnymi uzlami s narastajúcim priemerom prúta, zatiaľ čo pri kružnicovom prístupe s 1,4 uzlami odchýlka klesá.



Obr. 5-22 Graf maximálnej sily numerických prístupov.

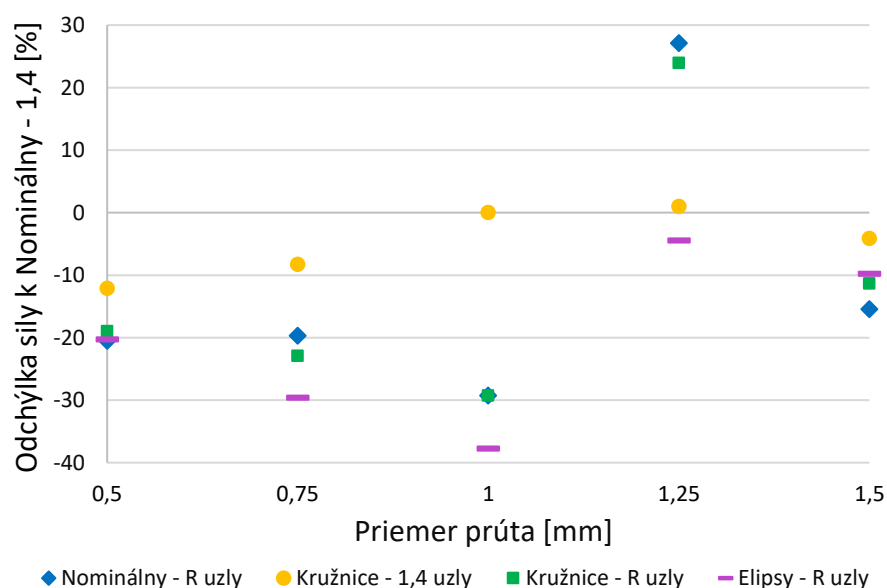
Odchýlky AE pri jednotlivých priemeroch prúta sú vypísané v Tab. 5-7. Z hodnôt je možné pozorovať nárast odchýlky hodnôt pri vzorkách s väčšou hodnotou priemeru prúta.

Konkrétne pri priemere 1,5 mm hovoríme približne o 45 % odchýlke prístupu Kružnice - R uzly a Elipsy - R uzly voči Nominálny – 1,4 uzly. V prípade Nominálny - R uzly hovoríme o odchýlke 37,5 % zatiaľ čo pri Kružniciach – 1,4 uzly o poklese na úrovni -8,4 %.

Tab. 5-7 Tabuľka odchýlky absorbovanej energie.

Priemer prúta	0,5	0,75	1	1,25	1,5
Nominálny - R uzly	-17,0	-5,2	-4,6	97,6	37,5
Kružnice - 1,4 uzly	10,0	1,7	0,0	-1,4	-8,4
Kružnice - R uzly	8,2	1,8	-4,6	88,3	42,9
Elipsy - R uzly	24,8	2,1	-10,8	41,6	45,5

Výsledky v grafe na Obr. 5-23 zobrazujú odchýlku v hodnotách maximálnej deformácie voči prístupu Nominálny – 1,4 uzly. Z grafu je možné pozorovať zhodu pri nominálnom a kružnicovom prístupe s reálnymi uzlami. Práve tieto prístupy dosahovali klesajúci trend v odchýlke pri priemeroch 0,5 mm až 1 mm. Zmena nastala pri priemere 1,25 mm, kedy došlo k nárastu na cca 25 % a k následnému poklesu na približne -10 % pri priemere 1,5 mm.



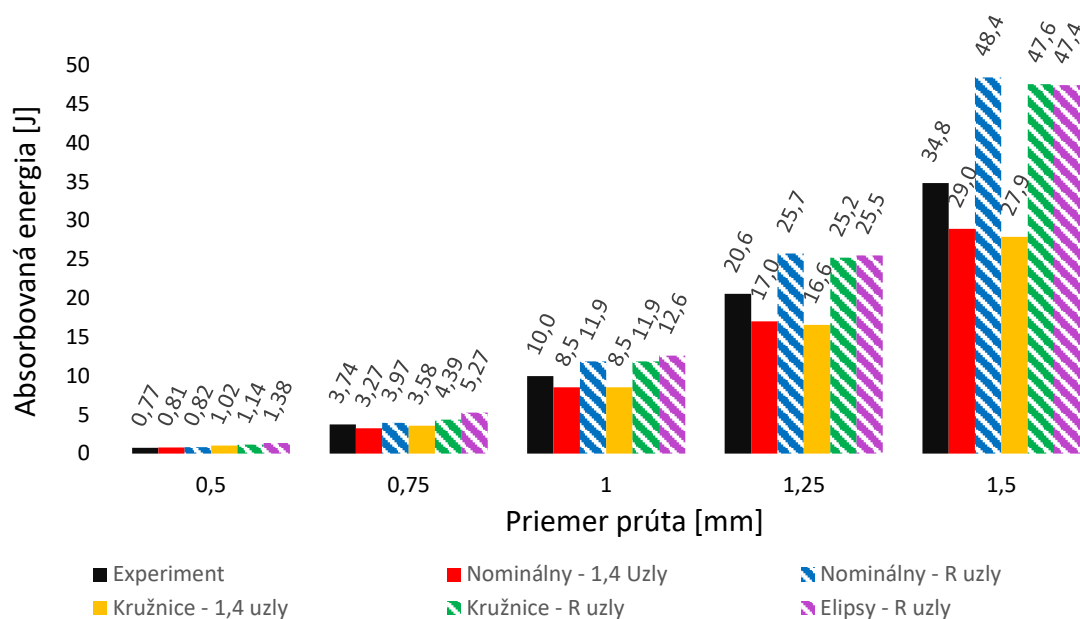
Obr. 5-23 Graf maximálnej deformácie numerických prístupov.

5.6.3 Porovnanie absorbovanej energie štruktúrami

Všetky štruktúry (rôzne priemery prúta) boli následne porovnávané prostredníctvom absorbovanej energie. Porovnanie predstavovalo priemer zo všetkých štyroch meraní a vo

výsledkoch boli zahrnuté aj všetky numerické prístupy **do deformácie 1,5 mm** (z dôvodu popísaného vyššie).

Výsledky sú zobrazené v grafe na Obr. 5-24. Z výsledkov bolo možné pozorovať trend rastúcej absorbovanej energie so zväčšujúcim sa priemerom prúta. Konkrétne hovoríme o hodnotách 0,77 J pri priemere 0,5 mm, cez 10,0 J a 34,8 J pri priemere prúta 1 mm a 1,5 mm. Výsledky rôznych numerických prístupov dosiahli pomerne zhodného trendu od veľkosti priemeru 0,75 mm. **Nominálny – 1,4** a **Kružnice – 1,4** dosahovali menších hodnôt ako experiment, zatiaľ čo prístupy s reálnymi uzlami (**Nominálny**, **Kružnice** a **Elipsy**) dosahovali hodnôt väčších.



Obr. 5-24 Absorbovaná energia do 1,5 mm deformácie.

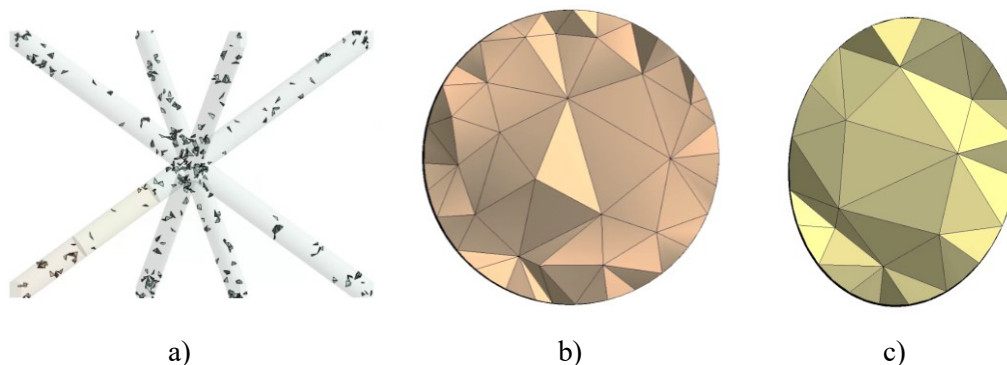
5.7 Numerické simulácie pre štúdium dopadu geometrických imperfekcií – Elementárna bunka

Druhou vykonanou časťou numerických simulácií, boli simulácie vykonané na elementárnej bunke. Simulácie využívali poznatky z oboch experimentov a prebiehali v troch rôznych konfiguráciách prierezu. Prvá konfigurácia využívala nominálne hodnoty priemeru prúta. Druhá konfigurácia využívala hodnoty priemeru získané na základe aproximácie prostredníctvom kružnice, zatiaľ čo tretia konfigurácia využívala eliptický tvar prierezu. Využitie konfigurácie vychádzali z porovnania výsledkov simulácií a mechanickej skúšky.

5.7.1 Kvalita konečno prvkovej siete

Priemerná kvalita konečno prvkovej siete zo všetkých simulácií dosahovala hodnoty 0,75 (z maximálne možnej 1). Minimálna hodnota kvality elementov sa pohybovala na úrovni

0,3, pričom elementy s nižšou kvalitou boli rovnomerne rozložené v celom objeme bunky (elementy s kvalitou 0,3 a 0,4 zobrazené na obrázku Obr. 5-25 a)). Počas tvorby konečno prvkovej siete bol kladený dôraz, aby sa v priemere vyskytovalo aspoň 5 elementov. Popísaný predpoklad bolo možné dosiahnuť pri kruhovom priereze (viď Obr. 5-25 b)). Pri eliptickom priereze nastával problém pri vedľajšej poloosi, hlavne u menších nominálnych priemeroch prúta, kde sa prejavovala výrazná excentricita prierezu. Výsledok konečno prvkovej siete je viditeľný na Obr. 5-25 c).



Obr. 5-25 Kvalita konečno prvkovej siete.

