



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE S VYUŽITÍM MIKRO- PRUTOVÝCH STRUKTUR

TOPOLOGY OPTIMISATION USING LATTICE STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Černák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vaverka

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Martin Černák
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Vaverka
Akademický rok:	2021/22

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

Topologická optimalizace s využitím mikro–prutových struktur

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Topologická optimalizace je nástroj, který pomáhá konstruktérům navrhnout nejvhodnější tvar pro danou aplikaci. Dlouhou dobu byla omezena možnostmi konvenčních výrobních technologií, což odpadá při spojení s aditivními technologiemi. Díky tomu není problém vyrobit díl, který má v různých místech zdánlivě různou hustotu materiálu. Takto navrhované díly by měly být lehčí a minimálně stejně tuhé. Toto tvrzení je potřeba experimentálně ověřit na reálné případové studii.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je navrhnout a vyrobit komponentu do leteckého průmyslu s využitím topologické optimalizace a mikro–prutových struktur. Daná komponenta by měla být lehčí než původní díl a zároveň musí zůstat funkční, tzn. musí mít dostatečnou tuhost.

Díličí cíle diplomové práce:

- definovat klíčové parametry pro optimalizaci,
- konstrukční návrh s využitím topologické optimalizace,
- pevnostní ověření návrhu pomocí MKP,
- realizace finálního dílu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, 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://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

ZHU, JH., ZHANG, WH., XIA, L. Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, vol. 23, iss. 4, s. 595-622. DOI: 10.1007/s11831-015-9151-2.

CHENG, L., ZHANG, P., BIYIKI, E., BAI, J., ROBBINS, J., TO, A. Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation. Rapid Prototyping Journal, vol. 23, iss. 4, s. 660-677. DOI: 10.1108/RPJ-04-2016-0069.

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

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cieľom práce bolo navrhnúť a overiť metodiku topologickej optimalizácie s využitím mikro-prútových štruktúr, ktorá zohľadňuje špecifikácie aditívnej výroby a je nezávislá na optimalizačnom riešení.

Vytvorená metodika využíva SIMP algoritmus topologickej optimalizácie. Penalizačný faktor použitý pre riešenie je vytvorený na základe mechanických vlastností charakterizujúcich ľubovoľne zvolenú bunku. Vlastnosti sú získané metódou homogenizácie aplikovanou na reálnu geometriu špecifikovanú 3D optickou digitalizáciou. Verifikácia návrhu prebieha pomocou MKP analýzy využívajúcej variabilné homogenizované vlastnosti. Lokálna napätosť je simulovaná technikou submodelingu.

Metodika bola overená optimalizáciou konzoly brzdného štítu lietadla. Optimalizovaný diel je oproti pôvodnému riešeniu o 22 % ľahší a o 31 % tuhší.

Výsledky práce demonštrujú, že navrhnutá metodika je vhodná pre optimalizáciu štruktúrnych dielov a umožňuje nám relatívne jednoducho využiť mikro-prútové štruktúry spolu s topologickou optimalizáciou a aditívnou výrobou, a to nie len v leteckom priemysle.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Topologická optimalizácia, Mikro-prútové štruktúry, Aditívna výroba

ABSTRACT

This thesis aimed to develop and verify the methodology for lattice topology optimization, which deals with additive manufacturing specifications and is independent of the optimization solver.

The developed methodology uses the SIMP topology optimization algorithm. The penalization factor used for a solution is based on the mechanical properties characterizing arbitrarily chosen unit cell. These are identified using the homogenization method applied to the real geometry specified by 3D optical digitization. Verification is based on FEA using the variable homogenized properties. The local stress response is simulated by submodeling technique.

The methodology was verified by optimizing the braking shield bracket of a plane. The optimized part is 22 % lighter and 31 % stiffer than the original solution.

Results of the thesis demonstrate that the proposed methodology is suitable for structural part optimization and allows us to use lattice structures together with topology optimization and additive manufacturing relatively easily, not only in the space industry.

KEYWORDS

Topology optimization, Lattice structures, Additive manufacturing

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ČERNÁK, Martin. *Topologická optimalizace s využitím mikro-prutových struktur*. Brno, 2022, 117 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ondřej Vaverka.

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcemu práce Ing. Ondřejovi Vaverkovi, za vedenie a rady počas vypracovávania diplomovej práce. Taktiež by som rád poďakoval môjmu kolegovi Ing. Zdeňkovi Čadovi, Ph.D. za rady ohľadom numerického modelovania.

Veľká vďaka patrí aj celej mojej rodine, ktorá ma v štúdiu podporovala a najmä môjmu otcovi, ktorému vďačím za lásku k technike. V neposlednom rade by som veľmi rád poďakoval svojej snúbenici Dominike za jej trpezlivosť, podporu a pochopenie počas štúdia.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovou prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Ondřeje Vaverku. 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	13
2	PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	15
2.1	Rešeršné metódy	15
2.2	Rešerš na stav techniky	17
2.2.1	Topologická optimalizácia s využitím mikro-prútových štruktúr	17
2.2.2	Teoretické pozadie density-based LSTO	21
2.2.3	Mechanické vlastnosti základných buniek	24
2.2.4	Výrobné imperfekcie a nepresnosti	25
2.2.5	Numerická analýza mikro-prútových štruktúr	26
2.2.6	Konzola brzdnych štítov	28
2.3	Zhrnutie hlavných zistení	30
2.4	Identifikácia novosti a príležitosti	32
3	CIEĽ PRÁCE	33
3.1	Vymedzenie problému	33
3.2	Cieľ práce	34
4	KONCEPČNÝ NÁVRH	35
4.1	Analýza cieľov a špecifikácia obmedzení	35
4.2	Technická funkčná analýza	36
4.3	Návrh alternatívnych riešení	38
4.3.1	Penalizačný faktor	38
4.3.2	Základná bunka	39
4.3.3	Numerická verifikácia	40
4.4	Analýza alternatívnych riešení	44
4.4.1	Penalizačný faktor	44
4.4.2	Základná bunka	45
4.4.3	Numerická verifikácia	46
5	PREDBEŽNÝ NÁVRH	48
5.1	Matematický model	48
5.1.1	Pre-analýza	48
5.1.2	Optimalizácia	52
5.1.3	Numerická verifikácia	54

5.2	Určenie tvarov, rozmerov a materiálov	56
5.2.1	Tvorba geometrie	56
5.2.2	Materiál konzoly	58
5.3	Odhad výrobných nákladov a objem výroby	58
6	DETAILNÝ NÁVRH	60
6.1	Konštrukčné riešenie	60
6.1.1	Topologická optimalizácia	60
6.1.2	Zavetrenie konzoly	61
6.1.3	Tvorba geometrie	63
6.1.4	Numerická verifikácia	64
6.2	Fyzická realizácia	68
6.2.1	Pre-processing a SLM výroba	68
6.2.2	Post-processing a technológia obrábania	70
6.3	Hodnotenie kľúčových parametrov	72
6.3.1	Konzola brzdných štítov	72
6.3.2	SWOT analýza navrhutej metodiky	74
7	ZÁVER	76
8	VÝSLEDOK PODĽA RIV	78
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	79
	ZOZNAM POUŽITÝCH STRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	85
	Zoznam skratiek	85
	Zoznam symbolov a veličín	85
	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	87
	ZOZNAM TABULIEK	90
	ZOZNAM PRÍLOH	91

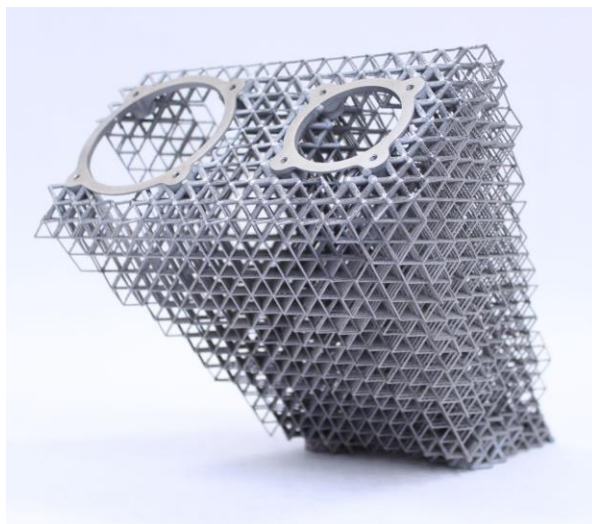
1 ÚVOD

Nízka hmotnosť a vysoká tuhosť. Dva parametre, ktoré sú cieľom (takmer) každého konštruktéra. Či už vedome, alebo nevedome, snažíme sa o to, aby boli navrhované konštrukcie ľahké a tuhé. Táto snaha má široké spektrum následkov od jednoduchších, ako úspora potrebného materiálu, až po sofistikované, ako nárast merného výkonu, úspora paliva a zníženie emisii. Často však nie je triviálne ľudským úsudkom určiť, aký by mal byť tvar navrhovaného komponentu, aby splňoval tieto požiadavky a tu prichádza k slovu metóda topologickej optimalizácie.

Topologická optimalizácia je numerická metóda, spadajúca pod štrukturálne optimalizácie, ktorá dokáže určiť optimálne rozloženie materiálu v priestore podľa vopred stanoveného cieľa a príslušných obmedzení. Napriek tomu, že myšlienka topologickej optimalizácie je stará už 30 rokov [1], jej praktické použitie bolo dlho obmedzené. Výsledkom topologickej optimalizácie sú často komplexné bionické tvary, ktoré sú problematicky (ak vôbec) vyrobiteľné konvenčnými technológiami. Z tohto dôvodu slúžila dlho topologická optimalizácia najmä ako predloha, podľa ktorej boli diely vymodelované [2]. Práve túto skutočnosť v posledných rokoch zásadným spôsobom ovplyvnili aditívne technológie.

Aditívne technológie, známe aj pod pojmom 3D tlač, sú disruptívne technológie, ktoré nám umožňujú vyrábať diely vrstvu po vrstve s ľubovoľnou tvarovou zložitosťou na základe digitálnych dát. V súčasnosti spadá pod pojem aditívne technológie celá rada výrobných technológií, ktoré pracujú na základe rôznych fyzikálnych princípov s rôznymi materiálmi. Z mechanického hľadiska však dominujú technológie, ktoré umožňujú výrobu kovových dielov, napr. technológia SLM (Selective Laser Melting). Napriek neporovnateľne väčšej tvarovej voľnosti, oproti konvenčným výrobným metódam, aj u týchto technológií platia určité pravidla pre návrh s ohľadom na úspešnú výrobu dielov. Jedným zo základných je, že tvarové prvky, ktoré zvierajú uhol s výstavbovou podložkou menší ako kritický, potrebujú podporné štruktúry. Podporné štruktúry majú u kovovej aditívnej výroby dvojakú funkciu. Jedna je mechanická, zabraňujúca zboreniu stavby a druhá je termo-mechanická, zaručujúca odvod tepla a zabraňujúca deformáciám a odtrhnutiu dielu od podložky v dôsledku zvyškových napätí. Z týchto dôvodov sú podporné štruktúry nevyhnutné. Ak však uvážime, že vzhľadom na geometrickú zložitosť optimalizovaných dielov môžu byť podpory v ťažko dostupných miestach a z ťažko obrábateľných materiálov ako je titán alebo Inkonel, je zrejmé, že by malo byť snahou navrhnuť geometriu tak, aby bol ich počet minimálny, respektíve, aby boli podporné štruktúry funkčnou súčasťou výsledného dielu. Odpoveďou na tento problém sa javia byť mikro-prútové štruktúry.

Mikro-prútové (lattice) štruktúry sú podskupinou štruktúrovaných materiálov, konkrétne sa jedná o peny s otvorenou bunkou. Práve základná bunka, ktorá sa v štruktúre periodicky opakuje, ju jednoznačne definuje. Lattice štruktúry vynikajú z mechanického hľadiska viacerými výhodnými vlastnosťami ako napr. vysokým pomerom tuhosti k hmotnosti alebo schopnosťou absorpcie energie a pri správnom návrhu sú samonosné. Najmä tuhosť a samonosnosť viedli k myšlienke použiť mikro-prútové štruktúry v spojitosti s topologickou optimalizáciou. Výsledkom takejto optimalizácie je gradientné rozloženie relatívnej hustoty základných buniek, ktoré maximalizuje tuhosť alebo minimalizuje hmotnosť použitej štruktúry (viď Obr. 1-1).



Obr. 1-1 Optimalizovaná konzola komunikačných antén satelitu [3].

Topologická optimalizácia s využitím mikro-prútvých štruktúr je v súčasnosti intenzívne skúmaná a rozvíjaná v množstve prác. Existujú aj komerčne dostupné riešenia, umožňujúce použiť tento typ topologickej optimalizácie, no problém je, že nezohľadňujú špecifiká a obmedzenia aditívnej výroby. Z tohto dôvodu je príležitosť vylepšiť metodiku topologickej optimalizácie s využitím mikro-prútvých štruktúr s ohľadom na aditívnu výrobu technológiou SLM a v rámci diplomovej práce demonštrovať jej funkčnosť aplikáciou na konkrétny diel.

Optimalizovaným dielom, slúžiacim pre overenie vhodnosti metodického postupu, bude konzola brzdnych štítov použitá na krídle lietadla. Vzhľadom na to, že tento typ konzoly už bol optimalizovaný s využitím plného materiálu, je príležitosť nie len overiť navrhnutú metodiku na reálnej prípadovej štúdií, ale ju aj porovnať s klasickou topologickou optimalizáciou z pohľadu tuhosti, hmotnosti, zložitosti výroby a celkovej ceny.

2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2.1 Rešeršné metódy

Vykonaná rešerš slúžiaca ako východisko práce bola rozdelená na 3 podcelky, ktoré úzko súvisia so samotným riešením. V prvej časti bola pozornosť venovaná topologickej optimalizácii s využitím mikro-prútových štruktúr a jej súčasným komerčne dostupným softvérovým implementáciám. Druhá časť rešerše bola zameraná na spresnenie teoretického pozadia potrebného pre topologickú optimalizáciu s využitím mikro-prútových štruktúr, najmä s ohľadom na nedostatky, ktoré vyplynuli z prvej časti rešerše. V tretej časti boli spracované dokumenty súvisiace s konzolou brzdnych štítov, ktorá bola vybraná ako diel vhodný pre optimalizáciu.

V prípade prvej časti spočívalo vykonanie rešerše v prieskume dostupných zdrojov informácií zo softvérovej dokumentácie (primárne pramene), školiacich materiálov (sekundárne pramene) alebo prác, ktoré daný softvér použili (terciárne pramene). Záujem bol kladený na identifikáciu kľúčových výhod a nevýhod príslušných pre daný program. Zároveň boli v databázach Scopus a Web of Science vyhľadávané práce, ktoré sa venujú tomuto typu optimalizácie s cieľom zistiť, aké metódy sú v literatúre dostupné.

Potom ako boli identifikované nedostatky a biele miesta v prvej časti rešerše, bolo možné rešerš spresniť a konkretizovať s ohľadom na výrobu technológiou SLM. Zostavené boli 4 otázky, pomocou ktorých boli informácie spresnené:

- a) Aký je princíp homogenization-based prístupu v spojení s mikro-prútovými štruktúrami?
- b) Aká základná bunka je najvýhodnejšia pre statické aplikácie?
- c) Aký je charakter vnesených výrobných imperfekcií?
- d) Ako je možné imperfekcie zahrnúť do výpočtu?

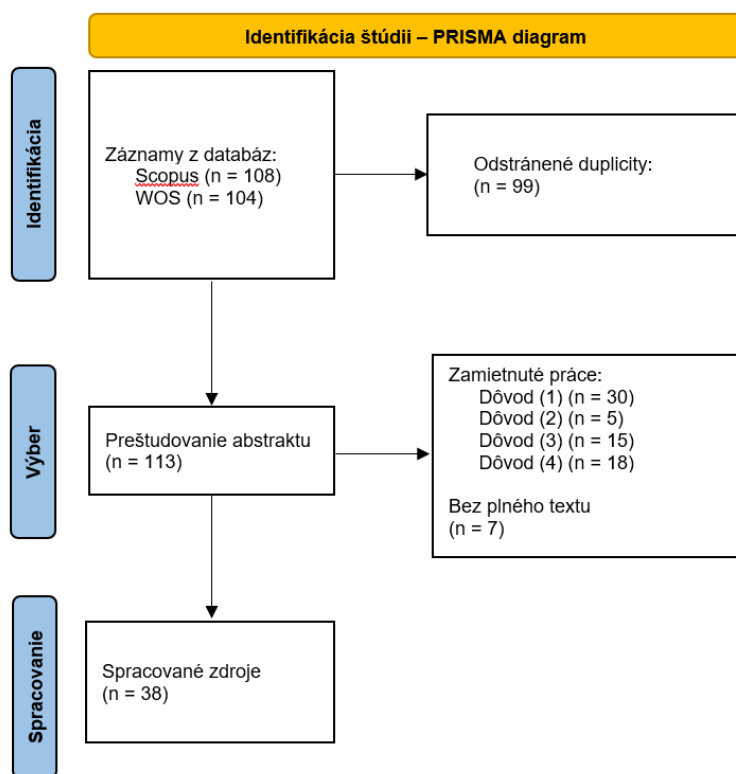
Ako relevantné zdroje boli uvažované indexované recenzované vedecké články a konferenčné príspevky vo vedeckých databázach. Pri voľbe prameňov bol braný ohľad na aktuálnosť informácií, a preto boli výsledky časovo obmedzené od roku 2015 do súčasnosti. Pre vyhľadávanie zdrojov boli použité databázy Scopus a Web of Science, v ktorých boli popísané zdroje vyhľadávané.

Vyhľadávané informácie boli rozdelené do 4 rešeršných požiadaviek. Konkrétne požiadavky boli zostavené na základe príslušných kľúčových slov a ich synonym. Pre vyhľadávanie bola použitá stratégia rastúcej perly, ktorou bol postupne redukovaný počet výsledkov. Finálne rešeršné požiadavky sú zobrazené v Tab. 2-1.

Tab. 2-1 Výsledné rešeršné požiadavky.

Otázka	Finálna vyhľadávacia požiadavka
a)	(lattice structure OR structured material OR cellular AND (solid OR material) AND topology optimization AND homogenization)
b)	((((SLM OR (selective laser melting)) AND ((lattice structure) OR (structured material) OR (cellular AND (solid OR material)))) AND stiffness AND geometr*))
c)	((lattice structure) OR (structured material) OR (cellular AND (solid OR material)) AND (slm OR (selective laser melting)) AND strut AND (accuracy OR imperfec*))
d)	((lattice) OR (structured material) OR (cellular AND (solid OR material)) AND (slm OR (selective laser melting)) AND (defect OR imperfec*) AND (fea OR simul* OR numeric*))

Na základe uvedených rešeršných požiadaviek bolo získaných 218 zdrojov, z ktorých zostalo po odstránení duplicitných záznamov 113. Získané záznamy boli ďalej vyhodnotené na základe abstraktu. Vylúčené boli zdroje s nasledujúcimi charakteristikami: (1) popísaná metóda topologickej optimalizácie používa nepravidelné základné bunky s premenlivým tvarom, orientáciou alebo typom, (2) nie sú porovnávané statické vlastnosti rôznych buniek, (3) články nerozoberajú vnesené imperfekcie a nepresnosti, (4) dokumenty nepredkladajú MKP numerický model. Taktiež boli vylúčené články bez plného textu. Tento proces viedol k výberu 38 zdrojov (Obr. 2-1).



Obr. 2-1 Prizma diagram výberu zdrojov.

Z 38 zdrojov vybraných pre systematickú rešerš prislúchalo 15 rešeršnej požiadavke a) zameranej na topologickú optimalizáciu, 7 rešeršnej požiadavke b) zameranej na voľbu základnej bunky, 8 rešeršnej požiadavke c) skúmajúcej vznikajúce imperfekcie a 8 rešeršnej požiadavke d) zohľadňujúcej integráciu imperfekcií v MKP výpočte.

V neposlednom rade bolo nutné získať a spracovať dokumenty týkajúce sa optimalizovaného dielu. Pre tento účel boli použité práce z Ústavu konstruování, ktoré sa už topologickou optimalizáciou tohto komponentu zaoberali a taktiež dokumenty poskytnuté výrobcom lietadla.

2.2 Rešerš na stav techniky

2.2.1 Topologická optimalizácia s využitím mikro-prútových štruktúr

Topologická optimalizácia (TO) je numerická metóda, ktorá umožňuje optimalizovať požadovanú vlastnosť, napr. tuhosť, na základe dopredu stanovených okrajových podmienok a obmedzení [1]. Výsledkom „klasickej“ optimalizácie je optimálne rozloženie homogénneho materiálu vo vopred definovanom priestore.

Myšlienku riešenia je možné jednoducho demonštrovať na úlohe maximalizácie tuhosti s obmedzením hmotnosti na určitú vopred zvolenú hodnotu nasledovne [1]:

Uvažujme teleso Ω^{mat} , ktoré je súčasťou väčšej základnej oblasti $\Omega \subset \mathbf{R}^3$ diskretizovanej pomocou konečných prvkov s virtuálnou energiou napätosti telesa W :

$$W = \frac{1}{2} \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}, \quad (1)$$

a potenciálom vonkajších síl:

$$P = \mathbf{U}^T \mathbf{F}, \quad (2)$$

kde \mathbf{U} je vektor neznámych nezávislých posuvov, \mathbf{K} globálna matica tuhosti a \mathbf{F} vektor celkového zaťaženia.

Optimalizačný problém formulujeme nasledovne:

$$\min_{\mathbf{u}, E_e} \mathbf{U}^T \mathbf{F}, \quad (3)$$

tak, aby:

$$\mathbf{K}(\mathbf{D}_e) \mathbf{U} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{D}_e \in \mathbf{D}_{ad}.$$

Úloha reprezentuje minimalizáciu poddajnosti telesa (maximalizáciu tuhosti) a jej výsledkom je matica tuhosti $\mathbf{K}(\mathbf{D}_e)$, pričom \mathbf{D}_e predstavuje maticu materiálových konštánt jednotlivých konečných prvkov diskretizujúcich teleso Ω^{mat} . Práve matice \mathbf{D}_e predstavujú vo výpočte premenné a sú volené z určitej množiny prijateľných riešení \mathbf{D}_{ad} . Takto formulovaný problém doplníme vopred zvoleným obmedzením objemu (hmotnosti) obecné v tvare:

$$\mathbf{D}_e = 1_{\Omega^{mat}} \mathbf{D}^0, \quad 1_{\Omega^{mat}} = \begin{cases} 1, & \text{ak } e \in \Omega^{mat} \\ 0, & \text{ak } e \in \Omega \setminus \Omega^{mat} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{\Omega} 1_{\Omega^{mat}} = Vol(\Omega^{mat}) \leq V, \quad (5)$$

kde \mathbf{D}^0 je matica materiálových konštánt zvoleného izotropného materiálu a V je vopred definovaný objem, ktorý chceme zachovať.

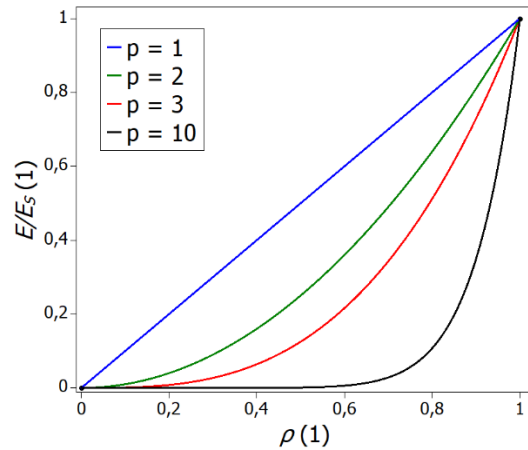
Obecná metóda optimalizácie popísaná vyššie však so sebou prináša určité problémy najmä z pohľadu diskretného rozdelenia materiálu v priestore, a preto vznikli ďalšie, pokročilejšie, metódy optimalizácie [1].

Najbežnejšou metódou topologickej optimalizácie, je metóda SIMP¹ [4]. Výsledkom tejto metódy je spojité rozdelenie materiálu v intervale $\langle 0;1 \rangle$ v rámci pôvodného telesa. Nula reprezentuje miesto bez materiálu, jedna materiál. Rozdelenie je popísané funkciou, ktorú je možné interpretovať ako pseudo-hustotu – odtiaľ označenie density-based method. Problém však tvoria medzi-hustoty z intervalu $(0;1)$. Tieto hodnoty predstavujú mikro-štruktúry, ktoré sú v homogénnom materiáli nežiadúce. Aby bolo možné potlačiť nežiadúce medzi-hustoty používa metóda SIMP penalizáciu materiálových vlastností

$$E_{ijkl} = \rho^p E_{ijkl}^S, \quad (6)$$

kde E_{ijkl} je tenzor elastických vlastností vo výpočte, ρ je relatívna hustota, p je penalizačný faktor a E_{ijkl}^S je tenzor elastických vlastností pre uvažovaný plný materiál. Z Obr. 2-2, zobrazujúceho závislosť relatívnej hustoty voči mechanickým vlastnostiam pre rôzne penalizačné faktory, je vidno, že mechanické vlastnosti medzi-hustôt sú s narastajúcim p znižované, čo vedie k ich menšiemu zastúpeniu vo výslednom rozložení. Hodnota tohto faktoru nie je presne stanovená a zvyčajne býva volená ako $p \geq 3$ [1].

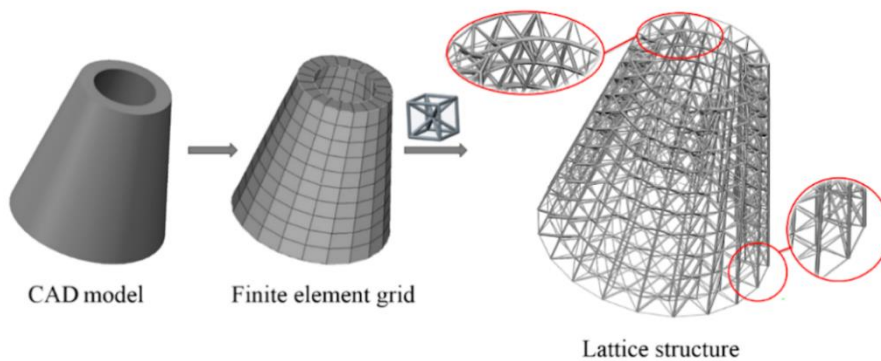
¹ Solid Isotropic Material With Penalization



Obr. 2-2 Pomerné mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na pseudo-hustote a penalizačnom faktore.

V prípade topologickej optimalizácie telesa s využitím štruktúrovaného materiálu (LSTO²) existujú hlavné 2 metódy, ktoré sú zároveň obsiahnuté v komerčne dostupných softvéroch. Prvá je tzv. Ground-structure method a druhá tzv. Homogenization-based method³.

V prípade Ground-structure je najskôr vytvorená mikro-prútová štruktúra, ktorá je následne upravená tak, aby boli jednotlivé priemery prútov optimálne (Obr. 2-3). Spôsobov, akým sú jednotlivé prúty menené je viacero. Nquyen [5] menil priemery prútov heuristicky. Najväčšie priemery prútov prislúchali miestam s najväčším napätím na pôvodnej telese. Tang [6] použil BESO algoritmus na tvarovú optimalizáciu prútov a Alzahrani [7] menil priemery prútov na základe relatívnych hustôt z klasickej optimalizácie.



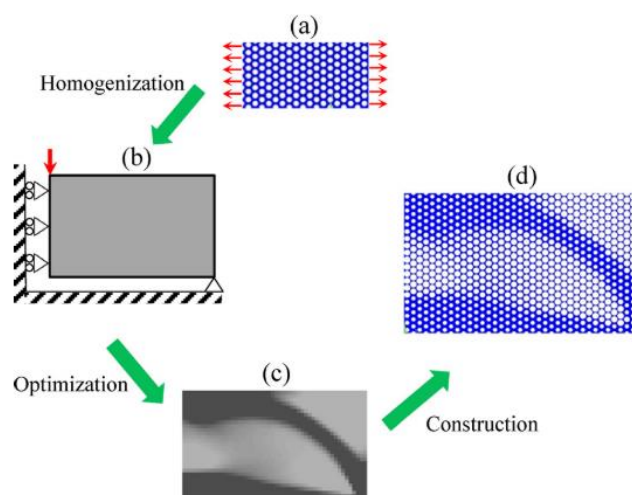
Obr. 2-3 Schéma optimalizácie ground-structure. Upravené z [8].

² Lattice Structure Topology Optimization

³ Názvy metód boli prevzaté z [8].

Týmto typom optimalizácie disponuje firma Altair. U Altairu [9] dôjde na základe výsledku z klasickej topologickej optimalizácie k rozhodnutiu, v ktorých miestach je vhodné aplikovať mikro-prútové štruktúry nahrádzajúce medzi-hustoty [10]. Následne je štruktúra vytvorená pre zvolenú bunku a priemery prútov sú optimalizované. Nevýhodou tohoto prístupu je, že štruktúra je vytvorená na základe konečno-prvkovej siete, kde jeden prvok predstavuje jednu bunku. Z toho je zrejmé, že v prípade siete s nepravidelnými prvkami môže dôjsť k deformácii buniek [11], čo vedie k nemožnosti tieto štruktúry vyrobiť v dostatočnej kvalite a následne k degradácii mechanických vlastností.

Prístup homogenizačnej metódy je demonštrovaný na Obr. 2-4. Táto metóda je založená na homogenizácii mechanických vlastností jednotlivých buniek a v literatúre sa dá dohľadať niekoľko prác, ktoré k optimalizácii pristupujú týmto spôsobom [12–14]. Princíp spočíva v náhrade heterogénneho štruktúrovaného materiálu homogénnym s ekvivalentnými mechanickými vlastnosťami. Tento popis materiálu následne vstupuje do optimalizácie, ktorej výsledkom je mapa relatívnych hustôt. Na základe tejto mapy je zrekonštruovaná výsledná mikro-prútová štruktúra. Ako ukázal Wang vo svojej práci [15], principiálne nie sú potrebné zásadné zmeny density-based optimalizačného algoritmu (SIMP), aby bol schopný pracovať s homogenizovanými materiálovými vlastnosťami.



Obr. 2-4 Schéma homogenization-based optimalizácie; (a) homogenizácia; (b) optimalizácia; (c) výsledok; (d) rekonštrukcia geometrie [14].

Tento spôsob optimalizácie je obsiahnutý v programovom balíku ANSYS. Na základe predchádzajúcej práce [16] sa však ukázalo, že je dostupný iba obmedzený počet základných buniek a väčšina z nich nie je vhodná pre výrobu technológiou SLM. Taktiež sa ukázalo, že aj v prípade tejto metódy je problematická tvorba geometrie. Geometria vzniká prienikom periodickej mikro-prútovej štruktúry s oblasťou pôvodného telesa, vďaka čomu nedochádza k deformácii buniek. Avšak bunky, ktoré sa nachádzajú na hranici telesa sú orezané, čím sú degradované ich mechanické vlastnosti a vznikajú voľné, poprípade „plávajúce“ prúty, ktoré sú nevyrobitelné. Navyše program ANSYS vytvára geometriu v ploškovej reprezentácii a s touto sa dá ďalej len veľmi ťažko pracovať.

V oboch prípadoch optimalizácie sa javí byť kľúčovým krokom tvorba geometrie. Bežné postupy pre tvorbu geometrie vo forme explicitnej alebo parametrickej reprezentácie sú nespoľahlivé, ak ide napr. o booleovskú operáciu s veľmi komplexnou geometriou [17]. V takýchto prípadoch je oveľa výhodnejšie reprezentovať geometriu implicitným spôsobom, teda ako rez viacdimerenzionálnej funkcie [18] (Obr. 2-5). Toto zjednoduší reprezentáciu geometrie a zvýši rýchlosť generovania komplexných topológií.



Obr. 2-5 Princíp implicitnej reprezentácie geometrie [18]. Žltá plocha reprezentuje viacdimerenzionálnu funkciu, šedá plocha predstavuje rovinu rezu, v ktorej výsledná geometria.

Komerčne dostupný softvér, ktorý pracuje na tomto princípe je nTopology. V tomto softvéri je okrem veľmi rýchlej tvorby premenlivých mikro-prútovej štruktúry možné tieto štruktúry aj simulovať s využitím MKP prútovej štruktúry a geometriu exportovať vo formáte .3mf do Materialize Magics na pre-processing výroby. Obe funkcionality umožňujú šetriť čas a hardvérové nároky pri práci s vytvorenou geometriou.

2.2.2 Teoretické pozadie density-based LSTO

Postup topologickej optimalizácie založený na homogenizácii materiálových vlastností sa javí byť robustnejším s ohľadom na aditívnu výrobu. Z tohto dôvodu bola ďalšia rešerš venovaná tomuto typu optimalizácie v kombinácii so špecifikáciami aditívnej výroby technológiou SLM.

Zvolený typ základnej bunky, či už pozostávajúci z mikro-prútov [19–28] (lattice) alebo plôch [29–32] (TPMS⁴) je v optimalizácii reprezentovaný pomocou materiálovej interpolácie. Vzťah pre interpoláciu a aj výsledok optimalizácie, sú obdobné metóde SIMP (viď 2.2.1). Konkrétne interpolované hodnoty sú určované na základe homogenizácie materiálových vlastností a interpolačné vzťahy sa medzi prácami líšili, no obecné sa dajú popísať rovnicou

$$E_{ijkl} = f(\rho), \quad (7)$$

ktorá značí, že tenzor elastických vlastností (tuhosti) je funkciou relatívnej hustoty. Vlastnosti buniek je vo všeobecnosti možné popísať anizotropným tenzorom tuhosti s 21 navzájom nezávislými koeficientami. Bunky však majú často roviny symetrie a tým pádom je možné počet neznámych koeficientov zredukovať. Ypsilantis [20] vytvoril vzťahy pre popis 4 nezávislých zložiek tenzoru tuhosti v tvare polynómu 2. rádu a Wang [26] vo forme 5. rádu. Pre naftovanie 3 koeficientov použil Cheng [23, 24] polynóm 4. rádu. Li [29] popísal vlastnosti exponenciálnou funkciou. Jansen [25] a Groen [33] použili po častiach lineárnu interpoláciu a Strömberg [30] kombináciu predpisu SIMP a RAMP⁵. Stromberg zároveň konštatoval, že pre prvotný odhad sa dá použiť aj Rov. (6) s $p = 2$. Casalotti [32] riešil 2D úlohu, pri ktorej vytvoril materiálový model pre 2 koeficienty v tvare polynómu 3. rádu. Simsek [31] neprekladal jednotlivé tenzory tuhosti ako predošlé práce, ale použil modul pružnosti, ktorý bol pre zvolenú bunku gyroidnej štruktúry vo všetkých smeroch rovnaký a homogenizované vlastnosti preložil funkciou v tvare:

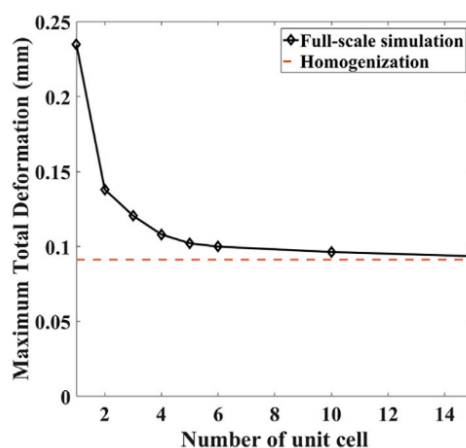
$$E = C\rho^p E^s. \quad (8)$$

Získaným koeficientom C prenášobil mechanické vlastnosti a koeficient p použil v metóde SIMP. Výsledky porovnal s neoptimalizovanou štruktúrou a štruktúrou s faktorom $p = 3$ a ukázalo sa, že ním navrhnutá metóda optimalizácie poskytla najtuhší štruktúrovaný diel.

⁴ Triply Periodic Minimal Surface

⁵ Rational Approximation of Material Properties [69]

Z prác vyplynulo, že na to, aby boli mechanické vlastnosti získané homogenizáciou správne, je nutné, aby bol rozmer základnej bunky rádovo menší ako rozmer optimalizovaného dielu. Casalotti považoval vo svojej práci [32] 10 buniek za dostatočný počet. Cheng [23] popísal túto problematiku kvantitatívne. Porovnával výsledky získané homogenizáciou s výsledkami získanými z MKP výpočtu plnej geometrie. Z porovnania sa ukázalo, že pre narastajúci počet buniek sa výsledky MKP asymptoticky blížia k homogenizácii a autori určili 6 buniek ako hraničnú hodnotu (Obr. 4). Z práce Groen [33] sa ukazuje, že v prípade, kedy je štruktúra opláštená, nie je podmienka počtu buniek taká prísna. S narastajúcim počtom buniek dochádza k ustáleniu tuhosti na určitú asymptotickú hodnotu, no zároveň je rozdiel pre štruktúru s 1 bunkou a so 6 bunkami iba 5 %.



Obr. 2-6 Rozdiel plného MKP výpočtu a homogenizácie vzhľadom na počet použitých buniek [23].

Mierne odlišný prístup optimalizácie, použili práce od Da [27, 28], Wu [19] a Wadbro [21]. Da navrhol dva rôzne prístupy. Prvý [28] spočíval vo voľbe typu a veľkosti základnej bunky, použitej vo výpočte a výsledkom bolo optimálne rozloženie buniek v priestore. Druhý [27] navrhovaný prístup spočíval v inverznej homogenizácii. Pomocou nej bola zo získaných výsledkov vytvorená periodicky sa opakujúca základná bunka. Metóda optimalizácie navrhnutá Wu spočívala v 3 krokoch. V prvom bol pomocou lineárnej materiálovej interpolácie optimalizovaný design a získané materiálové rozloženie pre zvolené obmedzenia. Výsledok bol použitý v druhom kroku, kedy bol na základe inverznej homogenizácie určený tvar každej základnej bunky a pomocou asymptotickej homogenizácie boli následne spresnené mechanické vlastnosti buniek. Spresnený výsledok bol použitý v konečno-prvkovej analýze, na základe ktorej bolo rozhodnuté o konvergencii úlohy. Wadbro navrhol metódu topologickej optimalizácie, ktorá pracuje s premenlivým opláštením a konštantnou (periodickou) lattice štruktúrou. Tvar základnej bunky bol výsledkom optimalizácie. Podobne ako Da, optimalizoval makro aj mikro úroveň dielu a tieto dve úrovne prepojil metódou PAMP⁶.

⁶ Porous Anisotropic Material with Penalization [70]

Vo vybraných zdrojoch bolo niekoľko prác, ktoré používali pri optimalizácii rôzne typy buniek [26, 30, 33] alebo porovnávajú optimalizovanú štruktúru s výsledkom klasickej topologickej optimalizácie [29, 31, 33]. Z výsledkov týchto štúdií je zrejmé, že rôzne základné bunky vedú k rôznym hodnotám tuhosti, a taktiež sa zdá, že diel optimalizovaný klasickým spôsobom SIMP z plného materiálu je tuhší ako optimalizovaná štruktúra.

2.2.3 Mechanické vlastnosti základných buniek

Pri výbere základnej bunky je v prvom priblížení bežné postupovať na základe Maxwellovho kritéria statickej určitosti, podobne ako práce [34–38]:

$$M = s - 3n + 6, \quad (9)$$

kde s je počet prútov a n počet uzlov.

Toto kritérium umožňuje predikovať deformačné správanie bunky, a teda jej vhodnú aplikáciu. Bunky s $M < 0$ sú staticky preurčené a prevláda ohýbanie prútov. Naopak bunky s $M \geq 0$ sú staticky určité, resp. neurčité, prúty sú naťahované a bunka je tuhšia.

Principiálne je tvar základných buniek neobmedzený a teda je možné vymyslieť ľubovoľný tvar buniek. V analyzovaných dokumentoch bolo celkovo použitých 22 typov rôznych buniek, ktoré sú pre prehľadnosť zobrazené v prílohe A.

V jednotlivých prácach boli bunky vyrobené pomocou technológie SLM a otestované, avšak použité materiály sa líšili. Použité boli: Ti6Al4V [34, 37, 39, 40], AlSi10Mg [35, 38] a Inconel 625 [36]. Z tohoto dôvodu nie je možné medzi sebou všetky typy buniek priamo porovnať. Dá sa však predpokladať, že charakter deformácie bunky je závislý na tvare a nie na materiáli a na základe tohoto predpokladu sumarizovať výsledky.

Zo všetkých buniek, ktoré použil v práci Paz [39] vyšla merná tuhosť bunky BCC najvyššia. V ostatných prácach však vždy vyšla táto bunka ako najhoršia z pohľadu tuhosti aj pevnosti. Lepšie ako BCC sú napríklad bunky: FCC, BCCZ, FCCZ [34–36]. Ich mechanické vlastnosti sú vo vzostupnom poradí a určené vzhľadom na jednotnú relatívnu hustotu. Bunka FCCZ sa svojimi vlastnosťami zdá byť obecné najlepšia. Prekonáva aj staticky určité bunky (zostupne) FBCCZ [34, 35] a FBCCXYZ [34] v prípade vzťahnutia vlastností na rovnakú relatívnu hustotu.

Leary [36] a Mazur [34] skúmali vo svojej práci taktiež vplyv rozmeru základnej bunky. Prvý použil veľkosti 2 mm a 3 mm a druhý 2 mm, 3 mm a 4 mm. V oboch prípadoch autori uvádzajú, že so zmenšujúcim sa rozmerom základnej bunky narastá tuhosť štruktúry. Leary však upozorňuje, že s klesajúcou veľkosťou bunky dochádza v prípade FCCZ a BCCZ ku kolapsu pri nižšom pretvorení. Bunky BCC a FCC vykazujú opačný trend.

Vo väčšine prác boli prúty orientované v hranách kocky buniek BCCZ, FCCZ, FBCCZ a FBCCXYZ rovnobežné so smerom namáhania. Brenne [37] pomocou DIC ukázal, že takto orientované prúty u bunky BCCZ prenášajú väčšinu zaťaženia v tlaku a zvyšné diagonálne prúty sú iba málo zaťažené a zabraňujú vzperu. U bunky BCC boli prúty zároveň ohýbané a naťahované. Výnimkou takto popísanej orientácie buniek, je práca Li [38], v ktorej boli prúty pri skúške v jednoosom tlaku orientované kolmo na smer namáhania, no aj napriek tomu došlo k značnému navýšeniu mechanických vlastností oproti bunkám, ktoré tieto prúty nemali, čo je výsledok, ktorý podporuje Maxwellovo kritérium.

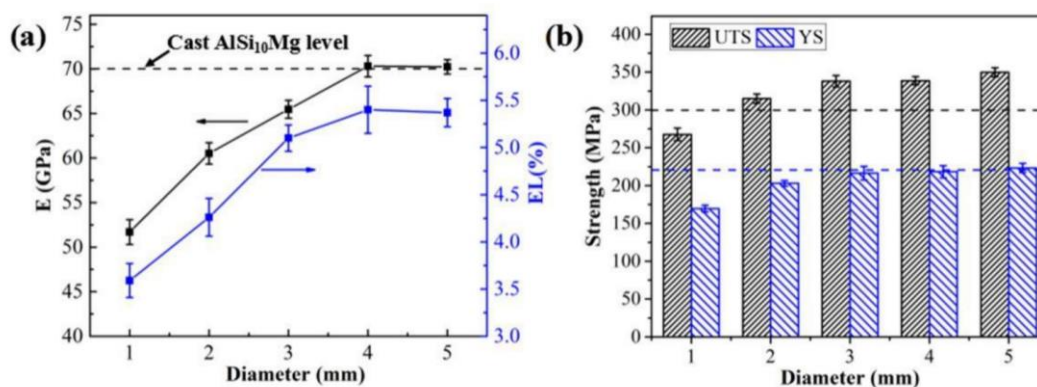
2.2.4 Výrobné imperfekcie a nepresnosti

V spojitosti s mikro-prútovými štruktúrami vyrobenými technológiou SLM sa vyskytujú 3 hlavné typy výrobných nedostatkov. Sú to:

- porozita,
- drsnosť povrchu,
- geometrické odchýlky.

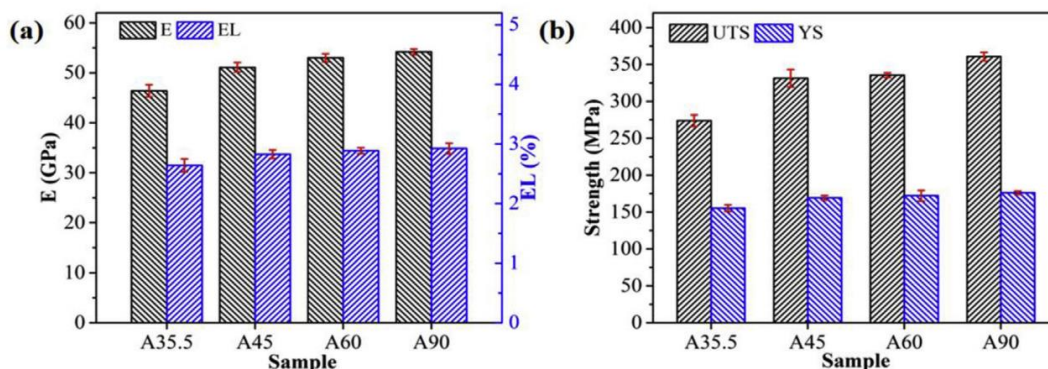
Ukazuje sa, že tieto nedostatky spolu často súvisia a ovplyvňujú vlastnosti výslednej štruktúry, ako ukázal Han [41] na základe Pearsonovho korelačného testu.

Dong [42] skúmal, akým spôsobom ovplyvňuje narastajúci priemer prútov z materiálu AlSi10Mg porozitu a mechanické vlastnosti. Vyplynulo, že s klesajúcim priemerom narastala porozita. Porozita spôsobená pravdepodobne vodíkom pri výrobnom procese sa nepriaznivo prejavila na iniciácii trhlin v prútoch a zároveň na znížení modulu pružnosti o 30 %.



Obr. 2-7 Vplyv priemeru prútov na mechanické vlastnosti; a) modul pružnosti E a pretvorenie EL; b) medza klzu YS a medza pevnosti UTS [42].

V ďalšej práci [43] sa zaoberal vplyvom uhlu natočenia na vyššie vymenované imperfekcie. Vyplynulo, že s klesajúcim uhlom, narastá drsnosť povrchu na spodnej strane prútov a mení sa ich prierez na eliptický. Pre zliatinu AlSi10Mg dochádzalo taktiež k nárastu porozity. Skutočnosť, že s klesajúcim uhlom rastie drsnosť povrchu vysvetlil na základe MKP modelu. Ukázal, že pre sklonené prúty dochádza k zhoršeniu prestupu tepla, ktoré sa prejaví čiastočným natavením a prilepením nežiaduceho prášku. Zároveň mali spodné časti prútov hrubozrnnú štruktúru a sklonené prúty vykazovali nižšie hodnoty E a R_p . Murchio [44], ktorý skúmal štruktúru z Ti6Al4V, však dospel k opačnému výsledku ohľadom porozity a aj mechanických vlastností.



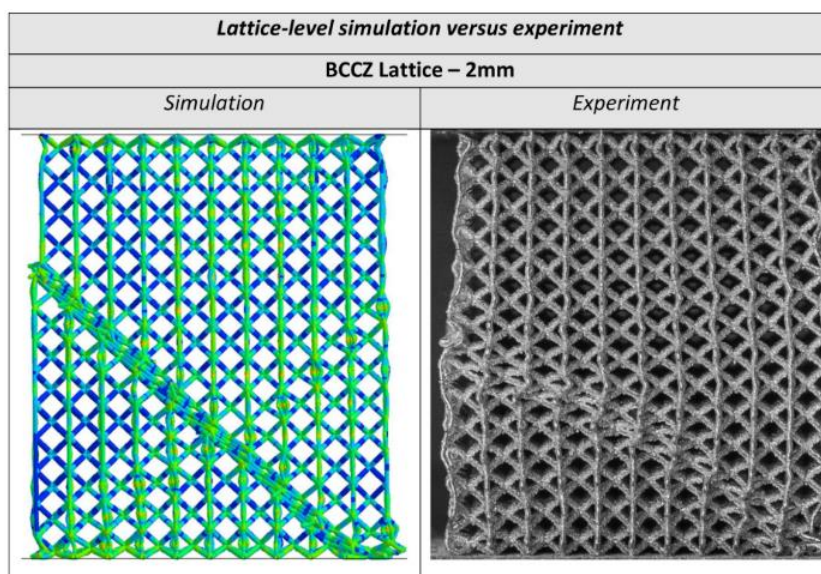
Obr. 2-8 Vplyv natočenia prútov na mechanické vlastnosti; a) modul pružnosti E a pretvorenie EL; b) medza klzu YS a medza pevnosti UTS [43].

Sing [45] v práci analyzoval vplyv procesných parametrov na kvalitu mikro-prútových štruktúr z materiálu Ti6Al4V. Pomocou metodiky ANOVA odhalil, že výkon a rýchlosť laseru majú štatisticky významný vplyv na nalepovanie prášku a ukázal, že pri zvýšení rýchlosti a znížení energie laseru sa objem nalepeného prášku zmenší. K obdobným výsledkom dospeli aj Han [41] a Grossmann [46]. Grossmann navyše zistil, že pre zliatinu AlSi10Mg existuje určité optimum dodanej energie, v ktorom je kvalita povrchu najlepšia. Geometrickú odchýlku popísal v tomto intervale pomocou experimentálne získaného korekčného faktoru. Abele [47] navrhol pre riešenie problému geometrických odchýlok skenovací stratégiu pozostávajúcu s kruhového pohybu laseru a Pawlak [48] navrhol bunku vhodne orientovať tak, aby boli odchýlky vo všetkých prútoch rovnaké.

2.2.5 Numerická analýza mikro-prútových štruktúr

Ukázalo sa, že výrobné imperfekcie vznikajúce pri SLM významným spôsobom ovplyvňujú materiálové vlastnosti a následne mechanickú odozvu jednotlivých štruktúr. Z tohto dôvodu je nutné pre spoľahlivý návrh štruktúrovaných dielov zohľadňovať nedostatky pri numerickej validácii.

Karamoz [49] vo svojej práci zohľadňoval vznikajúce imperfekcie na základe analýzy prútu. Vyrobené prúty nasnímal pomocou SEM mikroskopie a vytvoril CAD model, ktorým nahradil geometriu. Túto diskretizoval pomocou solid elementov a s použitím MKP získal mechanické vlastnosti prislúchajúce danému prútu. Získané vlastnosti aplikoval na BCC štruktúru pozostávajúcu z beam elementov. Každý prút bol rozdelený na 3 elementy. Krajné 2 reprezentovali uzly a ich modul pružnosti zväčšil 1000 krát. Týmto spôsobom docielil odchýlku modulu pružnosti od experimentu do 10 %. Prútový model vo svojej práci použili aj Meng [50], Liu [51] a Lozanovski [52]. Z pohľadu relatívnej hustoty štruktúry bola najvyššia hustota použitá v práci Liu – 14,9 %. Meng rozdelil jednotlivé prúty na 10 elementov a prierezy priradil stochasticky na základe získanej odchýlky drsnosti povrchu. Liu uvažoval zmenu rozmerov, nekonštantnosť prierezu a vlnitosť prútov získané z CT skenu. Každý prút bol rozdelený na 4 elementy a priečny prierez bol priradený na základe štatistického popisu imperfekcií. Týmto postupom dosiahol zhodu modulu pružnosti s experimentom 4,0 %, respektíve 8,3 % v závislosti na bunke. Lozanovski použil na vytvorenie modelu štatistickú metódu Monte Carlo. Pomocou CT získal geometriu prútu s imperfekciami, ktorú následne analyzoval pomocou MKP. Monte Carlo simuláciu použil na získanie efektívneho prierezu v závislosti na uhle, priemere a dĺžke prútu. Týmto spôsobom bol schopný pomerne presne a výpočtovo jednoducho popísať deformačné chovanie mikro-prútovej štruktúry (viď Obr. 2-9).



Obr. 2-9 Porovnanie deformačného správania MKP výpočtu a experimentu [52].

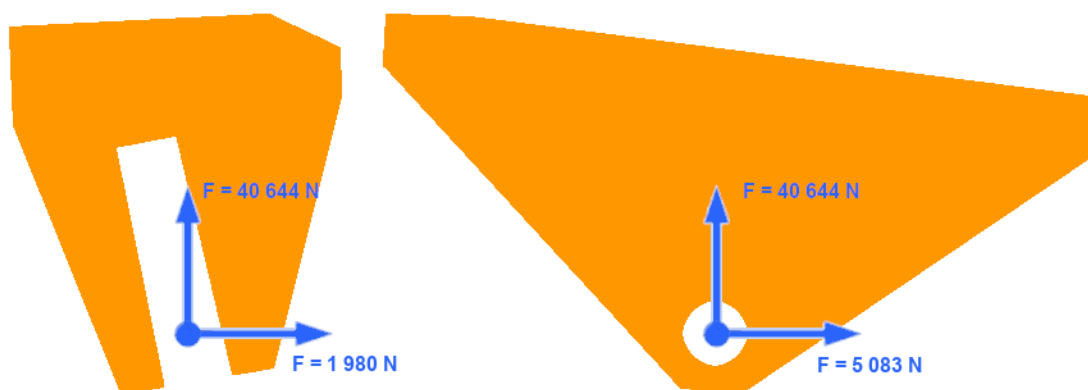
Lozanovski [53] skúmal v ďalšej práci popis a vplyv uzlov spájajúce jednotlivé prúty. V práci extrahoval geometriu z vyrobenej štruktúry pomocou CT a vytvoril 3 typy modelov: (a) ideálna geometria diskretizovaná solid elementami, (b) geometria získaná z CT diskretizovaná solid elementami a (c) ideálna prútová geometria. Ukázalo sa, že prútová geometria nedokáže podchytiť nárast tuhosti v uzloch danú výrobou a rozdiely boli až 80 %. Vrána [54] taktiež vytvoril výpočtový model pozostávajúci zo solid elementov. Zameraný bol na dynamické namáhanie štruktúry. Autori v práci uvažovali ako imperfekciu zmenu prierečného prierezu a určili ju z vyrobených vzoriek pomocou optického 3D skeneru. Ukázali, že v prípade použitia eliptického prierečného prierezu majú výsledky chybu 2 %, zatiaľ čo v prípade kruhového prierezu 12 %. Eliptickými prierečnými prierezmi nahradil prúty aj Lozanovski [55], avšak prút nebol prizmatický, ale elipsy boli vytvorené v niekoľkých CT rezoch a pospájané do výslednej geometrie prútu. Takto získanú geometriu porovnal pomocou MKP s nominálnou kruhovou geometriou a s modelom, ktorý vznikol priamym vysieťovaním CT dát. Jednotlivé prúty porovnal vzhľadom na vzper, kde sa ukázalo, že nominálna geometria bola tuhšia a kritická sila vzpernej stability vyššia. Taktiež porovnal vytvorenú štruktúru s nominálnymi prútmi a eliptickými prútmi voči dostupným experimentálnym dátam. Z dôvodu numerickej náročnosti nemohol numericke porovnať štruktúru s rovnakým počtom buniek ako v experimente, no ukázal, že eliptické prúty sa blížila experimentálnemu výsledku viac.

Cho [56] a Liu [51] navrhli metódy, ktoré umožňujú simulovať rozsiahle štruktúry s pomerne nízkymi výpočtovými nárokmi. Cho navrhol metódu pozostávajúcu zo simulácie v dvoch krokoch. V prvom analyzuje celú štruktúru s materiálovými vlastnosťami získanými na základe experimentu. V druhom následne preniesol vypočítané pole pretvoreni na základnú bunku, ktorej geometria je získaná z reálnej štruktúry a obsahuje imperfekcie. Liu používal metódu asymptotickej homogenizácie. Geometriu základnej bunky získal na základe CT dát, a túto potom použil v homogenizačnom výpočte. Týmto spôsobom sa mu podarilo dosiahnuť výsledok s chybou 5,1 % a 5,8 % voči experimentu v závislosti na použitej bunke.

2.2.6 Konzola brzdnych štítov

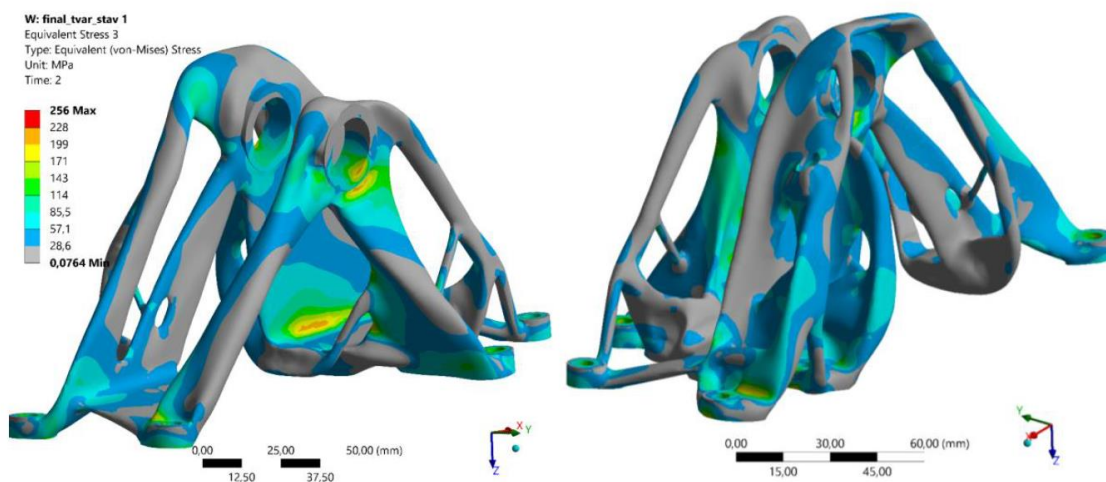
Diel, ktorý bude v rámci práce optimalizovaný bol poskytnutý leteckou firmou. Konkrétne ide o jednu z konzol, pomocou ktorej sú brzdne štíty pripojené ku krídlu lietadla. Konzola je vyrobená z hliníkovej zliatiny EN AW 2024-T351 a jej hmotnosť je 678 g. Ku krídlu je pripevnená pomocou 7 lícovaných šraubov priemeru M6 a brzdny štít je k nej prichytený pomocou svorníku s priemerom 15 mm uchyteného v dvoch okách.

Počas používania je konzola namáhaná silou, ktorá vzniká interakciou prúdiaceho vzduchu s brzdnými štítmí. Magnitúda sily bola stanovená na základe numerického výpočtu ako 27,3 kN [59]. Vzhľadom na charakter namáhania sa pri dimenzovaní konzoly uvažuje prevádzkové zaťaženie a početné zaťaženie [58]. V prípade prevádzkového zaťaženia nie je prípustná plastická deformácia konzoly. V prípade početného zaťaženia môže dôjsť k splastizovaniu a dokonca aj dosiahnutiu medze pevnosti, no podmienkou je, aby toto nastalo až 3 sekundy potom, ako bola dosiahnutá maximálna sila 41 kN [58]. Vzhľadom na charakter namáhania sa u konzoly nekontrolujú únavové vlastnosti.



Obr. 2-10 Smerové zložky namáhania v prípade početného zaťaženia.

Popisovaná konzola už bola optimalizovaná klasickou topologickou optimalizáciou v rámci diplomovej práce Kopeckého [59] a v rámci projektu TAČR TN01000029/05 [60]. V rámci projektu TAČR bola dosiahnutá hmotnosť 567 g. Kopecký vyskúšal viacero optimalizačných softvérov a vo finálnom riešení dospel ku konzole, ktorá vážila 427 g. Pred samotnou výrobou autor popisuje prácny a nie úplne úspešný postup premodelovania, aby sa zbavil plôch zvierajúcich s podložkou menší uhol ako kritický, ktorý vyžaduje podporné štruktúry. Nakoniec predsa len bolo nutné podpory použiť, čo sa prejavilo najmä na čase potrebnom na post-processingu. Z mechanických testov sa ukázalo, že konzola je voči početnému zaťaženiu bezpečná s koeficientom bezpečnosti približne 3,3. Dochádzalo však k tvaru deformácie, ktorú autor nepredpokladal. Počas zaťaženia dochádzalo k otláčeniu šraubov, pomocou ktorých bola konzola pripevnená k prípravku a posunu jednej strany konzoly. Toto sa prejavilo namáhaním konzoly na ohyb a jej prasknutím pod čapom svorníku. Autor preto odporúča využiť pri návrhu zavetrenie prepájajúce časti konzoly a zabraňujúce jej roztváraniu.



Obr. 2-11 Výsledný tvar konzoly po optimalizácii Kopeckým [59].

2.3 Zhrnutie hlavných zistení

Z vykonanej rešerše sa ukázalo, že v súčasnej dobe ponúkajú komerčné spoločnosti softvéry, ktoré dokážu riešiť topologickú optimalizáciu s využitím mikro-prúťových štruktúr. Jednou je firma ALTAIR a druhou ANSYS. Princiipiálne sa metodika použitia v oboch líši, no dá sa tvrdiť, že ani jedna z nich nie je ideálna s ohľadom na aditívnu výrobu. U ALTAIR-u je najväčším problémom vytváranie štruktúry na základe konečno-prvkovej siete, čo vedie v prípade nehomogénnej siete k deformovaným bunkám, ktoré môžu byť nevyrobiteľné. U ANSYS-u tento problém nie je. Bunky sú pravidelné a nedeformované, avšak softvér ponúka iba obmedzený počet buniek použiteľný pre optimalizáciu a väčšina z nich nie je vhodná pre aditívnu výrobu, z dôvodu horizontálne orientovaných prúťov. Pri porovnaní oboch metód sa zdá byť density-based metóda použitá v ANSYS-e ako robustnejšia, aj keď v súčasnej dobe ju nie je možné užívateľom upraviť tak, aby bola použiteľná pre ľubovoľnú bunku.

V odbornej literatúre existuje niekoľko aktuálnych prác, ktoré navrhujú metodiku density-based optimalizácie s využitím mikro-prúťových štruktúr. V rámci prác sú použité rôzne základné bunky a principiálne sú metódy funkčné pre ľubovoľne zvolenú základnú bunku. Myšlienka optimalizácie je založená na materiállovej interpolácii štruktúrovaného materiálu, obdobnej metóde SIMP. Interpoláčnne funkcie sa v rámci jednotlivých prác rôznia, no mechanické vlastnosti potrebné pre interpoláciu a popis mikro-prúťových štruktúr v optimalizačnom výpočte sú získavané spravidla pomocou homogenizácie vykonanej na základnej bunke.

Každá základná bunka je špecifikovateľná obecnými ortotropnými mechanickými vlastnosťami. Bunky však môžeme rozdeliť podľa vhodnosti použitia na tie, ktoré sú vhodné na absorpciu energie (napr. BCC) a tie vhodné na statické zaťaženie (napr. FCCZ). Paradoxom je, že BCC bunka, ktorá je najčastejšie sa vyskytujúcou sa javí byť na statické aplikácie najmenej vhodnou. Ako oveľa vhodnejšie sa javia byť bunky FCCZ alebo FBCCZ.

Výroba mikro-prútvých štruktúr je úzko spätá s aditívnymi technológiami. V prípade kovovej aditívnej výroby technológiou SLM je však nutné pamätať na to, že vytvorená geometria nie je ideálna a presne neodpovedá CAD modelu, dochádza najmä k zmene prierezov prútov. Taktiež sú ovplyvnené mechanické vlastnosti, ktoré sú výrazne nižšie ako v prípade plného dielu, a to až o 30 % v prípade modulu pružnosti, čomu odpovedá aj know-how získané na Ústave konštruovaní [61].

Zásadnou časťou pri návrhu mikro-prútvých štruktúr je numerické modelovanie výslednej štruktúry. Pri použití detailného modelu využívajúceho objemové prvky, môže byť počet uzlov tak vysoký, že je úloha v reálnom čase prakticky neriešiteľná. Z tohto pohľadu sa javia byť ako vhodnejšie zjednodušené modely využívajúce buď prútvové prvky alebo homogenizáciu mechanických vlastností. Ak však vytvoríme tieto modely na základe ideálnej geometrie a nezohľadníme výrobné imperfekcie, chyba modelov môže byť až 42 % pre prútvové modely a 51 % pre modely využívajúce homogenizáciu [51]. Prútvové modely je možné jednoducho spresniť dvomi spôsobmi - použitím mechanických vlastností získaných z vyrobených prútov a zvýšením modulu pružnosti u elementov tvoriacich spojnicu prútov ako ukázal Karamooz [49] alebo využitím homogenizovaných vlastností získaných z výpočtu na reálnej geometrii ako ukázal Liu [51].

Diel slúžiaci na demonštráciu navrhutej metodiky, konzola brzdných štítov, vážil po optimalizácii v rámci projektu TAČR 84 % a po optimalizácii Kopeckým 63 % hmotnosti pôvodnej konzoly. Z testov konzoly sa však ukázalo, že bezpečnosť k početnému zaťaženiu bola stále vysoká, a teda je možné konzolu ešte odľahčiť. S ohľadom na ďalšie práce sa však ukazuje, že výsledok topologickej optimalizácie s využitím mikro-prútvých štruktúr pravdepodobne nebude tuhší ako výsledok klasickej optimalizácie [29, 31, 33]. Toto je treba uvážiť najmä pri posudzovaní módu deformácie, ktorý Kopecký nepredpokladal a prejavil sa ako zásadný. Z tohto dôvodu sa nedá očakávať zásadné zníženie hmotnosti.

2.4 Identifikácia novosti a príležitosti

Napriek tomu, že existujú riešenia ako pristúpiť k topologickej optimalizácii s využitím mikro-prútvých štruktúr, tieto stále nie sú ideálne z pohľadu aditívnej výroby technológiou SLM. Preto je príležitosť navrhnuť metodický postup, ktorý umožní použiť tento typ optimalizácie v kombinácii s ľubovoľnou základnou bunkou a bude reflektovať výrobné nepresnosti. Postup by mal umožňovať jednoduchú a rýchlu tvorbu geometrie rozsiahlych mikro-prútvých štruktúr a zohľadniť ich následnú validáciu.

To nám umožní skombinovať výhody topologickej optimalizácie a mikro-prútvých štruktúr spolu s uvážením aditívnej výroby. V porovnaní s klasickou topologickou optimalizáciou sa skrátí čas potrebný pre tvorbu geometrie ako aj čas potrebný na post-processing – odstraňovanie podporných štruktúr, čo sa v konečnom dôsledku prejaví na zvýšenej produktivite a zníženej cene.

3 CIEĽ PRÁCE

3.1 Vymedzenie problému

Klasická topologická optimalizácia, ktorej výsledkom je optimálne rozloženie plného materiálu sa s príchodom aditívnych technológií stala veľmi populárnou a rozšírenou metódou na odľahčenie navrhovaných komponentov. Táto metóda však so sebou prináša aj dva problematické aspekty práve s ohľadom na aditívnu výrobu. Prvým je nutnosť premodelovania. Súčasti musia byť premodelované, aby ich bolo možné vyrobiť, čo je často náročný a zdĺhavý proces [62], no aj napriek tomu sa stáva, že navrhnutý tvar je komplexný s rôzne orientovanými tvarovými prvkami v priestore. Práve nevhodná orientácia, konkrétne sklon, súvisí s druhým problémom. Tým je nutnosť použitia podporných štruktúr, pre tvarové prvky, ktoré zvierajú s podložkou uhol nižší ako kritický. Tie majú za následok zvýšený čas výroby a problematický post-processing, počas ktorého sú podporné štruktúry odstraňované.

Z tohto pohľadu sa javí veľmi perspektívnou metóda topologickej optimalizácie využívajúca mikro-prútové štruktúry. Výsledkom metódy je gradientné rozloženie relatívnej hustoty v priestore, ktorá je úmerná použitému priemeru prútu. Týmto spôsobom je možné maximalizovať tuhosť zvolenej štruktúry a zároveň zachovať jej samonosnosť nevyžadujúcu použitie podporných štruktúr.

Ukázalo sa však, že napriek tomu, že už sú dostupné komerčné riešenia, nie sú tieto priamo orientované na aditívnu výrobu. Kľúčovou charakteristikou, ktorá popisuje mikro-prútové štruktúry je typ základnej bunky a v dostupných riešeniach sú výsledné bunky buď deformované, čím sú degradované alebo nie je typ ponúkaných buniek aditívne vyrobiteľný v dostatočnej kvalite. Z tohto pohľadu je stále priestor vyvinúť metodiku, ktorá bude zohľadňovať požiadavky aditívnej výroby a jej nedostatky. Konkrétne je problém s tromi aspektami aditívnej výroby, ktoré je nutné v metodike zahrnúť:

1. prúty orientované rovnobežne s výrobnou platformou nie sú vyrobiteľné v dostatočnej kvalite,
2. pri výrobe dochádza k odchýlkam tvaru od ideálnej CAD geometrie,
3. mechanické vlastnosti mikro-prútov sa líšia od vlastností plného materiálu.

Z toho vyplýva, že navrhnutá metodika optimalizácie by mala byť schopná použiť ľubovoľnú základnú bunku s ohľadom na jej reálnu geometriu a mechanické vlastnosti po výrobe. Výsledkom bude geometria, ktorú bude možné jednoducho vytvoriť bez premodelovania a následne vyrobiť technológiou SLM bez nutnosti použitia ťažko odstrániteľných podporných štruktúr.

Pre takto vytvorenú metodiku je veľký potenciál aplikačného použitia v odvetviach ako motoršport, kozmický priemysel, letecký priemysel alebo medicínsky priemysel. Konkrétne bude navrhnutá metóda otestovaná na komponente definovanom leteckou firmou, ktorá reprezentuje typického koncového spotrebiteľa. Ako diel vhodný pre optimalizáciu definovali konzolu pripájajúcu brzdné štíty ku krídlu lietadla. Poskytnutá konzola poslúži na vytvorenie prípadovej štúdie, na ktorej bude navrhnutý metodický postup verifikovaný. Výhodou taktiež je, že konzola už bola v minulosti optimalizovaná klasickou topologickou optimalizáciou, čo poskytuje príležitosť tieto dva prístupy priamo porovnať aplikáciou na rovnaký diel.

3.2 Cieľ práce

Cieľom práce je navrhnuť metodiku topologickej optimalizácie s použitím mikro-prútových štruktúr a overiť ju aplikáciou na konkrétnom diely používanom v leteckom priemysle. Vytvorená metodika musí reflektovať špecifikácie dané aditívnou výrobou a optimalizovaný diel musí byť ľahší ako pôvodný, no zároveň plne funkčný.

Na metodiku sú kladené nasledujúce dielčie ciele:

- Schopnosť použitia ľubovoľnej základnej bunky
- Nezávislosť na zvolenom optimalizačnom riešení
- Zohľadnenie výrobných imperfekcií mikro-prútových štruktúr
- Implicitná reprezentácia geometrie

Dielčie ciele spojené s optimalizovaným dielom:

- Identifikácia najvhodnejšej základnej bunky
- Stanovenie konkrétnych výrobných imperfekcií
- Numerická verifikácia pomocou MKP
- Overenie vyrobiteľnosti technológiou SLM

4 KONCEPČNÝ NÁVRH

4.1 Analýza cieľov a špecifikácia obmedzení

Pred vlastným riešením prípadovej štúdie bolo nutné analyzovať ciele, špecifikovať ich metriky splnenia a definovať príslušné obmedzenia, na základe ktorých bol výsledok hodnotený. Funkcia konzoly brzdných štítov, ktorá bola v rámci práce optimalizovaná je jednoznačná – uchytiť brzdne štíty ku krídlu lietadla a odolať mechanickému namáhaniu vznikajúcemu počas prevádzky brzdných štítov. S takto definovanou funkciou sa spája niekoľko konkrétnych cieľov a obmedzení, ktoré sú súhrnne zobrazené v Tab. 4-1. Aby bolo možné splniť všetky vytyčené ciele, bolo prípustné, aby boli určité časti konzoly z plného materiálu.

Tab. 4-1 Ciele a obmedzenia kladené na finálny návrh, * prút, ** plný materiál.

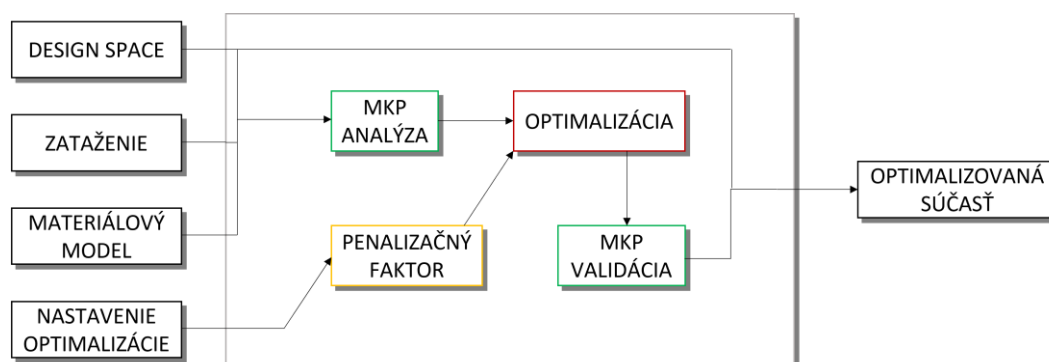
Oblasť	Charakteristika	Metrika	Cieľ	Obmedzenie
Topologická optimalizácia	Minimalizácia hmotnosti	678 g	•	
Bezpečnosť	Medzný stav deformácie	1,45 mm	•	
	Medzný stav pružnosti	180*/ 280** MPa	•	
	Medzný stav pevnosti	280*/ 390** MPa	•	
Montáž	Pripájacie rozmery	nezmenené		•
	Priestor pre montáž	Ø 15 mm, Ø 32 mm		•
	Zástavbové rozmery	120x230x120 mm ³		•
Aditívna výroba	Kritický uhol	43 °		•
	Minimálny priemer	0,5 mm		•
	Voľné prúty	minimalizácia		•

Ciele bolo možné bližšie rozdeliť na tie spojené s topologickou optimalizáciou a tie spojené s bezpečnosťou k medzným stavom. Cieľom optimalizácie bolo odľahčiť výsledný diel tak, aby bola jeho hmotnosť nižšia ako 678 g, ktorú má pôvodná konzola brzdného štítu. Zároveň musela byť zachovaná bezpečnosť k medzným stavom deformácie, pružnosti a pevnosti. Hodnota maximálnej prípustnej deformácie bola stanovená analýzou pôvodného dielu na 1.45 mm (vid'. kap. 5), ktorú nesmela optimalizovaná súčasť prekročiť. Pri prevádzkovom zaťažení s magnítudou 27,3 kN nesmie dôjsť ku globálnemu splastizovaniu súčasti spojeným s neprípustnou zmenou tvaru a pri početnom zaťažení, ktoré predstavuje 1,5 násobok prevádzkového, nesmie dôjsť k porušeniu súčasti skôr ako po 3 sekundách [58].

Príslušné obmedzenia bolo taktiež možné rozdeliť na dve oblasti - obmedzenia spojené s montážou konzoly a obmedzenia spojené s aditívnou výrobou. Vyrobenej optimalizovanej diel musel mať zachované pripájacie rozmery a ich počet, aby ho bolo možné jednoducho zameniť v zostave lietadla. Taktiež museli byť prístupné všetky otvory pre spojovací materiál, aby bolo možné konzolu pripevniť. Maximálne prípustné rozmery dielu boli obmedzené zástavbovými rozmermi. Z pohľadu aditívnej výroby boli obmedzenia kladené na orientáciu prútov a ich priemer s ohľadom na ich vyrobiteľnosť, a minimalizáciu voľných prútov vyžadujúcich podporné štruktúry.

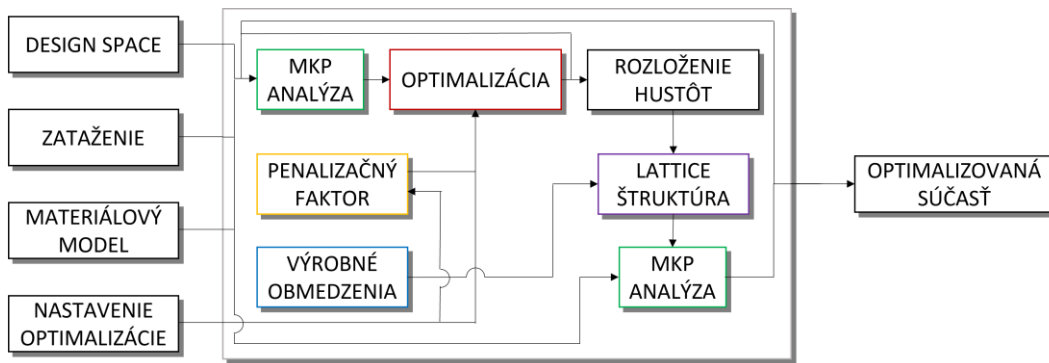
4.2 Technická funkčná analýza

V prípade topologickej optimalizácie, ktorej výsledkom je plný materiál (metóda SIMP), je často možné použiť túto metódu ako BlackBox (viď Obr. 4-1). Užívateľ musí definovať Design Space, ktorý slúži ako priestor na odoberanie materiálu, zaťaženie, materiálový model a nastavenie optimalizácie. V nastavení optimalizácie sa volí cieľ optimalizácie (napr. maximalizácia tuhosti) a príslušné obmedzenie (napr. zníženie hmotnosti pod 50 %). Taktiež je možné upraviť aj penalizačný faktor, no často ostáva na doporučenej hodnote $p = 3$ [1].



Obr. 4-1 Schematický postup topologickej optimalizácie s plným materiálom.

Napriek tomu, že vyššie popísaný postup je často dostatočný a vedie k žiadúcim výsledkom pre solid telesá, ako ukazuje mnoho prác (napr. [59, 62]), nie je úplne vhodný pre optimalizáciu s využitím mikro-prútových štruktúr. V tomto prípade je nutné začať na topologickú optimalizáciu nahliadať ako na GlassBox, využiť nadväznosti medzi jednotlivými operáciami a upravovať jednotlivé vstupy a výstupy s ohľadom na aplikáciu mikro-prútových štruktúr (obr. Obr. 4-2).



Obr. 4-2 Schematický postup navrhutej topologickej optimalizácie s využitím mikro-prútových štruktúr.

Z vykonanej rešerše sa ukázalo, že je možné použiť optimalizáciu metódou SIMP. Rôznili sa však penalizačné faktory, ktoré autori použili zväčša nezávisle na vlastnostiach zvolenej bunky [30, 63], alebo zohľadnili iba jeden koeficient popisujúci obecné ortotropné vlastnosti [31]. Z tohto dôvodu bolo v práci nutné zodpovedať na otázku:

O1: Aký penalizačný faktor je vhodný pre zvolenú mikro-prútovú štruktúru?

Taktiež sa ukázalo, že rôzne základné bunky vedú k rôznym mechanickým vlastnostiam výslednej štruktúry. Vystáva preto druhá otázka:

O2: Aká základná bunka je najvhodnejšia pre statické namáhanie?

Po zodpovedaní týchto otázok je možné pustiť sa do optimalizácie. S ohľadom na aditívnu výrobu je však ešte nutné vyriešiť pár nedostatkov. Výstupom optimalizácie je rozloženie hustoty v intervale $<0,1>$, čo je pre technológiu SLM nežiadúce. Pod určitou hustotou sú priemery prútov príliš malé, aby ich bolo možné vyrobiť, a nad určitou hustotou dôjde k uzavretiu nenataveného prášku. Problém minimálnej hustoty je možné vyriešiť v rámci optimalizačného výpočtu, kde je možné nastaviť minimálnu prípustnú hustotu⁷. V prípade maximálnej hustoty je však nutné hodnoty nad určitou medzou znížiť na jej úroveň. Vystáva preto 3. otázka:

O3: Aká maximálna hustota je vyrobiteľná bez uzavretia nenataveného prášku?

Maximálne hustoty je možné upraviť pomocou programovacieho jazyka Python. Následne je možné použiť získané rozloženie hustôt v programe nTopology a vytvoriť príslušnú gradientnú mikro-prútovú štruktúru. Tu sú taktiež jednoducho a rýchlo odstránené voľné prúty, ktoré by inak vyžadovali podporné štruktúry alebo neprispievali k prenášaniam zaťaženia. Pridané sú časti, ktoré sú vyrobené z plného materiálu a celok je exportovaný vo formáte .3mf na pre-processing výroby.

⁷ Minimálna hustota je v optimalizácii defaultne nastavená na malú nenulovú hodnotu z numerického hľadiska.

V neposlednom rade je nutné vytvorenú štruktúru overiť pomocou MKP. Na základe literatúry sa ukázalo, že v reálnom čase je prakticky nemožné počítať s celou detailnou geometriou a vhodné alternatívy sú prútové modely a homogenizácie. Avšak pre vysoké relatívne hustoty (cca nad 30 %) je zrejme, že prútové predpoklady jednoznačne nie sú splnené. Použiteľnou pre gradientné štruktúry ostáva metóda homogenizácie. Treba však pamätať na dôležitý aspekt výroby technológiou SLM a tým sú výrobné imperfekcie. Lineárny numerický výpočet s využitím homogenizácie vytvorenej na ideálnej geometrii môže mať chybu voči experimentu viac ako 51 % [51]. Vystáva preto 4. a posledná otázka:

O4: Akým spôsobom je možné spresniť numerický výpočet využívajúci homogenizáciu?