5.7.2 Princíp vyhodnocovania výsledkov

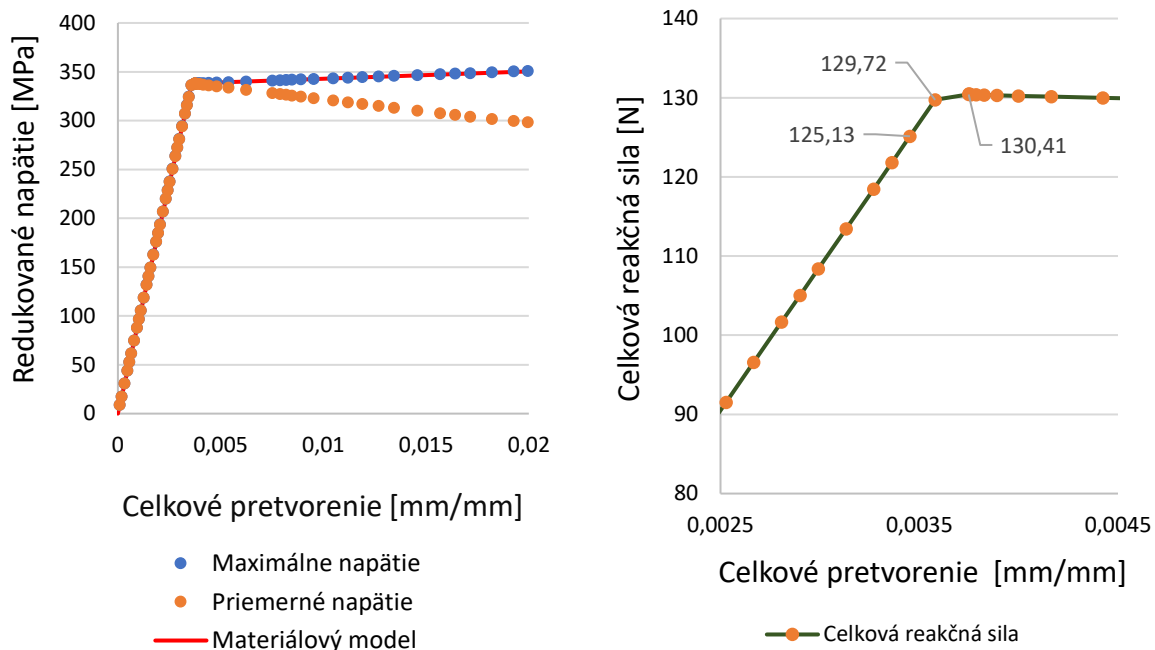
Ako bolo popísané v kapitole 4.5.6, vyhodnocovanie prebiehalo na výreze v prúte. Konkrétne sa jednalo o maximálne a priemerné hodnoty redukovaného napätia a celkového predĺženia. V centre záujmu bola taktiež celková reakčná sila a zložka sily pôsobiaca v smere osi Z, ktorá bola následne využívaná na výpočet zmluvného napätia.

Vyhodnotenie priebehu redukovaného napätia:

Pri všetkých simuláciách bol skúmaný priebeh redukovaného napätia. Z priebehu redukovaného napätia bola následne určená príčina zlyhania prútov v elementárnej bunke. Všetky simulácie (všetky tri typy prístupov prierezu prúta) priniesli podobné závislosti napätia ako je zobrazené na Obr. 5-26. Z výsledkov bolo možné konštatovať, že prúty v elementárnej bunke nezlyhávajú z dôvodu geometrickej ale z dôvodu materiálovej nelinearity.

Vyhodnotenie reakčnej sily:

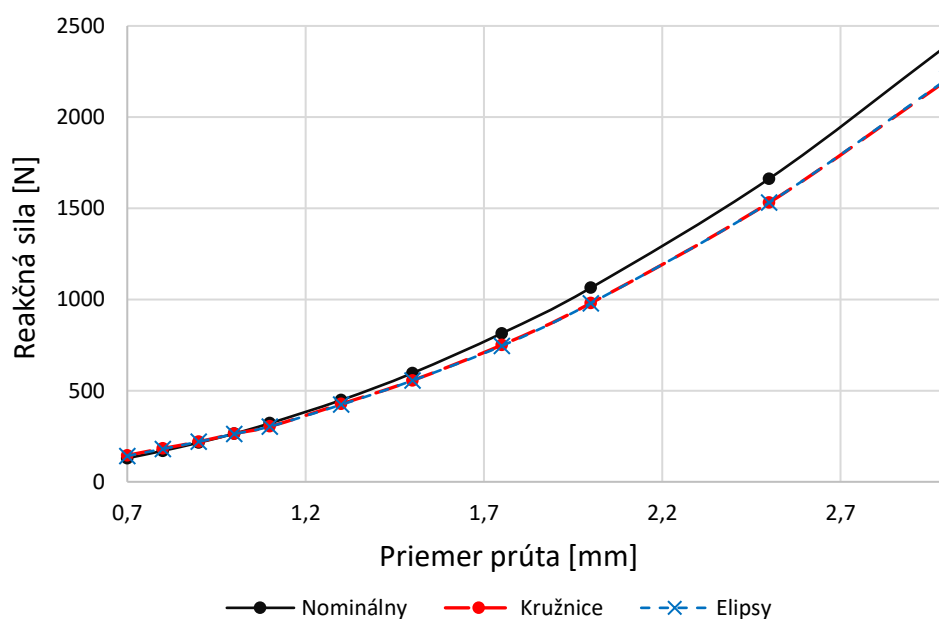
Maximálna reakčná sila bola vyhodnotená ako maximálna sila pri dosiahnutí medze sklzu materiálu. Ako zobrazuje graf na Obr. 5-26 nejednalo sa o jednu hodnotu v dátach. Z toho dôvodu bola hodnota sily určená na základe zmeny trendu (smernice) vo výsledkoch. Hodnota reakčnej sily bola stanovená ako posledná hodnota sily pred zmenou smernice preloženej priamky. Tento spôsob je zobrazený aj na obrázku Obr. 5-26, kde bola zvolená reakčná sila 129,72 N.



Obr. 5-26 Graf závislosti redukovaného napätia a reakčnej sily od predĺženia.

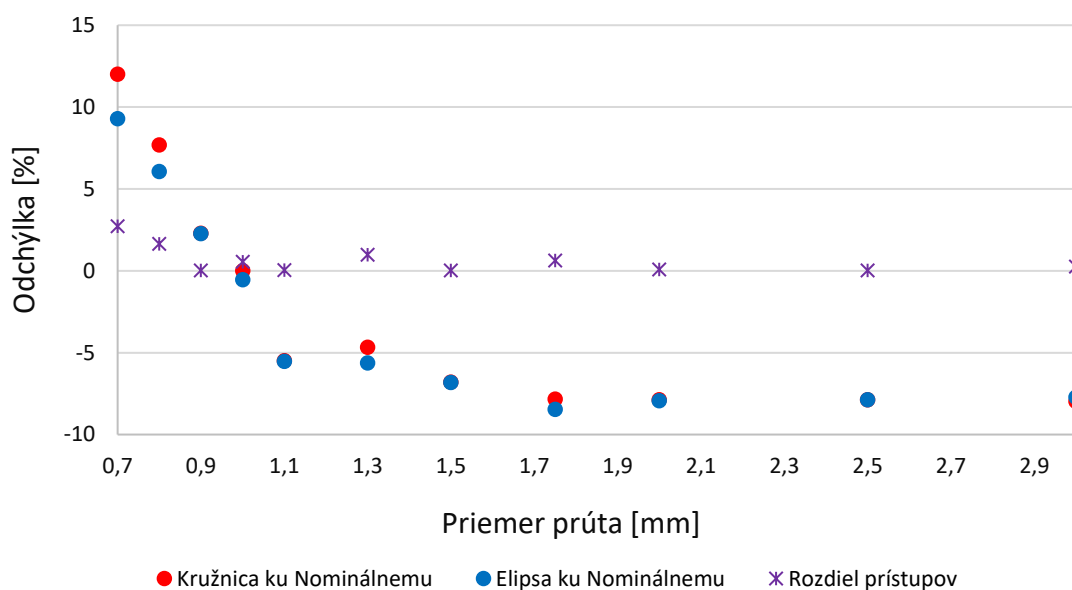
5.7.3 Výsledky priebehu sily

Výsledky síl z numerických simulácií elementárnej bunky boli porovnané aj s analytickým výpočtom. Odchýlka sa pohybovala na úrovni od -0,75 po 0,49 % numerického prístupu voči analytickému prístupu. Výsledky sily sú zobrazené na Obr. 5-27, pre priemery od 0,7 mm po 3 mm. Z priebehu je možné pozorovať väčších hodnôt sily aproximačnými prístupmi u priemerov 0,7 mm až 0,9 mm. Pri priemere 1 mm došlo k zhode hodnôt a s narastajúcim priemerom prúta došlo k zápornej odchýlke aproximačných prístupov voči nominálnemu.



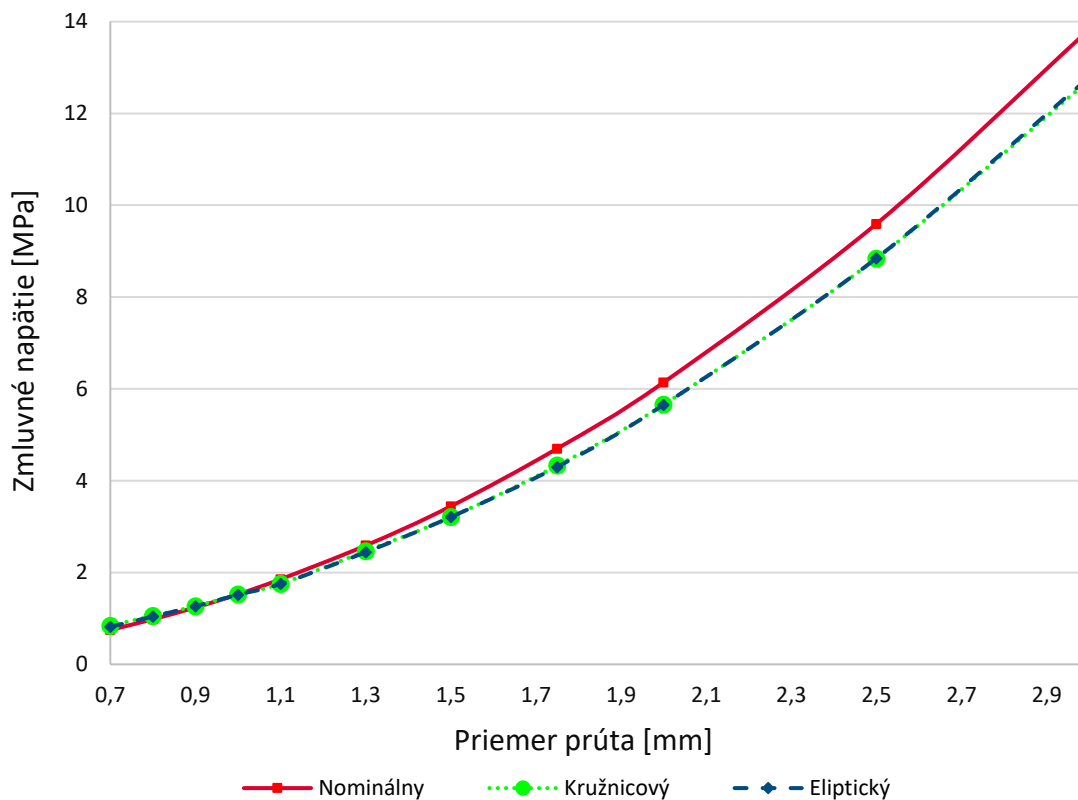
Obr. 5-27 Graf priebehu reakčnej sily elementárnej bunky.

Nasledujúci graf Obr. 5-28 zobrazuje odchýlku medzi numerickými simuláciami s rôznymi prístupmi priemeru prúta. Z výsledkov bolo možné pozorovať, že odchýlka aproximáciou prostredníctvom kružnice a elipsy prináša veľkú odchýlku vzhľadom k Nominálnemu rozmeru. Konkrétne hovoríme o odchýlke **12 %** a **9,3 %** pre **Kružnice**, respektíve **Elipsy** pri priemere 0,7 mm. Odchýlka medzi Kružnicovým a Eliptickým prístupom sa následne zmenšovala, čo v grafe zobrazuje aj závislosť **Rozdiel prístupov**. Pri hodnote priemeru 0,9 mm sa odchýlka medzi spomenutými prístupmi pohybovala na úrovni 0,02 %. Tento trend pokračoval až do priemeru 3 mm. Maximálna odchýlka dosiahla hodnoty 2,71 % pri priemere 0,7 mm. Vo všeobecnosti sa jednalo o rádovo menšiu odchýlku v porovnaní so závislosťami **Kružnica ku Nominálnemu** a **Elipsa ku Nominálnemu**, kde sa priemerná odchýlka pohybovala na úrovni -7 % medzi priemerom prúta 1,1 mm až 3 mm.



Obr. 5-28 Graf porovnania odchýlky jednotlivých simulačných prístupov.

Súčasťou vyhodnocovaných výsledkov boli taktiež aj hodnoty zmluvného napätia spočítané zo zložky reakčnej sily pôsobiacej v osi z. Pribeh je zobrazený na Obr. 5-29, kde bola dosiahnutá zhoda výsledkov z Eliptického a kružnicového prístupu. V rozsahu priemeru 1,1 mm – 3 mm bolo u nominálneho prístupu dosiahnutých väčších hodnôt ako z aproximačných prístupov. Do priemeru 1 mm dosahoval nominálny prístup naopak menších hodnôt. Pri priemere prúta 3 mm boli dosiahnuté hodnoty 12,79 MPa a 12,73 MPa pre eliptický, respektíve kružnicový prístup a 13,83 MPa pri nominálnom prístupe.

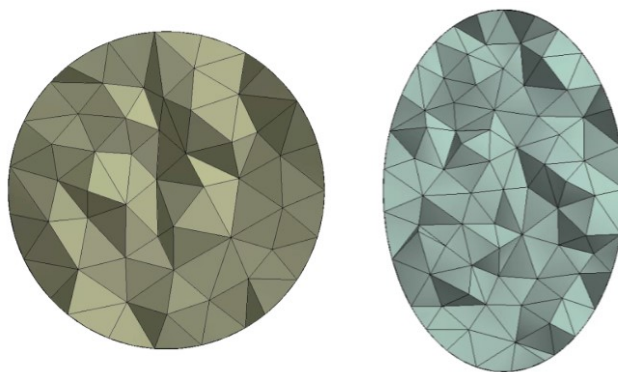


Obr. 5-29 Graf závislosti zmluvného napätia.

5.8 Numerické simulácie pre štúdium dopadu geometrických imperfekcií – Mikro-prúťová štruktúra

5.8.1 Kvalita konečno prvkovej siete

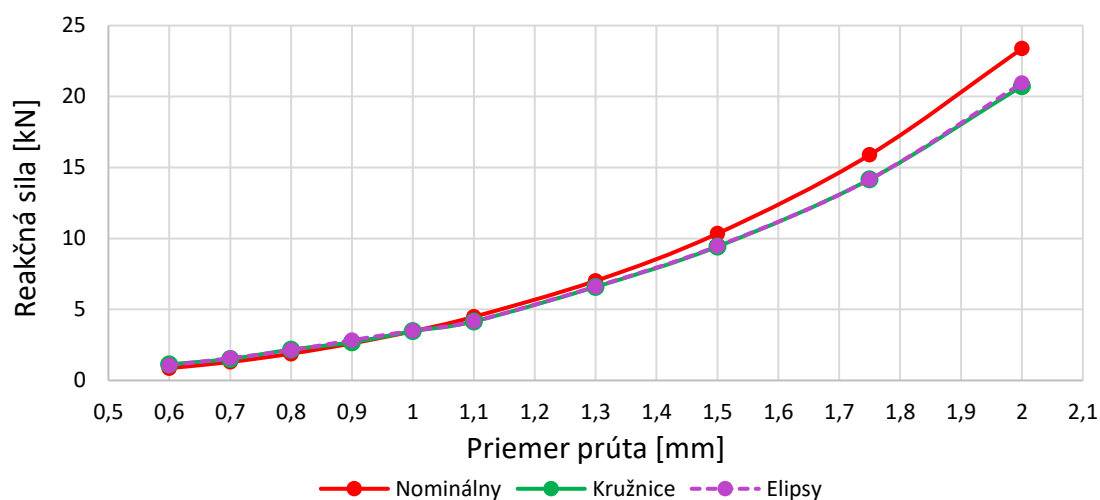
Veľkou výhodou na rozdiel od simulácií elementárnej bunky tu bola vysoká kvalita konečno prvkovej siete. V priemere hovoríme o hodnote 0,856 z maximálne možnej 1. Rozloženie najmenej kvalitných elementov dosahovalo podobného rozptylu ako je zobrazený na Obr. 5-25 a). Taktiež bolo možné dosiahnuť vždy aspoň 8 elementov v priemere prúta / najmenšej poloosi prierezu (viď Obr. 5-30).



Obr. 5-30 Rozloženie elementov v konečno prvkovej sieti kružnicového a eliptického prístupu.

5.8.2 Silová analýza

Obr. 5-31 zobrazuje priebeh reakčnej sily vo väzbe Displacement [0; 0; 0]. Kružnicový aj eliptický prístup dosahovali väčších hodnôt voči nominálnemu prístupu v rozsahu priemerov 0,6 mm až 0,9 mm. Pri priemeroch väčších ako 1 mm, kružnicový aj eliptický prístup dosahovali naopak menších hodnôt ako nominálny prístup. Geometria nominálneho a kružnicového prístupu dosahovala rovnakých hodnôt pri priemere 1 mm.



Obr. 5-31 Obrázok grafu priebehu reakčnej sily pri jednotlivých prístupoch.

V prípade kružnicového prístupu bola maximálna odchýlka dosiahnutá pri priemere 0,6 mm na úrovni 30,9 %. Nasledoval pokles v odchýlke od nominálnych hodnôt až do priemeru 2 mm, kedy dosahovala hodnotu -11,3 %. Odchýlka medzi kružnicovým a eliptickým prístupom nedosiahla väčšej hodnoty ako 1 % pri priemeroch väčších ako 1 mm (viď Tab. 5-8). V rozsahu 0,6 mm až 1 mm dochádza k poklesu odchýlky zo 7,4 % na hodnotu 1,1 % pri priemere 1 mm. Výnimka v klesajúcom priebehu nastala pri priemere 0,9 mm, kde odchýlka dosiahla 5,7 %.

Tab. 5-8 Tabuľka odchýlok aproximačných prístupov k nominálnemu priemery.

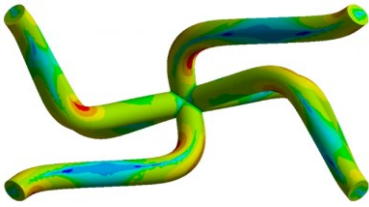
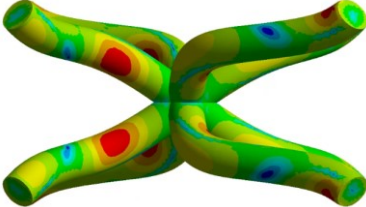
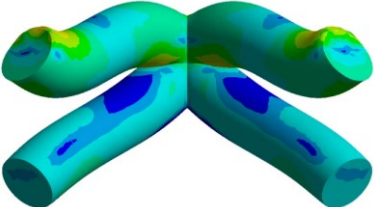
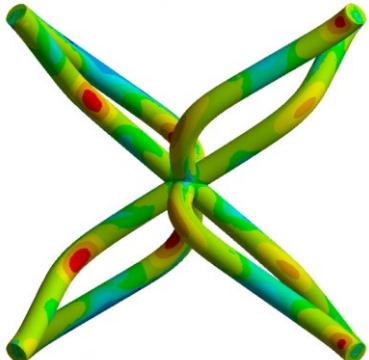
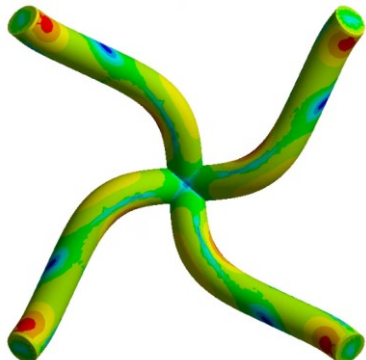
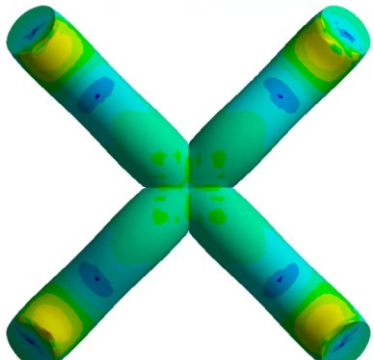
Priemer [mm]	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,3	1,5	1,75	2
Kružnice [%]	30,9	16,6	15,3	3	0	-7,3	-6,0	-8,8	-10,9	-11,3
Elipsy [%]	23,5	20,6	13,3	8,7	1,1	-7,1	-5,7	-8,5	-10,9	-10,4
Rozdiel [%]	7,4	4,0	2,0	5,7	1,1	0,2	0,3	0,4	0	0,9