4.3 Návrh alternatívnych riešení

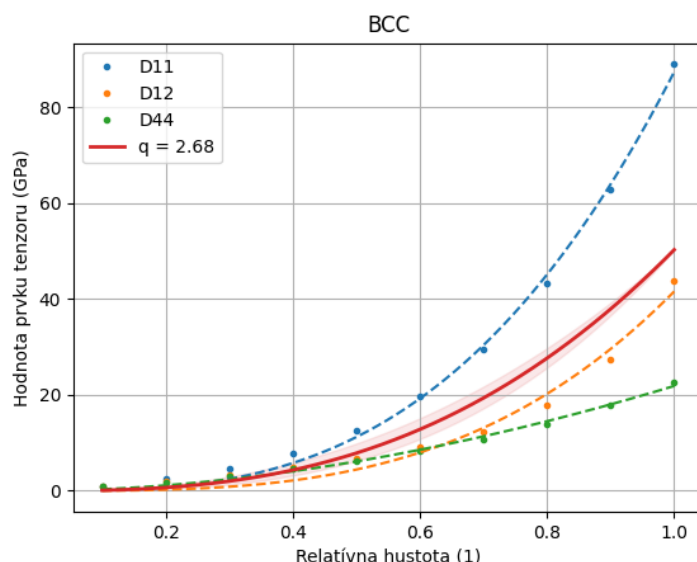
V snahe získať odpovede na položené otázky, boli sformulované predpoklady, ktorých overením boli získané alternatívne riešenia čiastočných problémov v metodike optimalizácie. Následne bolo možné pristúpiť k riešeniu topologickej optimalizácie konzoly brzdnych štítov.

4.3.1 Penalizačný faktor

Na základe rešerše je možné si všimnúť priamu analógiu medzi materiálovou interpoláciou v metóde SIMP a závislosťou koeficientov tenzoru elastických vlastností na relatívnej hustote štruktúry. Na základe tohto poznania bol sformulovaný nasledujúci predpoklad:

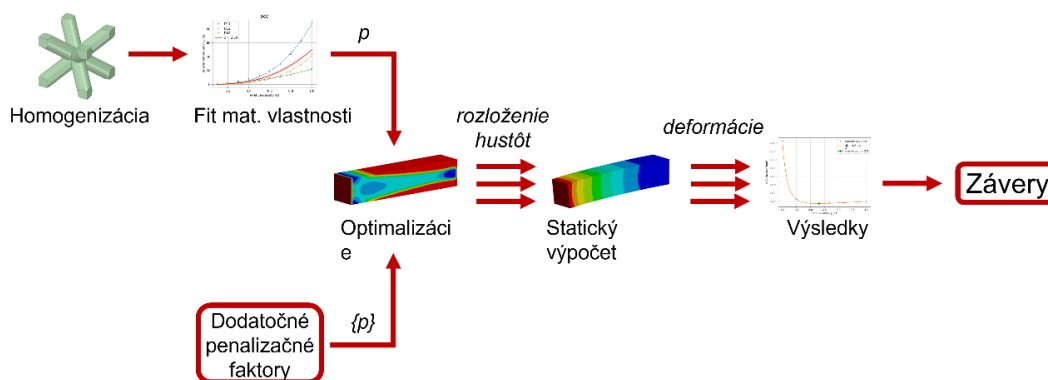
P1: Penalizačný faktor vytvorený na základe homogenizácie mechanických vlastností základnej bunky vedie k tuhšiemu výsledku ako penalizačný faktor 1 alebo 3

Predpoklad bol overený pre votknutý nosník namáhaný silou na ohyb a základnú bunku BCC. Pomocou homogenizácie v module ANSYS Material Designer boli získané 3 nezávislé koeficienty tenzoru elastických vlastností popisujúcich príslušnú bunku. Tieto boli následne preložené metódou najmenších štvorcov funkciou obdobnou metóde SIMP (viď 2.2.1) a výsledný penalizačný faktor bol získaný ako priemer exponentov $p = 2,68$ a vyhodnotená bola aj jeho chyba ako $e = \pm 0,33$ (Obr. 4-3).



Obr. 4-3 Závislosť koeficientov tenzoru elastických vlastností na relatívnej hustote.

Následne prebehli optimalizačné výpočty pre penalizačné faktory 1; 1,5; 2; 3; 4 a taktiež bol vyhodnotený penalizačný faktor s hodnotou 2,35, ktorý predstavuje spodnú hranicu chyby odhadnutého penalizačného faktoru. V rámci topologickej optimalizácie vykonanej v programe ANSYS boli menené jednotlivé penalizačné faktory. Úloha bola nastavená ako minimalizácia poddajnosti s obmedzením hmotnosti na 50 %. Získané výsledky boli overované s využitím homogenizovaného materiálu a vyhodnocovaná bola deformácia votknutého nosníku v mieste aplikácie sily. Schematicky je tento postup zobrazený na Obr. 4-4.



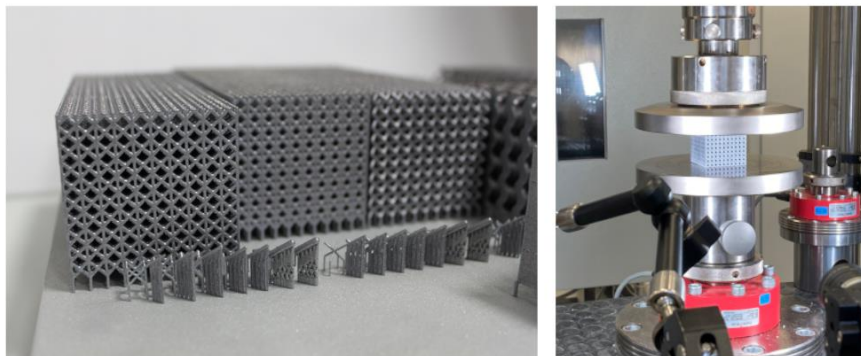
Obr. 4-4 Schematický postup určenia a overenia penalizačného faktoru.

4.3.2 Základná bunka

Aby bolo možné zodpovedať položenú otázku O2, bol na základe vykonanej rešerše formulovaný nasledujúci predpoklad.

P2: FCCZ bunka má vyšší pomer tuhosti k hmotnosti ako najčastejšie používaná BCC bunka a aj ako staticky preurčená FBCCZ bunka.

Overenie prebehlo experimentálne. Vyrobené boli 3 štruktúry z materiálu AlSi10Mg s rozmerom $50 \times 50 \times 45 \text{ mm}^3$ a relatívnou hustotou 0,3. Pozostávali z buniek: BCC, FCCZ a FBCCZ s rozmerom 5 mm. Rozmery bunky a štruktúry boli zvolené s ohľadom na zistenie Cheng [23]. Každý typ štruktúry bol vyrobený 3 krát, čím bolo celkovo otestovaných 9 štruktúr (Obr. 4-5). Skúšky boli vykonané v jednoosom tlaku (Obr. 4-5). Záujem bol najmä o lineárne elastickú deformáciu štruktúr, no test pokračoval aj v plastickej oblasti až do porušenia alebo maximálnej kapacity stroja 180 kN.



Obr. 4-5 Štruktúry určené pre materiálové skúšky; (a) umiestnenie na podložke; (b) konfigurácia na skúšobnom stroji.

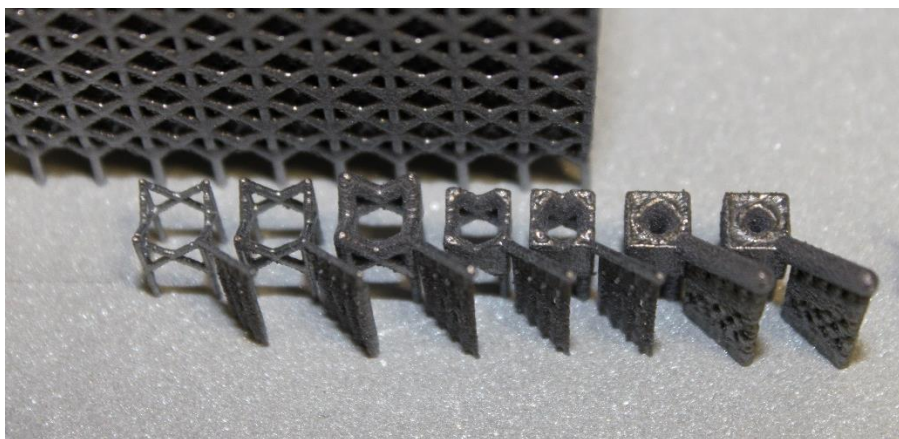
4.3.3 Numerická verifikácia

V snahe zodpovedať otázku O3, slúžiacu na definíciu maximálne prípustnej hustoty a O4 snažiacej sa spresniť numerický výpočet mikro-prútvých štruktúr, bol na základe CAD modelu formulovaný predpoklad P3 a v súlade s postupom, ktorý navrhol Liu [51] predpoklad P4:

P3: Bunky s relatívnou hustotou 0,95 nebudú zadržiavať nenatavený prášok.

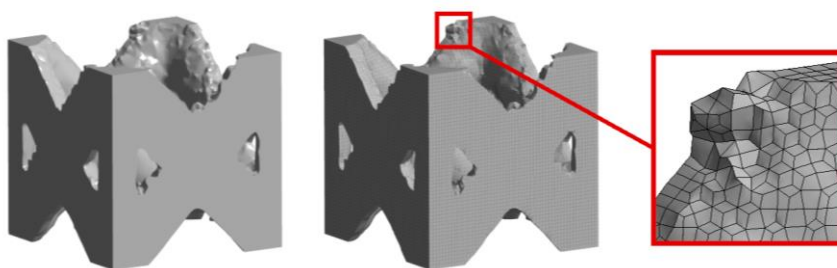
P4: Homogenizácia vytvorená na základe reálnej výrobných geometrií dokáže spresniť numerickú predikciu.

Aby bolo možné predpoklady overiť boli spolu so štruktúrami popísanými vyššie vyrobené sady základných buniek. Bunky s minimálnou hustotou mali priemery prútov 0,5 mm a ich relatívne hustoty sa líšili podľa typu základnej bunky. Ďalšie relatívne hustoty boli odstupňované od 0,1 po 0,9 s krokom 0,2 a pridané boli aj bunky s relatívnou hustotou 0,95. Celkovo teda boli vyrobené 3 sady po 7 buniek, čo je v súčte 21 buniek (Obr. 4-6). Reálna geometria buniek bola nasnímaná s využitím optického 3D skeneru ATOS III Triple Scan s využitím objektívu MV 60, ktorý má skenovací objem $60 \times 45 \times 35 \text{ mm}^3$. Chyba merania sa dá očakávať v tisícinách mm. Takto získaná geometria bola pred-zarovnaná pomocou troch bodov a následne zarovnaná pomocou metódy *best-fit* s nominálnou geometriou. Uzavreté boli chýbajúce časti a geometria bola použitá pre homogenizáciu (príloha D.1).



Obr. 4-6 Sada FCCZ základných buniek určených pre optické skenovanie.

Vzhľadom na zložitosť reálnej geometrie nebolo možné vypočítať homogenizované vlastnosti v rámci modulu Material Designer, ale musel byť použitý ANSYS Mechanical. Získaná geometria vo formáte .stl z optickej digitalizácie bola vysieťovaná s využitím karteziánskej metódy objemovými prvkami (*SOLID 186*). Veľkosť prvkov bola zvolená tak, aby boli zachované geometrické odchýlky a celkový počet uzlov bol približne 241 000. Okrajové podmienky sa zhodovali s tými použitými v module Material Designer [64].



Obr. 4-7 Geometria a sieť základnej bunky použitá pre homogenizáciu.

Materiálový model základných buniek bol stanovený na základe lineárnej MKP analýzy využívajúcej plne vysieťovaný detailný osminový model FCCZ štruktúry. Geometria bola vytvorená vo formáte .stl v softvéri nTopology a načítaná do ANSYS Mechanical, kde bol vytvorený konečno-prvkový model. Použité boli objemové elementy (*SOLID 186*) vytvorené kartézskou metódou a model pozostával z 2 271 524 uzlov. Na platňu, pomocou ktorej bol model deformačne zaťažovaný, bola predpísaná oceľ s tisícnásobným modulom pružnosti, čo predstavovalo tuhé teleso skúšobného stroja. Medzi telesá bol nastavený kontakt *bonded*. Modul pružnosti bol optimalizovaný až pokiaľ nebola dosiahnutá zhoda tuhosti štruktúry s experimentom, a to pre hodnotu $E = 40,9 \text{ GPa}$ a poissonov pomer $\mu = 0,33$.

Postup homogenizácie demonštrujeme pre transversálne ortotropnú FCCZ základnú bunku, no popísaný postup je obecný. Vhodnou zámennou indexov a uvážením správneho tvaru Hookovho zákona (Rov. (10)) je možné ho aplikovať na ľubovoľnú základnú bunku.

Pre FCCZ bunku platí nasledujúci vzťah medzi napätím a pretvorením:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & D_{44} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & D_{55} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & D_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (10)$$

S jeho uvážením bolo možné s ohľadom na okrajové podmienky určiť jednotlivé koeficienty D_{ij} nasledovne:

Pre $\epsilon_{xx} \neq 0$

$$D_{11} = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}} = \frac{F_x}{L\Delta x'} \quad (11)$$

$$D_{12} = \frac{\sigma_{yy}}{\epsilon_{xx}} = \frac{F_y}{L\Delta x'} \quad (12)$$

kde F_x, F_y sú reakčné sily, L je rozmer základnej bunky a Δx je aplikované posunutie.

Pre $\epsilon_{zz} \neq 0$

$$D_{13} = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{zz}} = \frac{F_x}{L\Delta z'} \quad (13)$$

$$D_{33} = \frac{\sigma_{zz}}{\epsilon_{zz}} = \frac{F_z}{L\Delta z'} \quad (14)$$

kde F_x, F_y sú reakčné sily, L je rozmer základnej bunky a Δx je aplikované posunutie.

Pre $\gamma_{xy} \neq 0$

$$D_{44} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{T_y}{L\Delta y'} \quad (15)$$

kde T_y sú reakčné sily, L je rozmer základnej bunky a Δy je aplikované posunutie.

Pre $\gamma_{yz} \neq 0$

$$D_{55} = \frac{\tau_{yz}}{\gamma_{yz}} = \frac{T_z}{L\Delta z'} \quad (16)$$

kde T_z sú reakčné sily, L je rozmer základnej bunky a Δz je aplikované posunutie.

Koeficienty D_{ij} pre $i, j = 1, 2, 3$ boli získané na základe nasledujúcich okrajových podmienok:

$$u_x(0, y, z) = 0, \quad (17)$$

$$u_x(L_x, y, z) = \epsilon_x L_x, \quad (18)$$

$$u_y(x, 0, z) = 0, \quad (19)$$

$$u_y(x, L_y, z) = \epsilon_y L_y, \quad (20)$$

$$u_z(x, y, 0) = 0, \quad (21)$$

$$u_z(x, y, L_z) = \epsilon_z L_z. \quad (22)$$

Koeficienty D_{ij} pre $i, j = 4, 5, 6$ boli získané na základe nasledujúcich okrajových podmienok:

$$u_y(0, y, z) = u_z = 0, \quad (23)$$

$$u_y(L_y, y, z) = \gamma_{xy} L_x, \quad (24)$$

$$u_z(L_x, y, z) = 0, \quad (25)$$

$$u_x(x, 0, z) = u_z = 0, \quad (26)$$

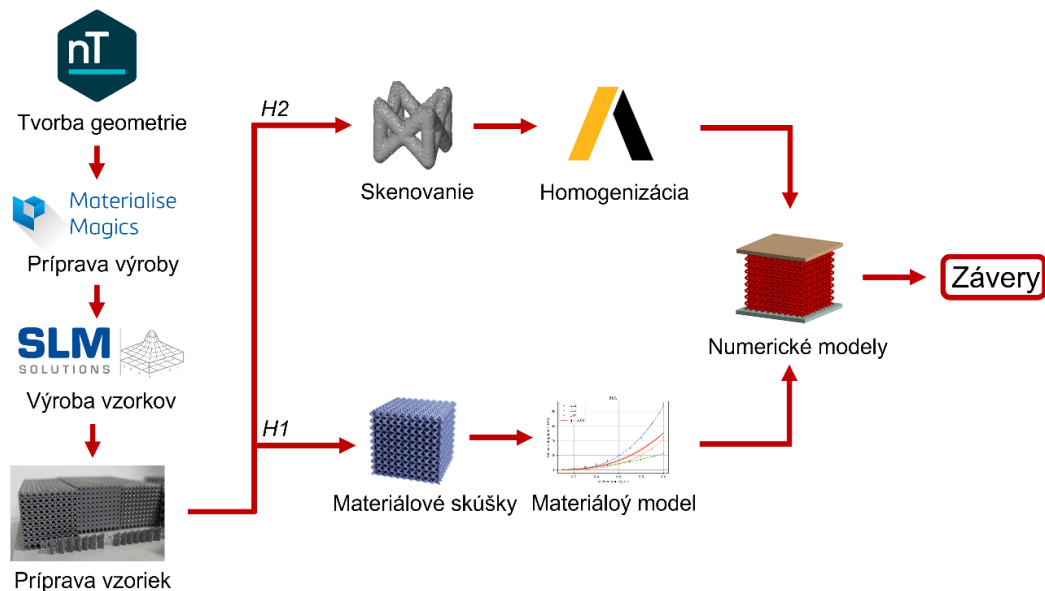
$$u_x(x, L_y, z) = u_z = 0, \quad (27)$$

$$u_z(x, y, 0) = 0, \quad (28)$$

$$u_z(x, y, L_z) = 0. \quad (29)$$

Získanie koeficientov tenzoru tuhosti pre jednu relatívnu hustotu vyžaduje štyri MKP výpočty, z ktorých sú koeficienty určené. Aby prebiehalo odčítavanie a výpočet jednotlivých koeficientov rýchlejšie, bol vytvorený automatizačný IronPython skript (príloha B.2) do konzoli Mechanical Scripting.

Potom ako boli určené homogenizované materiálové vlastnosti – získané jednotlivé koeficienty tenzoru elastických vlastností, prebehlo overenie voči výsledkom získaných použitím homogenizovaného materiálu vytvoreného z ideálnej geometrie a voči výsledkom získaných z experimentu s FCCZ štruktúrou. Celý postup je schematicky zhrnutý v Obr. 4-8.

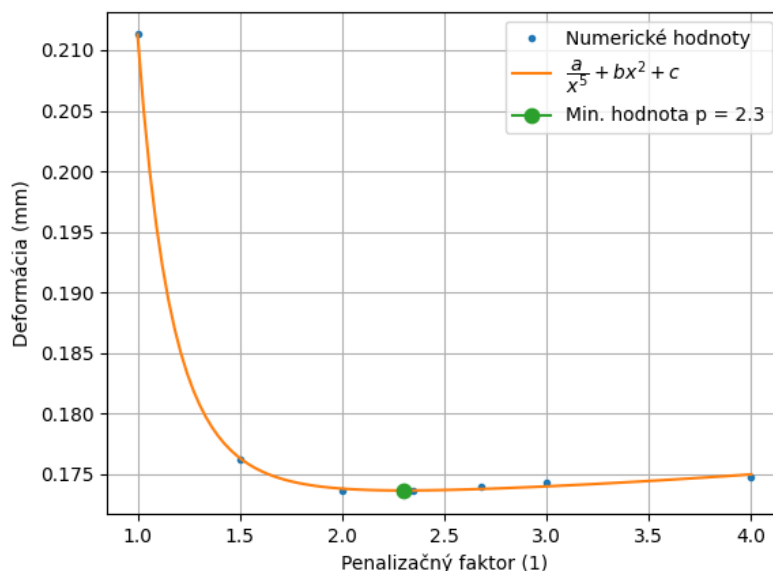


Obr. 4-8 Schematický postup pri tvorbe a vyhodnocovaní homogenizačných modelov.

4.4 Analýza alternatívnych riešení

4.4.1 Penalizačný faktor

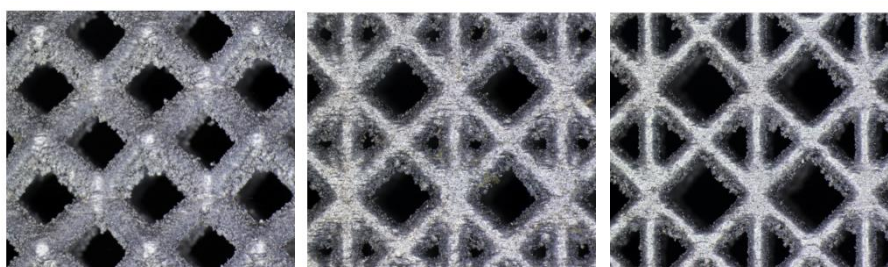
Postupom popísaným vyššie sme dospeli k závislosti deformácie na zvolenom penalizačnom faktore (Obr. 4-9), ktorá bola preložená metódou najmenších štvorcov a následne bolo možné induktívnym spôsobom formulovať závery. Ukázalo sa, že penalizačný faktor vytvorený na základe homogenizácie $p = 2,68$ vedie k výsledku výrazne tuhšiemu ako penalizačný faktor $p = 1$ a mierne tuhšiemu ako $p = 3$. Faktor $p = 2,68$ nie je globálnym minimumom na preloženej funkcii, to je v bode $p = 2,3$. Avšak toto minimum je blízko spodnej hranice chyby odhadu a môže sa meniť s charakterom namáhania. Rozdiel v deformácii medzi $p = 2,3$ a $p = 2,68$ nie je zvlášť výrazný. Z toho sa dá usudzovať, že hodnota penalizačného faktora získaná postupom navrhnutým v tejto práci je vhodná pre optimalizáciu s využitím mikro-prúťových štruktúr.



Obr. 4-9 Výsledky deformácie štruktúry v závislosti na rôznych penalizačných faktoroch.

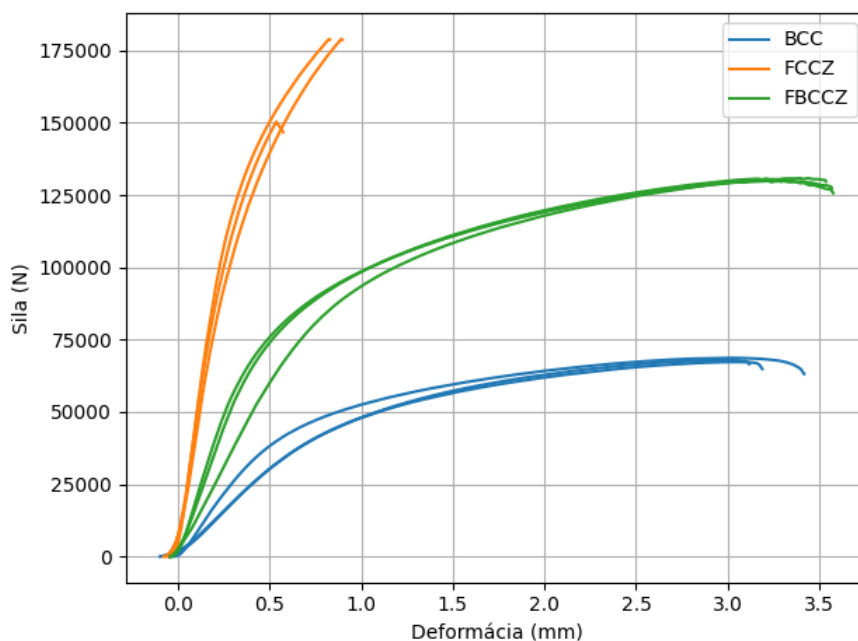
4.4.2 Základná bunka

Napriek tomu, že boli všetky bunky štruktúr vyrobené s rovnakou relatívnou hustotou, líšili sa po výrobe ich hmotnosti navzájom a mierne aj voči CAD modelu (uvažovaná hustota 2600 kgm^{-3}). Štruktúra s BCC bunkou vážila $87,40 \pm 0,22 \text{ g}$ (CAD $88,79 \text{ g}$) a FCCZ resp. FBCCZ vážili $100,56 \pm 0,19 \text{ g}$ (CAD $99,98 \text{ g}$) a $97,23 \pm 0,20 \text{ g}$ (CAD $94,04 \text{ g}$). Rozdiel hmotností FCCZ a FBCCZ štruktúr bol spôsobený neorezanými prútmi v plochách kocky, ktoré BCC štruktúra nemá. Najväčšiu odchýlku hmotnosti od CAD modelu mala FBCCZ štruktúra. Dá sa predpokladať, že je to z dôvodu nataveného prášku so spodnej strany prútov (viď Obr. 4-10). Vizuálne sa najviac prášku nachádza na štruktúre s FCCZ bunkou, no treba si uvedomiť, že u FCCZ chýbajú oproti FBCCZ stredové prúty, ktoré tvoria značný objem.



Obr. 4-10 Detail prútov a ich morfológie po výrobe. Zľava: BCC, FCCZ, FBCCZ.

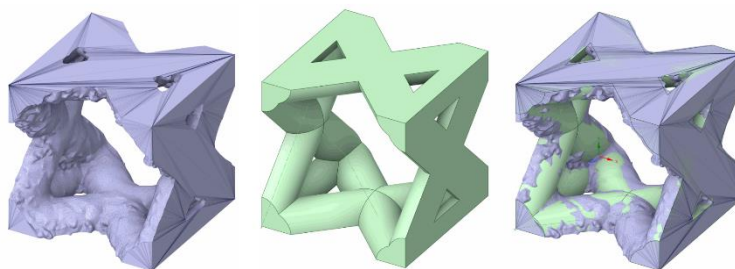
Zo získanej závislosti sila-deformácia (Obr. 4-10) je jednoznačne vidno, že bunka FCCZ násobne prekonávala vlastnosti buniek FBCCZ a BCC, ako z pohľadu tuhosti, tak aj pevnosti. Merná tuhosť bola u FCCZ štruktúry približne 2,7 krát vyššia ako u štruktúry FBCCZ a 5,4 krát vyššia ako u štruktúry BCC. Počas testu FCCZ štruktúr nebola dosiahnutá ich medza pevnosti. V ďalšom riešení práce bola preto použitá FCCZ bunka.



Obr. 4-11 Výsledok porovnania štruktúr pomocou skúšky v jednoosom tlaku.

4.4.3 Numerická verifikácia

Medzi geometriou získanou 3D skenovaním a nominálnou geometriou bolo vidno jednoznačné rozdiely ako v rozmeroch, tak aj príslušných imperfekciách v podobe nalepeného prášku zo spodnej strany prútov (Obr. 4-10, Obr. 4-12). Toto sa zásadným spôsobom prejavilo na získaných homogenizovaných vlastnostiach, ako si je možné všimnúť z porovnania pre FCCZ bunku s relatívnou hustotou 30% (Tab. 4-2).

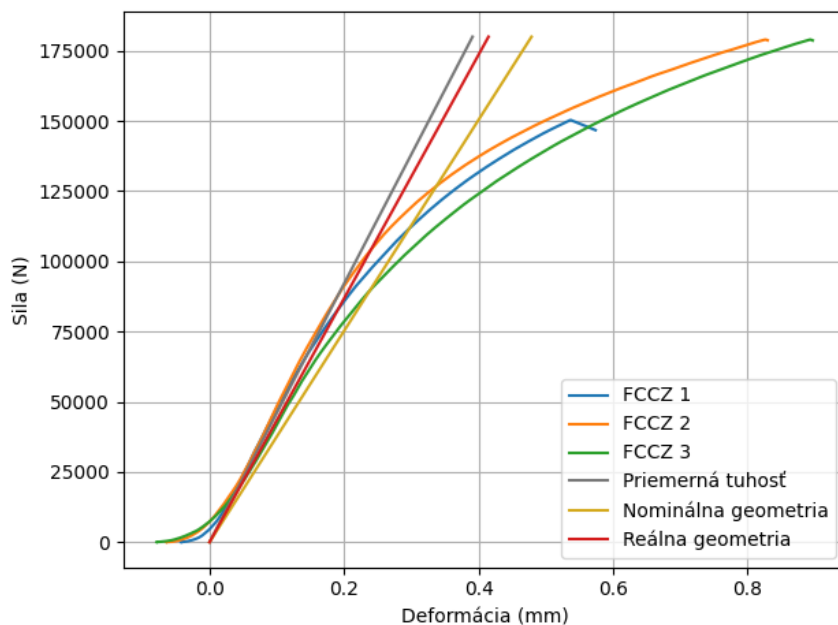


Obr. 4-12 Vzájomné porovnanie reálnej (šedá) a nominálnej (zelená) geometrie základných buniek.

Tab. 4-2 Výsledky homogenizovaných vlastností nominálnej a reálnej geometrie.

Geometria	D11	D33	D12	D13	D44	D55
(1)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
nominálna	3,75	8,02	0,15	1,79	0,18	1,96
reálna	4,97	8,82	0,30	1,97	0,24	2,13

Ak sa pozrieme na výsledky MKP simulácie (Obr. 4-13), v ktorej boli oba homogenizačné modely navzájom porovnané voči tlakovému experimentu na FCCZ štruktúre (modrá, oranžová a zelená krivka), dospievame k záveru, že homogenizácia vykonaná na základe reálnej geometrie dokáže znížiť chybu tuhosti voči priemernej hodnote (šedá priamka) z 22 % (žltá priamka) na 6 % (červená priamka) a tým spresniť numerickú predikciu.



Obr. 4-13 Výsledky porovnania experimentu s homogenizačnými MKP modelmi.

5 PREDBEŽNÝ NÁVRH

Simultánne s tým, ako boli určované neznáme vstupy a veličiny popísané v koncepčnom návrhu, bol tvorený predbežný návrh. Tento návrh popisuje vytvorenú metodiku topologickej optimalizácie od počiatku do konca, no s využitím základnej bunky BCC. Postup je obecný, rovnakým spôsobom bol použitý pri detailnom návrhu používajúcom FCCZ bunku a spresnené vstupy z koncepčného návrhu.

5.1 Matematický model

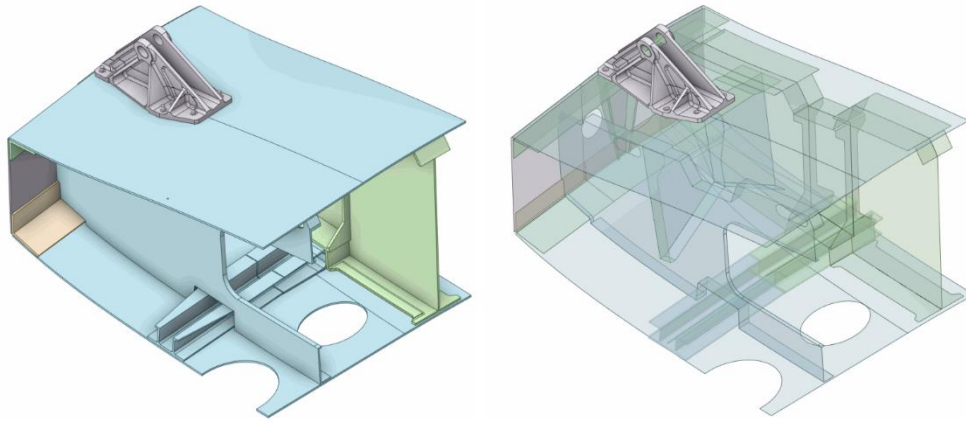
V práci je možné rozdeliť matematické – numerické modely do 3 oblastí podľa charakteru riešeného problému na:

- a) pre-analýzu,
- b) optimalizáciu,
- c) verifikáciu.

5.1.1 Pre-analýza

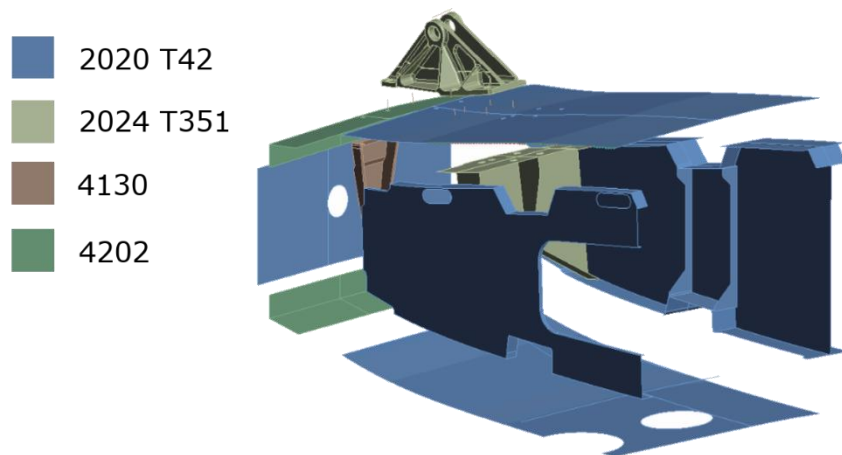
Pre-analýza spočívala v analýze originálnej konzoly použitej na lietadle. Jej cieľom bolo zostaviť konečno-prvkový model a určiť maximálne prípustné deformácie konzoly. Vytvorený model obsahoval okrem samotnej konzoly aj časť krídla, ku ktorému je konzola pripevnená (viď. Obr. 5-1).

V prvom rade bolo nutné poskytnutú objemovú geometriu zjednodušiť. Zo všetkých stojín a poťahov boli v modelári Space Claim extrahované strednicové plochy. U stojín bolo nastavené zdieľanie topológie, aby bolo zaručené spojenie geometrie na úrovni siete. Z nosníku bol extrahovaný priečny prierez a bol nahradený prútovým telesom. Rovnako aj šraubky a svorník boli nahradené prútovými telesami s príslušným prierezom.



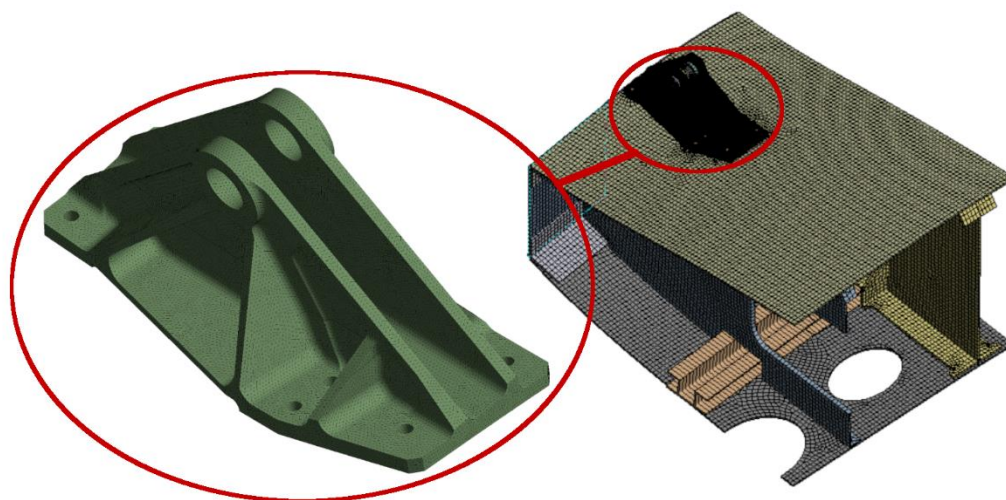
Obr. 5-1 CAD geometria (vľavo) a príslušné zjednodušenie modelu pre MKP analýzu (vpravo).

Okrem konzoly boli všetky ostatné časti modelované s využitím lineárne elastických materiálových vlastností. Konzola bola modelovaná s využitím bi-lineárneho izotropne spevňujúceho materiálového modelu, a to preto, že pre uvažované početné zaťaženie je možné predpokladať plasticitu. Konkrétne materiály predpísané jednotlivým častiam modelu sú zobrazené na Obr. 5-2 a mechanické vlastnosti sú uvedené v prílohe C.1.



Obr. 5-2 Materiály prislúchajúce jednotlivým dielom.

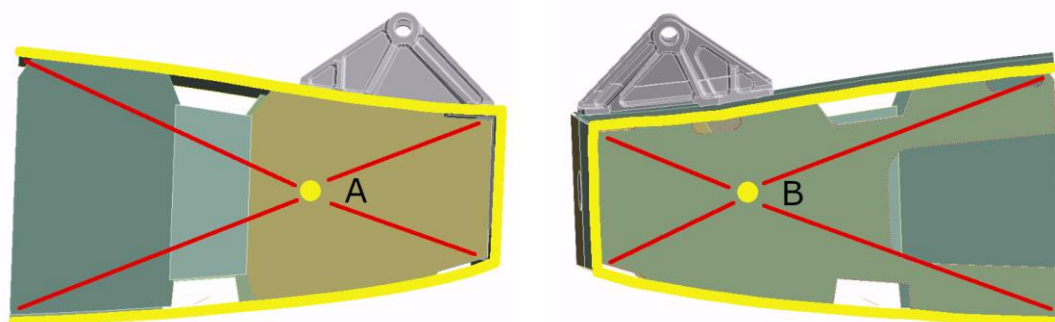
Poťahy a stojiny boli vysieťované s využitím lineárnych škrupinových elementov (*SHELL 181*). Pre šraubky a svorník boli použité lineárne prútové prvky (*BEAM 188*). Konzola bola vysieťovaná s použitím kvadratických štvorstenov (*SOLID 187*). Veľkosť prvkov na konzole bola zvolená tak, aby v najužšom mieste vyšli na prierez minimálne 3 rady elementov (vid' Obr. 5-3). Celkový počet uzlov bol 968 002.



Obr. 5-3 Vytvorená konečno-prvková sieť.

Spojenie častí krídla je fyzicky realizované pomocou bodových zvarov. Avšak s ohľadom na to, že nebolo cieľom vyhodnocovať napätosť na krídle, boli spojenia modelované pomocou kontaktov *bonded*. Konce šraubov a svorníka boli uchytené pomocou *fixed joint*-ov k plochám s rovnakým prierezom ako príslušné podložky a ich správanie bolo nastavené ako *rigid*. Medzi dosadacie plochy konzoly a príslušný poťah bol nastavený *frictional* kontakt s hodnotou trenia 1,15 [65]. Celkovo model obsahoval 48 kontaktov a 16 jointov. Ich funkčnosť bola overená pomocou modálnej analýzy a *Contact Tool*-u.

Krídlo bolo uchytené v oblasti rezu pomocou *remote point*-ov, ktoré mali zamedzené všetky stupne voľnosti (3 posuvy a 3 rotácie) (viď Obr. 5-4). Zaťaženie bolo aplikované v dvoch krokoch. V prvom bolo aplikované predopnutie šraubov silou 6 000 N a svorníku silou 500 N, rovnako ako v práci Kopeckého. V druhom kroku bola konzola zaťažená početným zaťažením (viď 2.2.6) s magnitúdou 41 kN aplikovaným na svorník.



Obr. 5-4 Zaväzbenie krídla v priestore.

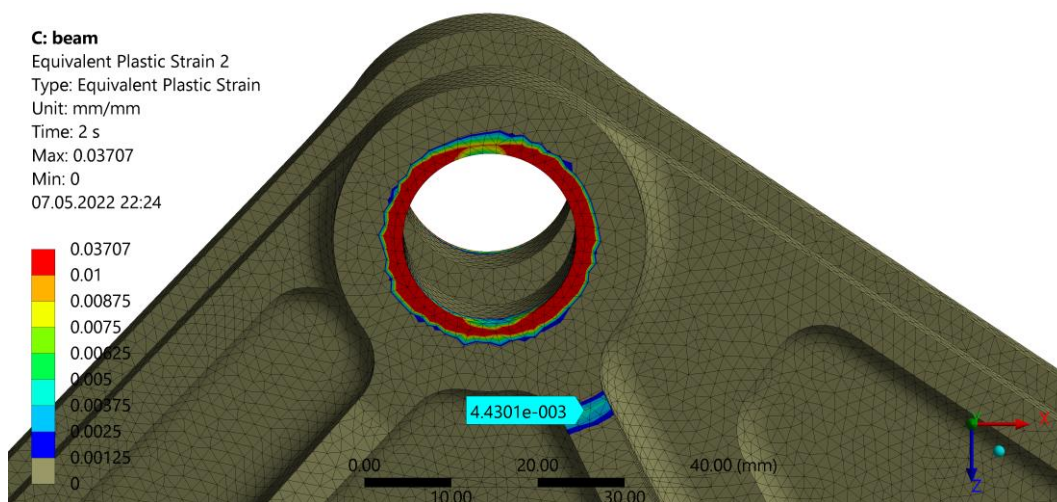
Oba kroky analýzy boli rozdelené na 10 počiatočných podkrokov, v ktorých prebiehalo iteratívne riešenie. Riešič bol nastavený ako priamy a výpočet bol distribuovaný na 6 jadier. Celkovo bolo treba k vyriešeniu vykonať 32 iterácií, čo trvalo 5,5 hodiny.