5.8.3 Deformačná analýza elementárnej bunky

Pri vyhodnocovaní bol kladený dôraz aj na hodnoty redukovaného napätia, ako pri simuláciách elementárnej bunky (str. 85). Okrem sily bola porovnávaná aj deformácia objemovej bunky v štruktúre. Pri skúmaných priemeroch prúta bolo dosiahnutých troch

typov deformácií. Prvý (viď Tab. 5-9 vľavo), kedy dochádzalo k pootočeniu uzla okolo horizontálnej osi. Pri tomto type deformácie dochádzalo k asymetrii vybočenia prútov (viď pohľad zvrchu), tzn. bola dosiahnutá rôzna veľkosť deformácie pri dvoch skupinách protiľahlých prútov. Druhý typ (tabuľka stred), kedy dochádzalo k pootočeniu uzla voči vertikálnej osi. Pri tomto type deformácie dochádzalo aj k symetrickému vybočeniu prútov. Ide o podobný tvar deformácie ako bol pozorovaný pri experimentoch vykonaných v minulosti, čo len potvrdzuje kvalitu výsledkov. Pri poslednom type deformácie (tabuľka vpravo) dochádzalo k zlyhaniu jednej z dvojíc prútov vrch - spodok. Deformácia pri priemere 0,6 mm u všetkých prístupov a 0,7 mm u eliptického prístupu bola nejednoznačná kombinácia viacerých typov.

Tab. 5-9 Tabuľka typu deformácií.

Pohľad z boku			
Pohľad zvrchu			
Rozsah priemerov a typ geometrie	0,7 mm – 1 mm Nominálny / Kružnicový 0,9 mm a 1,3 mm Eliptický	1,1 mm – 1,3 mm Nominálny / Kružnicový 0,8 mm; 1 mm – 1,1 mm; 1,5 mm Eliptický	1,5 mm – 2 mm Nominálny / Kružnicový 1,75 mm a 2 mm Eliptický

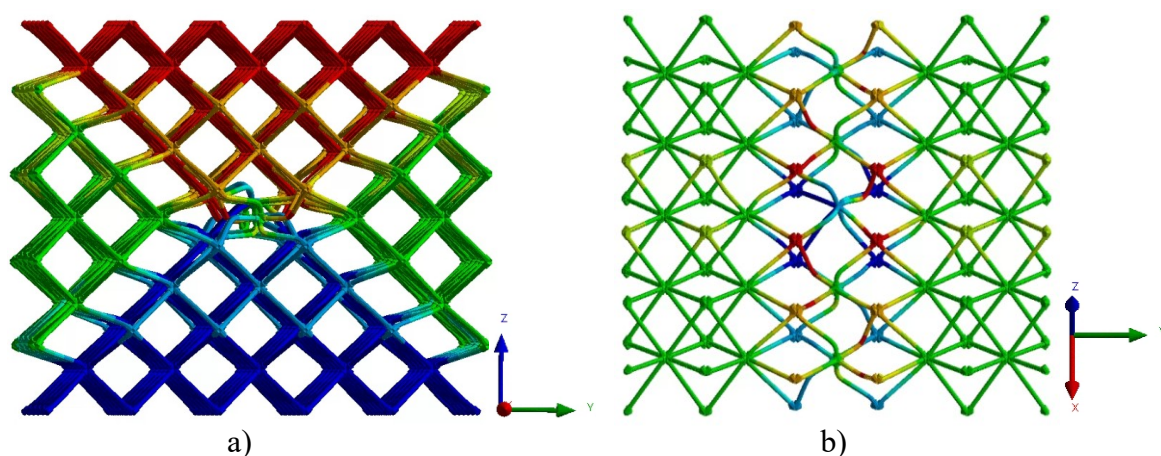
Využitý model geometrie priniesol kvalitné poznatky v oblasti štúdia dopadu geometrických imperfekcií, konkrétne zmeny veľkosti prierezu prúta a zmeny tvaru prierezu. Z vykonaných simulácií, hlavne simulácií mechanickej skúšky by bolo možné geometriu ďalej upraviť. Implementácia geometrie **Reálneho uzla**, ako bola využitá v kapitole 5.6 by mohla v budúcnosti priniesť reálnejšie výsledky.

6 DISKUSIA

6.1 Interpretácia výsledkov

6.1.1 Numerická simulácia – Rozmerová analýza štruktúry

Kvalitu výsledkov z Obr. 5-5 potvrdili následné simulácie na B-S-S-mod. modeli geometrie. Na Obr. 6-1 a) vidíme, že prostredná el. bunka bola spojnicou medzi deformáciami prichádzajúcimi z vrchnej a spodnej steny štruktúry. Na Obr. 6-1 b) vidíme výrez prostredej vrstvy, kde môžeme pozorovať podobné deformácie buniek, ako boli dosiahnuté v minulosti pri dynamických skúškach (Obr. 5-12 d)).



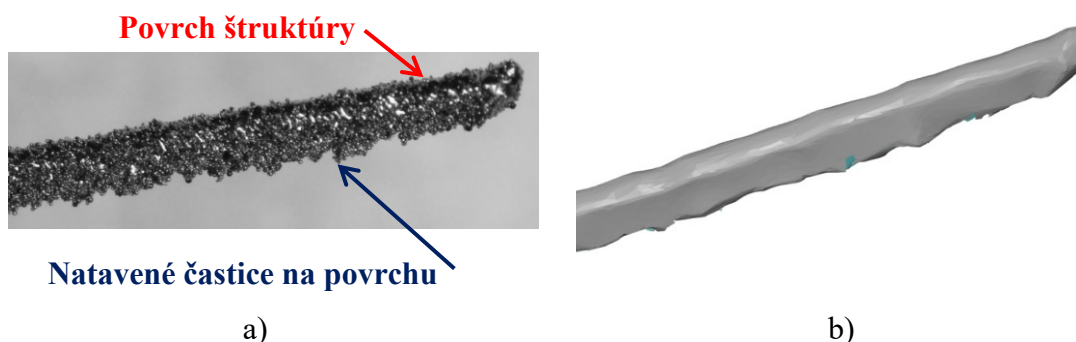
Obr. 6-1 Obrázok s deformáciou buniek v štruktúre.

6.1.2 Experiment reálnej geometrie:

Na základe výsledkov reálnej geometrie a pri stanovení kritickej odchýlky $\pm 5\%$, je možné formulovať nasledujúce tvrdenia. Pri aproximácii prostredníctvom kružníc bola nižšia odchýlka od nominálneho priemeru ako 5% dosiahnutá pri priemere $0,75+ \text{ mm}$. Aproximácia prostredníctvom elíps dosiahla odchýlku menšiu ako 5% pri hlavnej poloosi na hodnote nominálneho priemeru $1,1+ \text{ mm}$. V prípade vedľajšej poloosi bola odchýlka v celom rozsahu väčšia ako stanovený rozsah.

Podobného trendu v odchýlke zaznamenal aj Vrána [15], s BCC štruktúrami tvorenými zo zliatiny hliníka (Obr. 2-16), keď pri menších priemeroch dosiahol kladnej odchýlky, ktorá sa zmenšovala s narastajúcim priemerom prúta. Opačného trendu dosiahol Dong [6], ktorý tvoril tiež vzorky zo zliatiny hliníka, ale s uhlom kolmým na platformu. Pri menšom priemere dosahoval zápornej odchýlky, ktorá prešla do kladných hodnôt až s narastajúcim priemerom. Z týchto poznatkov je možné konštatovať, že charakteristika odchýlky prútov je závislá na uhle, pod ktorým sú prúty tvorené. Tieto skutočnosti môžu priniesť problém pri aplikácii poznatkov na ďalšie typy štruktúr a zdôrazňujú nutnosť získania reálnej geometrie.

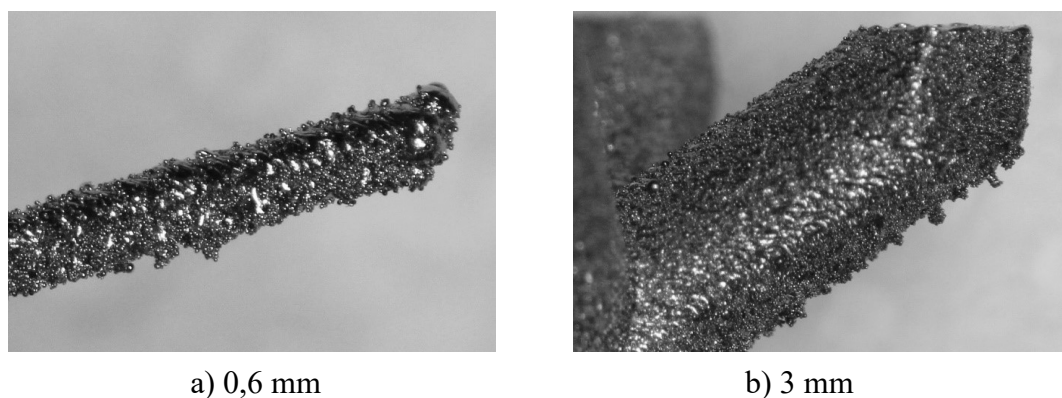
Pri výsledkoch z experimentu reálnej geometrie musí byť braný do úvahy samotný nástroj získavania reálnej geometrie. Ako môžeme vidieť na Obr. 6-2 dochádza k skresleniu informácie pri využití optickej digitalizácie. Na spodnej časti štruktúr na miestach kde dochádza k prichyteniu častíc základového materiálu (**modrá šípka** Obr. 6-2 a)), boli tieto oblasti naskenované rovnako ako oblasti na vrchnej časti prúta. Na obrázku bol porovnaný jeden / rovnaký prút. Toto tvrdenie je možné preukázať aj na výsledkoch absorbovanej energie z mechanickej skúšky (viď Obr. 5-20). Z grafu je možné pozorovať, že pri priemere prúta 0,5 mm a 0,75 mm nominálne prístupy dosahujú menšej odchýlky ako aproximačné.