Pred samotným vyhodnotením deformácií a napätí, boli vyhodnotené reakčné sily s ohľadom na verifikáciu modelu. Ich suma vyšla rovná takmer identicky zápornej hodnote zaťaženia a model je preto možné považovať za validný (viď Tab. 5-1).

Tab. 5-1 Reakčné sily aplikovaných okrajových podmienok.

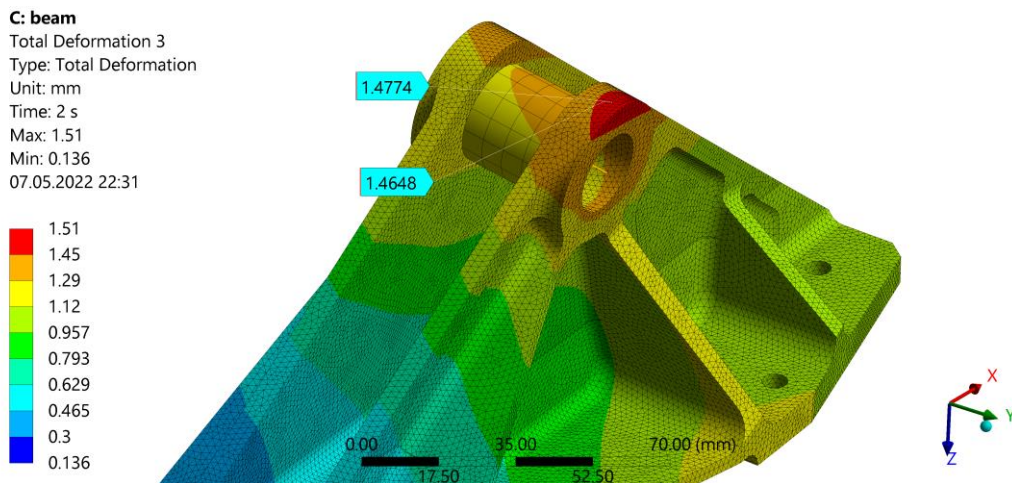
Remote point	Reakčná sila X	Reakčná sila Y	Reakčná sila Z
(1)	(N)	(N)	(N)
A	-4581.8	-15132	-17461
B	-501.19	13152	-23183
Suma	-5082.99	-1980	-40644

Samotné výsledky ukazujú, že na konzole dochádza k plastickému pretvoreniu. Špičkové hodnoty sa nachádzajú v mieste pripojenia svorníku ku konzole pomocou jointu, a preto ich je možné považovať za numerickú chybu. Vyhodnotiť je možné miesto pod svorníkom, kde je plastické pretvorenie lokalizované. Jeho hodnota, 4,4 tisíciny, nie je zvlášť výrazná a neprejavuje sa na celkovej deformačnej odozve konzoly (viď Obr. 5-5).



Obr. 5-5 Plastické pretvorenie konzoly pri početnom zaťažení.

Maximálna deformácia, ktorá bola na konzole dosiahnutá má hodnotu približne 1,45 mm. Tento výsledok sa zhoduje aj s prácou Kopeckého. Ako smerodajná bola zvolená maximálna smerová deformácia v mieste aplikácie sily na svorník (Tab. 5-2) a táto bola použitá v ďalšom riešení práce (viď 5.1.2).



Obr. 5-6 Celková deformácia konzoly pri početnom zaťažení.

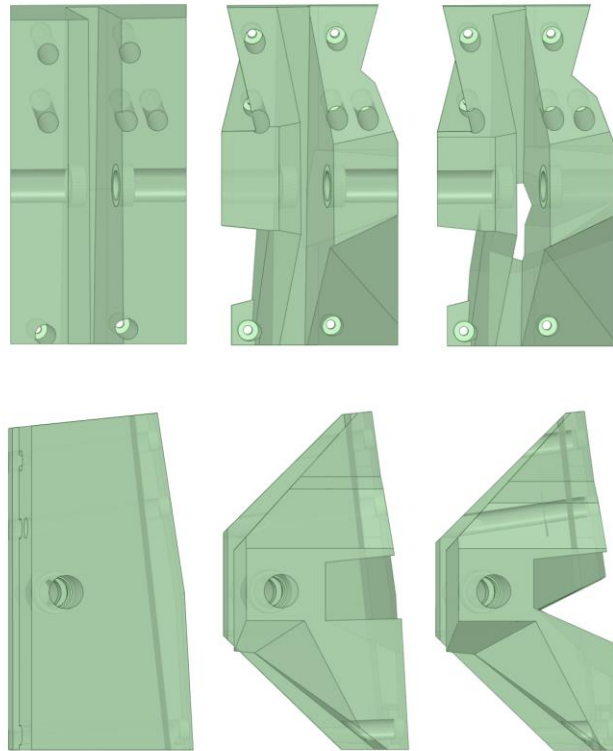
Tab. 5-2 Smerové deformácie v mieste aplikácie sily na pôvodnej konzole.

Deformácia X	Deformácia Y	Deformácia Z
(mm)	(mm)	(mm)
0,43	0,9	1

5.1.2 Optimalizácia

Vytvorený model krídla bol následne použitý vo výpočte topologickej optimalizácie. Konzola bola nahradená design-space-om, ktorý bol optimalizovaný. Vzhľadom na to, že topologická optimalizácia je lineárna analýza, bol *frictional contact* nahradený kontaktom *bonded*. Taktiež materiál bol zvolený ako lineárny, konkrétne zliatina AlSi10Mg (viď 5.2) a bola vytvorená konečno-prvková sieť s využitím objemových (*SOLID 187*) elementov.

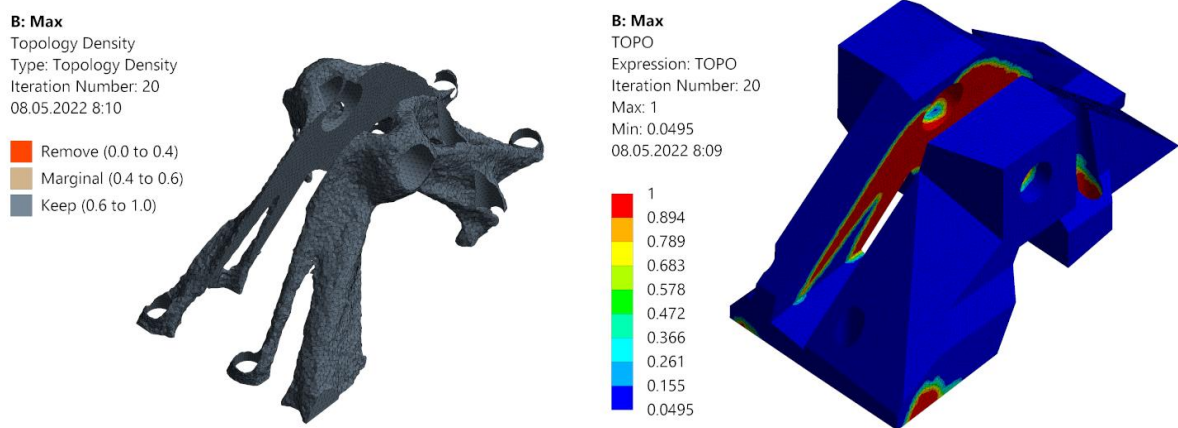
V prvej analýze bola ako design-space využitá maximálna možná zástavbová plocha na krídle lietadla (viď 4.1), aby bola zaručená čo najväčšia tvarová voľnosť pre topologickú optimalizáciu. Táto bola postupne zmenšovaná s ohľadom na jednotlivé výsledky topologických optimalizácií, aby bola dosiahnutá nižšia hmotnosť. Celkovo bolo potreba vykonať 3 analýzy, než bol dosiahnutý finálny design-space (viď Obr. 5-7) umožňujúci zníženie hmotnosti pod hodnotu pôvodnej konzoly. Skôr, ako bol výsledok prijatý za finálny, bolo nutné vykonať ďalšie 2 analýzy, počas ktorých boli upravené hodnoty optimalizačných obmedzení, aby došlo k zníženiu hmotnosti pod požadovanú hodnotu.



Obr. 5-7 Vývoj použitého design-space-u.

V optimalizáciách bola použitá density-based metóda a penalizačný faktor bol zvolený na základe postupu v kapitole 4.3.1 ako 2,68. Cieľ optimalizácie bol nastavený ako minimalizácia poddajnosti a obmedzenia boli pre deformáciu v mieste svorníku vo všetkých troch osách. Použité boli hodnoty deformácií získaných z analýzy originálnej konzoly spolu s výsledným koeficientom bezpečnosti 1,3. Minimálna hustota bola obmedzená na hodnotu 0,0495, ktorá odpovedá u BCC bunky priemeru prútov 0,5 mm, ktorý bol uvažovaný ako minimálny vyrobiteľný priemer.

Výsledkom topologickej optimalizácie bolo rozloženie relatívnych hustôt v priestore v intervale $<0,0495; 1>$ získané pre jednotlivé čísla uzlov design-space-u (viď Obr. 5-8). Získané hodnoty bolo nutné spojiť s polohami uzlov v priestore a nahradiť relatívne hustoty väčšie ako 0,95. Z tohto dôvodu vznikol Python skript, ktorý načítaval jeden súbor obsahujúci polohu uzlov, druhý súbor obsahujúci relatívne hustoty a vytvoril požadovaný výsledkový súbor (viď príloha B.1). Takto vytvorený výsledok bol následne použitý pre tvorbu mikro-prútovej geometrie, na základe ktorej bolo možné rozhodnúť, či je zvolený design-space vhodný alebo nie.

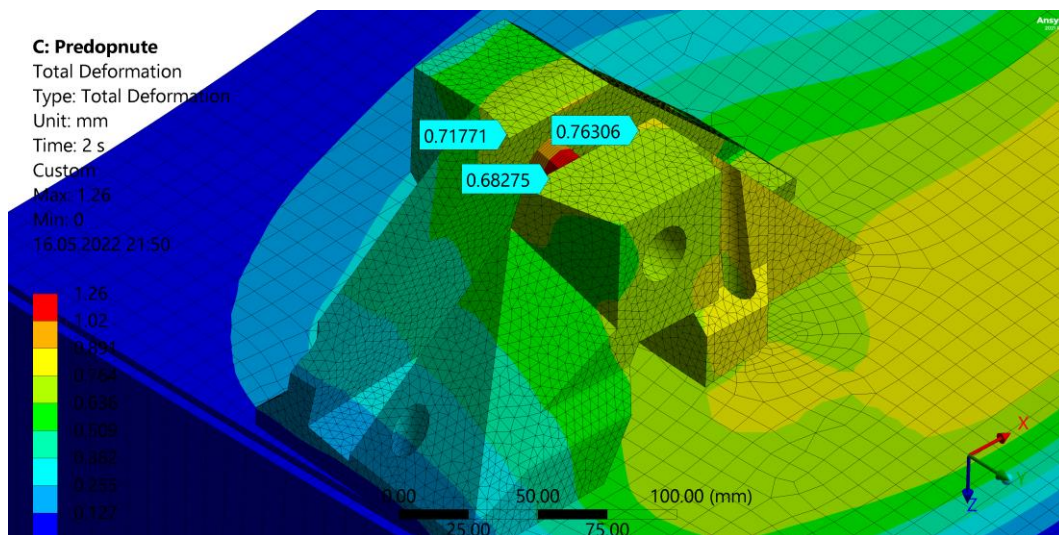


Obr. 5-8 Rozloženie relatívnych hustôt získané v predbežnom návrhu.

5.1.3 Numerická verifikácia

Získaný výsledok optimalizácie bol následne verifikovaný. Vzhľadom na komplexnosť geometrie a premenlivosť relatívnej hustoty v rozmedzí od $\langle 0,05; 0,95 \rangle$ nebolo možné použiť objemové ani prútové elementy. Model, ktorý by pozostával z objemových elementov by nebol v reálnom čase riešiteľný a model, ktorý by bol vytvorený z prútových elementov by pri relatívnych hustotách nad cca 30 % prestal spĺňať prútové predpoklady. Z toho dôvodu bolo pristúpené k verifikácii optimalizovaného dielu pomocou homogenizácie v spojitosti so submodelingom. Rovnako ako v projekte TAČR nebola overovaná bezpečnosť k medzi únavy a na základe skutočností uvedených v [66] nebol predpokladaný a overovaný ani medzný stav vzpernej stability, pretože nebude predchádzať plastickému kolapsu štruktúry.

Na konečno-prvkový model pozostávajúci z design-space-u a krídla bolo namapované rozloženie relatívnych hustôt, ktoré predstavovalo rozloženie gradientnej štruktúry. Premenné mechanické vlastnosti boli získané v module Material Designer a aplikované spolu s materiálovým rozložením. Výsledkom tejto analýzy bola globálna deformačná odozva navrhutej štruktúry. Maximálna deformácia štruktúry vyšla približne 1,2 mm v mieste svorníku (viď Obr. 5-9). Smerové deformácie sú zhrnuté v Tab. 5-3.

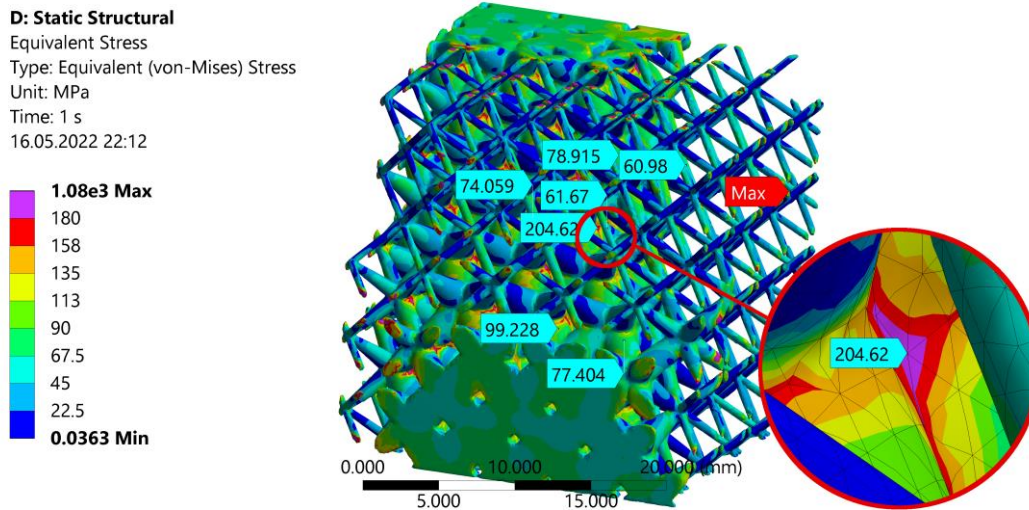


Obr. 5-9 Celková deformácia dosiahnutá pre návrh s BCC štruktúrou.

Tab. 5-3 Smerové deformácie dosiahnuté pre návrh s BCC štruktúrou v mieste svorníka.

Deformácia X	Deformácia Y	Deformácia Z
(mm)	(mm)	(mm)
0,36	0,12	0,99

Aby bolo možné modelovať lokálnu napätosť, bola použitá metóda submodelingu. Vytipované boli kritické miesta v oblasti otvorov alebo v miestach s vysokým ekvivalentným napätím a boli vytvorené ich detailné konečno-prvkové modely s využitím objemových prvkov (*SOLID 187*). Submodely mali rozmery 25x25x25 mm³ a pozostávali približne z 1 100 000 uzlov. Veľkosť prvkov bola zvolená tak, aby boli v mieste záujmu na prierez minimálne 3 rady tetrahedrálnych elementov. Vzhľadom na to, že homogenizácia je (v ponímaní ANSYS-u) materiálovo lineárny výpočet, nebolo možné konzolu dimenzovať v plastickej oblasti. Z tohto dôvodu bolo k riešeniu pristúpené spôsobom, kedy bolo uvažované početné zaťaženie a vyhodnocovaná bola medza klzu. Na hranice submodelu boli namapované posunutia získané v poslednom kroku využívajúceho homogenizovaný materiál a úloha bola vyriešená, čím bola získaná lokálna napät'ová odozva (vid' Obr. 5-10) a bolo možné navrhnutý diel verifikovať.



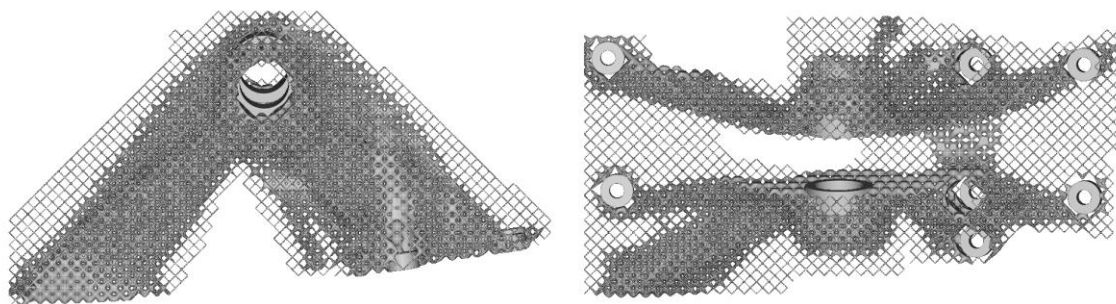
Obr. 5-10 Rozloženie napätia na submodeli BCC štruktúry pri početnom zaťažení.

Maximálne napätie 1 000 MPa sa nachádza v mieste mapovania posunutí na submodel a z tohto dôvodu je irelevantné. Obecné sa dá tvrdiť, že napätie sa na submodeli pohybuje na hodnote do 100 MPa pri prútoch. V uzlových polohách dochádza ku koncentrácii napätia a jeho hodnota je približne 200 MPa a dalo by sa očakávať, že lokálne môže dôjsť k plastickému pretvoreniu. Dá sa však predpokladať, že podobne ako u originálnej konzoly by bolo pri aplikácii početného zaťaženia miesto plastického pretvorenia značne lokalizované a neprejavilo sa na celkovej deformačnej odozve štruktúry. V prípade prevádzkového zaťaženia platí s uvažovaním linearity výpočtu pre zobrazené miesto bezpečnosť k MSP približne 1,35.

5.2 Určenie tvarov, rozmerov a materiálov

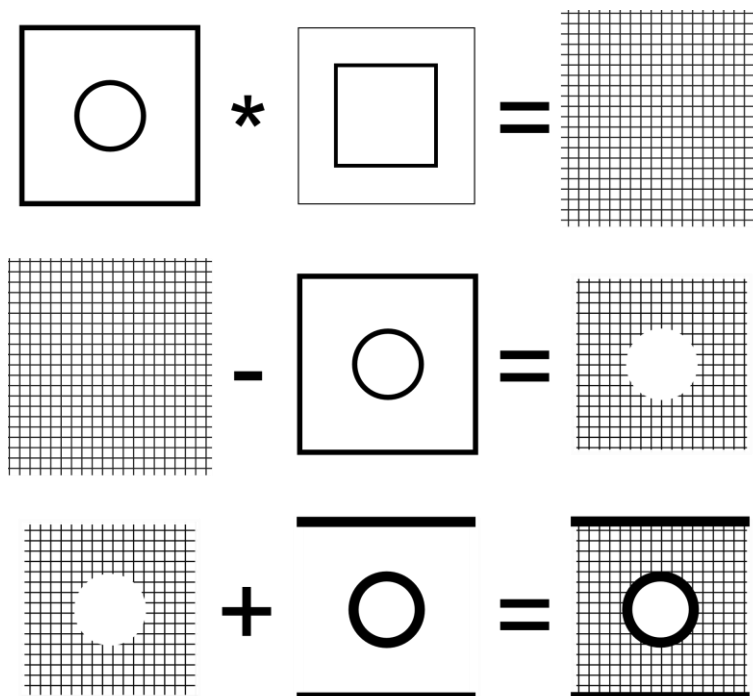
5.2.1 Tvorba geometrie

Tvorba geometrie prebehla implicitným spôsobom v softvéri nTopology. Filozofia práce v nTopology je odlišná od klasických CAD modelárov a spočíva v nadväzovaní jednotlivých operácií, ktoré vedú k výslednej geometrii a dá sa prirovnáť ku grafickému programovaniu. Ako vstupy boli použité geometria vo formáte .stp a rozloženie relatívnych hustôt v priestore vo formáte .csv. Potrebný bol model geometrie pre design-space a modely plných častí, na základe ktorých bola vytvorená výsledná geometria (viď Obr. 5-11). Jej hmotnosť bola 519 g.



Obr. 5-11 Topologicky optimalizovaná konzola vytvorená v predbežnom návrhu.

V prvom rade bolo nutné step geometriu previesť z hraničnej reprezentácie na implicitnú, aby s ňou bolo možné ďalej pracovať. Následne bolo nutné vytvoriť pole, ktoré prepočítavalo vstup relatívnych hustôt na použité variabilné priemery prútov. Toto pole spolu s geometriou design-space-u, bolo použité na vytvorenie optimalizovanej mikro-prútovej štruktúry, ktorá bola orezaná, aby nepresahovala stanovený design-space. Odfiltrované boli voľné a plávajúce prúty, ktoré sú nevyrobitel'né. Celkovo bolo odfiltrovaných 15 666 prútov. Pomocou booleovských operácií boli pričítané časti z plného materiálu potrebné na uchytenie šraubov a svorníku. Na záver bol overený export do formátu .3mf. Takto popísaný postup vyžadoval prepojenie 37 logických operácií, no po jeho vytvorení bolo možné meniť geometriu (typ bunky, rozmer bunky, rozloženie hustoty,...) prakticky na kliknutie. Celý postup je schematicky znázornený na Obr. 5-12.



Obr. 5-12 Schematický postup rekonštrukcie geometrie. Vytvorenie štruktúry, jej orezanie a pridanie plných častí.

5.2.2 Materiál konzoly

Ako materiál, z ktorého bude konzola vyrobená, bola zvolená zliatina AlSi10Mg. Dôvodov pre jeho voľbu bolo viacero. Rovnako ako pôvodný materiál konzoly, AW EN 2024, patrí medzi hliníkové zliatiny. Zároveň je ho možné relatívne spoľahlivo spracovať technológiou SLM s malou anizotropiou u plných častí [67] a nízkou porozitou u prútov – 0,17 % [68]. V prospech tohto materiálu hovorili aj predošlé skúsenosti dostupné na Odbore reverzného inžinierstva a aditívnych technológií. V neposlednom rade podporila voľbu tohoto materiálu aj skutočnosť, že bol použitý aj v práci Kopeckého a v rámci projektu TAČR. Mechanické vlastnosti AlSi10Mg uvažované vo výpočtoch pre prúty boli prevzaté z diplomovej práce Vrátu [61]. Modul pružnosti bol zvolený ako stredná hodnota a medza klzu bola zvolená z dôvodu bezpečnosti ako prvý kvartil z dostupných dát. Na navrhovanej konzole sa nachádzajú aj časti z plného materiálu ako oká pre svorník alebo opláštenie. Pre tieto štrukturálne časti boli zvolené mechanické vlastnosti uvádzané v práci Kopeckého. Materiál bude použitý bez tepelného spracovania.

Tab. 5-4 Mechanické vlastnosti mikro-prútov z AlSi10Mg vyrobené technológiou SLM.

Typ	Modul pružnosti E	Poissonov pomer μ	Medza klzu R_e
(1)	(GPa)	(1)	(MPa)
Prút	46	0,33	180
Plný materiál	73	0,33	280

5.3 Odhad výrobných nákladov a objem výroby

S ohľadom na typ lietadla, na ktorom je diel umiestnený, použitím mikro-prútových štruktúr a výrobu technológiou SLM sa dá predpokladať, že sa jedná o zákazkovú, kusovú, resp. malosériovú (jednotky ročne) výrobu.

Čo sa samotnej ceny týka, je ju možné na základe predbežného návrhu odhadnúť podľa potrebných výrobných krokov nasledovne (Tab. 5-5):

Tab. 5-5 Odhad výrobných nákladov.

Krok	Operácia	Odhadovaná cena
Pre-processing	Príprava stroja	2 h x 200 Kč = 400 Kč
	Príprava výrobných dát	1 h x 250 Kč = 250 Kč
Výroba	Výroba dielu na stroji SLM 280 HL	22 h 22 min x 2000 Kč/h = 44 750 Kč
	Spotrebovaný materiál	0,7 kg x 1250 Kč/kg = 875 Kč
Post-processing	Odstraňovanie podporných štruktúr	2 h x 200 Kč/h = 400 Kč
	Obrábanie funkčných častí	2 h x 600 Kč/h = 1 200 Kč

V súčte je teda možné čiastku v predbežnom návrhu veľmi hrubo odhadnúť na 48 000 Kč. Táto hodnota sa zhoduje aj s odhadovanou cenou konzoly optimalizovanou v rámci projektu TAČR [60], kde bola stanovená na 50 000 Kč. Podobná cena sa dá predpokladať aj pre konzolu optimalizovanú Kopeckým.

6 DETAILNÝ NÁVRH

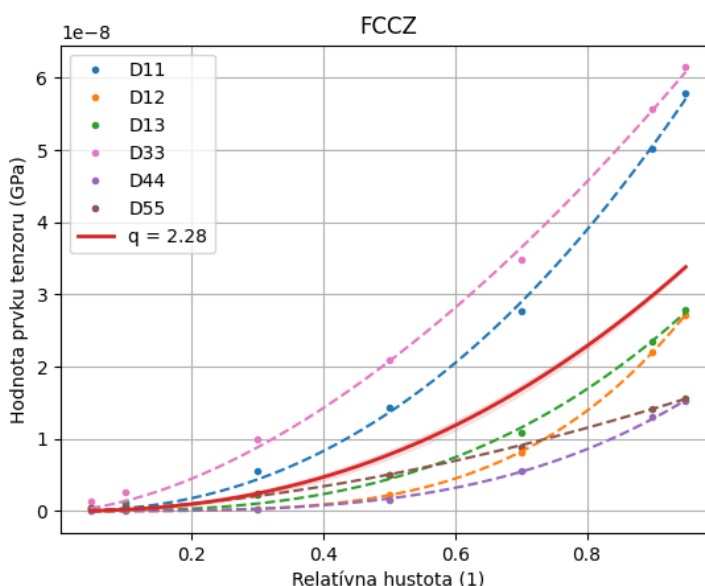
Potom, ako boli určené a overené potrebné neznáme vstupy do optimalizácie v kapitole 4 a overená jej použiteľnosť v kapitole 5, bolo možné vytvoriť detailný návrh topologicky optimalizovanej konzoly brzdných štítov s využitím mikro-prútových štruktúr.

6.1 Konštrukčné riešenie

6.1.1 Topologická optimalizácia

Topologická optimalizácia detailného návrhu využívala konečno-prvkový model krídla pripravený v predbežnom návrhu. Použitá bola FCCZ základná bunka, ktorá vyšla v koncepčnom návrhu ako najlepšia z pohľadu mernej tuhosti. Jej rozmer bol stanovený na 5 mm, a to z toho dôvodu, aby vo väčšine design-space-u vychádzalo na šírku minimálne 6 buniek a boli splnené podmienky platnosti homogenizácie (viď 2.2.2).

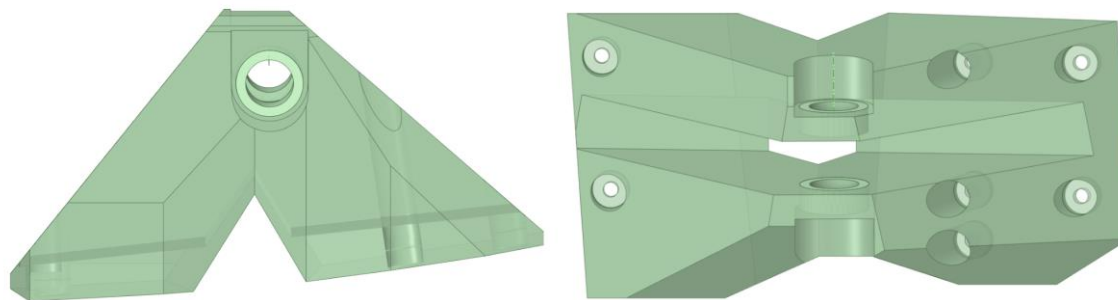
Následne bolo nutné určiť penalizačný faktor vstupujúci do optimalizácie. To bolo vykonané postupom stanoveným v kapitole 4.3.1, no s ohľadom na výsledky z kapitoly 4.3.3 neboli použité homogenizované koeficienty tenzoru tuhosti z modulu Material Designer, ale boli určené manuálne v ANSYS Mechanical z reálnej geometrie danej optickou digitalizáciou vyrobených základných buniek. Celkovo bolo nutné vykonať 28 výpočtov na základných bunkách. Výsledný penalizačný faktor bol stanovený na $q = 2,28$ (viď Obr. 6-1).



Obr. 6-1 Stanovenie penalizačného faktoru pre FCCZ bunku.

Takto získaný penalizačný faktor bol použitý v nastavení topologickej optimalizácie spolu s minimálnou hustotou stanovenou pre FCCZ bunku ako 0,047. Cieľ optimalizácie, ako aj nastavenie obmedzení, ostali voči predbežnému návrhu nezmenené.

Na počiatku optimalizácie bol použitý rovnako ako v predbežnom návrhu celý dostupný zástavbový priestor, ktorý bol postupne zmenšovaný. Na dosiahnutie finálneho design-space-u (viď Obr. 6-2) boli potrebné opäť 3 optimalizácie.



Obr. 6-2 Finálny design-space použitý v konštrukčnom riešení.

Finálny konečno-prvkový model vstupujúci do topologickej optimalizácie pozostával z 452 280 uzlov. Samotný optimalizačný výpočet potreboval na dosiahnutie cieľa 43 iterácií a výpočet trval 11,5 hodiny. Zvolené horné hranice obmedzenia deformácie v smere osi X a Z boli presne dosiahnuté. Horná hranica deformácie v ose Y však dosiahnutá nebola. Jej hodnota bola v poslednej iterácii optimalizácie 0,29 mm, čo je približne 43 % z nastavenej hodnoty. Tento výsledok značí, že štruktúra je tuhšia v smere Y ako pôvodná konzola a nie je možné ju odľahčiť bez toho, aby boli zmenené bezpečnosti v smeroch X a Y (viď 6.1.4), čo by sa prejavilo taktiež na znížení bezpečnosti vzhľadom k MS pružnosti. Výsledok optimalizácie bol vyexportovaný pre tvorbu geometrie a následný verifikačný výpočet.

6.1.2 Zavetrenie konzoly

Výsledky topologickej optimalizácie ukázali, že v priestore medzi šraubami uchytávajúcimi konzolu ku krídlu, nie je materiál potreba a finálny design-space tvorí písmeno „V“. K podobnému výsledku dospel aj Kopecký a tento výsledok odpovedá ideálnym okrajovým podmienkam, kedy nedochádza k relatívnemu pohybu medzi úchytmi konzoly.

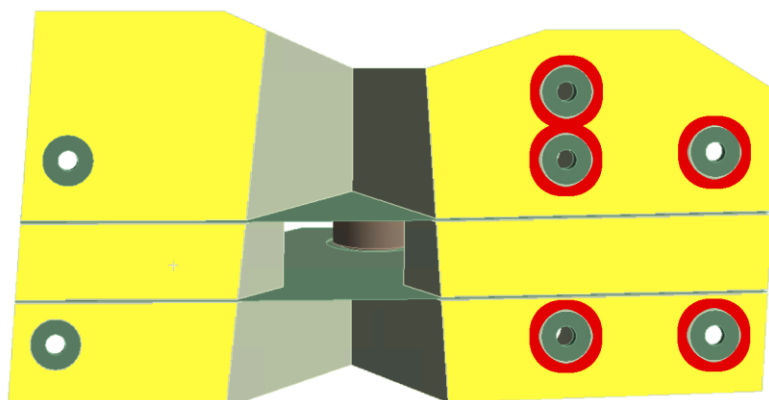
Z práce Kopeckého je však zrejme, že v prípade testovania konzoly, sú okrajové podmienky odlišné od tých uvažovaných počas optimalizácie. Počas testovania konzoly na prípravku došlo k otláčeniu šraubov (s modrou hlavou, viď Obr. 6-3), ktoré umožnilo relatívny pohyb dosiek a roztváranie konzoly, čo sa prejavilo zníženou tuhosťou konzoly.



Obr. 6-3 Testovanie nezavetrenej optimalizovanej konzoly [57].

Aby bolo zabránené tomuto stavu deformácie bolo na konzolu pridané zavetrenie a dosadacie plochy. Tieto štrukturálne časti sú 1 mm resp. 1,5 mm hrubé a perforované, čím došlo k úspore hmotnosti. Priemery otvorov tvoriacich perforovanie boli stanovené na základe topologickej optimalizácie. Pre dosadacie plochy bolo možné použiť rozloženie hustôt získané finálnou topologickou optimalizáciou, no pre zavetrenie bolo nutné vytvoriť novú optimalizačnú úlohu s adekvátnymi okrajovými podmienkami.

Zostavený bol konečno-prvkový model pozostávajúci z geometrie finálneho design-space-u, ktorý bol upravený zavetrením v podobe škrupinových elementov (*SHELL 181*). Medzi solid a shell elementami bol nastavený *bonded* kontakt. Použitý bol taktiež svorník z objemových elementov (*SOLID 186*), na ktorý bola aplikovaná sila s veľkosťou početného zaťaženia. Na dosadacie plochy bol nastavený *frictionless support* (Obr. 6-4 žltá) umožňujúci pohyb iba v tangenciálnom smere a na jednu stranu bol predpísaný na diery pre šraubky *cylindrical support*, ktorým bol zamedzený radiálny pohyb, čím bol model jednoznačne zaväzbený v priestore (Obr. 6-4 červená). Takto formulovaná úloha predstavovala extrémny prípad bez trenia, čo znamená, že výsledný model bol na bezpečnej strane vzhľadom k MS pružnosti. Topologická optimalizácia bola nastavená na maximalizáciu tuhosti spolu s obmedzením ekvivalentného (von Misses) napätia pod hodnotou 150 MPa a znížením hmotnosti pod 30 %. Ako design-space boli vybrané iba plochy zavetrenia zo shell elementov. Výsledok optimalizácie bol použitý na naškálovanie priemerov tvoriacich perforovanie.



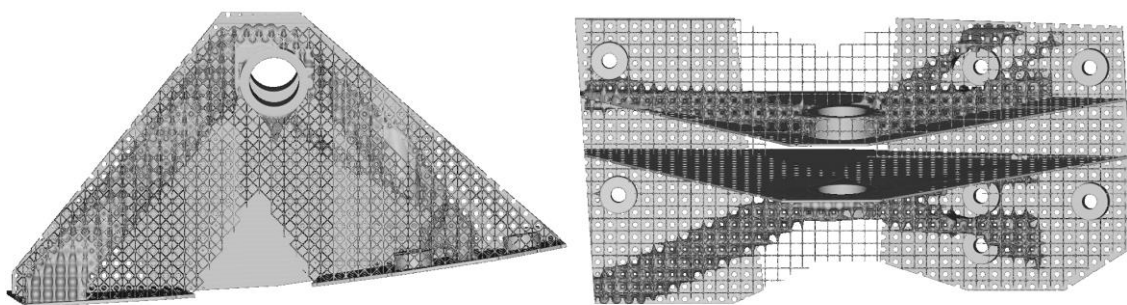
Obr. 6-4 Model a väzby použité pri optimalizácii zavetrenia. Červená – *cylindrical support*, žltá – *frictionless support*.

6.1.3 Tvorba geometrie

Tvorba geometrie prebiehala rovnakým spôsobom ako v prípade predbežného návrhu, iba s dvomi rozdielmi. FCCZ bunka nie je v softvéri nTopology nadefinovaná, bolo nutné ju vytvoriť a taktiež bolo nutné perforovať geometriu zavetrenia a dosadacích plôch. Čo sa samotného tvaru dosadacích plôch týka, tieto boli už v optimalizácii nahradené namiesto štyroch rôznobežných plôch na pôvodnej konzole, dvoma, rovnako ako v práci Kopeckého a projekte TAČR.

Vytvorenie FCCZ bunky pozostávalo v prepojení dvoch rôznych lattice štruktúr s variabilným priemerom prútov. Jedna štruktúra pozostávala z FCC bunky, ktorej boli odfiltrované horizontálne orientované prúty a druhá štruktúra bola definovaná základnou bunkou *Column*. Zjednotenie týchto dvoch štruktúr vytvorilo výslednú gradientnú FCCZ štruktúru. Perforácie v geometrii zavetrenia a dosadacích plôch boli vytvorené pomocou booleovského odčítania periodického poľa valcov. Valce mali variabilné priemery, získané z topologickej optimalizácie, ktorej výsledok bol namapovaný inverzne – relatívna hustota 0 odpovedala priemeru 2 mm a relatívna hustota 1 odpovedala priemeru 0 mm. Následne bolo možné pristúpiť k ďalším krokom popísaným v predbežnom návrhu – orezaniu štruktúry, odfiltrovaní voľných prútov, pričítaniu solid geometrie a exportu (viď 5.2.1).

Takto popísaným postupom bolo nutné vytvoriť 2 geometrie. Finálnu po obrobení, ktorá bola použitá na odhad hmotnosti a tvorbu submodelov a druhú výrobnú s potrebnými prídavkami pre obrábanie. Finálna geometria optimalizovanej mikro-prútovej štruktúry vážila 478 g a bez zavetrenia pridaného z dôvodu testovania iba 410 g (viď Obr. 6-5). Za zmienku stojí aj tvar solid čapov pre svorník navrhnutý tak, aby bol vyrobiteľný bez podporných štruktúr s čo možno najmenším množstvom materiálu (viď D.4).



Obr. 6-5 Finálna topologicky optimalizovaná konzola brzdnych štítov.

Geometria pre výrobu sa líšila od finálnej geometrie technologickými prídavkami. Otvory pre svorník boli vyrobené s priemerom \varnothing 16 mm (2 mm prídavok), otvory pre šraubky s priemerom \varnothing 4,8 mm (prídavok 0,6 mm), dosadacia plocha so šírkou 3 mm (prídavok 1,5 mm) a plocha medzi čapmi svorníku s lokálnym prídavkom 2 mm na oboch stranách. Predĺžené boli taktiež solid časti pre šraubky a pridané boli 2 U-profily na úrovni štruktúry v strednej časti. Zmysel týchto úprav, ako aj geometria pre výrobu sú uvedené v kapitole 6.2.2.

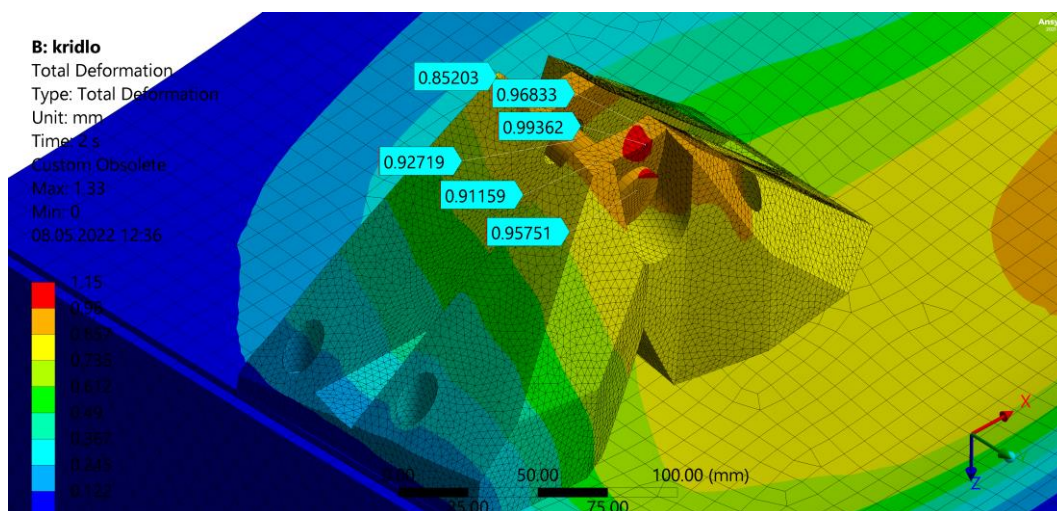
6.1.4 Numerická verifikácia

S ohľadom na prevádzkové a testovacie zaťaženie boli vytvorené dva konečno-prvkové modely. Oba využívali rovnaké homogenizované materiálové vlastnosti a materiálové rozloženie dané topologickou optimalizáciou, no líšili sa okrajovými podmienkami, rovnako ako to bolo u modelov použitých pre optimalizačné výpočty (viď 6.1.1 a 6.1.2). Rozdiel oproti optimalizácii bol však v tom, že došlo k detailnému vymodelovaniu svorníka (viď Obr. 6-6). Model počítaný na krídle bol vytvorený bez opláštenia, čím bol overený návrh vytvorený na základe optimalizačného výpočtu. Model počítaný na prípravku opláštenie obsahoval a overoval návrh slúžiaci pre testovanie. Pre výpočet simulujúci testovanie na prípravku bolo použité aj trenie na pohyblivej časti, ktorého hodnota bola zvolená ako 0,65 [65].