Obr. 6-2 Obrázok reálnej a naskenovanej geometrie.

Na druhej strane je nutné poznamenať, že k prichyteniu nenatavených častíc na spodnom povrchu dochádzalo aj pri najväčších priemeroch prúta (viď Obr. 6-3). Rozdiel bol spôsobený v odchýlke, ktorú predstavovalo navýšenie voči 0,5 mm alebo 3 mm priemeru prúta. K prichyteniu nenatavených častíc dochádzalo z dôvodu využitej geometrie (tzn. uhol od podložky), keďže oblasť s roztaveným kovom bola zo spodnej strany obklopená základovým materiálom.

Jedným z možných dôvodov zmeny rozmeru je posun trajektórií lasera voči hranici navrhovanej geometrie. U väčších rozmerov mohlo dôjsť k vytvoreniu oblasti s roztaveným kovom, ktorá ale nesiahala k preddefinovanému okraju. Zhoda pri priemere 1 mm bola pravdepodobne spôsobená skutočnosťou, že vrstva prichytených častíc bola totožná s úbytkom spôsobeným posuvom trajektórií.



Obr. 6-3 Obrázok porovnania pri rôznych priemeroch.

6.1.3 Experiment mechanickej skúšky – porovnanie výsledkov s experimentom

Z výsledkov zobrazených na Obr. 5-20 je možné pozorovať platnosť hypotézy číslo 1.1. Úpravou priemeru prúta alebo aj úpravou tvaru prierezu na eliptický, je možné dosiahnuť zníženie odchýlky medzi výsledkami numerickej simulácie a experimentom pod 5 %. O zhode výsledkov je možné hovoriť pri priemeroch prúta 0,75-1,25 mm.

Výsledky simulácií na Obr. 5-20 vo všeobecnosti porovnávajú dva prístupy geometrie. Prvý, kedy sú aplikované poznatky z experimentu reálnej geometrie o rozmere prúta. Druhý, ktorý sa zaoberá úpravou geometrie uzlov. Oba prístupy ovplyvňujú výsledky, ovšem z výsledkov je možné konštatovať, že implementácia Reálnej geometrie uzlov prinesie presnejšie výsledky k experimentu. Na druhej strane je nutné zaoberať sa problematikou zmeny prierezu, čo zobrazuje aj Obr. 6-4.

Pri porovnávaní numerických prístupov s hodnotami experimentu je nutné brať na zreteľ problematiku zmeny materiálového modelu vzhľadom k priemeru prúta. Najväčšiu vypovedaciu hodnotu majú práve výsledky pri menších hodnotách priemeru. Konkrétne je to z toho dôvodu, že model materiálu bol stanovený na vzorkách s priemerom 0,6 mm. Dong vo svojej štúdií [6], popísal zmenu mechanických vlastností na úrovni 30 % medzi priemerom 1 mm a 5 mm. Z obrázka Obr. 2-8 je možné pozorovať výraznú zmenu hlavne medzi priemerom 1 mm a 3 mm.

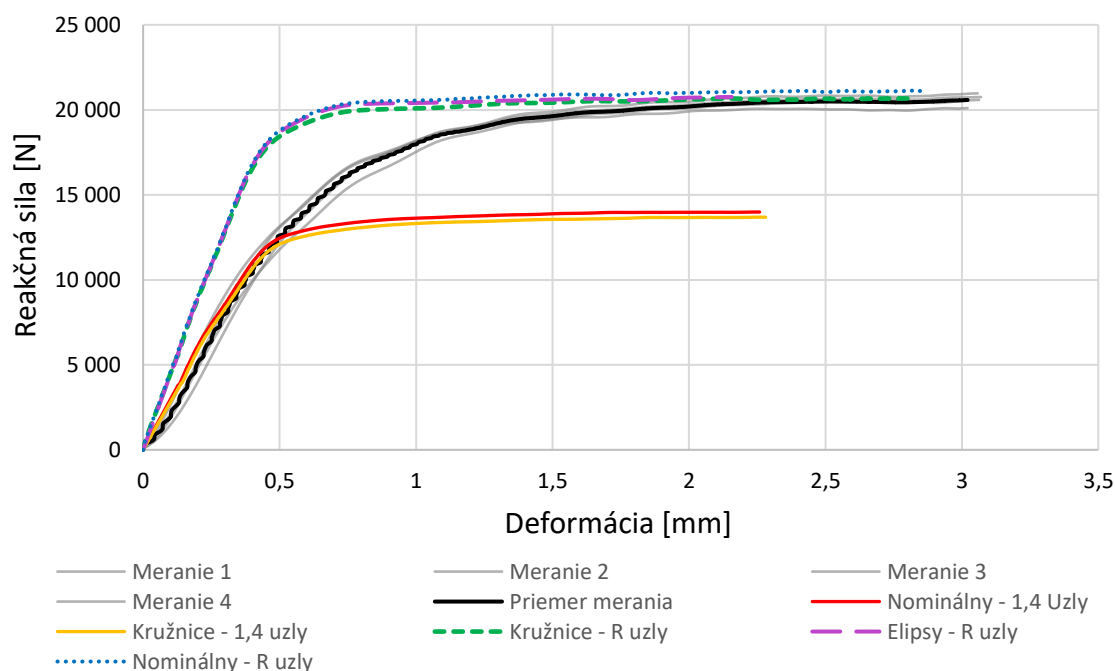
Pri priemeroch prúta 0,5 mm a 0,75 mm dosiahli najbližšiu hodnotu maximálnej sily k prístupu Nominálny – 1,4 uzly práve pri prístupe Nominálny – R uzly (Obr. 5-22). Prístupy využívajúce hodnoty aproximácie prostredníctvom kružnice dosahovali väčšej odchýlky maximálnej sily voči prístupu Nominálny – 1,4 / R uzly. Táto skutočnosť taktiež umocňovala tvrdenie, že dochádza k skresleniu hodnôt reálneho priemeru prúta pri využití optickej digitalizácie u menších priemerov. Druhá skupina výsledkov (priemer prúta 1,25 mm a 1,5 mm) zase potvrdila tvrdenie, že pri aproximácií kružnicou dochádza k zápornej odchýlke priemeru prúta. Z grafu na Obr. 5-22 je možné pozorovať, že aproximačné prístupy využívajúce kružnice dosahujú menších hodnôt síl ako nominálne prístupy.

Modifikácia geometrie na eliptický tvar prierezu nespĺnila očakávania pri znížení odchýlky vo výsledkoch. Z grafu na Obr. 5-22 je možné pozorovať, že tento prístup dosahoval najväčších odchýlok maximálnych síl pri priemeroch 0,5 mm až 1 mm a k dorovnaní na hodnoty kružnicového prístupu s Reálnymi uzlami došlo pri priemeroch 1,25 mm a 1,5 mm. Z tohto dôvodu už využitie elíps nemá význam. Z výsledkov na Obr. 5-20 je možné pozorovať, že eliptické prístupy dosahujú najväčšej odchýlky v rozsahu prútov 0,5 mm až 1 mm. Preto využitie tohto prístupu neprináša žiadne výhody oproti kružnicovému prístupu s reálnymi uzlami.

Aplikácia reálneho rozmeru prútov do geometrie priniesla vo väčšine prípadov zmenšenie hĺbky deformácie a priblíženie sa k hodnotám získaným z experimentu. Výraznú zmenu

veľkosti deformácie je možné pozorovať pri priemeroch prúta 0,5 mm až 1 mm, pričom zmena sa prejavila aj pri priemere 1,25 mm (viď Obr. 6-4). So zmenou reálnej geometrie uzlov sa spája aj ďalší jav, viditeľnejší práve pri väčších priemeroch prúta. Z Obr. 6-4 je možné pozorovať výraznú zmenu smernice v počiatku deformačnej krivky. Na obrázku dochádza v počiatkovej fáze k odklonu numerických prístupov Nominálny a Kružnicový s 1,4 uzlami. Pri priemere 1,25 mm je problematika javu o to dôležitejšia, že dochádza aj k odklonu od hodnôt získaných z merania, zatiaľ čo prístupy s 1,4 uzlami dosahujú priebehu podobného s experimentom. Príčin môže byť viacero: Materiálový model stanovený pre odlišnú geometriu, prichytené častice základového materiálu, ktoré boli súčasťou geometrie pri vyhodnocovaní (problematika kapitoly 6.1.2) ale aj geometria uzla. Pri prístupoch kde sa vyskytol tento jav boli využité **Reálne uzly**. V prípade geometrie reálnych uzlov sú kľúčové rozmery polomer uzla a priemer prierezu prúta v oblasti uzlov. Svetlo do problematiky by mohla priniesť parametrická analýza, ktorá by sa zaoberala práve vplyvom týchto rozmerov.

Dopad aplikácie Reálnych uzlov (konkrétne priemeru prierezu prúta v oblasti uzlov a veľkosti rozmeru prúta) by mohol byť centrom záujmu v budúcnosti. Konkrétne hovoríme o dvoch hodnotách. Priemer prierezu prúta v oblasti uzlov a veľkosť rozmeru prúta, tzn. vzdialenosť od stredu uzla, ktorá dosahuje zväčšeného prierezu. Z výsledkov (Obr. 5-20 a Obr. 6-4) je možné pozorovať, že využitie geometrie reálneho uzla bol krok správnym smerom.



Obr. 6-4 Obrázok grafu merania a numerických simulácií pri priemere prúta 1,25 mm.

6.1.4 Simulácie dopadu imperfekcií –Elementárna bunka

Výsledky simulácií elementárnej bunky využívajú predpoklady hypotézy číslo 1.1 (str. 35) ktorá hovorí, že dostatočnú zmenu vo výsledkoch mechanických vlastností je možné doceliť

zmenou prierezu prúta (veľkosť priemeru prierezu a tvar prierezu). Výsledky numerických simulácií (Obr. 5-27 a Obr. 5-28) sa zhodovali s výsledkami získanými z analytického prístupu, pričom hovoríme o odchýlke menšej ako 1 %. Výsledky z modelu elementárnej bunky vychádzali z predpokladaného teoretického namáhania v štruktúre o nekonečných rozmeroch.

Z výsledkov reakčnej sily ktoré boli získané na základe numerických simulácií (Obr. 5-28) je možné konštatovať nasledujúce tvrdenie: **Úprava geometrie prierezu prúta z kruhového na eliptický nepriniesla úžitok pri priemere väčšom ako 0,8 mm.** Vznik eliptického prierezu pri vyhodnocovaní bol s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobený prichytením nenatavených častíc na povrchu, ktoré by sa na ňom za ideálnych podmienok nenachádzali.

Úprava na reálne hodnoty priemeru pri aproximácii prostredníctvom kružnice sa ukázala ako potrebná v celom rozsahu priemerov. Výnimku predstavovala iba hodnota priemeru 1 mm, kedy dochádza k zmene odchýlky z kladnej hodnoty na zápornú (viď Obr. 5-28). Ako už bolo diskutované vyššie, s najväčšou pravdepodobnosťou dochádza k odchýlke z dôvodu posunu trajektórií lasera. Taktiež by bolo zaujímavé rovnaký experiment získania reálnej geometrie vykonať aj pri iných uhloch od podložky, napríklad 90 °, podobne ako Dong [7]. Mohlo by nám to priniesť znalosti o dopade na reálnu geometriu, čo by následne mohlo byť využité pri štúdiu iných typov mikro-prúťových štruktúr.

6.1.5 Simulácie dopadu imperfekcií – Mikro-prúťová štruktúra

Výsledky silovej analýzy potvrdzujú výsledky simulácií elementárnej bunky a taktiež vychádzali z predpokladov hypotézy číslo 1.1. Rozdiel medzi odchýlkami zo štruktúr (Tab. 5-8) a buniek (Obr. 5-28) je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobený prítomnosťou uzlov v štruktúre. Pri aplikácii poznatkov o reálnych uzloch z mechanickej skúšky by pravdepodobne bolo možné dosiahnuť výsledky, ktoré sa viac blížila aplikačným výsledkom.

Na základe výsledkov boli stanovené tri hlavné typy deformácie. Jedná sa o deformácie ktoré sa vyskytovali v rozsahu testovaných priemerov. Na základe tvaru deformácie by sa dal predpokladať spôsob zlyhania väčších štruktúr.

- Pri menších priemeroch prúta – Nominálny rozmer: 0,7 mm – 1,3 mm – je predpoklad zlyhania v stredovej oblasti prúťov.
- Pri väčších priemeroch prúta – Nominálny rozmer 1,5 mm – 2 mm – k maximálnym hodnotám napätia dochádzalo v oblasti uzlov, čo by mohlo signalizovať zlyhanie práve v tejto oblasti.

Rozdiel v type deformácie bol pravdepodobne spôsobený geometrickými nelinearitami, ktoré pri menších priemeroch spôsobili zlyhanie prúťov (prúty s väčšou štihlosťou). Zaujímavým javom je aj rozdielnosť deformácií do priemeru 1 mm a nad priemer 1 mm. Nakoľko veľkosť deformácie štruktúry bola rovnaká (-5 mm) u malých priemerov (0,7 mm

– 1 mm) bola zmena tvaru deformácie spôsobená pôsobiacou silou mimo osi prúta, čo bolo pri daných rozmeroch priemeru prúta kritické. Z obrázku v Tab. 5-9 (ľavý stĺpec) je možné pozorovať vybočenie do smeru totožného so smerom zaťažovania. Do budúcnosti by bolo zaujímavé na použitom modeli geometrie študovať dopad aj ďalších imperfekcií ako napríklad vyosenie od osi prúta.

6.2 Verifikácia hypotéz

6.2.1 Výskumná otázka č. 1:

Na základe výsledkov v grafe na Obr. 5-20, kde bolo dosiahnutej odchýlky menšej ako 5 % medzi výsledkami experimentu a numerickej simulácie, je možné potvrdiť platnosť hypotézy číslo 1.1. Hypotéza 1.1 tvrdila, že na základe úpravy priemeru alebo tvaru prierezu prúta je možné znížiť odchýlku vo výsledkoch pod 5 %. Popísaný predpoklad bol splnený pri priemere 0,75 mm až 1,25 mm. Pri priemere 0,5 mm bola odchýlka na základe zhrnutia v kapitole 6.1 spôsobená samotnou technológiou získania reálnej geometrie (optické skenovanie). V prípade priemeru prúta 1,5 mm došlo k väčšej odchýlke ako 5 %, čo môže byť spôsobené výraznou odlišnosťou v geometrii, na ktorej bol stanovený model materiálu. Táto skutočnosť hrá veľkú rolu v prípade využitej technológie.

6.2.2 Výskumná otázka č. 2:

Riešenie na základe porovnania experimentu s numerickej simuláciou:

Na základe výsledkov absorbovanej energie z mechanickej skúšky (Obr. 5-20) je možné povedať, že pri hodnotách priemeru 0,75 mm a 1 mm je možné zanedbať vplyv imperfekcií. Toto tvrdenie sa opiera o výsledky ktoré ukazujú, že Nominálny prístup s 1,4 uzlami dosiahol odchýlky menšej ako 5 % voči hodnotám experimentu.

Riešenie na základe numerickej simulácií s rôznymi prístupmi:

Druhý pohľad na problematiku prinášajú simulácie dopadu geometrických imperfekcií. Tento prístup sa zaoberá odchýlkou reakčnej sily medzi aproximačnými prístupmi a prístupom s nominálnou geometriou. Pri výsledkoch elementárnej bunky (Obr. 5-28) a mikro-prútovej štruktúry (Tab. 5-8), bola odchýlka menšia ako 5 % voči nominálnemu prístupu dosiahnutá iba pri priemere 0,9 mm a 1 mm. Jedná sa hodnoty priemeru, kedy dochádza k prechodu z kladných do záporných hodnôt v odchýlke voči priemeru prúta.

7 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberala štúdiom dopadu geometrických imperfekcií (zmena veľkosti priemeru a zmena tvaru prierezu) na výsledné mechanické vlastnosti. Zameranie práce sa od doterajších štúdií líšilo v tom, že na rozdiel od mapovania výsledkov numerických simulácií k experimentu je študovaný priamo dopad, ktorý spôsobujú spomenuté geometrické imperfekcie.

V počiatku riešenia práce bola vykonaná rešeršná štúdia v oblasti geometrických imperfekcií vyskytujúcich sa v mikro-prútvých štruktúrach, metódach digitalizácie reálnej geometrie ale aj o možnostiach úpravy modelu geometrie pre numerické simulácie. Na základe rešerše boli následne vybrané geometrické imperfekcie, ktoré majú najväčší dopad na mechanické vlastnosti.

Prvým krokom praktickej časti bolo stanovenie najmenej veľkosti mikro-prútovej štruktúry, ktorá bola následne využívaná pri zjednodušovaní výpočtového modelu. Vytvorený zjednodušený model geometrie umožnil študovať spomenuté geometrické imperfekcie v rozsahu, ktorého by nebolo možné dosiahnuť pri použití štandardných postupov z dôvodu vysokej výpočtovej náročnosti.

Následne boli vytvorené vzorky prostredníctvom technológie SLM. Jednalo sa o vzorky kryštalickej mriežky typu BCC pre experiment reálnej geometrie a experiment mechanickej skúšky. Vyrábané vzorky boli vytvorené v dvoch sériách, pričom zakaždým boli použité rovnaké procesné parametre.

Časť vzoriek bola digitalizovaná pomocou optického skenera ATOS Triple Scan. Vyhodnotenie prebiehalo automatizovane v programe GOM Inspect a získané poznatky boli následne využité v numerických simuláciách. Zvyšné vzorky boli využité pri testovaní na pádovom testeri, z ktorého boli použité výsledky pri mapovaní výsledkov numerických simulácií v kombinácii so znalosťami zdigitalizovaných vzoriek. Nadobudnuté poznatky boli následne využité pri štúdiu dopadu geometrických imperfekcií.

Z výsledkov boli následne potvrdené hypotézy a niektoré z dosiahnutých poznatkov sú:

- Pri využití poznatkov reálnej geometrie bolo možné dosiahnuť medzi výsledkami experimentu mechanickej skúšky a numerickými simuláciami odchýlky menšej ako 5 %.
- Pri porovnaní reálnych rozmerov geometrie voči nominálnym rozmerom bolo dosiahnutej odchýlky až na hodnote 29,7 %, pričom odchýlka voči nominálnemu rozmeru sa vyskytovala takmer v celom intervale v rozsahu priemeru 0,5 mm až 3 mm.
- Pri výsledkoch simulácií študujúcich dopad geometrických imperfekcií bola odchýlka reakčnej sily väčšia ako 5 % pre všetky hodnoty prúta okrem 0,9 mm a 1 mm.
- Bol pozorovaný veľký dopad na výsledky MKP simulácií pri úprave geometrie uzlov.

Prínosom práce bol aj zjednodušený model geometrie, ktorý umožnil získať kvalitné výsledky v oblasti silovej a deformačnej charakteristiky so zahrnutím geometrických imperfekcií. Práve tento model geometrie má v budúcnosti potenciál objasniť dopad ďalších imperfekcií sprevádzajúcich technológiu SLM. Výhodou by tiež mohla byť jeho ďalšia úprava na iný typ kryštalickej mriežky, kedy by získané poznatky mohli pomôcť k rozšíreniu mikro-prútvých štruktúr v bežných aplikáciách.