Variabilné materiálové vlastnosti vstupujúce do výpočtov boli určené už počas definície penalizačného faktoru (viď 4.3.3), no aby ich bolo možné použiť, museli byť z anizotropného zápisu prevedené na ortotropný. K tomuto účelu vznikol Python skript (viď príloha B.3), ktorý prepočítaval získané nezávislé anizotropné koeficienty: D_{11} až D_{55} na ortotropné E_1 až G_3 , ktoré boli následne použité na definíciu materiálového modelu v prostredí ANSYS (viď príloha C.2). Medzi napočítanými premenlivými hodnotami bola použitá lineárna interpolácia.

Deformačná odozva

Z vykonaných homogenizačných výpočtov boli získané deformácie konzoly pre oba početné stavy. Celková dosiahnutá deformácia pre výpočet na krídle je zobrazená na Obr. 6-6. Už na prvý pohľad je vidno, že deformácie sú voči pôvodnej konzole menšie (viď Obr. 5-6) Maximálna deformácia dosiahnutá u optimalizovanej konzoly je cca 1 mm, zatiaľ čo u pôvodnej je to približne 1,45 mm a u Kopeckého 1,1 mm. Detailné porovnanie prebehlo na základe smerových deformácií získaných na svorníku v mieste zaťaženia. Toto miesto bolo zvolené z dôvodu, že svorníkom je konzola pripojená k brzdnému štítu, a teda sú deformácie v tomto mieste zásadné. Výsledky sú súhrnne zobrazené v Tab. 6-1. Uvádzané hodnoty sú získané maximá a porovnávajú sa s hodnotami pôvodnej konzoly a hodnotami získanými z topologickej optimalizácie.

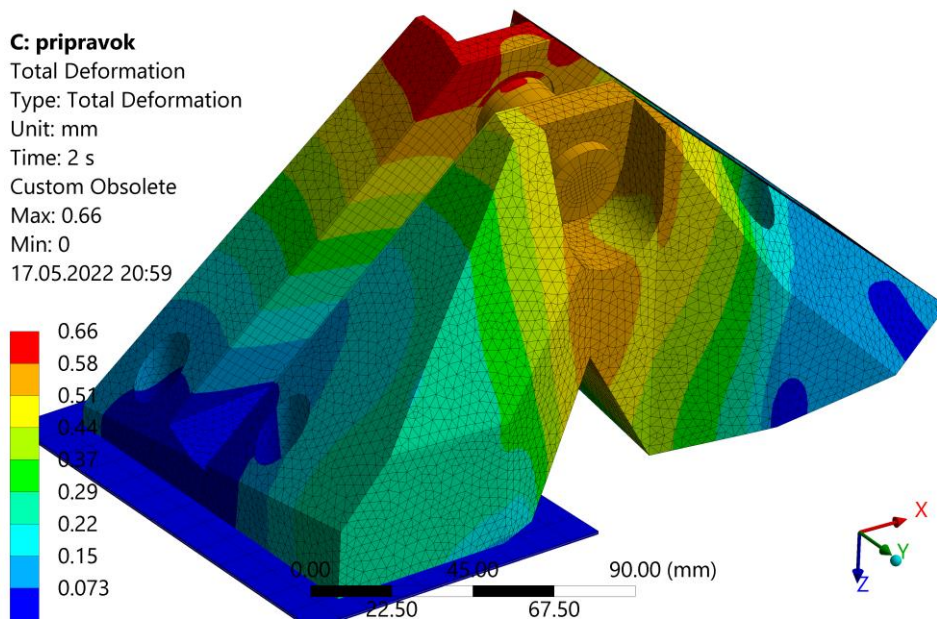


Obr. 6-6 Celková deformácia dosiahnutá počas numerickej verifikácie na krídle.

Tab. 6-1 Porovnanie získaných deformácií; HM – homogenizácia; TO – dosiahnuté hodnoty v topologickej optimalizácii; TOc – zamýšľané hodnoty v topologickej optimalizácii; OP – originálna konzola.

Model	Deformácia			Bezpečnosť		
	X	Y	Z	X	Y	Z
(1)	(mm)	(mm)	(mm)	(1)	(1)	(1)
HM	0,43	0,3	0,86	1	3	1,16
TO	0,32	0,29	0,77	1,3	3	1,3
TOc	0,32	0,68	0,77	1,3	1,3	1,3
OP	0,43	0,9	1	1	1	1

Totálna deformácia, ktorá bola získaná pre početné zaťaženie je zobrazená na Obr. 6-7. Celková deformácia na svorníku vyšla rovná 0,59 mm a u Kopeckého 0,6 mm. Príslušné maximálne smerové deformácie sú súhrnne zobrazené v Tab. 6-2.



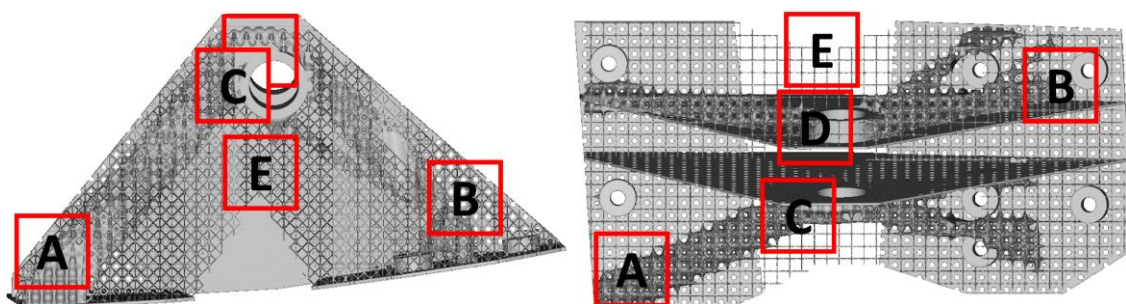
Obr. 6-7 Deformácia navrhutej konzoly pri početnom zaťažení.

Tab. 6-2 Maximálna deformácia svorníku pri početnom zaťažení.

Deformácia X (mm)	Deformácia Y (mm)	Deformácia Z (mm)	Celková deformácia (mm)
0,0347	0,499	0,326	0,59

Napätová odozva

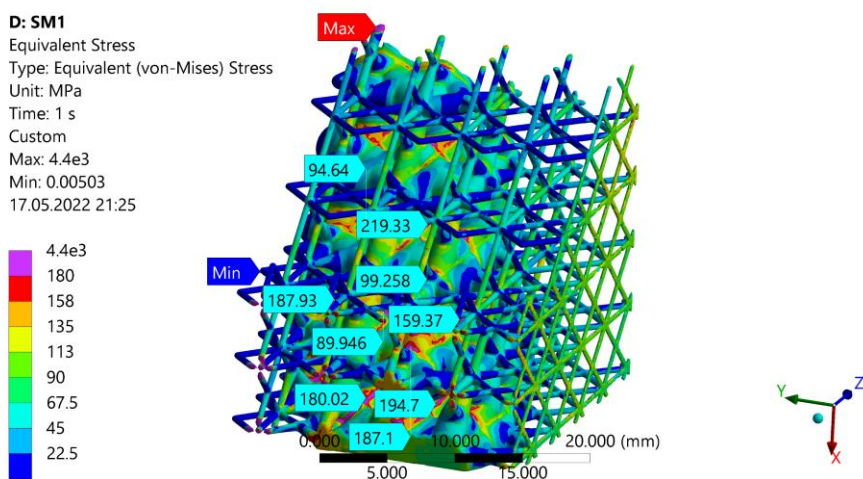
Na základe homogenizačných výpočtov bolo stanovených 5 kritických miest, ktoré boli podrobené submodelingu (vid' Obr. 6-8). Na submodely boli aplikované posunutia získané z homogenizácie a boli analyzované pre oba typy okrajových podmienok uvažovaných popísaných vyššie. Celkovo teda bolo vytvorených 10 konečno-prvkových modelov.



Obr. 6-8 Pozície submodelov v globálnom modeli.

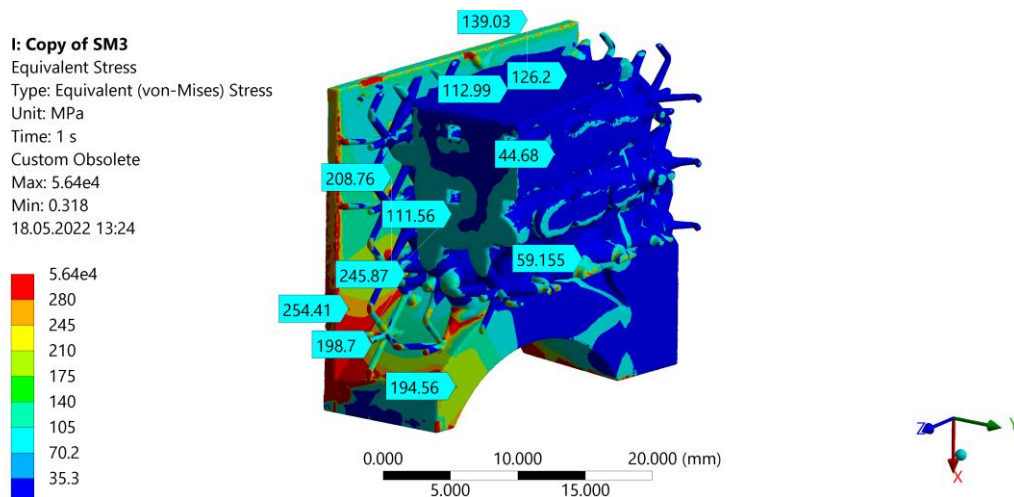
Postup vyhodnotenia bol rovnaký ako pri predbežnom návrhu. Singulárne hodnoty napätia neboli uvažované. Súhrn výsledkov (E.1) a rozloženie napätia (E.2) pre jednotlivé submodely v závislosti na analýze je zobrazený v prílohe. Pre prehľadnosť sú uvedené iba kritické submodely pre zaťaženie na krídle a pre zaťaženie na prípravku.

Kritickým pre zaťaženie na krídle bol submodel A. Napätie dosiahnuté v prútoch je pre prevádzkové zaťaženie približne 67 MPa, čomu odpovedá bezpečnosť k MS pružnosti 2,68 a pre uzly približne 147 MPa, čo značí bezpečnosť 1,22. Pri početnom zaťažení dosahujú prúty napätie 100 MPa (vid' Obr. 6-9) a bezpečnosť k MS pružnosti 1,8. V uzlových polohách dôjde pri početnom zaťažení k miernemu prekročeniu medze klzu. Tento stav je obdobný ako pri BCC štruktúre a dá sa opäť predpokladať, že v uzloch dôjde k malému lokalizovanému plastickému pretvoreniu, ktoré sa neprejaví na celkovom deformačnom správaní konzoly a trvalej zmene tvaru. Taktiež si treba uvedomiť, že u početného zaťaženia nie je plastická deformácia nežiadúca, pokiaľ nevedie k porušeniu súčasti skôr ako po troch sekundách.



Obr. 6-9 Rozloženie ekvivalentného napätia na submodeli A pre zaťaženie na krídle.

Simulácia vykonaná na prípravku odhalila ako kritický submodel C. Hodnoty napätia dosiahnuté na štruktúre sú približne 140 MPa pre početné zaťaženie, čo predstavuje bezpečnosť k MS pružnosti 1,28. Ako problematickou časťou sa však javí čap pre svorník a jeho prechod do opláštenia. Ak zanedbáme skreslenie výsledkov mapovaním deformácií na submodel a skreslenie dané singularitou – ostrým prechodom medzi okom svorníka a zavetrením, dospievame extrapoláciou po ceste (príloha E.2) k hodnotám napätia vo vrube približne 340 MPa. Toto napätie prekračuje medzu klzu 280 MPa uvažovanú pre plný AlSi10Mg materiál, došlo by k plastickej deformácii, a preto nie je hodnota reálna. Dá sa predpokladať, že plastická deformácia by nezmenila deformačné správanie konzoly, no ani by nemala vyslovene lokálny charakter. Z tohto dôvodu je pravdepodobné, že ak by došlo k porušeniu počas testovania, bolo by iniciované s najväčšou pravdepodobnosťou z tohto miesta podobne ako u Kopeckého. Nutné však pripomenúť, že testovacie podmienky sa od prevádzkových líšia a konzola voči nim nebola optimalizovaná.



Obr. 6-10 Rozloženie ekvivalentného napätia na submodeli C pre zaťaženie na krídle.

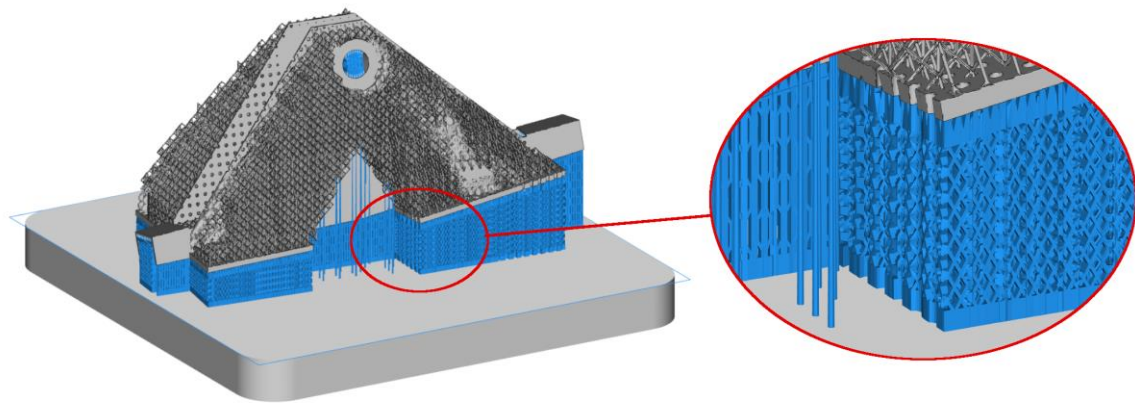
Napätie na perforovaných doskách zavetrenia vychádza pre početné zaťaženie približne 200 MPa pre obe strany. Táto hodnota značí bezpečnosť k MS pružnosti rovnú 1,4. Špičkové hodnoty, napätia, ktoré boli dosiahnuté (cca 450 MPa) sa nachádzajú v mieste kontaktu s hranou a teda sa jedna o numericky skreslené singulárne hodnoty. Detailné rozloženie napätia na oboch doskách je zobrazené v prílohe E.2

6.2 Fyzická realizácia

6.2.1 Pre-processing a SLM výroba

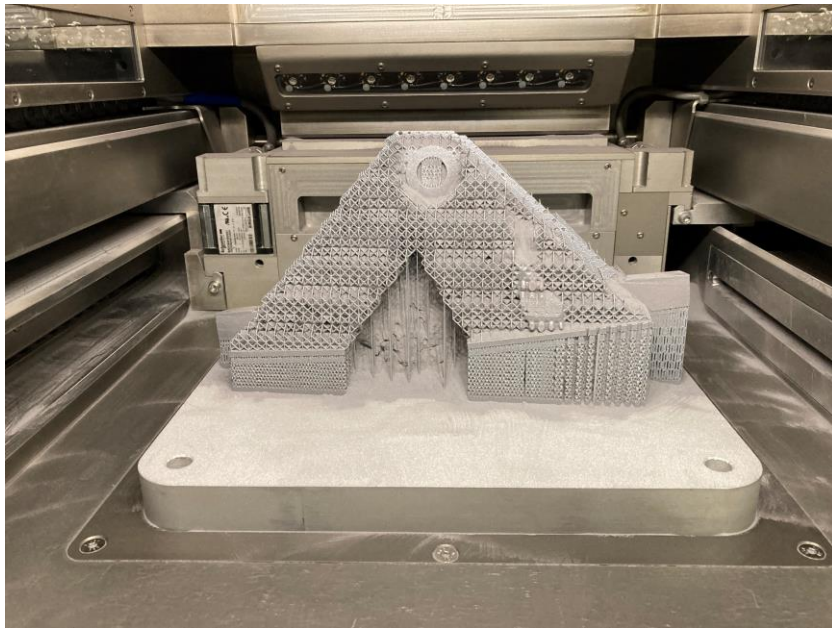
Keď bola hotová finálna geometria, bolo možné pustiť sa do pre-processingu výroby. Vytvorená geometria mala vzhľadom na svoju komplexnosť po exporte do formátu .3mf 170 MB. Pre predstavu, celá zostava krídla s brzdnými štítkami mala veľkosť približne 96 MB. Samotná možnosť exportu vo formáte .3mf patrí medzi jednu z najväčších výhod softvéru nTopology a dá sa predpokladať, že vo formáte .stp by bola veľkosť približne trojnásobná – 510 MB.

Pre prípravu aditívnej výroby bol použitý softvér Materialise Magics 22.03. Na vyexportovanej geometrii bolo nutné vytvoriť podporné štruktúry najmä na dosadacie plochy, pretože zvierali s platformou uhol menší ako 43° . Použité boli neobjemové blokové štruktúry s perforáciami, ktoré umožňujú odstránenie nespečeného prášku. Aby bol zaistený dostatočný odvod tepla zo súčasti a pre zlepšenie jej mechanickej stability počas výroby, boli pridané aj objemové podpory v tvare kužeľov. Pár podporných štruktúr bolo nutné pridať aj v strednej časti konzoly na prúty, ktoré neboli podporené, pretože počas tvorby geometrie neboli prerušené a z tohto dôvodu neboli odfiltrované. Na tieto boli použité podpory vo forme tenkých pinov. Podpory boli použité aj pre diery svorníku. Samotná súčasť bola naorientovaná tak, aby nedošlo ku kolízii s recoater-om počas nanášania prášku. Samotný tvar konzoly zabezpečil, že dosadacie plochy boli vyrábané priebežne, čo bolo priaznivé z pohľadu deformácií daných zvyškovou napätosťou (viď Obr. 6-11).



Obr. 6-11 Orientácia dielu na platforme a aplikácia podporných štruktúr.

Zvolené boli procesné parametre zobrazené v Tab. 6-3 a boli vygenerované výrobné dáta. Tieto boli následne použité na výrobu dielu na stroji SLM 280 HL. Použitá bola dusíková ochranná atmosféra s koncentráciou kyslíku pod 0,5 %. Samotná výroba trvala približne 29 hodín a bola úspešná na prvý pokus.



Obr. 6-12 Vyrobená geometria optimalizovanej konzoly brzdnych štítov.

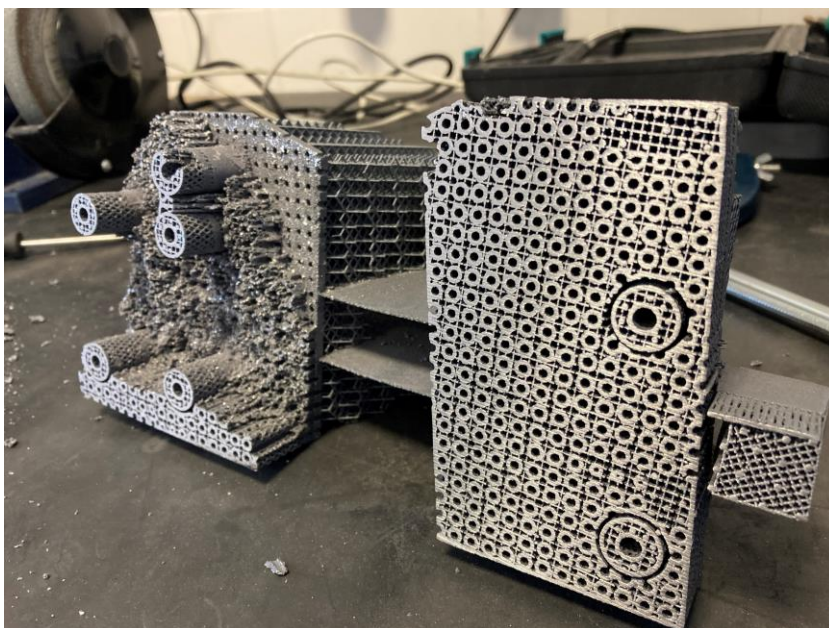
Tab. 6-3 Zvolené procesné parametre.

Predohrev platformy (°C)	Výkon laseru (W)	Rýchlosť skenovania (mms ⁻¹)	Šírka medzi návarmi (μm)	Výška vrstvy (μm)
150	350	930	0,17	50

6.2.2 Post-processing a technológia obrábania

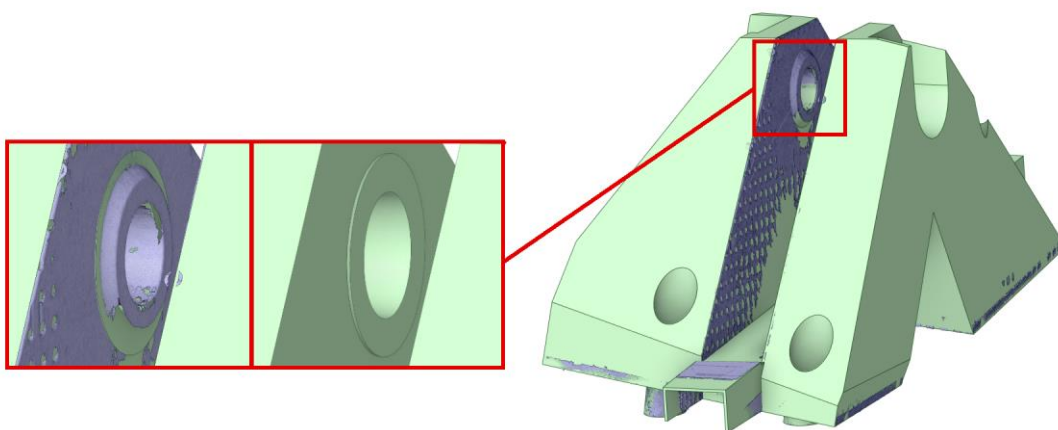
Po vyrobení konzoly technológiou SLM bolo nutné obrobit' všetky funkčné plochy a otvory. Samotný výrobný postup bol predom konzultovaný s firmou Dakrex Engineering, v ktorej bola konzola obrábaná. Na základe tejto konzultácie bola pripravená geometria pre výrobu.

Prvým krokom bolo očistenie dielu od zvyškového prášku a odstránenie podporných štruktúr. Obe operácie prebiehali manuálne (vid' Obr. 6-13).



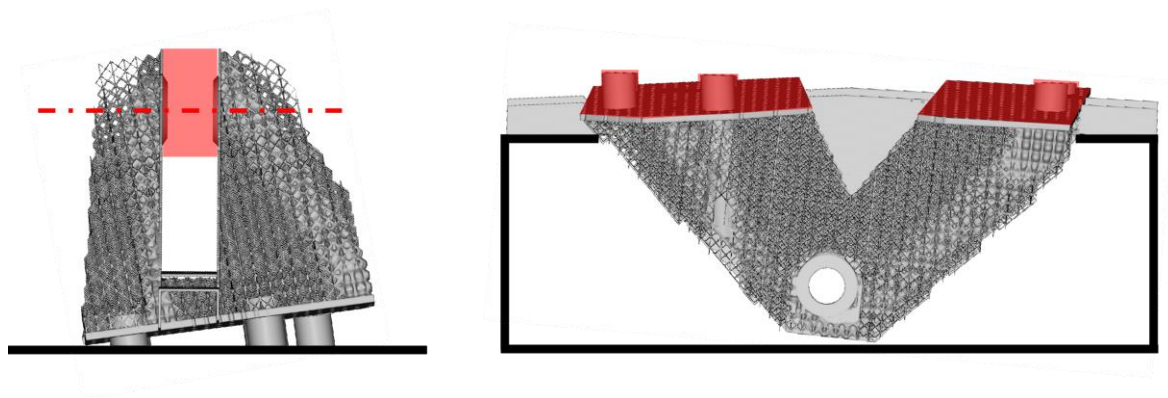
Obr. 6-13 Odstraňovanie podporných štruktúr.

Následne bola konzola opieskovaná a vytvorený bol 3D sken vyrobenej geometrie optickým skenerom ATOS III Triple Scan. Použitá bola optika MV 170, ktorá má merací objem $170 \times 130 \times 130 \text{ mm}^3$. Získaná geometria bola zarovnaná s nominálnou geometriou v softvéri GOM Inspect pomocou súradných systémov (príloha D.2). Ukázalo sa, že vplyvom zvyškových napätí došlo k miernemu uhlovému natočeniu vnútorných plôch, čo sa však na relatívne dlhom ramene prejavilo priblížením čapov pri svorníku o 1 mm. Na základe týchto skutočností bola vytvorená CAD geometria obáľkovej plochy, ktorá reflektovala skutočný tvar geometrie a použitá bola na vytvorenie CAM dát (viď Obr. 6-14).



Obr. 6-14 Geometria pre obrábanie upravená na základe 3D optického skenovania.

Z pohľadu samotnej technológie výroby bolo prvou operáciou vystruženie dier pre šraubíky na priemer 6 H8 ručným výstružníkom. Následne bola pomocou týchto dier konzola pripojená k podložke, čím došlo k ustaveniu osy svorníku do horizontálnej polohy a bolo možné obrobit' otvory pre púzdra s priemerom 20 H8, ako aj dosadacie plochy pre púzdra s priemerom 21 H11. Keď bola obrobena horná časť, bola konzola otočená a upnutá pomocou dvoch U-profilov k prípravku, čím bolo umožnené obrobenie dosadacej plochy konzoly. Popísaný postup je schematicky znázornený na Obr. 6-15. Poslednou operáciou bolo odstránenie upínacích U-profilov a nalisovanie púzdiel pre uchytenie svorníku.



Obr. 6-15 Technologický postup obrábania konzoly. Červená označuje obrábané časti.

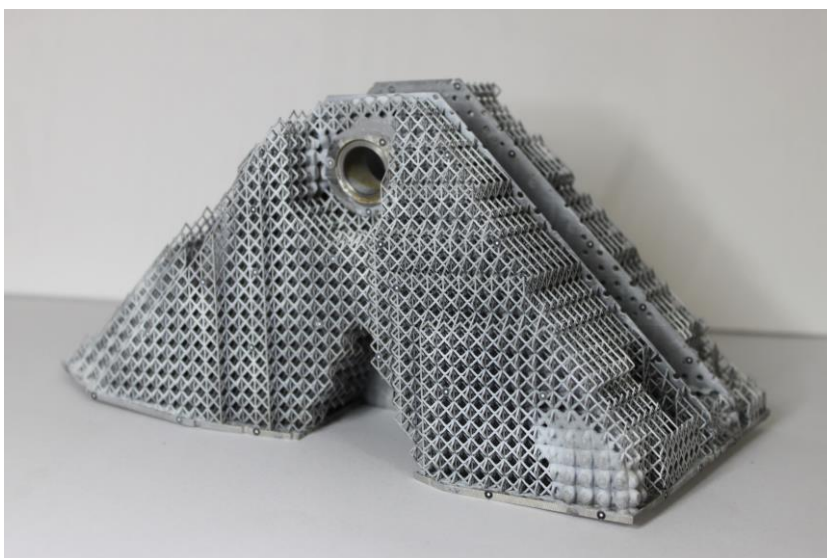
Po obrobení bola konzola odvážená a vyplynulo, že dosiahnutá hmotnosť je vyššia ako bola vypočítaná v nTopology. Jej hmotnosť bola 526 g oproti predpokladaným 478 g. Z tohto dôvodu bola konzola opäť opticky digitalizovaná a zarovnaná s nominálnou geometriou s využitím rovnakého postupu ako pred obrábaním. Ukázalo sa, že pri obrábaní došlo k chybe a spodná plocha nebola obrobená na požadovanú hrúbku, ale ostala takmer o milimeter hrubšia (viď príloha D.4). Táto prídavná hmotnosť predstavuje približne 40 g. Zvyšných 8 g je pravdepodobne daných nalepeným práškom.

6.3 Hodnotenie kľúčových parametrov

6.3.1 Konzola brzdnych štítov

Na základe predložených výsledkov uvedených v detailnom návrhu je možné s ohľadom na požiadavky a obmedzenia formulované v kapitole 4 vykonať hodnotenie výslednej optimalizovanej konzoly. Konzola brzdnych štítov bola poňatá ako prípadová štúdia, ktorá overuje vhodnosť navrhnutého metodického postupu využívajúceho topologickú optimalizáciu s využitím mikro-prútových štruktúr.

Detailný návrh prezentovaný v kapitole 6 je výsledkom iteratívneho riešenia, na základe ktorého bol akceptovaný ako finálny. Topologicky optimalizovaná štruktúra, ku ktorej numerické riešenie dospelo, má hmotnosť 478 g s uvážením zavetrenia prispievajúceho k zvýšenej tuhosti a reflektuje problém vznikajúci pri testovaní (viď 2.2.6). Táto hmotnosť tvorí 70 % hmotnosti z pôvodne použitej konzoly brzdných štítov. Oproti riešeniu vytvorenému v rámci projektu TAČR je predkladaná konzola taktiež ľahšia, a to o 16 %. V prípade porovnania s výsledkami práce Kopeckého je konzola mierne ťažšia, približne o 12 %. Ak však vezmeme do úvahy fakt, že zavetrenie pridalo konzole približne 68 g a riešenie predkladané Kopeckým ním nedisponuje, dospievame k tomu, že konzola navrhnutá v rámci diplomovej práce by bola pri rovnakých podmienkach o 5 % ľahšia. Pri fyzickom riešení však došlo k chybe pri obrábaní, reálna konzola je o 48 g ťažšia a váži 526 g. Oproti riešeniu z TAČR projektu je však stále ľahšia o 7,2 %. Z pohľadu hmotnosti je teda možné považovať cieľ práce za splnený.



Obr. 6-16 Finálna geometria optimalizovanej konzoly po obrobení.

Z pohľadu dosiahnutých deformácií je taktiež možné považovať výsledný návrh za adekvátny. Celková dosiahnutá deformácia je pri početnom zaťažení na krídle približne 1 mm čo je 69 % z deformácie pôvodnej konzoly stanovenej v pre-analýze (viď 5.1.1). Charakter deformácie je však mierne odlišný, čo ukazujú smerové deformácie v mieste aplikovania sily na svorník. V smere osi X sú deformácie optimalizovanej a originálnej konzoly zhodné, no v smere osy Y a Z sú nižšie a bezpečnosť voči medznému stavu deformácie je 3 a 1,16. To značí, že optimalizovaná konzola je ľahšia a zároveň tuhšia. Bezpečnosť 3 v smere osi Y by sa mohla zdať vysoká, no toto je dané výsledkom optimalizácie, kedy ani v samotných optimalizačných iteráciách nebol limit deformácie dosiahnutý. Táto skutočnosť je s najväčšou pravdepodobnosťou daná počiatočným využitím celého dostupného priestoru pre optimalizáciu, čo sa prejavilo širšou geometriou a značne zvýšenou tuhosťou v ose Y.

Vzhľadom na tvarovú zložitosť vytvorenej štruktúry bolo nutné pristúpiť k modelovaniu pomocou homogenizácie materiálových vlastností. To malo za následok nutnosť pristupovať k výpočtu lineárnym spôsobom a porovnávať hodnoty voči medzi klzu, čím v podstate došlo k predimenzovaniu konzoly. Lokálna napätosť bola modelovaná pomocou submodelingu. Ukázalo sa, že pre prevádzkové zaťaženie je štruktúra bezpečná voči MSP s koeficientom bezpečnosti pre prúty približne 2,68 a pre uzlové polohy približne 1,22. Pre početné zaťaženie sa blíži hodnota bezpečnosti pre prúty k 1,8 a v uzlových polohách je možno nájsť miesta, kde dôjde k prekročeniu medze klzu. Avšak rovnako ako u pre-analýzy sa dá predpokladať, že hodnoty plastického pretvorenia budú malé, lokalizované a neprejavia sa na celkovej zmene tvaru lattice štruktúry. Z týchto dôvodov je optimalizovaný diel možné považovať vzhľadom k medzným stavom pružnosti a pevnosti za bezpečný, avšak je nutné konštatovať, že samotné konečno-prvkové modelovanie rozsiahlych lattice štruktúr s presahom do plasticity je do budúcnosti v spojitosti s predstavenou metodikou najvýznamnejšou témou.

Pripájacie rozmery ostali podľa požiadaviek u vytvoreného dielu nezmenené. Uvažované boli všetky potrebné spojovacie materiály (šraubky, svorník, matica, podložky, závlačka), ktoré sú použité na originálnej konzole. Pri návrhu design-space-u bolo pamätané aj na montáž a priestory boli rozšírené s ohľadom na potreby montáže. Z celkového možného zástavbového priestoru s objemom 3,3 dm³ bolo využité cca 39 %.

Vzhľadom na aditívnu výrobu bola snaha minimalizovať geometrické entity vyžadujúce podporné štruktúry. Na samotnú mikro-prúťovú štruktúru bol aplikovaný filter voľných a otvorených prúťov, ktorý odfiltroval celkovo 15 666 prúťov. Filter však nedokázal odfiltrovať prúťy, ktoré boli uzavreté a z tohto dôvodu bolo pri výrobe nutné použiť 38 pinov na podporenie. Taktiež bolo nutné použiť podporné štruktúry na dosadacie plochy. Týchto štruktúr bolo nakoniec viac ako v prípade práce Kopeckého z dôvodu pridaných častí potrebných pre ustavenie konzoly pri obrábaní. Výhodou však bolo, že podpory boli umiestnené v rovine na dosadacích plochách a oproti konzole od Kopeckého boli veľmi ľahko dostupné, čo výrazne pomohlo ich odstraňovaniu. Môžeme teda konštatovať, že s ohľadom na aditívnu výrobu návrh spĺňa požadované ciele.

6.3.2 SWOT analýza navrhutej metodiky

Silné stránky

Medzi najsilnejšie stránky navrhutej metodiky patrí možnosť použiť ľubovoľný density-based optimalizačný riešič. K získaniu optimálneho riešenia je nutné poznať iba variabilné (ortotropné) mechanické vlastnosti ľubovoľnej zvolenej základnej bunky. Na základe týchto vlastností je následne určený penalizačný faktor vstupujúci do metódy SIMP, ktorou disponuje väčšina optimalizačných softvérov (ANSYS, ALTAIR, TOSCA, ...).

Druhou silnou stránkou je zahrnutie reálnej výrobnéj geometrie do určenia mechanických vlastností pomocou homogenizácie. Táto úprava umožnila výrazným spôsobom znížiť chybu numerickej predikcie z 22 % na 6 %. Získané mechanické vlastnosti boli použité ako pri určovaní penalizačného faktoru, tak aj pri numerickej verifikácii.

V neposlednom rade je možné za silnú stránku považovať aj tvorbu geometrie implicitným spôsobom v softvéri nTopology. Tvorba geometrie je rýchla, robustná a export do formátu .3mf umožňuje značne znížiť veľkosť výstupného súboru. Nutné je však dodať, že rovnako ako pri optimalizácii, ani tvorba geometrie nie je principiálne závislá na použítom softvéri a mohla by byť vytvorená v ľubovoľnom modelári umožňujúcom načítať a interpretovať výsledkový súbor s rozložením relatívnych hustôt (napr. Rhino Grasshopper).

Slabé stránky

Za slabú stránku je možné považovať nemožnosť automatickej optimalizácie design-space-u. Design-space, ktorý je zvolený na počiatku optimalizácie, musí byť celý vyplnený mikro-prútovou štruktúrou. Tým pádom je pravdepodobné, že niektoré časti štruktúry by mohli byť z pohľadu únosnosti nepotrebné a iba zvyšujú výslednú hmotnosť. Podobným spôsobom však funguje aj lattice optimalizácia, ktorú ponúka ANSYS.

Príležitosti

Najväčšiu príležitosť je možné vidieť v numerickej validácii ako časti navrhutej metodiky. Konkrétne v presahu homogenizovaných vlastností do plasticity. Na základe materiálových testov by bolo možné získať koeficienty Hillovho kritéria modifikovaného o hydrostatický člen a spolu s bi-lineárnym alebo multi-lineárnym materiálovým modelom ho následne pomocou užívateľom definovaného materiálu implementovať napr. do programu ANSYS Mechanical. V spojitosti s topologickou optimalizáciou by však musel byť tento materiálový model funkciou relatívnej hustoty a získavanie koeficientov by bolo netriviálne a značne zdĺhavé. Umožnilo by nám to však s relatívne nízkymi výpočtovými nárokmi dimenzovať aj rozsiahle štruktúry pracujúce za medzou klzu.

Hrozby

Za hrozbu spojenú s predkladanou metodikou sa dá považovať odstránenie nedostatkov v komerčných softvéroch, ktoré viedli k jej vytvoreniu. V súčasnosti sa ani o jednom komerčne dostupnom softvéri nedá tvrdiť, že by zohľadňoval špecifiká dané výrobou pomocou technológie SLM. Dá sa však predpokladať, že v budúcnosti dôjde k zlepšeniu komerčných riešení. Do tejto doby je však navrhnutá metodika vhodnou alternatívou, ktorá kladie dôraz najmä na aditívnu výrobu a jej špecifiká v spojitosti s jednoduchým modelovaním a exportom geometrie.

7 ZÁVER

V predkladanej diplomovej práci bola vytvorená metodika návrhu topologicky optimalizovaných dielov s využitím mikro-prútvých štruktúr. Táto metodika je nezávislá na použitom optimalizačnom riešiči a na rozdiel od komerčných riešení umožňuje použiť ľubovoľnú základnú bunku. Počas návrhu a konečno-prvkovej validácie sú používané materiálové vlastnosti získané homogenizáciou reálnej geometrie po výrobe. Celý návrh je vedený v kontexte špecifikácii aditívnej výroby. Validita predstavenej metodiky bola demonštrovaná vytvorením prípadovej štúdie – topologicky optimalizovanej konzoly brzdnych štítov, na ktorej bol demonštrovaný celý postup práce od analýzy pôvodnej súčasti, cez určenie potrebných vstupov do výpočtu, až po samotnú optimalizáciu a konečno-prvkovú verifikáciu.

Výsledky ukázali, že parametre definované v kapitole 4, boli splnené. Voči pôvodnému dielu je konzola o 23 % ľahšia a o 31 % tuhšia. Zároveň boli zachované pripájacie a montážne rozmery, čo umožňuje zameniteľnosť konzoly. Dôraz bol kladený aj na tzv. „additive ready design“, kedy bol odstránený maximálny počet voľných a otvorených prútvov a celá geometria štruktúry, vrátane plných častí pre svorník a šraubky, bola navrhnutá tak, aby nevyžadovala podporné štruktúry. Tie boli v konečnom dôsledku použité iba na dosadacie plochy, no zároveň boli veľmi jednoducho dostupné a odstrániteľné.

Vzhľadom na to, že konzola bola už v minulosti optimalizovaná v rámci diplomovej práce a aj v rámci projektu TAČR klasickým spôsobom, je možné priamo porovnať výsledky optimalizácie s využitím mikro-prútvých štruktúr s výsledkami klasických topologických optimalizácií. Hmotnosť vytvorenej konzoly je o 7 % ľahšia oproti konzole vytvorenej v rámci projektu TAČR. Voči diplomovej práci Kopeckého je konzola mierne ťažšia, približne o 19 %. To je však z dôvodu zavetrenia, ktoré Kopecký nepoužíva, ale odporúča. Ak by nebolo použité a nedošlo by k chybe pri obrábaní, dospeli by sme k výsledku, ktorý je oproti Kopeckého práci o 4 % ľahší. Môžeme teda súhrnne konštatovať, že navrhnutá metodika je vhodná pre štruktúralne optimalizácie, čo preukazuje aj porovnanie so štandardne topologicky optimalizovanými dielmi. Z pohľadu ceny a prácnosti výroby sa javia obe metódy ako takmer ekvivalentné. Nedá sa preto jednoznačne povedať, ktorá z nich je lepšia a je na inžinierskom úsudku, kedy bude ktorá metóda vhodnejšia.

V kontexte súčasného stavu poznania dostupného pre optimalizácie s využitím mikro-prútvých štruktúr nie je práca prelomovou a existujú pokročilejšie práce, ktoré napr. optimalizujú mikro aj makro úroveň dielu, alebo kombinujú niekoľko základných buniek. Takéto práce sú však stále na hranici ľudského poznania, nie sú jednoducho implementovateľné na rozsiahle štruktúralne diely a často nezohľadňujú požiadavky aditívnej výroby. V tomto duchu a v kontexte súčasných komerčných riešení preto prináša navrhnutá metóda zaujímavú a účinnú alternatívu, vhodnú pre rozsiahle mikro-prútvé štruktúry.

Z pohľadu Odboru reverzného inženýrství a aditivních technologií ide o tretiu prácu venujúcu sa topologickej optimalizácii s využitím mikro-prútových štruktúr. Prístupom sa však od predchádzajúcich značne líši, a preto sa dá tvrdiť, že aj z pohľadu RIAT-u prináša práca výsledky, ktoré umožnia rozšíriť doposiaľ získané know-how a aplikovať ho na reálnych projektoch v spolupráci s priemyslom.