Vytvorenie efektívneho modelu geometrie, využitie dostupných metód na získanie reálnej geometrie ale aj identifikácia kľúčových parametrov geometrie v budúcnosti poslúžia k efektívnejšiemu návrhu komponentov s mikro-prútvými štruktúrami. Okrem časovej a finančnej úspory pri vývoji hovoríme aj o poznatkoch, ktoré umožnia jednoduchšiu implementáciu do oblasti medicíny, ako aj do obvyklých oblastí priemyslu ako je automobilový a letecký. Využitie mikro-prútvých štruktúr v deformačných zónach automobilov môže okrem úspory hmotnosti zachrániť mnoho ľudských životov.

Všetky ciele diplomovej práce boli splnené.

8 VÝSLEDOK VÝSKUMU PODĽA RIV

Výsledky dosiahnuté v tejto diplomovej práci rozširujú oblasť poznania geometrických imperfekcií vyskytujúcich sa v mikro-prútových štruktúrach. Za účelom publikácie výsledkov vznikol manuskript pre odborný článok.

Názov článku: Model of geometry of micro-lattice structures for finite element method

Autori: D. Javorský, O. Červinek, T. Koutecký, D. Koutný

Abstrakt (Anglická verzia):

The growing availability of additive manufacturing technology, such as SLM, enables the creation of innovative structural designs. An example of these are complex lattice structures which are used because of their excellent mechanical properties relative to weight. One significant challenge lies in production tolerances. These are not crucial for the majority of components. However, when dealing with lattice structures and their thin-walled geometry, manufacturing tolerances lead to substantial deviations in mechanical properties. The process of designing such structures and achieving results comparable to the experiment requires the use of non-standard methods. These methods are time-consuming and costly for obtaining real geometry. The real geometry is then used for numerical simulations based on the FEM principle. This thesis focuses on the impact of geometric imperfections occurring in BCC-type structures made of stainless steel 316L. During the solution, the real geometry was obtained through optical digitization using the ATOS Triple Scan scanner. Dynamic drop-weight tests were also conducted, and the obtained results were used to modify the geometry model in combination with the acquired real geometry. The aim was to minimize the deviation between experimental and numerical simulation results below 5%. The knowledge gained from this process was then applied in simulations investigating the impact of geometric imperfections. Deviations up to 30% were observed in simulations investigating the impact of geometric imperfections. These deviations can be minimized by incorporating the knowledge of real geometry into the design. The results also help determine the diameter range within which including geometric imperfections in the design is irrelevant. Furthermore, a significant impact of the node geometry on the results of numerical simulations was observed. This knowledge brought the values closer to the experimental data. Another important contribution of this work is the simplified geometry model. This model will enable the study of the impact of additional imperfections in a range that was previously unattainable.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] LEARY, Martin, Maciej MAZUR, Joe ELAMBASSERIL, Matthew MCMILLAN, Thomas CHIRENT, Yingying SUN, Ma QIAN, Mark EASTON a Milan BRANDT. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials & Design* [online]. 2016, **98**, 344–357 [vid. 2023-05-22]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2016.02.127
- [2] VAN BAELE, S., G. KERCKHOFS, M. MOESEN, G. PYKA, J. SCHROOTEN a J. P. KRUTH. Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2011, **528**(24), 7423–7431 [vid. 2023-05-22]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/J.MSEA.2011.06.045
- [3] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design* [online]. 2019, **183**, 108137 [vid. 2023-05-22]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2019.108137
- [4] ALOMAR, Zaki a Franco CONCLI. A Review of the Selective Laser Melting Lattice Structures and Their Numerical Models. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2020, **22**(12), 2000611 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1527-2648. Dostupné z: doi:10.1002/ADEM.202000611
- [5] CHERRY, J. A., H. M. DAVIES, S. MEHMOOD, N. P. LAVERY, S. G.R. BROWN a J. SIENZ. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, **76**(5–8), 869–879 [vid. 2023-05-22]. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-014-6297-2/METRICS
- [6] DONG, Zhichao, Xiaoyu ZHANG, Wenhua SHI, Hao ZHOU, Hongshuai LEI a Jun LIANG. Study of Size Effect on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Samples Made by Selective Laser Melting. *Materials 2018, Vol. 11, Page 2463* [online]. 2018, **11**(12), 2463 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA11122463
- [7] DONG, Zhichao, Yabo LIU, Weijie LI a Jun LIANG. Orientation dependency for microstructure, geometric accuracy and mechanical properties of selective laser melting AlSi10Mg lattices. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2019, **791**, 490–500 [vid. 2023-05-22]. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:10.1016/J.JALLCOM.2019.03.344

- [8] ČERVINEK, Ondřej, Benjamin WERNER, Daniel KOUTNÝ, Ondřej VAVERKA, Libor PANTĚLEJEV a David PALOUŠEK. Computational Approaches of Quasi-Static Compression Loading of SS316L Lattice Structures Made by Selective Laser Melting. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 2462 [online]. 2021, **14**(9), 2462 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA14092462
- [9] LI, Dongming, Ruixian QIN, Bingzhi CHEN a Junxian ZHOU. Analysis of mechanical properties of lattice structures with stochastic geometric defects in additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2021, **822**, 141666 [vid. 2023-05-22]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/J.MSEA.2021.141666
- [10] CAO, Xiaofei, Yongbo JIANG, Tian ZHAO, Panding WANG, Yongzhen WANG, Zihao CHEN, Ying LI, Dengbao XIAO a Daining FANG. Compression experiment and numerical evaluation on mechanical responses of the lattice structures with stochastic geometric defects originated from additive-manufacturing. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2020, **194**, 108030 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108030
- [11] VRÁNA, Radek, Ondrej CERVINEK, Pavel MANAS, Daniel KOUTNÝ a David PALOUŠEK. Dynamic Loading of Lattice Structure Made by Selective Laser Melting-Numerical Model with Substitution of Geometrical Imperfections. *Materials* 2018, Vol. 11, Page 2129 [online]. 2018, **11**(11), 2129 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA11112129
- [12] LOZANOVSKI, Bill, David DOWNING, Rance TINO, Anton DU PLESSIS, Phuong TRAN, John JAKEMAN, Darpan SHIDID, Claus EMMELMANN, Ma QIAN, Peter CHOONG, Milan BRANDT a Martin LEARY. Non-destructive simulation of node defects in additively manufactured lattice structures. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **36**, 101593 [vid. 2023-05-22]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/J.ADDMA.2020.101593
- [13] AMANI, Yasin, Sylvain DANCETTE, Pauline DELROISSE, Aude SIMAR a Eric MAIRE. Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Acta Materialia* [online]. 2018, **159**, 395–407 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:10.1016/J.ACTAMAT.2018.08.030
- [14] LEI, Hongshuai, Chuanlei LI, Jinxin MENG, Hao ZHOU, Yabo LIU, Xiaoyu ZHANG, Panding WANG a Daining FANG. Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis. *Materials & Design* [online]. 2019, **169**, 107685 [vid. 2023-05-22]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATDES.2019.107685

- [15] VRÁNA, Radek, Tomáš KOUTECKÝ, Ondřej ČERVINEK, Tomáš ZIKMUND, Libor PANTĚLEJEV, Jozef KAISER a Daniel KOUTNÝ. Deviations of the SLM Produced Lattice Structures and Their Influence on Mechanical Properties. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 3144 [online]. 2022, **15**(9), 3144 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA15093144
- [16] LABEAS, G. N. a M. M. SUNARIC. Investigation on the Static Response and Failure Process of Metallic Open Lattice Cellular Structures. *Strain* [online]. 2010, **46**(2), 195–204 [vid. 2023-05-22]. ISSN 1475-1305. Dostupné z: doi:10.1111/J.1475-1305.2008.00498.X
- [17] GENG, Xiaoliang, Liyang MA, Chao LIU, Chen ZHAO a Zhu Feng YUE. A FEM study on mechanical behavior of cellular lattice materials based on combined elements. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2018, **712**, 188–198 [vid. 2023-05-22]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/J.MSEA.2017.11.082
- [18] *Sensor Configurations - GOM ATOS II Triple Scan User Manual [Page 8] | ManualsLib* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/1816996/Gom-Atos-Ii-Triple-Scan.html?page=8#manual>
- [19] PALOUSEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNY, Josef BEDNAR, Tomas KOUTECKY a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials* [online]. 2015, **40**, 1–9 [vid. 2023-05-26]. ISSN 0925-3467. Dostupné z: doi:10.1016/J.OPTMAT.2014.11.020
- [20] SOBOL, Vítězslav. *NÁVRH AUXETICKÝCH STRUKTUR PRO 3D TISK* [online]. 2022 [vid. 2023-05-26]. Dostupné z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>
- [21] *Column Buckling | MechaniCalc* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://mechanicalc.com/reference/column-buckling#note-yield-strength>
- [22] *mechanical engineering - Calculation of critical column buckling load using Johnson's formula, but with eccentricity? - Engineering Stack Exchange* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://engineering.stackexchange.com/questions/49685/calculation-of-critical-column-buckling-load-using-johnsons-formula-but-with-e>
- [23] *Johnson's parabolic formula - Wikipedia* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%27s_parabolic_formula
- [24] *Ansys Help* [online]. [vid. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://ansyshelp.com/>

10 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

\emptyset	priemer
316L	nerezová oceľ
AlSi10Mg	zliatina hliníka
AM	additive manufacturing
BCC	Body Centered Cubic (typ štruktúry)
BCCZ	Body Centered Cubic - prúty z (typ štruktúry)
CAD	Computer-aided Design
d	priemer prúta
d_i	vedľajšia poloosa
d_o	hlavná poloosa
E	Youngov modul pružnosti
EA	absorbovaná energia
FCC	Face Centered Cubic (typ štruktúry)
FCBCCXYZ	Face-Body Centered Cubic – prúty x, y a z (typ štruktúry)
Ti6Al4V	zliatina titánu
LED	luminiscenčná dióda (anglicky: Light-Emitting Diode)
M	Maxwellovo číslo
MKP	Metódy konečných prvkov
MPC	multipoint constraint – viacbodové napojenie (typ väzby)
n	počet uzlov v sústave
px	pixel
s	počet prútov v sústave
SEA	merná absorbovaná energia
SLM	Selective Laser Melting
STEP	typ formátu
STL	typ formátu
Q	distribúcia počtu častíc