Výsledkom samotnej práce je funkčná vzorka, ktorá bude v najbližšej dobe nad rámec diplomovej práce otestovaná. To nám umožní ešte hlbšiu konfrontáciu navrhutej metódy s reálnymi výsledkami. Tým pádom bude možné vyvodiť ďalšie závery a ak to bude potrebné, rozvíjať navrhnutú metodiku ďalej, napríklad smerom k dimenzovaniu štruktúr za medzou klzu, alebo k napísaniu vlastného optimalizačného riešiča.

8 VÝSLEDOK PODĽA RIV

Výsledkom diplomovej práce bude funkčná vzorka - G_{funk} . Jedná sa o funkčný, originálny výrobok zhotovený ako jeden kus, aby bolo možné overiť jeho vlastnosti. Na rozdiel od prototypu, však po overení bezprostredne nenasleduje sériová výroba.

Názov funkčnej vzorky:

Štruktúrovaná konzola brzdného štítu

Autori:

Bc. Martin Černák; Ing. Ondřej Vaverka; doc. Ing. Daniel Koutný, PhD.

Technický popis:

Predmetom práce bolo vytvoriť topologicky optimalizovanú konzolu brzdného štítu ľahkého prúdového lietadla s využitím mikro-prútvých štruktúr. Cieľom bola minimalizácia hmotnosti pri zachovaní tuhosti a využitím aditívne vyrábanej hliníkovej zliatiny. Vďaka navrhutej metodike optimalizácie mikro-prútvých štruktúr, bola dosiahnutá úspora hmotnosti 23 % a nárast tuhosti o 31 %. Tento výsledok predstavuje nárast mernej tuhosti o 88 % napriek horším mechanickým vlastnostiam použitej hliníkovej zliatiny (cca -17 %). Funkčná vzorka demonštruje, že použitie mikro-prútvých štruktúr v spojitosti s topologickou optimalizáciou je perspektívne predovšetkým dosahovaným pomerom tuhosti k hmotnosti aj s bežne používanými hliníkovými zliatinami pre aditívnu výrobu a môže prispieť k efektívnejšiemu riešeniu (nielen) leteckých komponentov.

Väzba na projekt:

Vysokoškolský projekt špecifického výzkumu FSI-S-20-6296 "Výzkum mechanických a fyzikálných vlastností štrukturovaného materiálu pripravovaného pomocí aditívni výroby"

Umiestnenie:

Ústav konstruování, Odbor reverzního inženýrství

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

Kontaktná osoba:

Ing. Ondřej Vaverka

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] BENDSØE, Martin Philip a Ole SIGMUND. *Topology optimization : theory, methods and applications*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2004. ISBN 978-3-540-42992-0.
- [2] ZHU, Ji-Hong, Wei-Hong ZHANG a Liang XIA. Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2016, roč. 23, č. 4, s. 595–622. ISSN 1134-3060.
- [3] KOUTNÝ, Daniel. Vypečená družice. In: *zVUT.cz* [online]. 17. august 2015 [cit. 14. December 2020]. Dostupné z: https://www.zvut.cz/i/media/document_images/fotogalerie_doc/ostra/103894/vypecena_druzice_800.jpg.
- [4] ROZVANY, G I N, M ZHOU a T BIRKER. Generalized shape optimization without homogenization. *Structural Optimization*. 1992, roč. 4, č. 3–4, s. 250–252. ISSN 0934-4373.
- [5] NGUYEN, Jason, Sang-in PARK a David ROSEN. Heuristic optimization method for cellular structure design of light weight components. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013, roč. 14, č. 6, s. 1071–1078. ISSN 2234-7593.
- [6] TANG, Yunlong, Aidan KURTZ a Yaoyao Fiona ZHAO. Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing. *Computer-Aided Design*. 2015, roč. 69, s. 91–101. ISSN 00104485.
- [7] ALZHRANI, Mahmoud, Seung-Kyum CHOI a David W. ROSEN. Design of truss-like cellular structures using relative density mapping method. *Materials & Design*. 2015, roč. 85, s. 349–360. ISSN 02641275.
- [8] CHEN, Wenjong, Xiaonan ZHENG a Shutian LIU. Finite-Element-Mesh Based Method for Modeling and Optimization of Lattice Structures for Additive Manufacturing. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 11, s. 2073. ISSN 1996-1944.
- [9] DIAS, Warren. Design and Optimization of Lattice Structures for 3D Printing using Altair OptiStruct. In: *Altair HyperWorks Insider* [online]. 23. jún 2015 [cit. 14. december 2020]. Dostupné z: <https://insider.altairhyperworks.com/design-and-optimization-of-lattice-structures-for-3d-printing-using-altair-optistruct/>
- [10] TROY, Mich. Altair OptiStruct® Revolutionizes Lattice Structures for 3D Printing. In: *Altair* [online]. 26. február 2015 [cit. 13. máj 2022]. Dostupné z: <https://www.altair.com/es/news/11109/>
- [11] PETRŽELA, Zdeňek. *Topologická optimalizace a využití struktur pro letecké komponenty*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.
- [12] LYNCH, Matthew E., Matthew MORDASKY, Lin CHENG a Albert TO. Design, testing, and mechanical behavior of additively manufactured casing with optimized lattice structure. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 22, s. 462–471. ISSN 22148604.

- [13] CHENG, Lin, Pu ZHANG, Emre BIYIKLI, Jiayi BAI, Joshua ROBBINS a Albert TO. Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation. *Rapid Prototyping Journal*. 2017, roč. 23, č. 4, s. 660–677. ISSN 1355-2546.
- [14] ZHANG, Pu, Jakub TOMAN, Yiqi YU, Emre BIYIKLI, Mesut KIRCA, Markus CHMIELUS a Albert C. TO. Efficient Design-Optimization of Variable-Density Hexagonal Cellular Structure by Additive Manufacturing: Theory and Validation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015, roč. 137, č. 2, s. 41–45. ISSN 1087-1357.
- [15] WANG, Yingjun, Hang XU a Damiano PASINI. Multiscale isogeometric topology optimization for lattice materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017, roč. 316, s. 568–585. ISSN 00457825.
- [16] ČERNÁK, Martin. *Topologická optimalizace v programu ANSYS s využitím strukturovaného materiálu*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Radek Vrána, Ph.D.
- [17] COURTER, Blake. Implicit Modeling for Mechanical Design. In: *nTopology* [online]. 22. január 2019 [cit. 14. december 2020]. Dostupné z: <https://ntopology.com/blog/2019/01/22/implicit-modeling-for-mechanical-design/>
- [18] COURTER, Blake. Understanding the basics of B-reps and Implicits. In: *nTopology* [online]. 12. marec 2019 [cit. 14. december 2020]. Dostupné z: <https://ntopology.com/blog/2019/03/12/understanding-the-basics-of-b-reps-and-implicits/>
- [19] WU, Tong a Andres TOVAR. Multiscale, thermomechanical topology optimization of self-supporting cellular structures for porous injection molds. *Rapid Prototyping Journal*. 2019, roč. 25, č. 9, s. 1482–1492. ISSN 1355-2546.
- [20] YPSILANTIS, Konstantinos-Iason, George KAZAKIS a Nikos D. LAGAROS. Two-scale topology optimization using homogenization theory. *Procedia Manufacturing*. 2020, roč. 44, s. 449–456. ISSN 23519789.
- [21] WADBRO, Eddie a Bin NIU. Multiscale design for additive manufactured structures with solid coating and periodic infill pattern. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019, roč. 357, s. 112605. ISSN 00457825.
- [22] WU, Zijun, Liang XIA, Shuting WANG a Tielin SHI. Topology optimization of hierarchical lattice structures with substructuring. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019, roč. 345, s. 602–617. ISSN 00457825.
- [23] CHENG, Lin, Jiayi BAI a Albert C. TO. Functionally graded lattice structure topology optimization for the design of additive manufactured components with stress constraints. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019, roč. 344, s. 334–359. ISSN 00457825.
- [24] CHENG, Lin, Xuan LIANG, Eric BELSKI, Xue WANG, Jennifer M. SIETINS, Steve LUDWICK a Albert TO. Natural Frequency Optimization of Variable-Density Additive Manufactured Lattice Structure: Theory and Experimental Validation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018, roč. 140, č. 10. ISSN 1087-1357.

- [25] JANSEN, M. a O. PIERARD. A hybrid density/level set formulation for topology optimization of functionally graded lattice structures. *Computers & Structures*. 2020, roč. 231, s. 106205. ISSN 00457949.
- [26] WANG, Yu, Dezheng HU, Hailin WANG, Tinghao ZHANG a Hao YAN. Practical design optimization of cellular structures for additive manufacturing. *Engineering Optimization*. 2020, roč. 52, č. 11, s. 1887–1902. ISSN 0305-215X.
- [27] DA, Daicong. Inverse homogenization design of lattice structures without scale separation. *Structures*. 2021, roč. 29, s. 796–805. ISSN 23520124.
- [28] DA, Daicong a Liang XIA. Design of heterogeneous mesostructures for nonseparated scales and analysis of size effects. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2020, roč. 122, č. 5, s. 65–80. ISSN 0029-5981.
- [29] LI, Dawei, Wenhe LIAO, Ning DAI, Guoying DONG, Yunlong TANG a Yi Min XIE. Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing. *Computer-Aided Design*. 2018, roč. 104, s. 87–99. ISSN 00104485.
- [30] STRÖMBERG, Niclas. Optimal grading of TPMS-based lattice structures with transversely isotropic elastic bulk properties. *Engineering Optimization*. 2021, roč. 53, č. 11, s. 1871–1883. ISSN 0305-215X.
- [31] SIMSEK, Ugur, Cemal Efe GAYIR, Gullu KIZILTAS a Polat SENDUR. An integrated homogenization-based topology optimization via RBF mapping strategies for additively manufactured FGLS and its application to bandgap structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, roč. 111, č. 5–6, s. 1361–1374. ISSN 0268-3768.
- [32] CASALOTTI, Arnaldo, Francesco D’ANNIBALE a Giuseppe ROSI. Multi-scale design of an architected composite structure with optimized graded properties. *Composite Structures*. 2020, roč. 252, s. 112608. ISSN 02638223.
- [33] GROEN, J. P., C. R. THOMSEN a O. SIGMUND. Multi-scale topology optimization for stiffness and de-homogenization using implicit geometry modeling. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2021, roč. 63, č. 6, s. 2919–2934. ISSN 1615-147X.
- [34] MAZUR, Maciej, Martin LEARY, Shoujin SUN, Martin VCELKA, Darpan SHIDID a Milan BRANDT. Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, roč. 84, č. 5–8, s. 1391–1411. ISSN 0268-3768.
- [35] 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*. 2016, roč. 98, s. 344–357. ISSN 02641275.
- [36] LEARY, Martin, Maciej MAZUR, Hugh WILLIAMS, Eric YANG, Ahmad ALGHAMDI, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Darpan SHIDID, Lena FARAHBOD-STERNAHL, Gerd WITT, Ingomar KELBASSA, Peter CHOONG, Ma QIAN a Milan BRANDT. Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes. *Materials & Design*. 2018, roč. 157, s. 179–199. ISSN 02641275.

- [37] BRENNE, F. a T. NIENDORF. Load distribution and damage evolution in bending and stretch dominated Ti-6Al-4V cellular structures processed by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*. 2019, roč. 121, s. 219–228. ISSN 01421123.
- [38] LI, Chuanlei, Hongshuai LEI, Zhong ZHANG, Xiaoyu ZHANG, Hao ZHOU, Panding WANG a Daining FANG. Architecture design of periodic truss-lattice cells for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2020, roč. 34, s. 101172. ISSN 22148604.
- [39] PAZ, Rubén, Mario D. MONZÓN, Philippe BERTRAND a Alexey SOVA. Comparison of different cellular structures for the design of selective laser melting parts through the application of a new lightweight parametric optimisation method. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2019, roč. 20, č. 2, s. 117–132. ISSN 1673-565X.
- [40] ALOMAR, Zaki a Franco CONCLI. Compressive behavior assessment of a newly developed circular cell-based lattice structure. *Materials & Design*. 2021, roč. 205, s. 109716. ISSN 02641275.
- [41] HAN, Xuesong, Haihong ZHU, Xiaojia NIE, Guoqing WANG a Xiaoyan ZENG. Investigation on Selective Laser Melting AlSi10Mg Cellular Lattice Strut: Molten Pool Morphology, Surface Roughness and Dimensional Accuracy. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 3, s. 392. ISSN 1996-1944.
- [42] 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, roč. 11, č. 12, s. 2463. ISSN 1996-1944.
- [43] 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*. 2019, roč. 791, s. 490–500. ISSN 09258388.
- [44] MURCHIO, S., M. DALLAGO, F. ZANINI, S. CARMIGNATO, G. ZAPPINI, F. BERTO, D. MANIGLIO a M. BENEDETTI. Additively manufactured Ti-6Al-4V thin struts via laser powder bed fusion: Effect of building orientation on geometrical accuracy and mechanical properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021, roč. 119, s. 104495. ISSN 17516161.
- [45] SING, S. L., W. Y. YEONG, F. E. WIRIA a B. Y. TAY. Characterization of Titanium Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting Using an Adapted Compressive Test Method. *Experimental Mechanics*. 2016, roč. 56, č. 5, s. 735–748. ISSN 0014-4851.
- [46] GROSSMANN, Alexander, Julian GOSMANN a Christian MITTELSTEDT. Lightweight lattice structures in selective laser melting: Design, fabrication and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, roč. 766, s. 138356. ISSN 09215093.
- [47] ABELE, Eberhard, Hanns A STOFFREGEN, Klaus KLIMKEIT, Holger HOCHÉ a Matthias OECHSNER. Optimisation of process parameters for lattice structures. *Rapid Prototyping Journal*. 2015, roč. 21, č. 1, s. 117–127. ISSN 1355-2546.

- [48] PAWLAK, Andrzej, Patrycja SZYMCZYK, Grzegorz ZIOLKOWSKI, Edward CHLEBUS a Bogdan DYBALA. Fabrication of microscaffolds from Ti-6Al-7Nb alloy by SLM. *Rapid Prototyping Journal*. 2015, roč. 21, č. 4, s. 393–401. ISSN 1355-2546.
- [49] KARAMOOZ RAVARI, M. R. a M. KADKHOAEI. A Computationally Efficient Modeling Approach for Predicting Mechanical Behavior of Cellular Lattice Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015, roč. 24, č. 1, s. 245–252. ISSN 1059-9495.
- [50] MENG, Guang, Bin JI, Han HAN, Chengzhang GU, Renbang LIN a Fujun PENG. Design and simulation of an innovative cylinder fabricated by selective laser melting. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019, roč. 32, č. 1, s. 133–142. ISSN 10009361.
- [51] LIU, Lu, Paul KAMM, Francisco GARCÍA-MORENO, John BANHART a Damiano PASINI. Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: the role of geometric defects induced by Selective Laser Melting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2017, roč. 107, s. 160–184. ISSN 00225096.
- [52] LOZANOVSKI, Bill, David DOWNING, Phuong TRAN, Darpan SHIDID, Ma QIAN, Peter CHOONG, Milan BRANDT a Martin LEARY. A Monte Carlo simulation-based approach to realistic modelling of additively manufactured lattice structures. *Additive Manufacturing*. 2020, roč. 32, s. 101092. ISSN 22148604.
- [53] 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*. 2020, roč. 36, s. 101593. ISSN 22148604.
- [54] VRÁNA, Radek, Ondřej ČERVINEK, Pavel MAŇAS, Daniel KOUTNÝ a David PALOÚŠEK. Dynamic Loading of Lattice Structure Made by Selective Laser Melting-Numerical Model with Substitution of Geometrical Imperfections. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 11, s. 2129. ISSN 1996-1944.
- [55] LOZANOVSKI, Bill, Martin LEARY, Phuong TRAN, Darpan SHIDID, Ma QIAN, Peter CHOONG a Milan BRANDT. Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures. *Materials & Design*. 2019, roč. 171, s. 107671. ISSN 02641275.
- [56] CHO, Hoon-Hwe, Yigil CHO a Heung Nam HAN. Finite element analysis for mechanical response of Ti foams with regular structure obtained by selective laser melting. *Acta Materialia*. 2015, roč. 97, s. 199–206. ISSN 13596454.
- [57] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. *Optimalizovaná konzola brzdících štítů* [funkčná vzorka]. KOPECKÝ, M.; KOUTNÝ, D.; VAVERKA, O. Brno, VUT, 2022. Dostupné z: <https://intranet.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getProjectPdf/450/>
- [58] CS-23. *Certifikační specifikace pro letouny kategorie, normální, cvičná, akrobatická a pro sběrnou dopravu* [online] Praha: Úřad pro civilní letectví, 2012 [cit. 6. mája 2022]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/dokumenty/predpisy/rozhodnuti-vykonneho-reditele-easa/certifikacni-specifikace/cs-23-letouny-kategorie-normalni-cvicna-akrobaticka-a-pro-sbernou-dopravu/>

- [59] KOPECKÝ, Marek. *Optimalizace konzoly brzdících štítů lehkého proudového letounu*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [60] TAČR STARFOS. *Braking Shield Bracket* [online]. ©2012 [cit. 15. máj 2022]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/en/result/RIV%2F00216305%3A26210%2F21%3APR34457>
- [61] VRÁNA, Radek. *Návrh poréznicích struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [62] VAVERKA, Ondřej. *Optimalizace těhlice formule student pro výrobu SLM technologií*. Brn, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [63] PANESAR, Ajit, Meisam ABDI, Duncan HICKMAN a Ian ASHCROFT. Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 19, s. 81–94. ISSN 22148604.
- [64] SYSTEMS SWANSON ANALYSIS INC. ANSYS help - Homogenization. *ANSYS.com*. [cit. 27. marec 2020]. Available at: https://ansyshelp.ansys.com/?ReturnUrl=%2FViews%2FSecured%2Fcorp%2Fv194%2Facp_md%2Facp_md_homogenization.html
- [65] The Enginering ToolBox. *Friction - Friction Coefficients and Calculator* [online]. ©2004 [cit. 7. máj 2022]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- [66] GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. *Cellular solids: Structure and properties*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0-521-49911-9.
- [67] KEMPEN, K., L. THUIS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2012, roč. 39, s. 439–446. ISSN 18753892.
- [68] VRÁNA, Radek, Daniel KOUTNÝ, David PALOUŠEK, Libor PANTĚLEJEV, Jan JAROŠ, Tomáš ZIKMUND a Jozef KAISER. Selective Laser Melting Strategy for Fabrication of Thin Struts Usable in Lattice Structures. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 9, s. 1763. ISSN 1996-1944.
- [69] STOLPE, M. a K. SVANBERG. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001, roč. 22, č. 2, s. 116–124. ISSN 1615-147X.
- [70] LIU, Ling, Jun YAN a Gengdong CHENG. Optimum structure with homogeneous optimum truss-like material. *Computers & Structures*. 2008, roč. 86, č. 13–14, s. 1417–1425. ISSN 00457949.

ZOZNAM POUŽITÝCH STRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

Zoznam skratiek

ANOVA	ANalysis Of VAriance
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CT	Computer Tomography
G_{funk}	Funkčná vzorka
LSTO	Lattice Structure Topology Optimization
MKP	Metóda Konečných Prvkov
MS	Medzný Stav
PAMP	Porous Anisotropic Material with Penalization
RAMP	Rational Approximation of Material Properties
SEM	Scanning Electron Microscopy
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SLM	Selective Laser Melting
TAČR	Technologická Agentura České Republiky
TO	Topologická Optimalizácia
TPMS	Triply Periodic Minimal Surface

Zoznam symbolov a veličín

ϵ_{ij}	Koeficient tenzoru pretvorenia
σ_{ij}	Koeficient tenzoru napätia
μ	Poissonov pomer
ρ	Relatívna hustota
Ω^{mat}	Oblasť telesa v priestore

D_{ij}	Koeficient anizotropného tenzoru elastických vlastností
E_T	Tečný modul
F_i	Normálová reakčná sila
L_i	Rozmer základnej bunky
T_i	Šmyková reakčná sila
u_i	Posunutie v smere i
E_{ijkl}	Tenzor elastických vlastností
R_e	Medza klzu
D_{ad}	Množina prijateľných matíc materiálových konštánt
D_e	Prvková matica materiálových konštánt
E	Youngov modul pružnosti v ťahu
F	Matica silové zaťaženia
G	Modul pružnosti v šmyku
K	Matica tuosti
M	Maxwellovo číslo
n	Počet uzlov
p	Penalizačný faktor
P	Potenciál vonkajších síl
\mathbf{R}^3	Euklidovský priestor
s	Počet prútov
U	Matica neznámich posunutí
V	Požadovaný objem
W	Energia napätosti
$\Delta_{x,y,z}$	Aplikované posunutie

ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1-1 Optimalizovaná konzola komunikačných antén satelitu [3].....	14
Obr. 2-1 Prizma diagram výberu zdrojov.	16
Obr. 2-2 Pomerné mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na pseudo-hustote a penalizačnom faktore.	19
Obr. 2-3 Schéma optimalizácie ground-structure. Upravené z [8].	19
Obr. 2-4 Schéma homogenization-based optimalizácie; (a) homogenizácia; (b) optimalizácia; (c) výsledok; (d) rekonštrukcia geometrie [14].	20
Obr. 2-5 Princíp implicitnej reprezentácie geometrie [18]. Žltá plocha reprezentuje viacdimeziálnu funkciu, šedá plocha predstavuje rovinu rezu, v ktorej výsledná geometria.	21
Obr. 2-6 Rozdiel plného MKP výpočtu a homogenizácie vzhľadom na počet použitých buniek [23].	23
Obr. 2-7 Vplyv priemeru prútov na mechanické vlastnosti; a) modul pružnosti E a pretvorenie EL; b) medza klzu YS a medza pevnosti UTS [42].	25
Obr. 2-8 Vplyv natočenia prútov na mechanické vlastnosti; a) modul pružnosti E a pretvorenie EL; b) medza klzu YS a medza pevnosti UTS [43].	26
Obr. 2-9 Porovnanie deformačného správania MKP výpočtu a experimentu [52].	27
Obr. 2-11 Smerové zložky namáhania v prípade početného zaťaženia.	29
Obr. 2-12 Výsledný tvar konzoly po optimalizácii Kopeckým [59].	30
Obr. 4-1 Schematický postup topologickej optimalizácie s plným materiálom.	36
Obr. 4-2 Schematický postup navrhutej topologickej optimalizácie s využitím mikro-prútových štruktúr.	37
Obr. 4-3 Závislosť koeficientov tenzoru elastických vlastností na relatívnej hustote.	39
Obr. 4-4 Schematický postup určenia a overenia penalizačného faktoru.	39
Obr. 4-5 Štruktúry určené pre materiálové skúšky; (a) umiestnenie na podložke; (b) konfigurácia na skúšobnom stroji.	40
Obr. 4-6 Sada FCCZ základných buniek určených pre optické skenovanie.	41
Obr. 4-7 Geometria a sieť základnej bunky použitá pre homogenizáciu.	41
Obr. 4-8 Schematický postup pri tvorbe a vyhodnocovaní homogenizačných modelov. ...	44
Obr. 4-9 Výsledky deformácie štruktúry v závislosti na rôznych penalizačných faktoroch.	45

Obr. 4-10 Detail prútov a ich morfológie po výrobe. Zľava: BCC,FCCZ, FBCCZ.....	45
Obr. 4-11 Výsledok porovnania štruktúr pomocou skúšky v jednoosom tlaku.....	46
Obr. 4-12 Vzájomné porovnanie reálnej (šedá) a nominálnej (zelená) geometrie základných buniek.....	46
Obr. 4-13 Výsledky porovnania experimentu s homogenizačnými MKP modelmi.....	47
Obr. 5-1 CAD geometria (vľavo) a príslušné zjednodušenie modelu pre MKP analýzu (vpravo).	49
Obr. 5-2 Materiály prislúchajúce jednotlivým dielom.....	49
Obr. 5-3 Vytvorená konečno-prvková sieť.	50
Obr. 5-4 Zaväzbenie krídla v priestore.....	50
Obr. 5-5 Plastické pretvorenie konzoly pri početnom zaťažení.	51
Obr. 5-6 Celková deformácia konzoly pri početnom zaťažení.	52
Obr. 5-7 Vývoj použitého design-space-u.	53
Obr. 5-8 Rozloženie relatívnych hustôt získané v predbežnom návrhu.	54
Obr. 5-9 Celková deformácia dosiahnutá pre návrh s BCC štruktúrou.....	55
Obr. 5-10 Rozloženie napätia na submodeli BCC štruktúry pri početnom zaťažení.....	56
Obr. 5-11 Topologicky optimalizovaná konzola vytvorená v predbežnom návrhu.	57
Obr. 5-12 Schematický postup rekonštrukcie geometrie. Vytvorenie štruktúry, jej orezanie a pridanie plných častí.	57
Obr. 6-1 Stanovenie penalizačného faktoru pre FCCZ bunku.	60
Obr. 6-2 Finálny design-space použitý v konštrukčnom riešení.	61
Obr. 6-3 Testovanie nezavetrenej optimalizovanej konzoly.....	62
Obr. 6-4 Model a väzby použité pri optimalizácii zavetrenia. Červená – <i>cylindrical support</i> , žltá – <i>frictionless support</i>	63
Obr. 6-5 Finálna topologicky optimalizovaná konzola brzdných štítov.....	64
Obr. 6-6 Celková deformácia dosiahnutá počas numerickej verifikácie na krídle.....	65
Obr. 6-7 Deformácia navrhutej konzoly pri početnom zaťažení.	66
Obr. 6-8 Pozície submodelov v globálnom modeli.	66
Obr. 6-9 Rozloženie ekvivalentného napätia na submodeli A pre zaťaženie na krídle.	67
Obr. 6-10 Rozloženie ekvivalentného napätia na submodeli C pre zaťaženie na krídle....	68
Obr. 6-11 Orientácia dielu na platforme a aplikácia podporných štruktúr.....	69

Obr. 6-12 Vyrobená geometria optimalizovanej konzoly brzdých štítov.	70
Obr. 6-13 Odstraňovanie podporných štruktúr.	71
Obr. 6-14 Geometria pre obrábanie upravená na základe 3D optického skenovania.	71
Obr. 6-15 Technologický postup obrábania konzoly. Červená označuje obrábané časti...	72
Obr. 6-16 Finálna geometria optimalizovanej konzoly po obrobení.	73


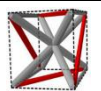

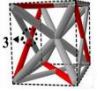

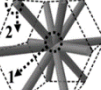

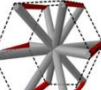

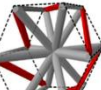
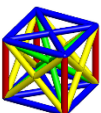
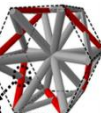


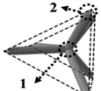
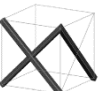
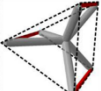
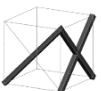
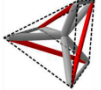

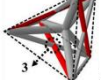

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1 Výsledné rešeršné požiadavky.	16
Tab. 4-1 Ciele a obmedzenia kladené na finálny návrh, * prút, ** plný materiál.....	35
Tab. 4-2 Výsledky homogenizovaných vlastností nominálnej a reálnej geometrie.	46
Tab. 5-1 Reakčné sily aplikovaných okrajových podmienok.	51
Tab. 5-2 Smerové deformácie v mieste aplikácie sily na pôvodnej konzole.	52
Tab. 5-3 Smerové deformácie dosiahnuté pre návrh s BCC štruktúrou v mieste svorníka.	55
Tab. 5-4 Mechanické vlastnosti mikro-prútov z AlSi10Mg vyrobené technológiou SLM.	58
Tab. 5-5 Odhad výrobných nákladov.....	59
Tab. 6-1 Porovnanie získaných deformácií; HM – homogenizácia; TO – dosiahnuté hodnoty v topologickej optimalizácii; TOc – zamýšľané hodnoty v topologickej optimalizácii; OP – originálna konzola.....	65
Tab. 6-2 Maximálna deformácia svorníku pri početnom zaťažení.	66
Tab. 6-3 Zvolené procesné parametre.	70

ZOZNAM PRÍLOH

A	Prehľad používaných buniek	92
B	Skripty použité pri riešení práce	93
B.1	EditDensityResult.py	93
B.2	HomogenizedTensorAssembler.py	94
B.3	AnisotropicToOrtotropicConverter.py	95
C	Materiálové modely	96
C.1	Materiály krídla a originálnej konzoly	96
C.2	Variabilného ortotropný materiál FCCZ štruktúry	96
D	3D optická digitalizácia	97
D.1	Digitalizácia základných buniek	97
D.2	Zarovnanie konzoly voči originálnemu dielu	97
D.3	Porovnanie vyrobenej konzoly voči nominálnemu dielu	98
D.4	Porovnanie obrobenej konzoly voči nominálnemu dielu	98
E	Výsledky submodelingu	100
F	Fotografická dokumentácia	106
G	Výkresová dokumentácia	117

A Prehľad používaných buniek

Základná bunka	Názov	Zdroj	Základná bunka	Názov	Zdroj
	BCC	[34–40]		Q3	[38]
	BCCZ	[35–38]		Q4	[38]
	FCC	[35, 36]		H1	[38]
	FCCZ	[34–36]		H2	[38]
	FBCCZ	[34, 35]		H3	[38]
	FBCCXYZ	[34]		H4	[38]
	CirC	[40]		Cubic	[39]
	T1	[38]		-	[39]
	T2	[38]		-	[39]
	T3	[38]		-	[39]
	T4	[38]		-	[39]

B Skripty použité při řešení práce

B.1 EditDensityResult.py

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
maxDens = 0.95
name = r'.csv' #Path and name for save

fDens = open(r'.csv ', 'r') #Path to exported densities
fNodes = open(r'.csv ', 'r') #Path to exported node locations
fOut = open(name + '-densEdit.csv', 'w')

x = []
y = []
z = []
val = []

for line in fDens:
    val.append(line.split(',')[1])

for line in fNodes:
    vals = line.split(',')
    x.append(vals[1])
    y.append(vals[2])
    z.append(vals[3])

fDens.close()
fNodes.close()

newVal = []
newLine = []

for i in val[1:]:
    if float(i) > maxDens:
        newVal.append(maxDens)
    else:
        newVal.append(float(i))

plt.hist(newVal, bins=np.arange(0, 1, 0.01), rwidth=0.95, color="C2")
plt.xlabel('Relative density (1)')
plt.ylabel('Count (1)')
plt.title('Lattice density distribution')
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

for i in range(len(newVal)):
    data = [str(x[i + 1]), str(y[i + 1]), str(z[i + 1]), str(newVal[i])]
    line = ','.join(data)
    fOut.write(line + '\n')

fOut.close()
```

B.2 HomogenizedTensorAssembler.py

```
an = ExtAPI.DataModel.Project.Model.Analyses
L = 5 #mm

# D33
F_z = float(an[0].Solution.Children[2].MaximumTotal.Value) #N
d_z = float(an[0].Children[2].ZComponent.ToString()[1:-6])
D33 = F_z/L/d_z #MPa

# D13
F_x = float(an[0].Solution.Children[3].MaximumTotal.Value) #N
D13 = F_x/L/d_z #MPa

# D11
F_x = float(an[2].Solution.Children[2].MaximumTotal.Value) #N
d_x = float(an[2].Children[4].XComponent.ToString()[1:-6])
D11 = F_x/L/d_x #MPa

# D12
F_y = float(an[2].Solution.Children[3].MaximumTotal.Value) #N
D12 = F_y/L/d_x #MPa

# D44
F_y = float(an[1].Solution.Children[2].MaximumTotal.Value) #N
d_y = float(an[1].Children[2].YComponent.ToString()[1:-6])
D44 = F_y/L/d_y #MPa

# D55
F_z = float(an[3].Solution.Children[2].MaximumTotal.Value) #N
d_z = float(an[3].Children[2].ZComponent.ToString()[1:-6])
D55 = F_z/L/d_z #MPa

print("D11 {} MPa\n D12 {} MPa\n D13 {} MPa\n D33 {} MPa\n D44 {} MPa\n D55 {}
MPa".format(D11,D12,D13,D33,D44,D55))
```

B.3 AnisotropicToOrtotropicConverter.py

```
import pandas as pd
import numpy as np

name = r'.txt' #Path to anisotropic matrix
f = open(name, 'r')
data = f.readlines()
f.close()

rho = [float(i) for i in data[0].split(',')[1:]]
D11 = [float(i) for i in data[1].split(',')[1:]]
D12 = [float(i) for i in data[2].split(',')[1:]]
D13 = [float(i) for i in data[3].split(',')[1:]]
D33 = [float(i) for i in data[4].split(',')[1:]]
D44 = [float(i) for i in data[5].split(',')[1:]]
D55 = [float(i) for i in data[6].split(',')[1:]]

D = np.zeros((6, 6))
dict = {"rho": [], "E1": [], "E2": [], "E3": [], "G12": [],
        "G23": [], "G31": [], "nu12": [], "nu13": [], "nu23": []}
Df = pd.DataFrame(dict)

for i in range(len(D11)):
    D[0, 0] = D11[i]
    D[0, 1] = D12[i]
    D[0, 2] = D13[i]

    D[1, 0] = D12[i]
    D[1, 1] = D11[i]
    D[1, 2] = D13[i]

    D[2, 0] = D13[i]
    D[2, 1] = D13[i]
    D[2, 2] = D33[i]

    D[3, 3] = D44[i]

    D[4, 4] = D55[i]

    D[5, 5] = D55[i]

    S = np.linalg.inv(D)

    r = rho[i]
    E1 = 1 / S[0, 0]
    E2 = 1 / S[1, 1]
    E3 = 1 / S[2, 2]
    G12 = 1 / S[3, 3]
    G23 = 1 / S[4, 4]
    G31 = 1 / S[5, 5]
    nu12 = -S[1, 0] * E1
    nu13 = -S[2, 0] * E1
    nu23 = -S[2, 1] * E2

    Df.loc[len(Df.index)] = [r, E1, E2, E3, G12, G23, G31, nu12, nu13, nu23]