11 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 2-1 Rozdelenie článkov na základe scientometrických údajov.....	15
Obr. 2-2 PRISMA diagram.....	16
Obr. 2-3 Typy prútových sústav a) Nedostatočne tuhá, b) Príliš tuhá a c) Dostatočne tuhá [1].	17
Obr. 2-4 Rozloženie prútov v mikro-prútových štruktúrach: modré 0°, zelené 35,26°, žlté 45° a červené 90° [1].	17
Obr. 2-5 Javy spojené s technológiou SLM a) Staircase effect a b) Odvod tepla [3, 4]. ...	18
Obr. 2-6 Prichytenie nenatavených častíc na povrchu prútov tvorených pod uhlom 35,26°, 45° a 90° [1].	19
Obr. 2-7 Grafy závislostí vlastností a procesn. parametrov a) Drsnosť – Energia a b) Pórovitosť – Energia [5].	19
Obr. 2-8 Grafy zobrazujúce vplyv na mechanické vlastnosti pri rôznych priemeroch prúta [6].	20
Obr. 2-9 Grafy zobrazujúce vplyv na mechanické vlastnosti pri rôznych uhloch tvorby vzoriek [7].	21
Obr. 2-10 Vyosenie prierezu od osy prúta a princíp vyhodnocovania [9].	23
Obr. 2-11 Graf výsledkov absorpcie energie a mernej absorpcie energie z rôznych výpočtových modelov [10].	24
Obr. 2-12 Rozloženie veľkostí priemeru prúta a uzlov [13].	24
Obr. 2-13 Rozptyl hodnôt priemeru prúta pri štruktúrach BCC a BCCZ a) Diagonálny prút BCCZ štruktúry b) Vertikálny prút BCCZ štruktúry a c) Vertikálny prút BCC štruktúry [14].	25
Obr. 2-14 Geometria pre numerické simulácie obohatená o poznatky zmeny priemeru prúta [14].	25
Obr. 2-15 Grafy s výsledkami modulu tlaku z numerických simulácií a experimentu [14].	26
Obr. 2-16 Obrázok poukazujúci na zmenu tvaru prierezu a) Vyhodnocovacie kritéria a b) Graf výsledkov pri jednotlivých rozmeroch [15].	26
Obr. 2-17 Grafy porovnávajúce experiment a numerickú simuláciu a) Priemer 0,6 mm a b) Priemer 1,5 mm [15].	27
Obr. 2-18 Obrázok zobrazujúci zrekonštruovanú geometriu pomocou röntgenovej mikrotomografie [12].	28

Obr. 2-19 Obrázok zobrazujúci modifikáciu elementov v oblasti uzlov mikro-prútovej štruktúry [8].	28
Obr. 2-20 Obrázok s kombinovanou geometriou a) Navrhnuté ťahové vzorky, b) Popis MPC a c) Výsledky na elementárnej bunke (objemová geometria): Ekvivalentné napätie [17].	29
Obr. 2-21 Grafy porovnávajúce výsledkov z experimentu a numerických simulácií a) Reakčná sila a b) Deformácia v ose X [11].	30
Obr. 4-1 Obrázok postupu riešenia diplomovej práce.	37
Obr. 4-2 Rozloženie vzoriek na platforme.....	39
Obr. 4-3 Obrázok segmentov štruktúr pred a po zmatnení.	40
Obr. 4-4 Obrázok prístrojového vybavenia experimentu mechanickej skúšky [20].	41
Obr. 4-5 Obrázok geometrie segmentov štruktúr.	43
Obr. 4-6 Obrázok vyhodnocovania prútov.	44
Obr. 4-7 Obrázok vyhodnocovania uzlov.....	44
Obr. 4-8 Obrázok s princípom získania rozmeru uzla pre numerické simulácie.	45
Obr. 4-9 Prevedenie výpočtu do problematiky jedného prúta.	46
Obr. 4-10 Obrázok s hodnotami faktoru efektívnej dĺžky [21]......	46
Obr. 4-11 Obrázok nastavenia a vyhodnotenia simulácie rozmerovej analýzy štruktúry. .	50
Obr. 4-12 Spôsob zaťaženia mikro-prútovej štruktúry.	51
Obr. 4-13 Nastavenie kontaktu modelu geometrie Beam-Surface-Solid.	53
Obr. 4-14 Popísanie geometrických modelov zjednodušeného modelu.....	54
Obr. 4-15 Obrázok nastavenia simulácie elementárnej bunky.	55
Obr. 4-16 Obrázok nastavenia simulácie analýzy vzperu.	56
Obr. 4-17 Geometria simulácie mechanickej skúšky.	57
Obr. 4-18 Nastavenie konečno prvkovej siete.....	58
Obr. 4-19 Nastavenie konečno prvkovej siete.....	58
Obr. 5-1 Graf závislosti štihlosti od priemeru prúta pri dĺžke 8,66 mm.....	60
Obr. 5-2 Graf závislosti hodnôt síl z analytického a simulačného prístupu od priemeru prúta.	62
Obr. 5-3 Vyobrazenie tvaru deformácií.	63
Obr. 5-4 Vyobrazenie tvaru deformácie elementárnej bunky do písmena "S".	63
Obr. 5-5 Graf závislosti pomeru od veľkosti mikro-prútovej štruktúry vo vrchnom prúte.64	

Obr. 5-6 Obrázok porovnania vznikajúcich extrémov redukovaného napätia a rozloženie elementov konečno prvkovej siete pri priemere prúta 1,5 mm.	65
Obr. 5-7 Obrázok porovnania rozloženia redukovaného napätia pri priemere prúta 1 mm.	66
Obr. 5-8 Obrázok priebehu redukovaného napätia v rôznych typoch kontaktu.	67
Obr. 5-9 Obrázok pohybu elementárnej bunky uprostred mikro-prútovej štruktúry.....	67
Obr. 5-10 Obrázok porovnania geometrických modelov pre 1 mm priemer prúta.	71
Obr. 5-11 Obrázok porovnania geometrických modelov pre 1,5 mm priemer prúta.	72
Obr. 5-12 Obrázok zobrazujúci jav skrútenia elementárnej bunky.....	73
Obr. 5-13 Graf intervalu nameraných hodnôt pri aproximácii kružnicou.	74
Obr. 5-14 Graf intervalu nameraných hodnôt pri aproximácii elipsou.	75
Obr. 5-15 Graf intervalu nameraných hodnôt geometrie uzlov.	76
Obr. 5-16 Obrázok grafu polomeru prierezu uzlov.	77
Obr. 5-17 Obrázok grafu závislosti hmotnosti od priemeru prúta.	77
Obr. 5-18 Obrázok grafu priemernej a maximálnej sily dosiahnutej pri experimente.....	78
Obr. 5-19 Obrázok grafu zobrazujúci vznikajúci šum pri priemere prúta 1,5 mm.	79
Obr. 5-20 Graf odchýlky absorbovanej energie numerických prístupov od experimentu..	80
Obr. 5-21 Obrázok grafu merania a numerických simulácií pri priemere prúta 0,5 mm. ..	82
Obr. 5-22 Graf maximálnej sily numerických prístupov.	82
Obr. 5-23 Graf maximálnej deformácie numerických prístupov.....	83
Obr. 5-24 Absorbovaná energia do 1,5 mm deformácie.	84
Obr. 5-25 Kvalita konečno prvkovej siete.	85
Obr. 5-26 Graf závislosti redukovaného napätia a reakčnej sily od predĺženia.....	86
Obr. 5-27 Graf priebehu reakčnej sily elementárnej bunky.....	86
Obr. 5-28 Graf porovnania odchýlky jednotlivých simulačných prístupov.....	87
Obr. 5-29 Graf závislosti zmluvného napätia.	88
Obr. 5-30 Rozloženie elementov v konečno prvkovej sieti kružnicového a eliptického prístupu.....	88
Obr. 5-31 Obrázok grafu priebehu reakčnej sily pri jednotlivých prístupoch.	89
Obr. 6-1 Obrázok s deformáciou buniek v štruktúre.	91
Obr. 6-2 Obrázok reálnej a naskenovanej geometrie.....	92

Obr. 6-3 Obrázok porovnania pri rôznych priemeroch.....	92
Obr. 6-4 Obrázok grafu merania a numerických simulácií pri priemere prúta 1,25 mm. ...	94

12 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1 Tabuľka mechanických vlastností dvoch typov vzoriek [8].	21
Tab. 4-1 Tabuľka použitých procesných parametrov.	38
Tab. 4-2 Tabuľka chemického zloženia kovového prášku [8].	38
Tab. 4-3 Tabuľka mechanických vlastností použitého materiálu [8].	38
Tab. 4-4 Tabuľka dopĺňujúcich mechanických vlastností pre dynamické simulácie [8].	39
Tab. 4-5 Tabuľka mechanických vlastností Skúšobného materiálu.	48
Tab. 5-1 Tabuľka výpočtových časov pre rôzne geometrické modely.	64
Tab. 5-2 Tabuľka priemernej hodnoty konečno prvkovej siete jednotlivých modelov geometrie.	65
Tab. 5-3 Tabuľka analýzy citlivosti geometrického modelu.	68
Tab. 5-4 Tabuľka reakčnej sily a odchýlky.	70
Tab. 5-5 Tabuľka maximálnej hodnoty deformácie.	70
Tab. 5-6 Tabuľka hodnôt z experimentu pádového testera.	78
Tab. 5-7 Tabuľka odchýlky absorbovanej energie.	83
Tab. 5-8 Tabuľka odchýlok aproximačných prístupov k nominálnemu priemeru.	89
Tab. 5-9 Tabuľka typu deformácií.	90

13 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Vyhodnotenie experiment 1.1

Príloha 2: Vyhodnotenie experiment 1.2

Príloha 3: Vyhodnotenie experiment 2

Príloha 4: Vyhodnotenie – Štruktúra

Príloha 5: Vyhodnotenie – El. Bunka

Príloha 6: Dynamicka_uloha

Príloha 7: BSS-mod_model_Kruznica

Príloha 8: BSS-mod_model_Elipsa

Príloha 9: El_Bunka_Kruznica

Príloha 10: El_Bunka_Elipsa

Príloha 11: Matlab

Príloha 12: Scany

Príloha 12: Fotodokumentácia