print(Df)
Df.to_csv(name[:-4] + "_variable_mech_prop.csv")
```

C Materiálové modely

C.1 Materiály krídla a originálnej konzoly

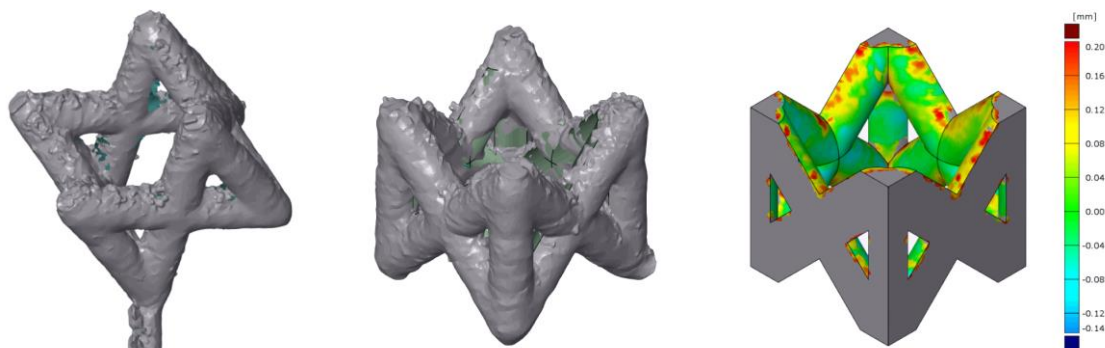
Materiál	Modul pružnosti E	Poissonov pomer μ	Medza klzu R_e	Tečný modul E_T
(1)	(GPa)	(1)	(MPa)	(MPa)
2024 T351	71,1	0,33	324	731
2020 T42	72,4	0,33	-	-
4130	205	0,29	-	-
4202	72	0,33	-	-

C.2 Variabilný ortotropný materiál FCCZ štruktúry

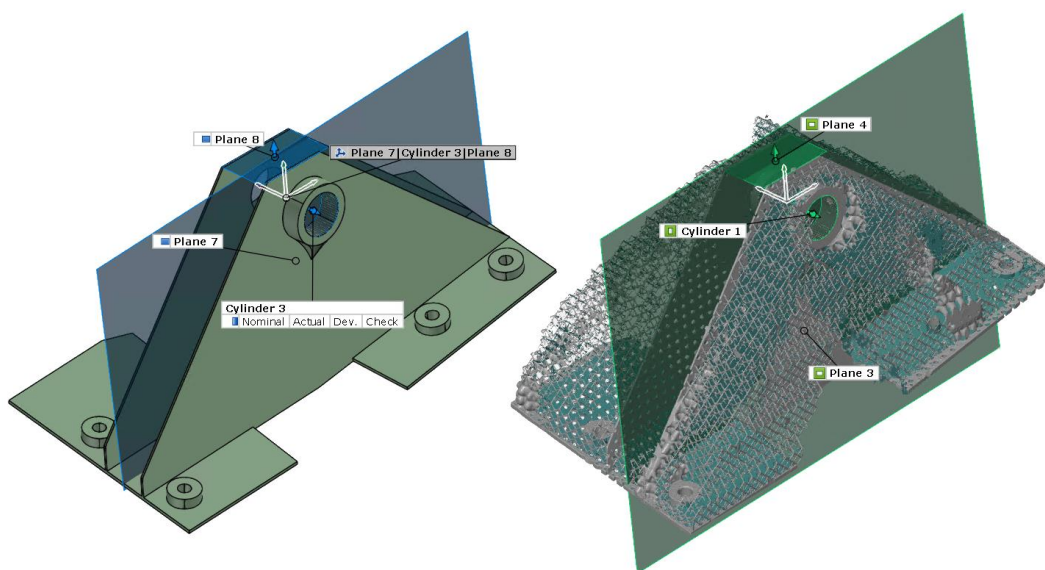
Rel. hustota	E	E	E	μ	μ	μ	G	G	G
(1)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(1)	(1)	(1)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
0.047	0.355	0.355	0.770	-0.289	0.369	0.369	6.60	0.391	0.392
0.100	0.889	0.889	1.75	-0.205	0.326	0.326	21.0	0.710	0.710
0.300	5.09	5.09	8.26	-0.0315	0.231	0.231	275	2.39	2.39
0.500	13.0	13.0	17.9	0.0800	0.217	0.217	1510	4.98	4.98
0.700	23.3	23.3	28.3	0.199	0.249	0.249	5470	8.79	8.79
0.900	36.5	36.5	40.5	0.304	0.293	0.293	13000	14.2	14.2
0.950	40.6	40.6	43.2	0.321	0.308	0.308	15200	15.7	15.7

D 3D optická digitalizácia

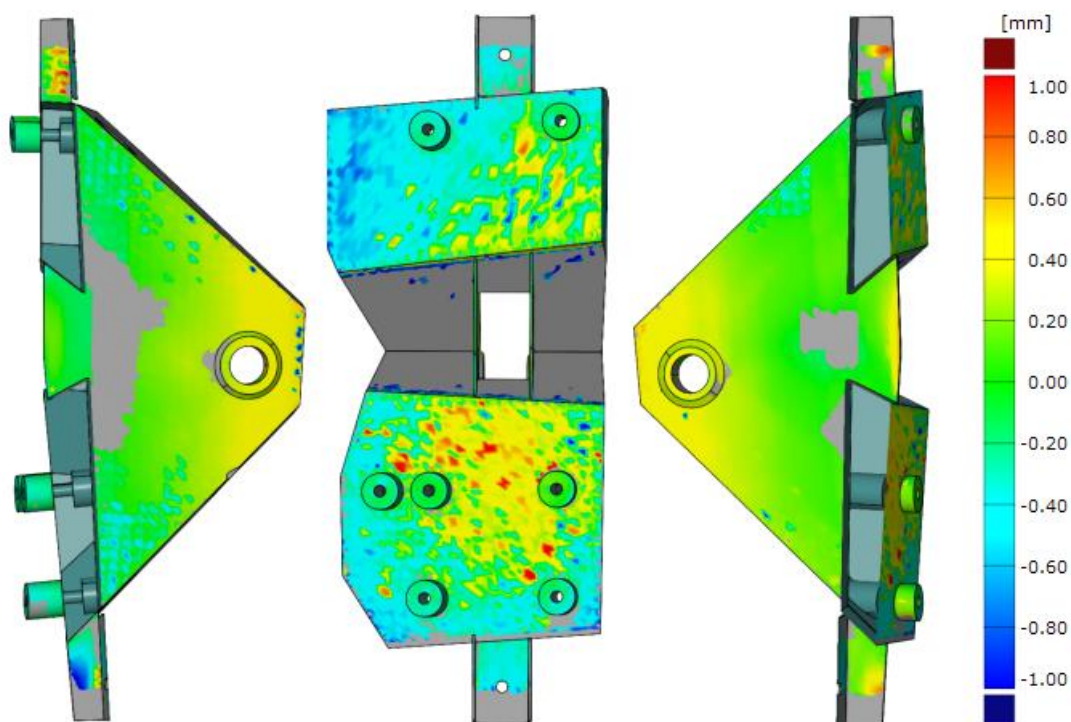
D.1 Digitalizácia základných buniek



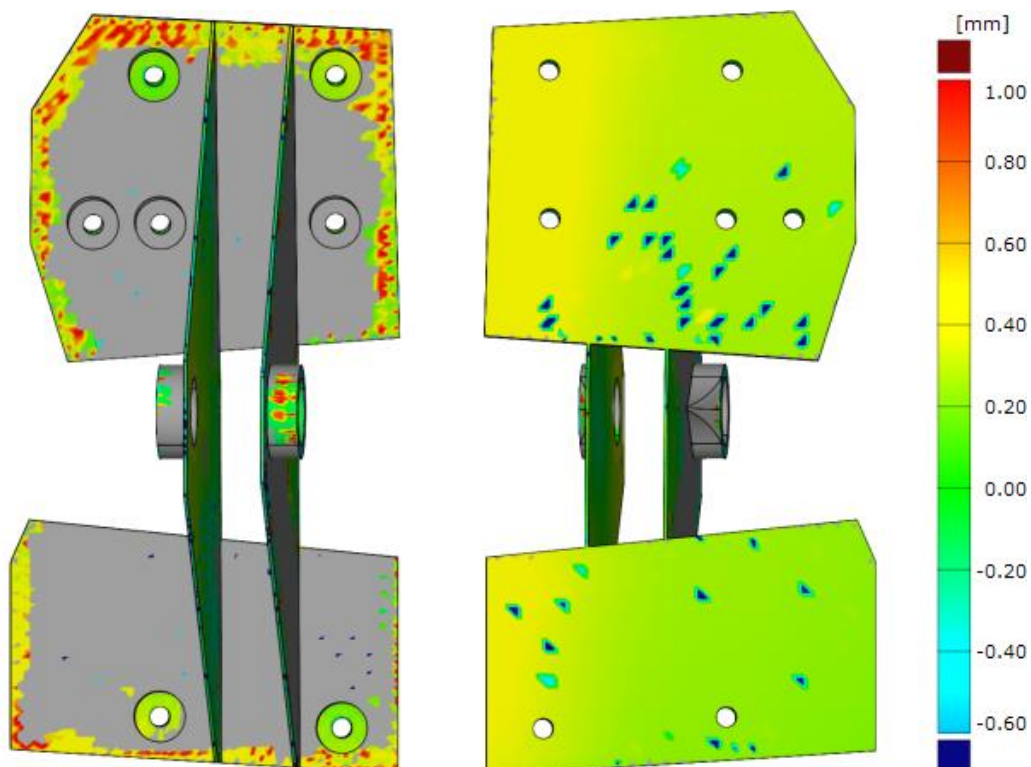
D.2 Zarovnanie konzoly voči originálnemu dielu

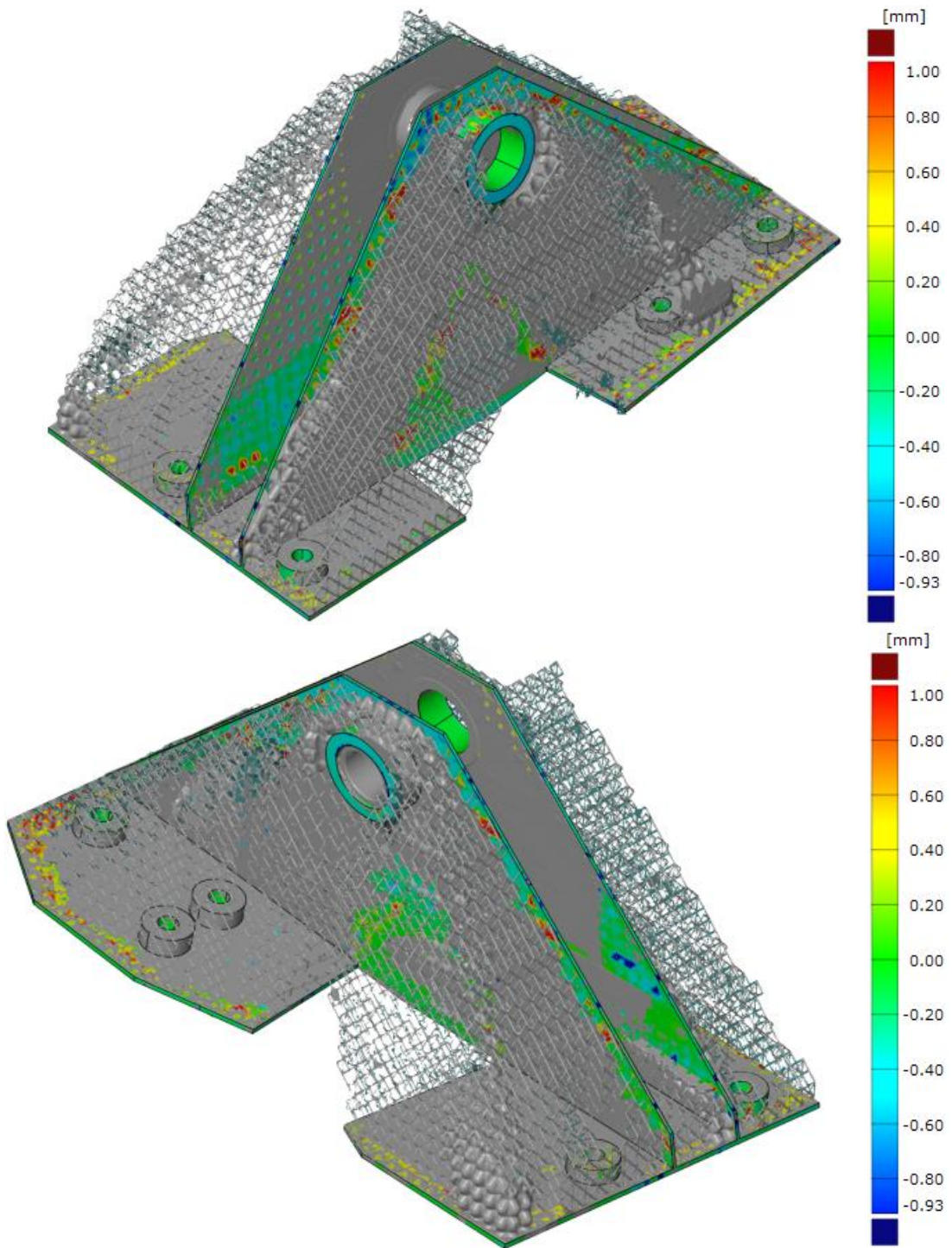


D.3 Porovnanie vyrobenej konzoly voči nominálnemu dielu



D.4 Porovnanie obrobenej konzoly voči nominálnemu dielu





E Výsledky submodelingu

E.1 Tabuľka výsledkov

Výsledky napätí na jednotlivých submodeloch pri zatažení na krídle.

Submodel	Prevádzkové zaťaženie		Početné zaťaženie	
	Napätie v prútoch (MPa)	Napätie v uzloch (MPa)	Napätie v prútoch (MPa)	Napätie v uzloch (MPa)
A	67	147	100	220
B	57	124	85	186
C	66	123	94	184
D	42	131	63	196
E	57	77	88	115

Výsledky napätí na jednotlivých submodeloch pri zatažení na prípravku.

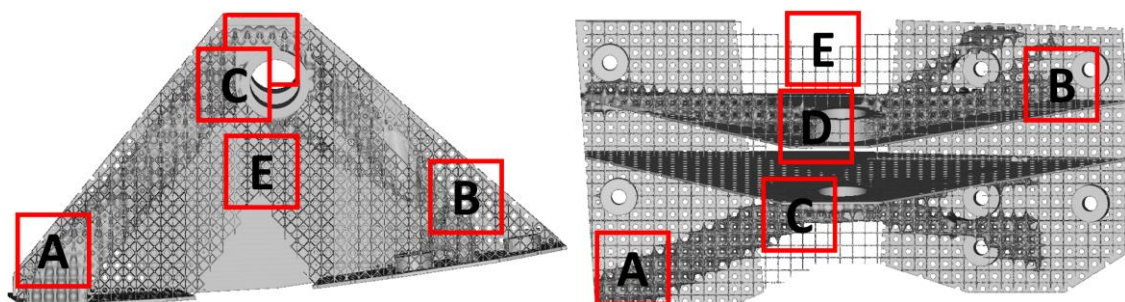
Submodel	Prevádzkové zaťaženie		Početné zaťaženie	
	Napätie v prútoch (MPa)	Napätie v uzloch (MPa)	Napätie v prútoch (MPa)	Napätie v uzloch (MPa)
A	60	91	90	136
B	66	115	99	172
C	75	139	112	209
D	65	131	98	197
E	103	113	155	169

E.2 Rozloženie napätí

Výsledky jednotlivých submodelov sú zobrazené v nasledujúcom poradí:

- Submodel C – zaťaženie na prípravku – vyhodnocovacia cesta
- Submodel C – zaťaženie na prípravku – extrapolácia napätia po ceste
- Submodel A – zaťaženie na prípravku
- Submodel B – zaťaženie na krídle
- Submodel B – zaťaženie na prípravku
- Submodel C – zaťaženie na krídle
- Submodel D – zaťaženie na krídle
- Submodel D – zaťaženie na prípravku
- Submodel E – zaťaženie na krídle
- Submodel E – zaťaženie na prípravku
- Zavetrenie – užšia časť
- Zavetrenie – širšia časť

Z dôvodu komfortu bolo dodaný umiestnenie jednotlivých submodelov v priestore.



I: Copy of SM3

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

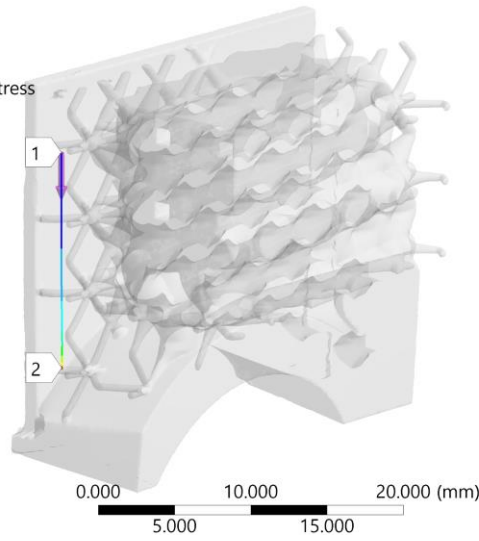
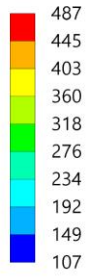
Unit: MPa

Time: 1 s

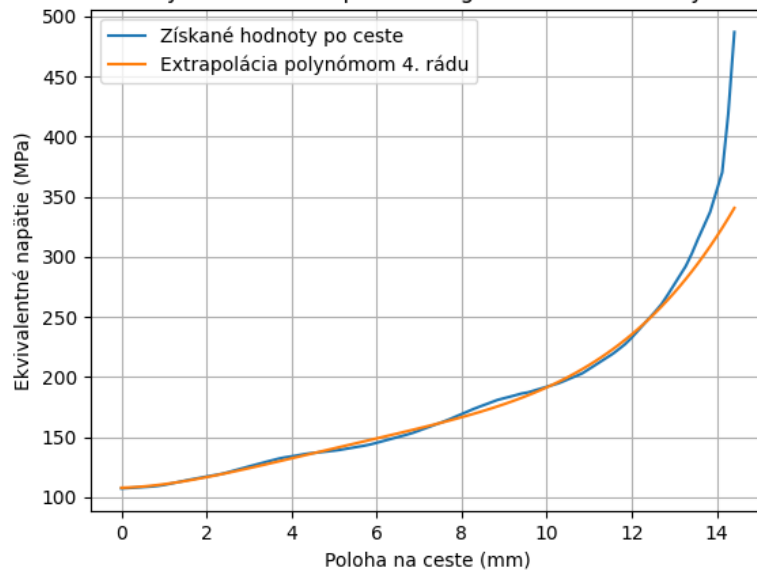
Max: 487

Min: 107

17.05.2022 22:12

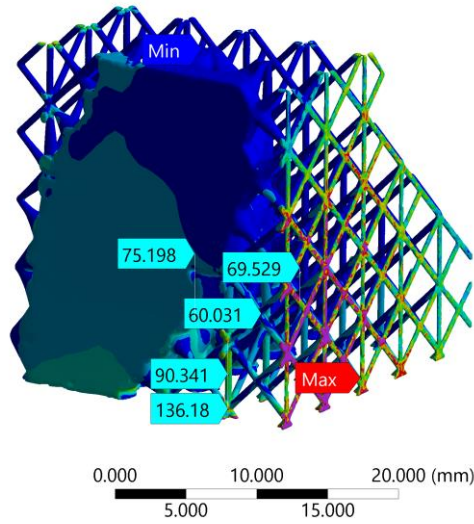
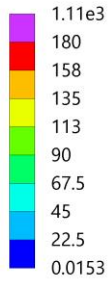


Vyhodnotenie napätia v singulárnom bode dosky



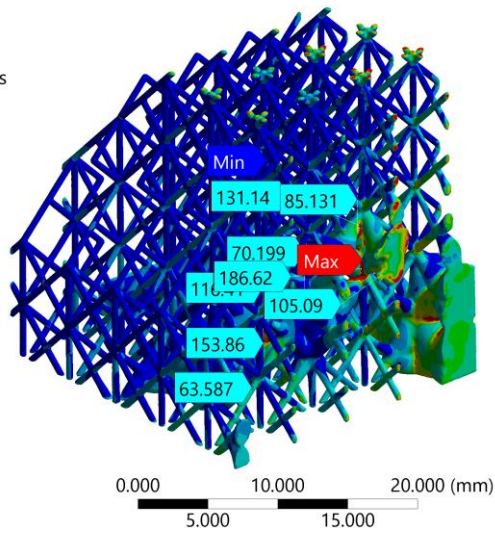
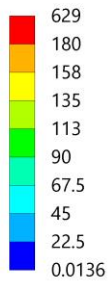
E: Copy of SM1

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Max: 1.11e3
Min: 0.0153
18.05.2022 14:00



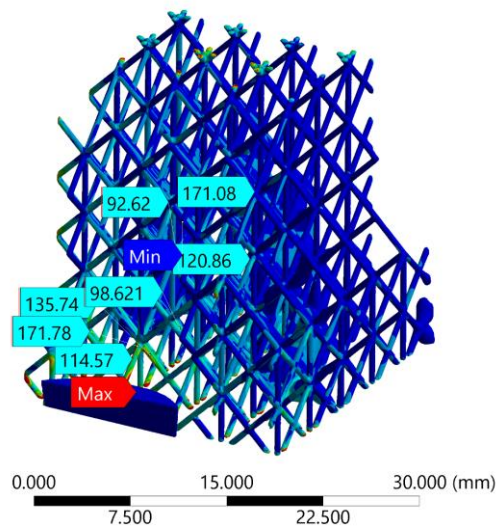
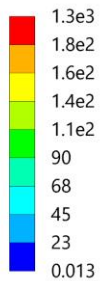
F: SM2

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Max: 629
Min: 0.0136
18.05.2022 14:04



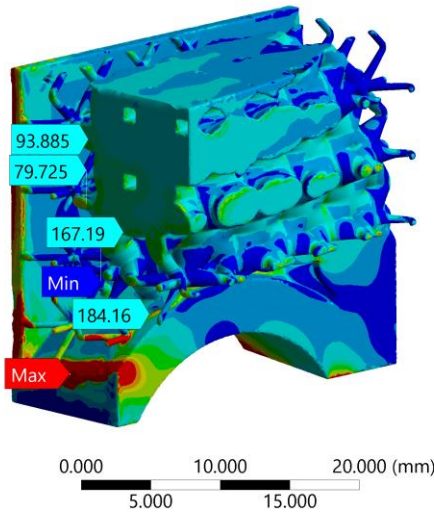
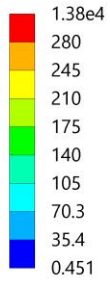
G: Copy of SM2

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Max: 1.3e3
Min: 0.013
18.05.2022 14:05



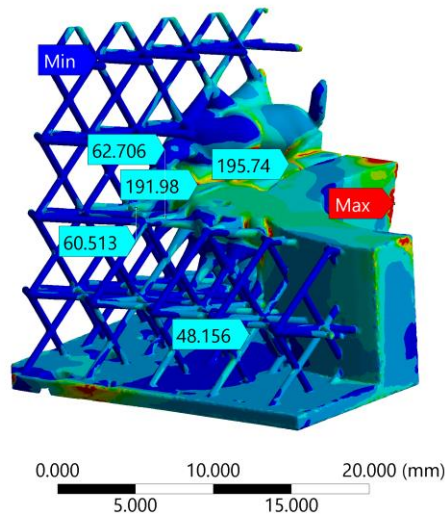
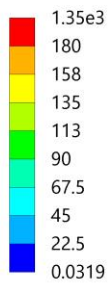
H: SM3

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Max: 1.38e4
Min: 0.451
18.05.2022 14:08



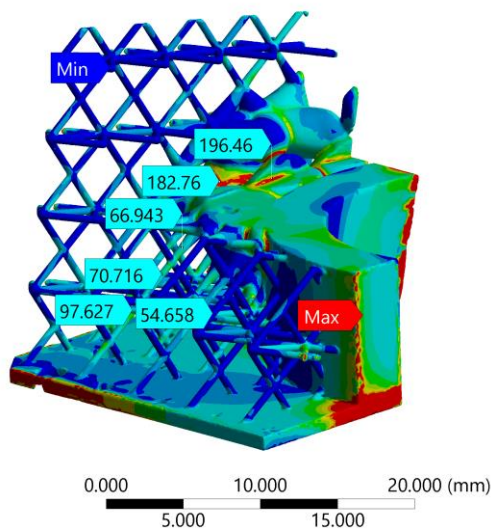
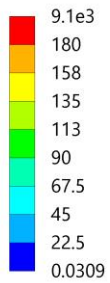
K: SM4

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Max: 1.35e3
Min: 0.0319
18.05.2022 14:10



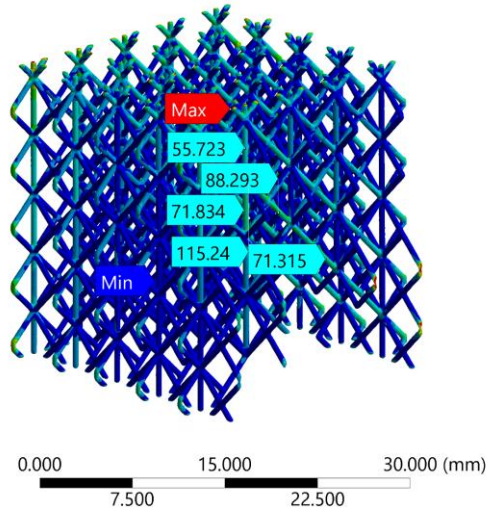
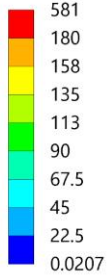
L: Copy of SM4

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Max: 9.1e3
Min: 0.0309
18.05.2022 14:12



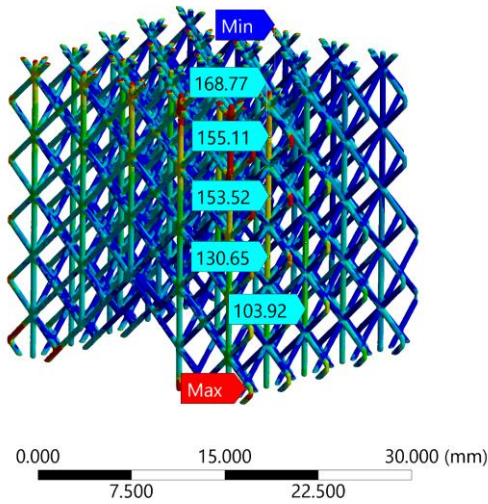
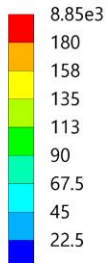
M: SM5

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Max: 581
Min: 0.0207
18.05.2022 14:14



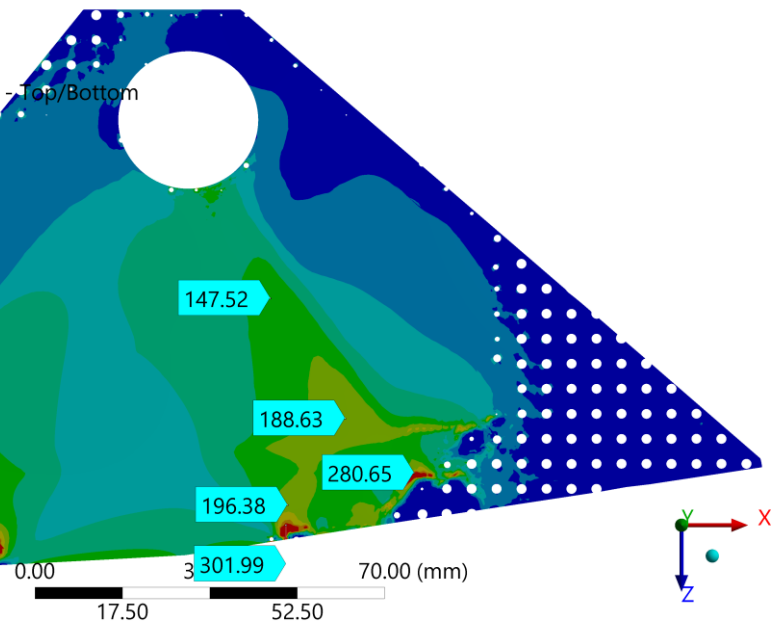
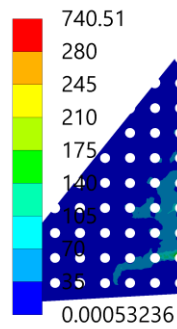
N: Copy of SM5

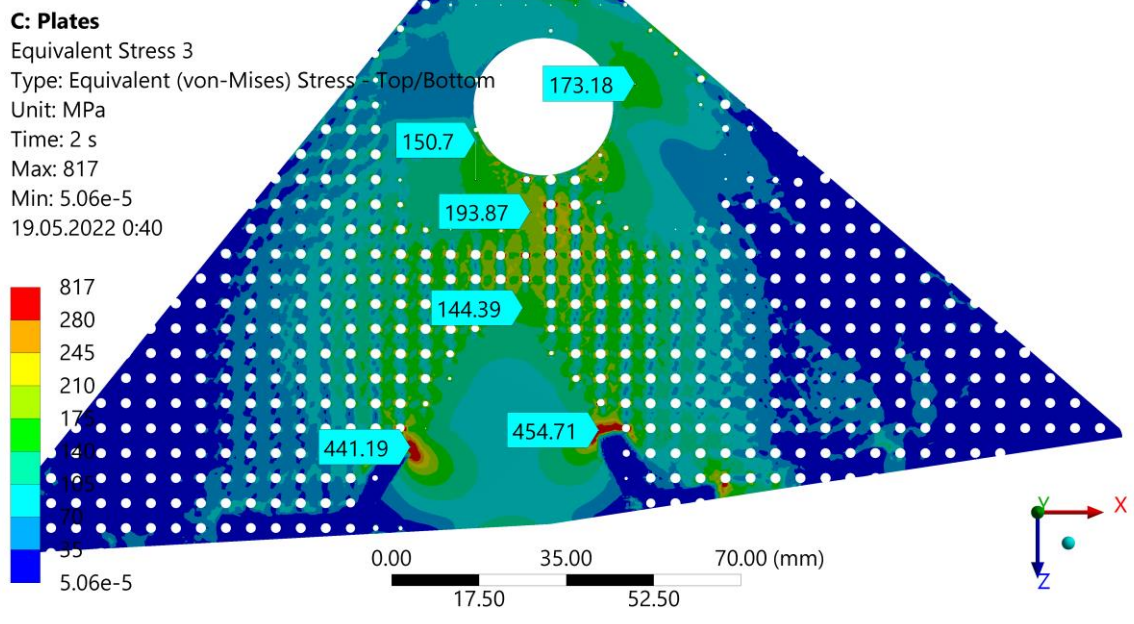
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
Custom Obsolete
Max: 3.51e3
Min: 0.0147
18.05.2022 14:16



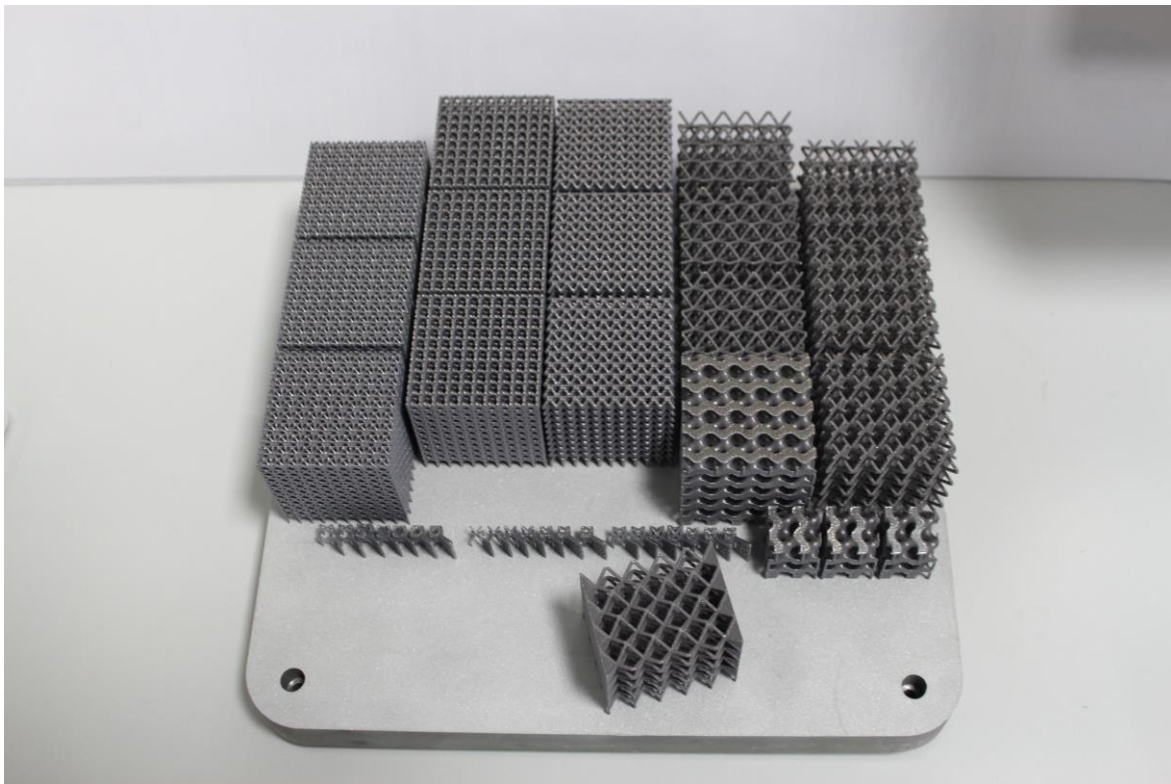
C: Plates

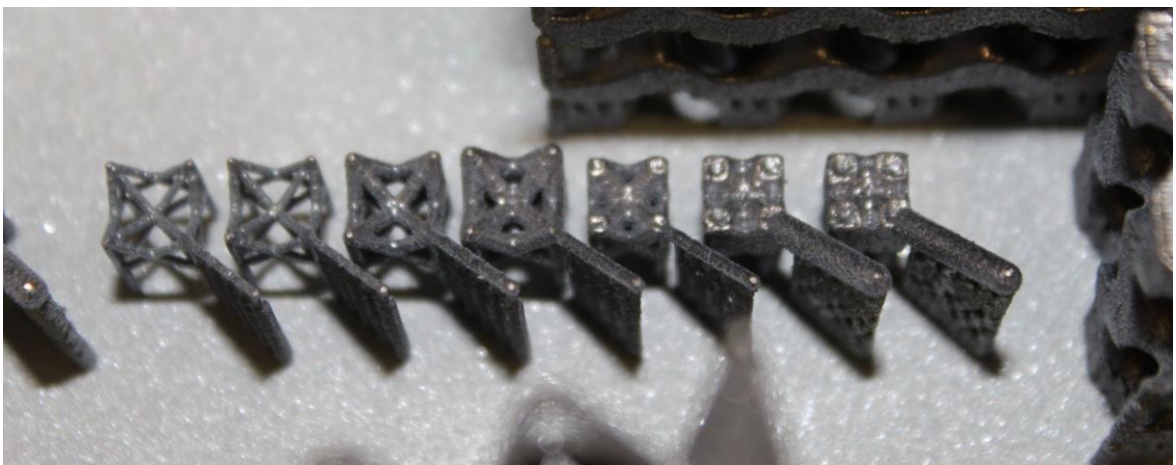
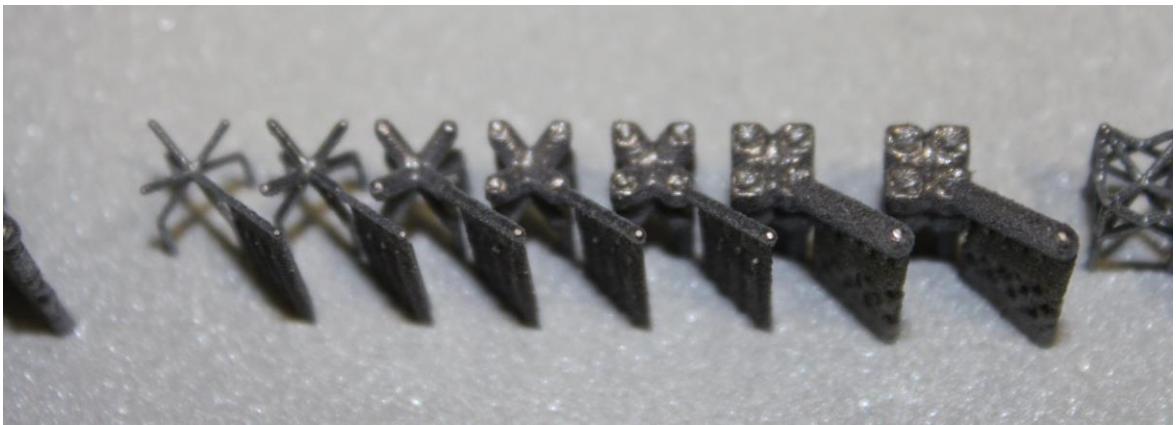
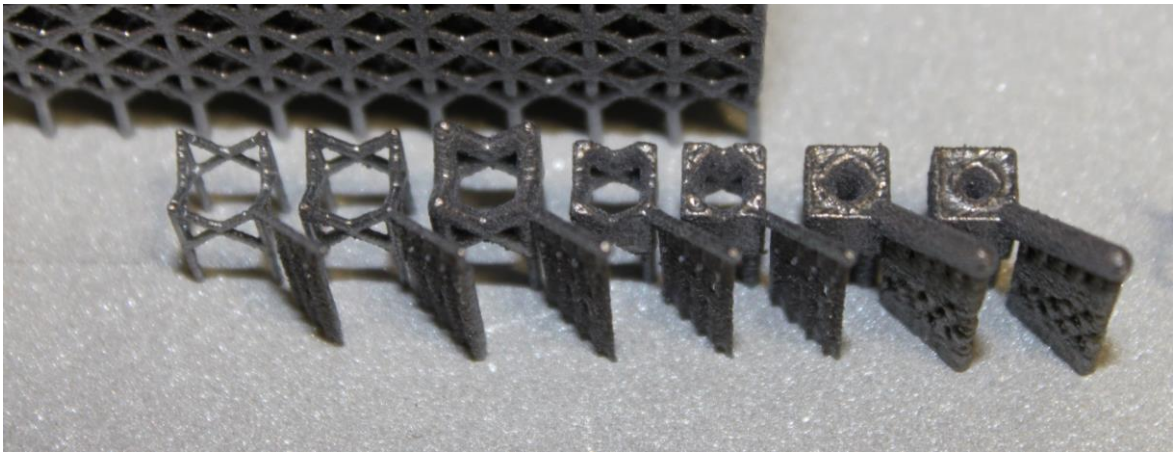
Equivalent Stress 4
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 2 s
Max: 740.51
Min: 0.00053236
19.05.2022 0:39

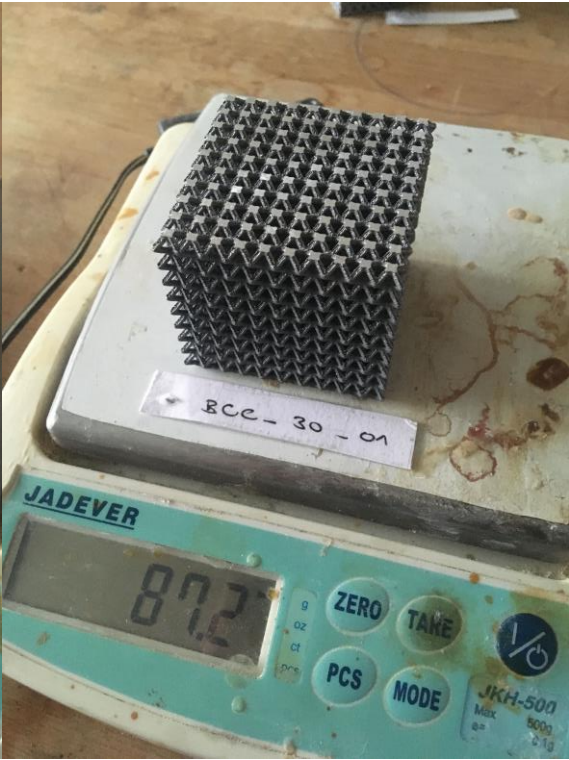


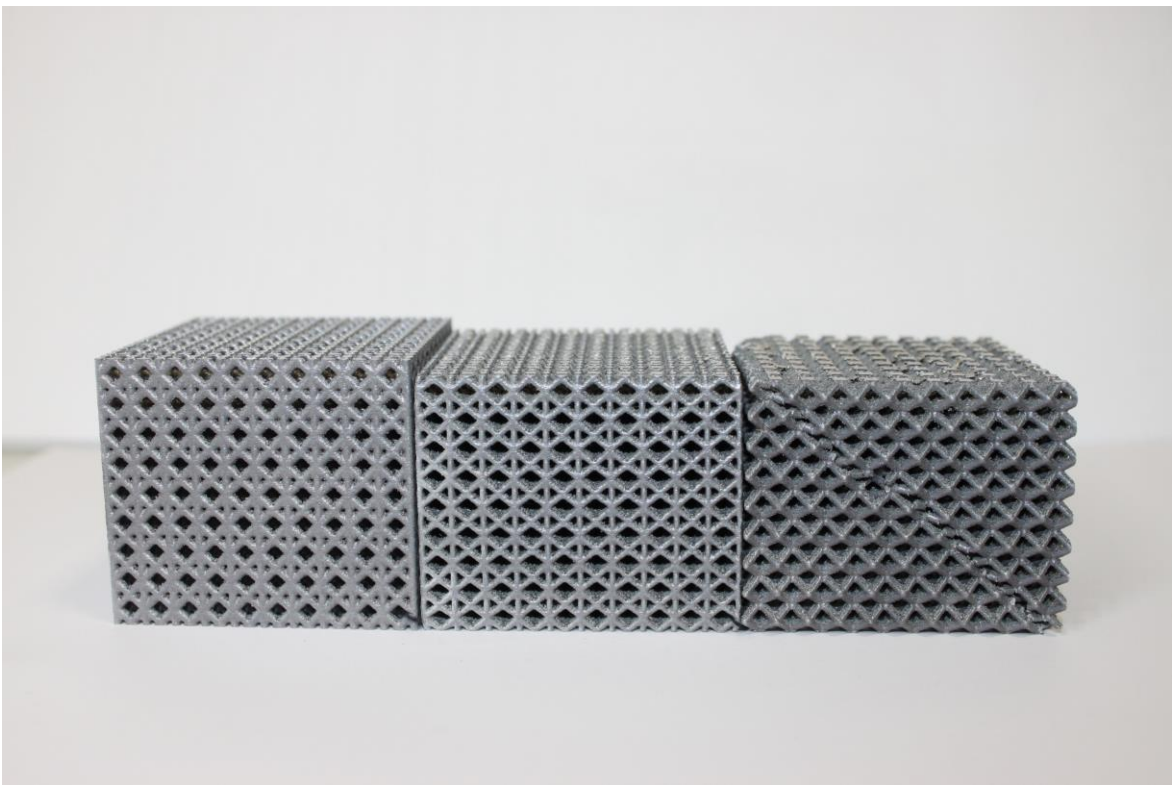


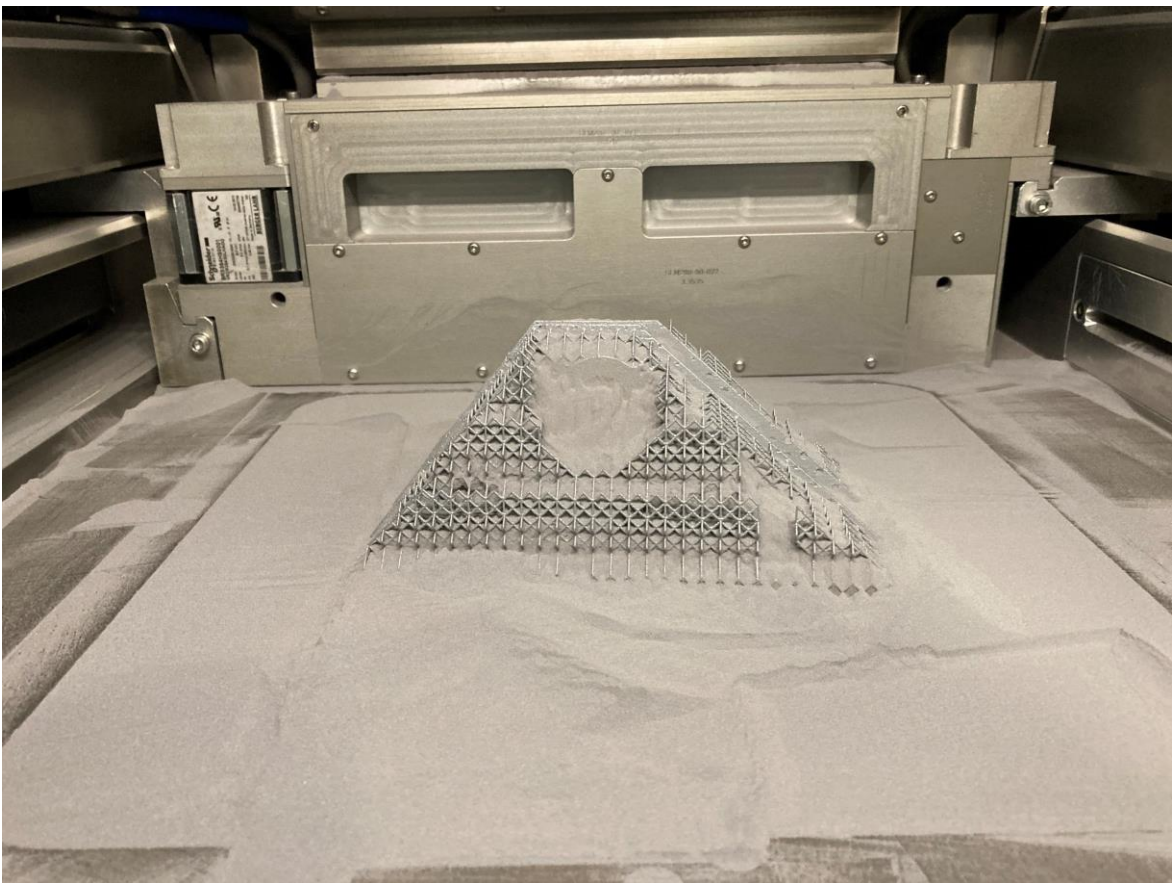
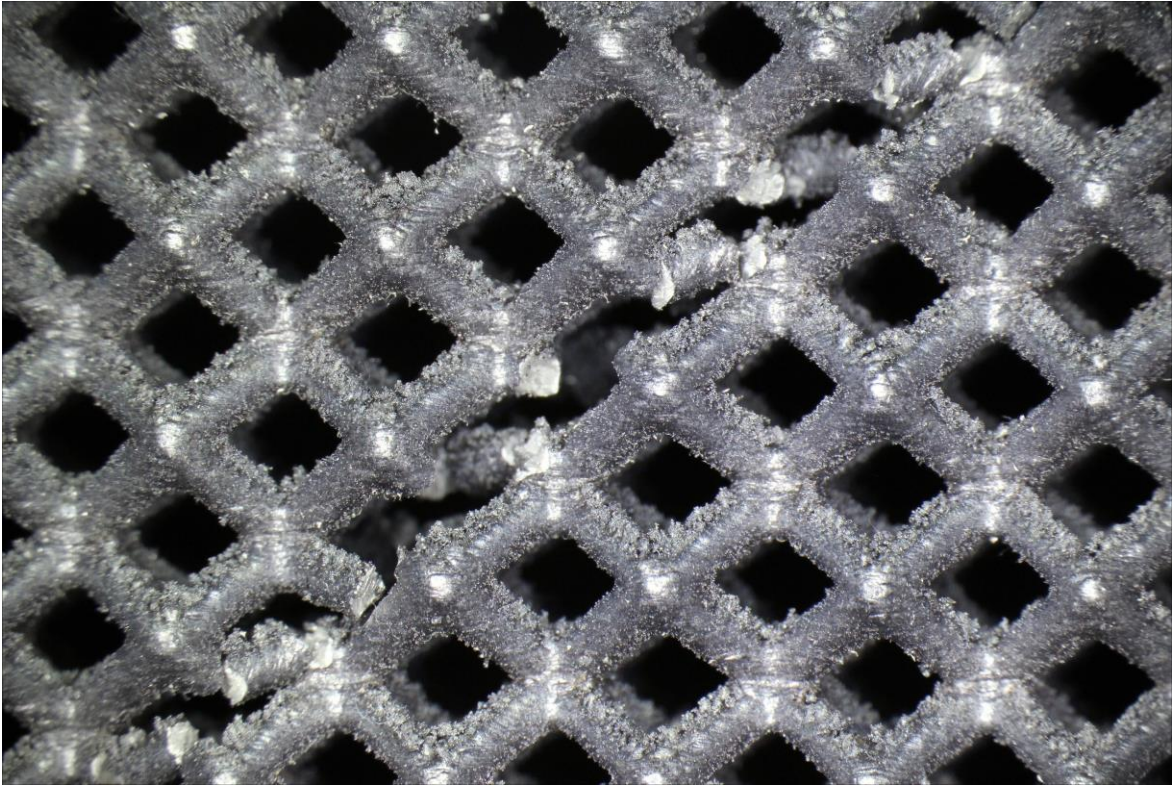
F Fotografická dokumentácia

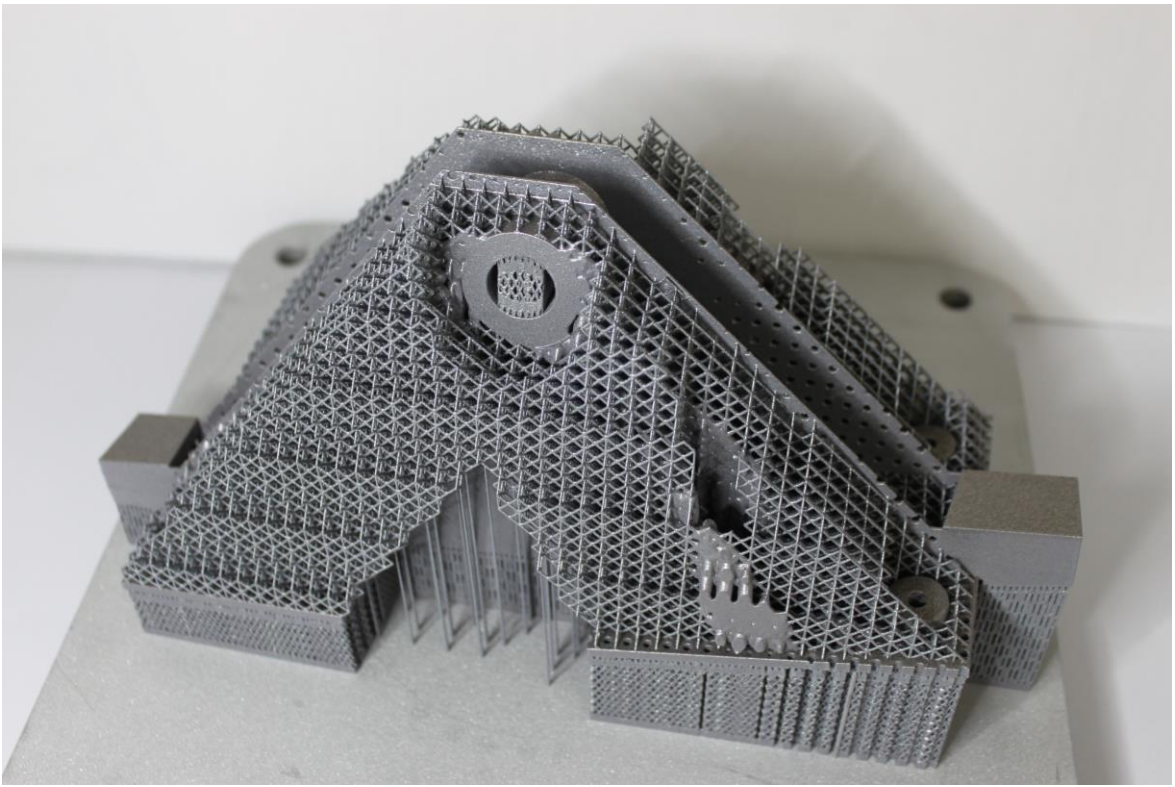
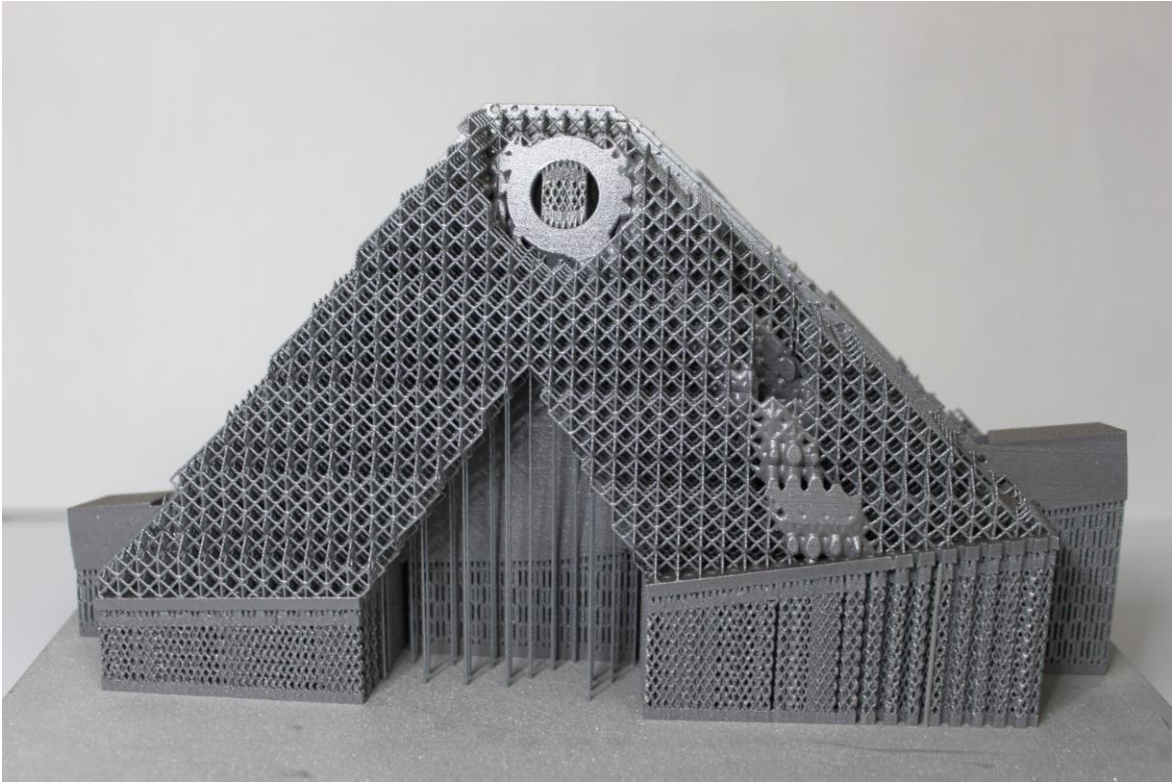


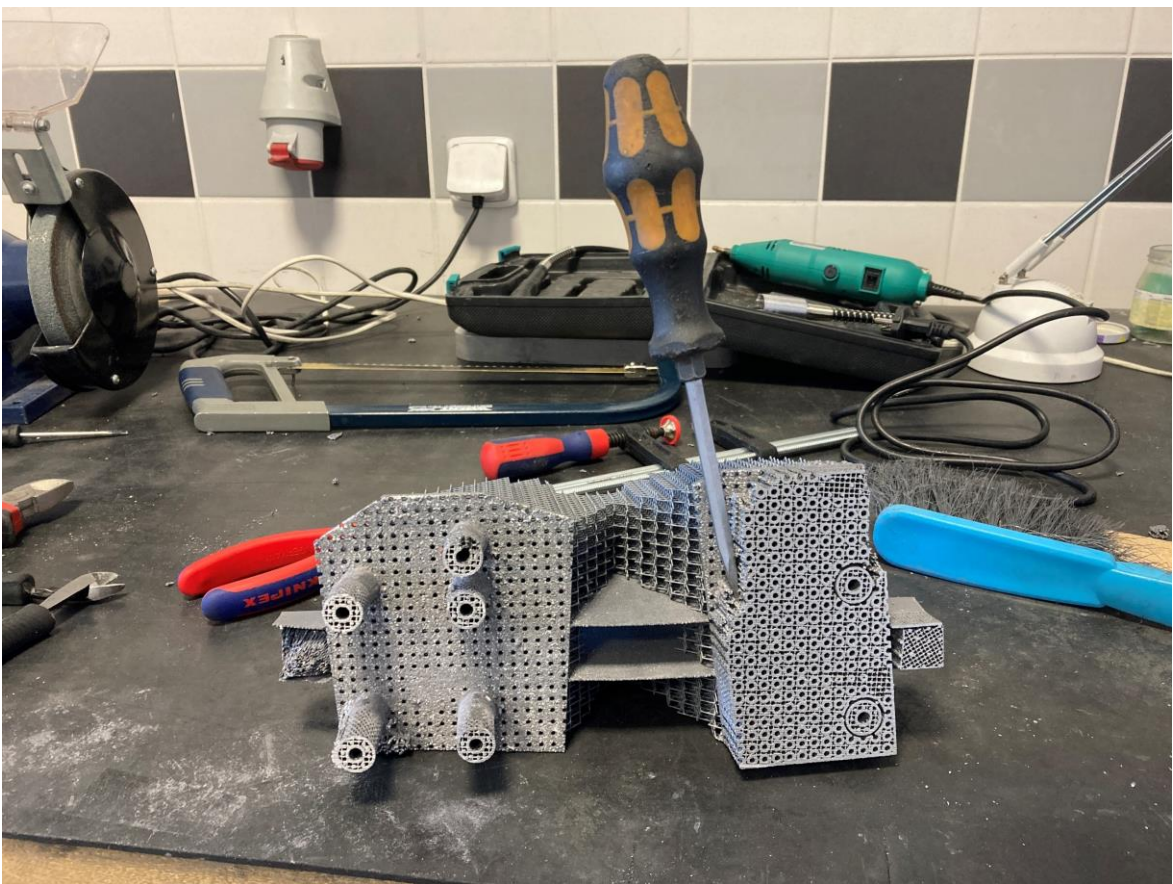
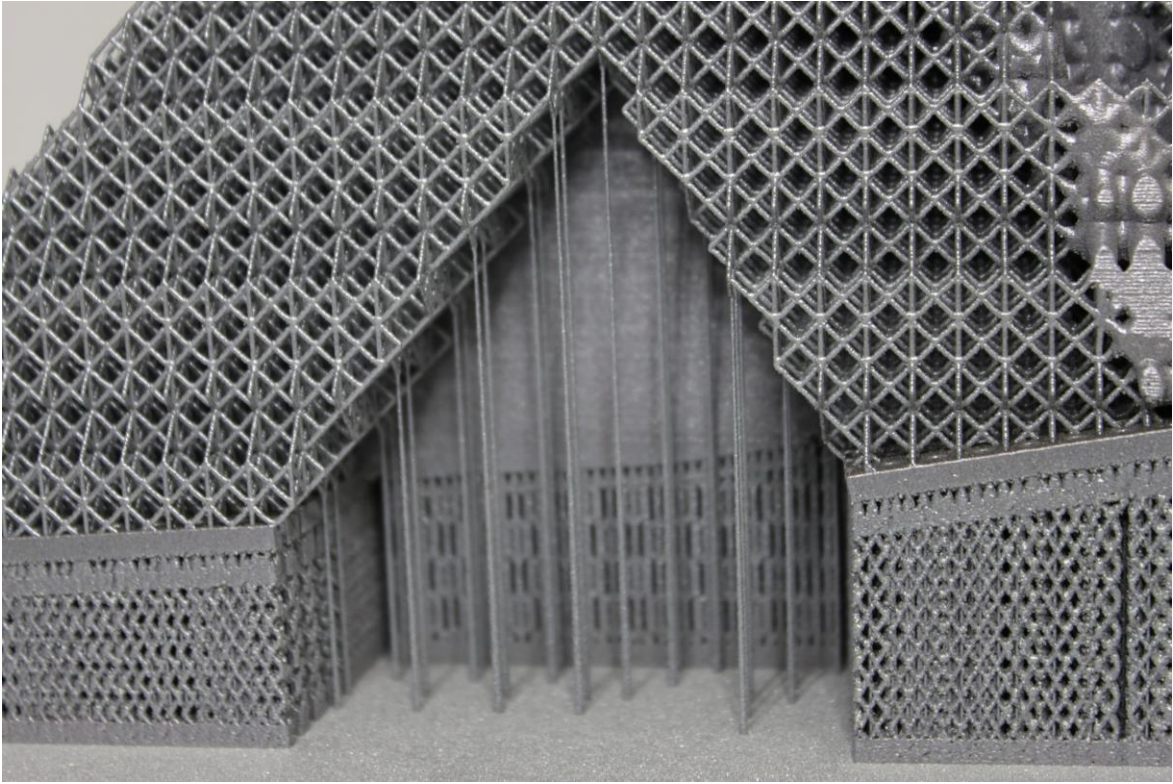


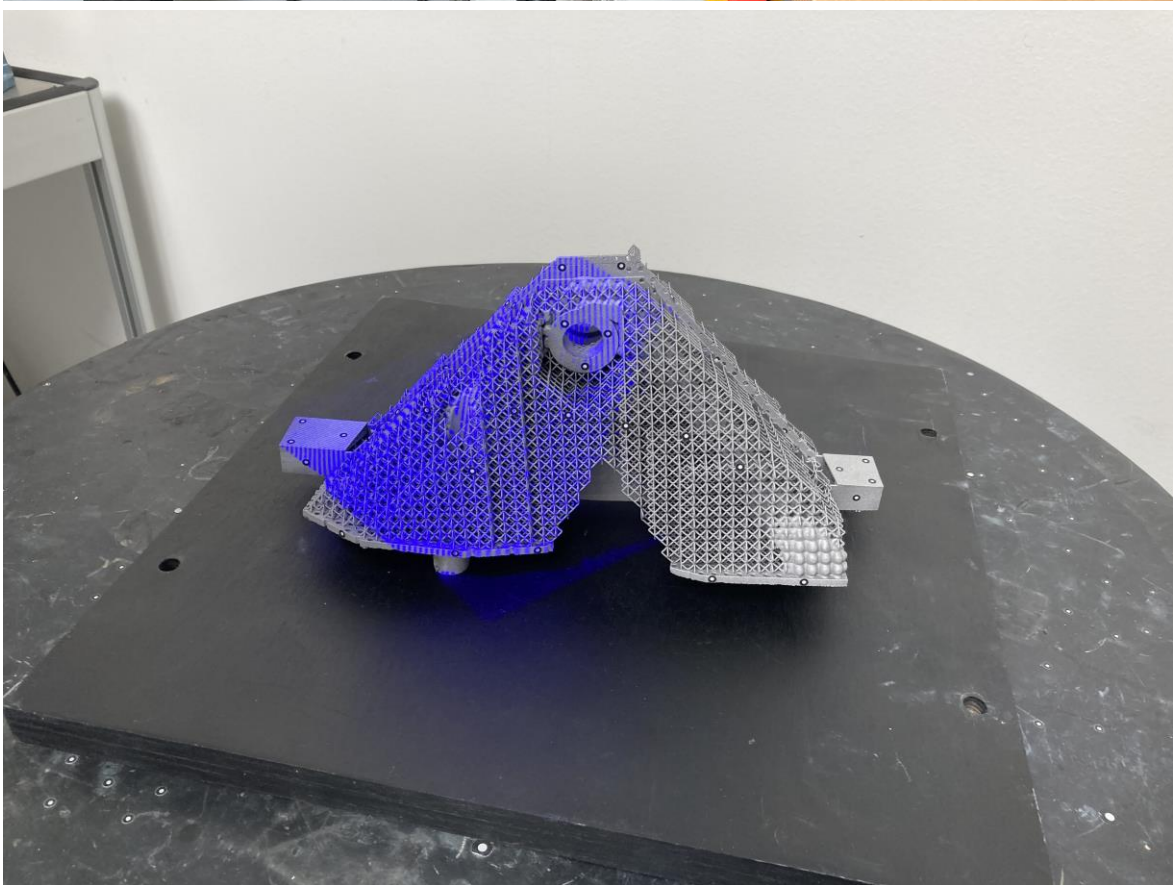
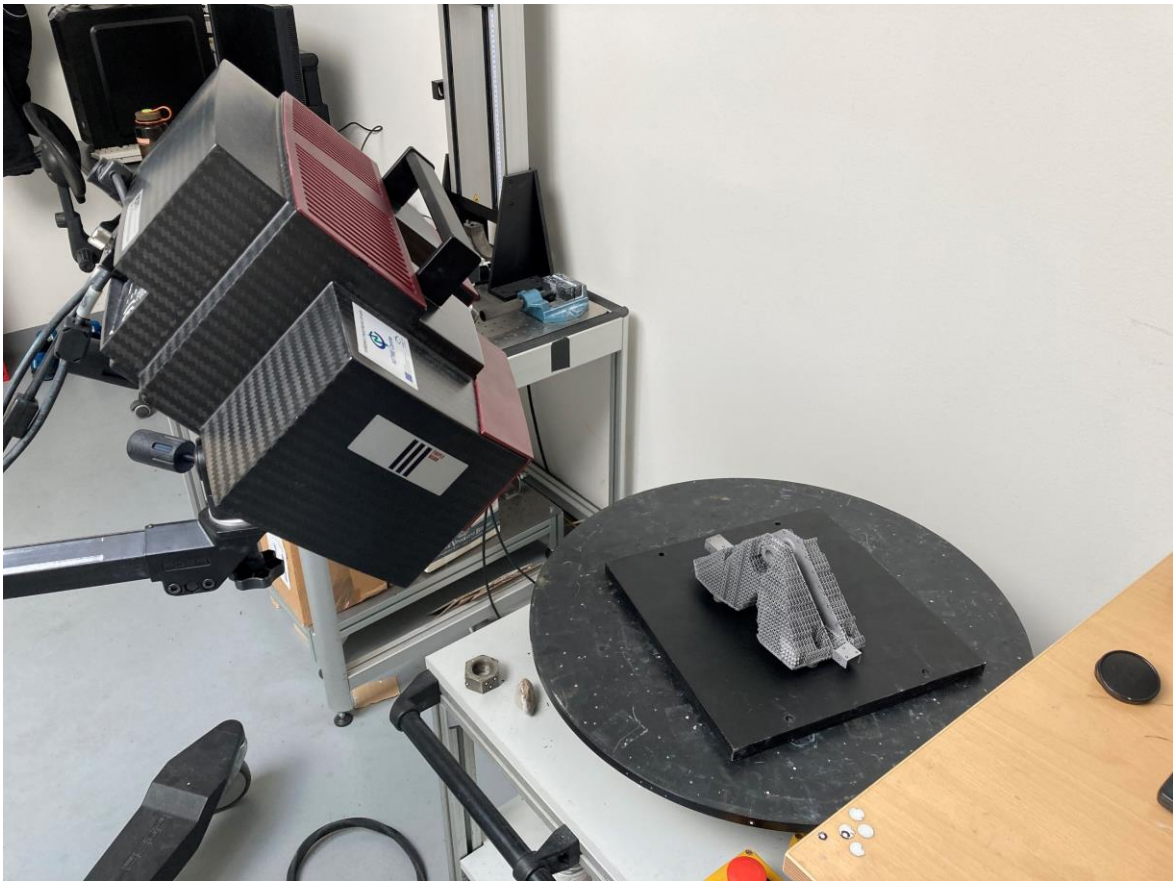


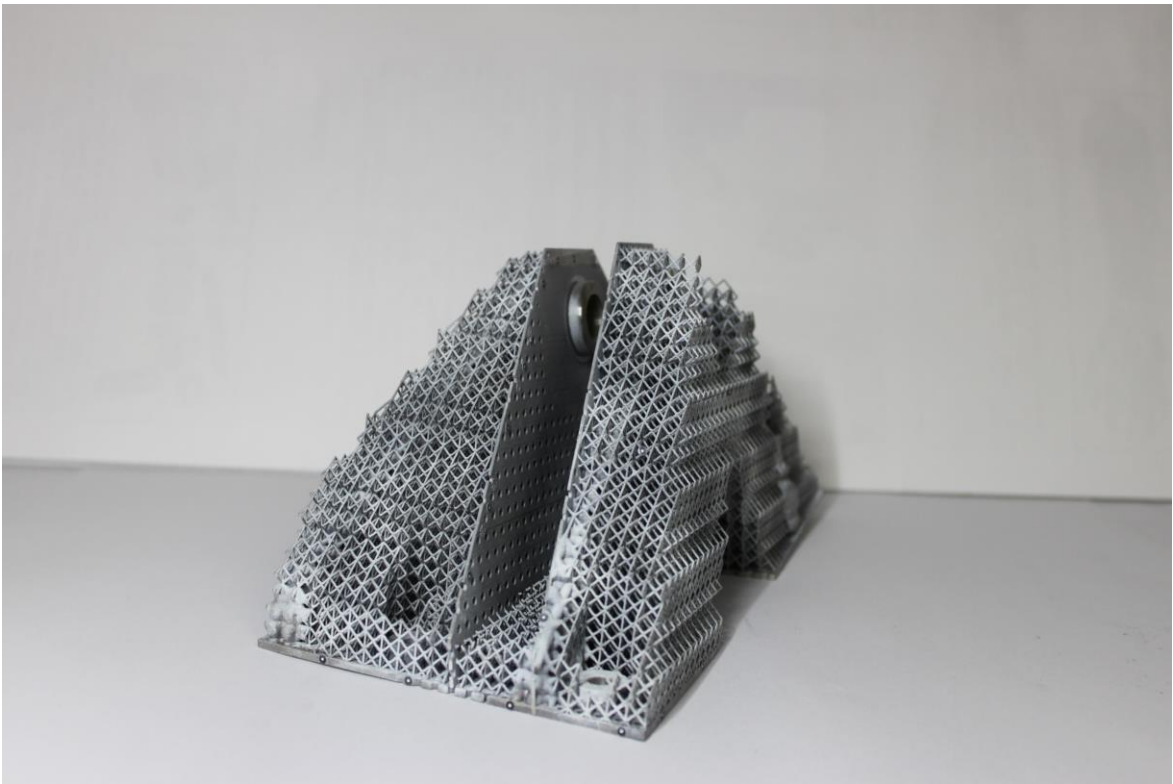
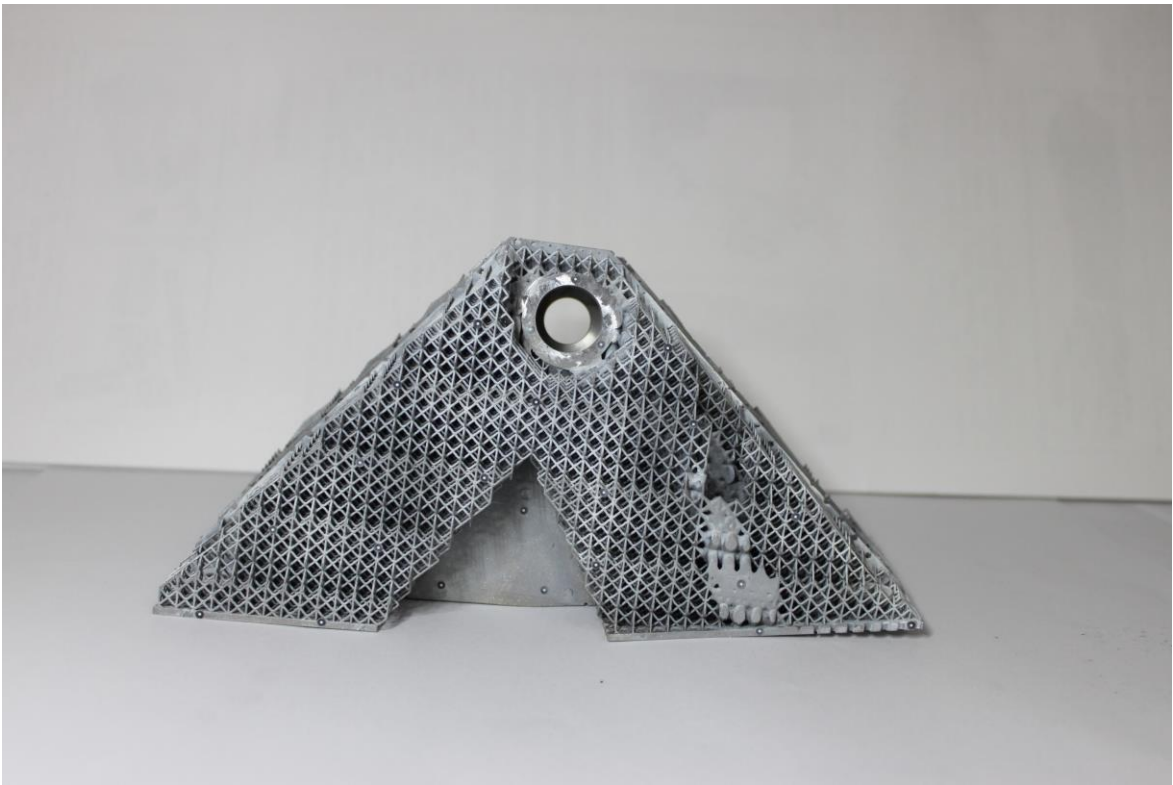


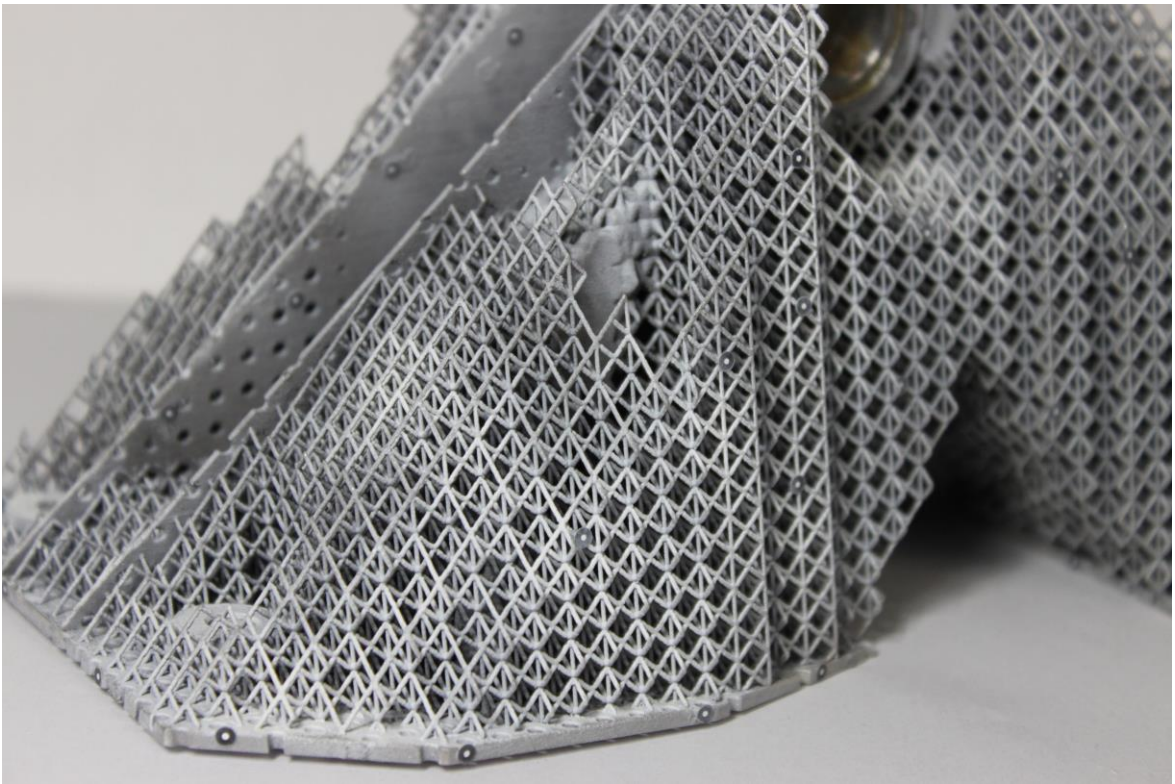
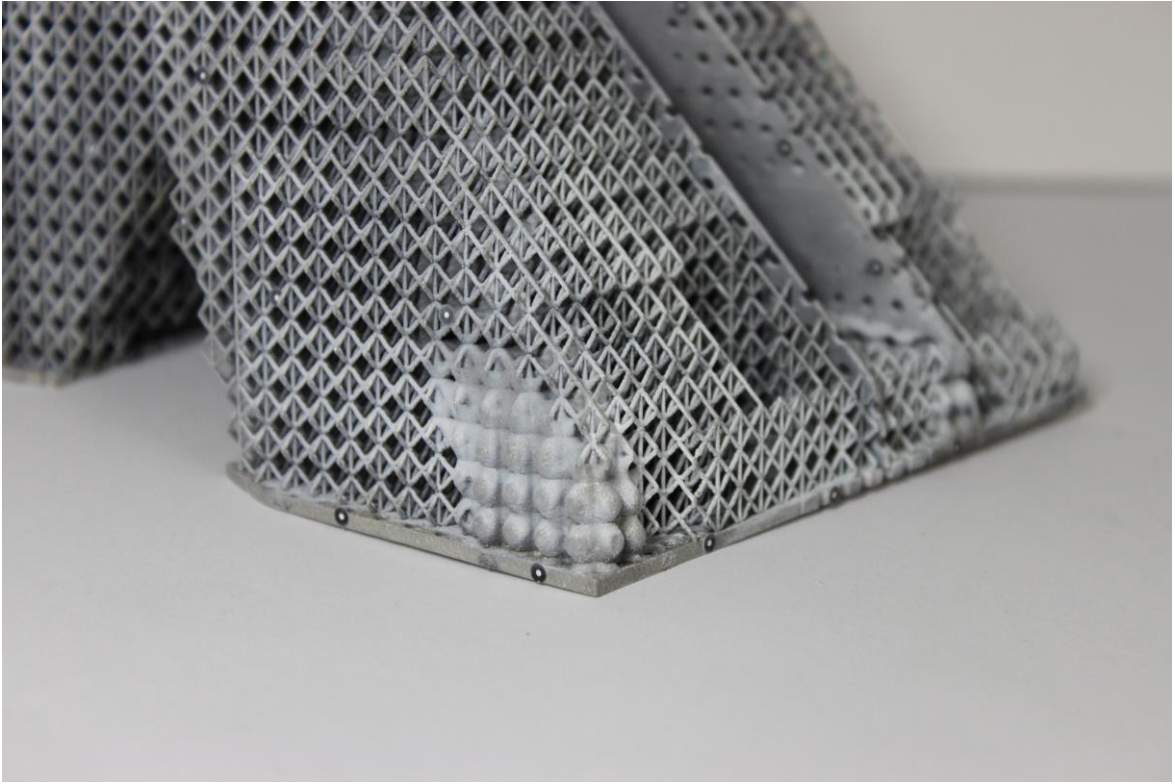


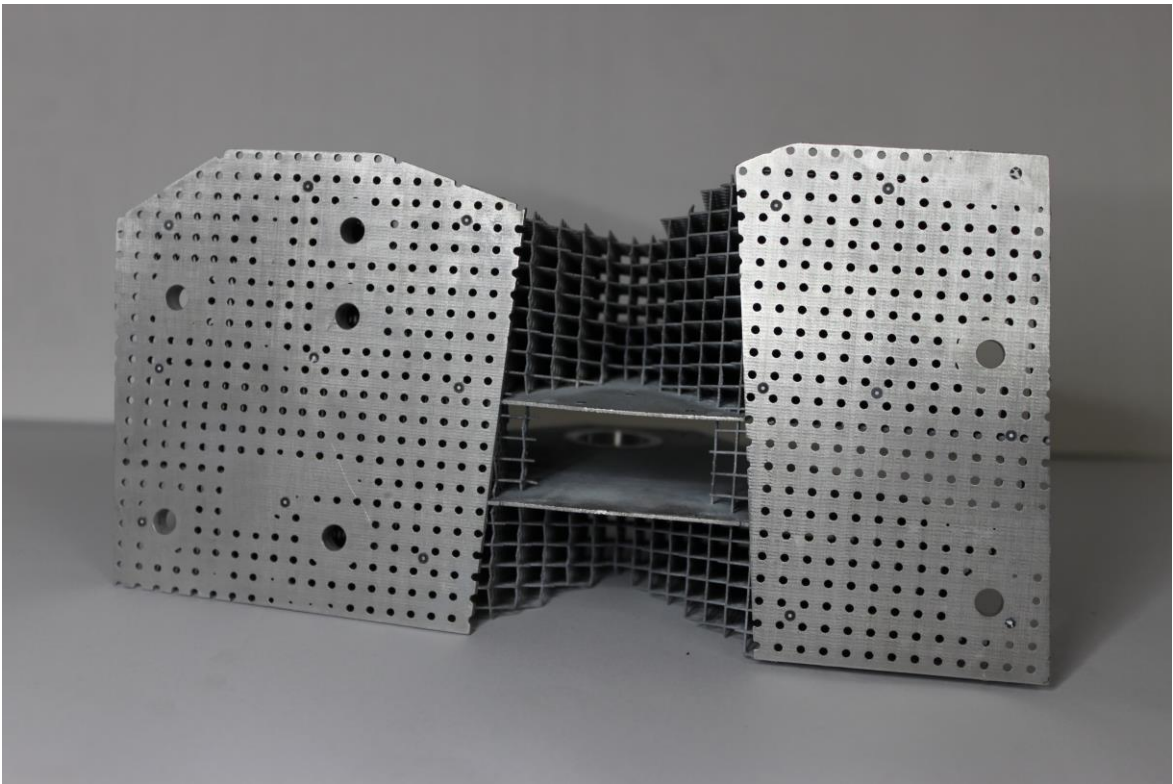
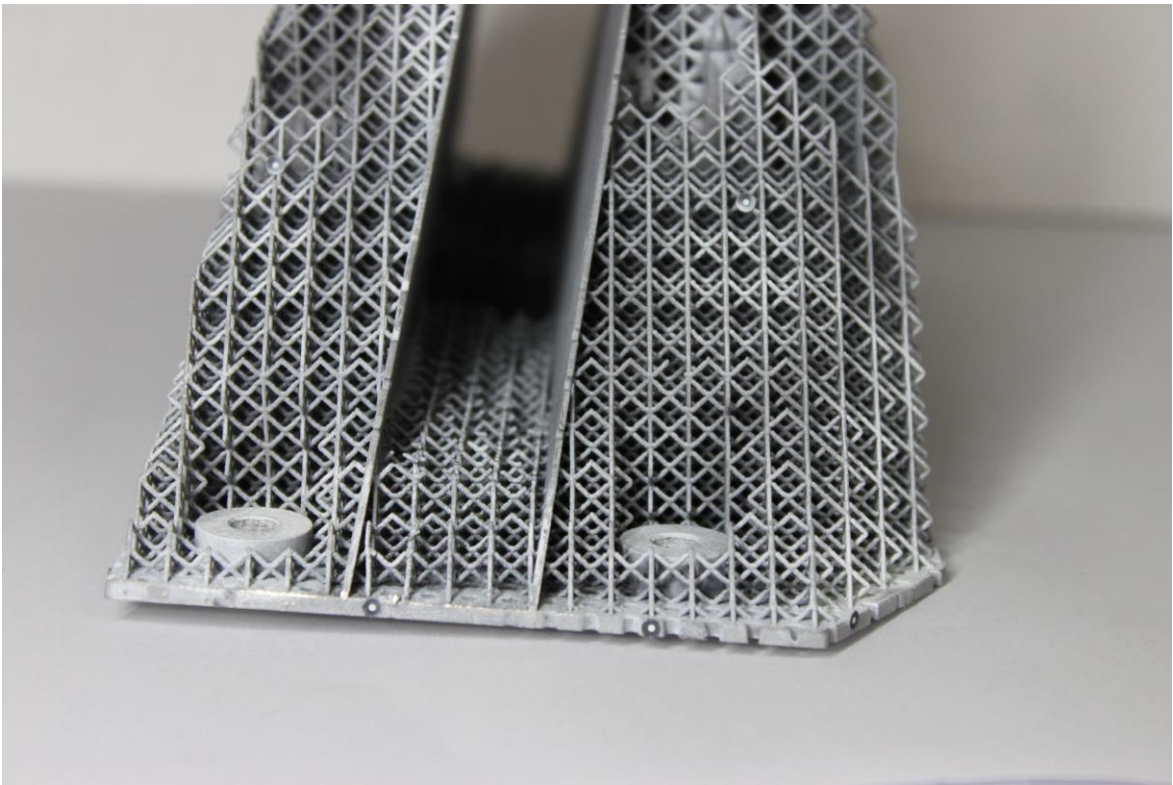


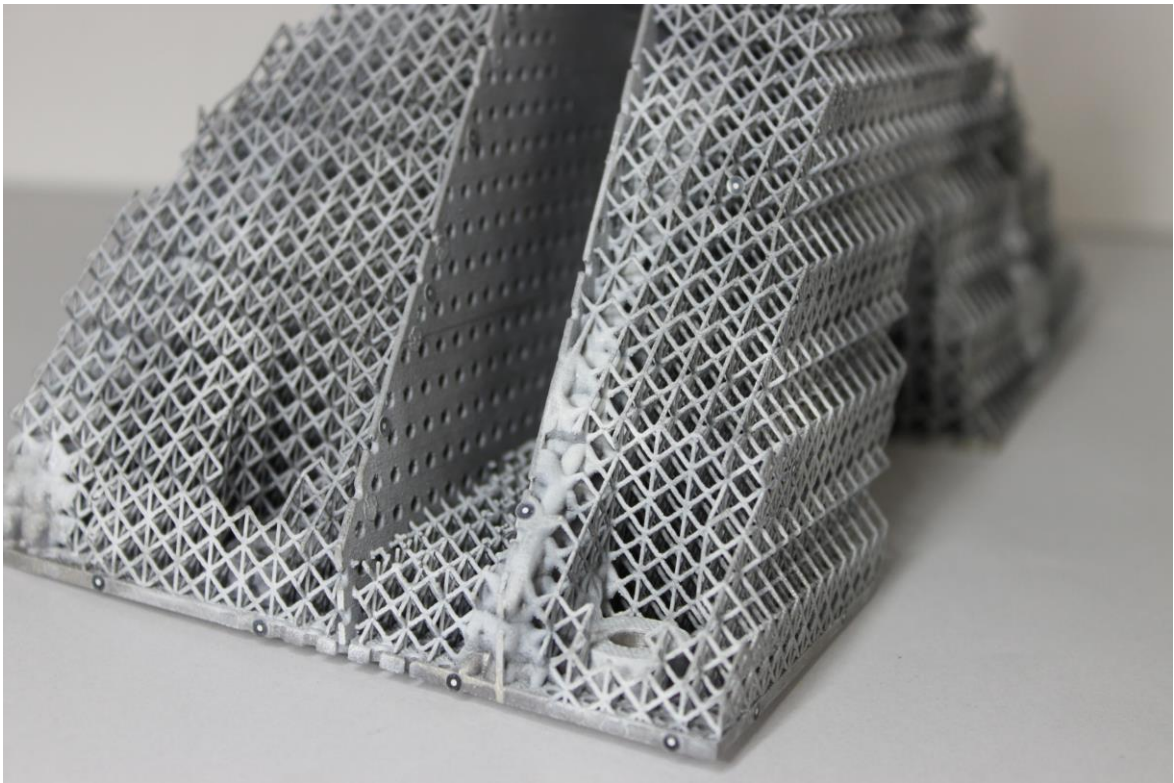












G Výkresová dokumentacia

- Výrobný výkres: LSTO-001.pdf – priložené samostatne