



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**SYSTÉM VELKOROZMĚROVÉHO 3D TISKU PRODUKTŮ Z
PRUTOVÝCH STRUKTUR**

SYSTEM OF LARGE-SCALE 3D PRINTING OF PRODUCTS FROM BAR STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Vašátko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Škaroupka, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Marek Vašátko
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. David Škaroupka, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Systém velkorozměrového 3D tisku produktů z prutových struktur

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměřuje na výrobní strategie 3D tisku prostorových prutů. 3D tisk prutových struktur může výrazně snížit hmotnost dílu a zkrátit výrobní čas. Pruty jsou tisknuty do prostoru díky aktivnímu chlazení nánosů, takže v místě spojů zřídka dochází k difuznímu spojení materiálu. Problematická je i měnící se velikost průřezu prutu a nepřesnost geometrie tisknutého vzoru. To vše má zásadní vliv na schopnost dílu plnit svou funkci. Náplní práce je návrh systému aditivní robotické výroby a experimentální vývoj součástí z prutových struktur vyrobitelné technologií 3D tisku 6-osým robotickým ramenem. Podstatou je návrh výpočtového modelu mechanických vlastností a jeho přesnost prokázaná experimentálně vyrobenými modely.

Typ práce: vývojová experimentální
Výstup práce: funkční vzorek (G-funk)
Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Navrhnout systém robotické aditivní výroby prutových struktur z termoplastů. Pomocí něj vyrobit a experimentálně ověřit parametry dílů s prutovou výplní (BCC, Oktet), a ověřit jejich vlastnosti pomocí zkoušky pevnosti v tlaku.

Dílčí cíle diplomové práce:

- návrh geometrie vzorku (generativní design, MKP),
- identifikovat kritické stavy geometrie (náklon a délka prutu) a procesních parametrů (rychlost extruze, teplota),
- návrh úprav konstrukce 3D tiskové hlavy typu FFF,
- návrh experimentálního měření, příprava tiskových drah: 3D tisk a validace mechanickými zkouškami,
- vyhodnocení vlastností navrženého systému a interpretace dosažených výsledků.

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

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

LIU, Shuting, Yingguang LI a Nanya LI. A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures. *Materials & Design*. 2018, roč. 137, s. 235–244. ISSN 02641275.

TYMRAK, B.M., M. KREIGER a J.M. PEARCE. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*. 2014, (58), 242–246. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>

DE GUEVARA, Manuel Ladron, Luis BORUNDA, Jeremy FICCA, Daragh BYRNE a Ramesh KRISHNAMURTI. Robotic free-oriented additive manufacturing technique for thermoplastic lattice and cellular structures. *Intelligent and Informed - Proceedings of the 24th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA 2019*. 2019, roč. 2, s. 333–342.

BOYD, Robert Platt, Christopher WELLER, Anthony DISANTO, Melody REES a Bruce HILBERT. Cellular Fabrication and Apparatus for Additive Manufacturing. 2017, roč. US2017, č. 19.

HELM, Volker, Jan WILLMANN, Andreas THOMA, Luka PIŠKOREC, Norman HACK, Fabio GRAMAZIO a Matthias KOHLER. Iridescence Print: Robotically Printed Lightweight Mesh Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2015, roč. 2, č. 3, s. 117–122. ISSN 23297670.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem systému na výrobu prutových prostorových struktur z polymerních materiálů tisknutých pomocí robotického ramena. Cílem práce je obecně navrhnout vhodný výrobní systém a experimentálně ověřit výrobu produktů na současné podobě systému. Pomocí tlakových testů zjistit únosnost vyrobených prutových struktur a porovnat ji s výpočtním modelem ideální geometrie. Byly obecně navrženy části výrobního systému a provedeno experimentální měření tlakových zkoušek na vyrobených vzorcích struktur. Byly získány první výsledky tlakových zkoušek takto vyrobených struktur pro dvě topologie buněk. Přesnost mezi experimenty a výpočtním modelem je porovnatelná s výsledky současné literatury. V oblastech opakovatelnosti získaných hodnot zatížení bylo dosaženo lepších výsledků. Systém je kombinací HW a SW řešení zajišťující 3D tisk velkorozměrových prutových struktur pro velkorozměrové objemové díly a představuje inkrementální vylepšení dílčích vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, prutové struktury, KUKA robot, mechanické vlastnosti, výrobní systém

ABSTRACT

This thesis deals with the design of a system for the production of lattice spatial structures from polymer materials printed by a robotic arm. The aim of the thesis is to design a suitable manufacturing system in general and to experimentally verify the production of products on the current form of the system. Using compression tests to determine the load carrying capacity of the fabricated lattice structures and compare it with a computational model of the ideal geometry. In general, the parts of the manufacturing system were designed and experimental measurements of compression tests on fabricated specimen structures were carried out. The first results of compression tests of such fabricated structures for two cell topologies were obtained. The accuracy between the experiments and the computational model is comparable to the results in the current literature. Better results were obtained in the areas of repeatability of the obtained load values. The system is a combination of HW and SW solutions providing 3D printing of large-scale lattice structures for large volume parts and represents an incremental improvement of partial properties.

KEYWORDS

3D printing, lattice structures, KUKA robot, mechanical properties, manufacturing system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAŠÁTKO, Marek. *Systém velkorozměrového 3D tisku produktů z prutových struktur*. Brno, 2022, 103 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. David Škaroupka, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidu Škaroupkovi, Ph.D. za cenné rady a ochotu v průběhu vypracovávání této diplomové práce. Rád bych poděkoval také Ing. Petru Krivohlavému a Ing. Petru Krejčíříkovi za vstřícný přístup a pomoc v laboratoři robotické aditivní výroby. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Krčmovi za pomoc při zpracovávání výrobních skriptů.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Škaroupky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

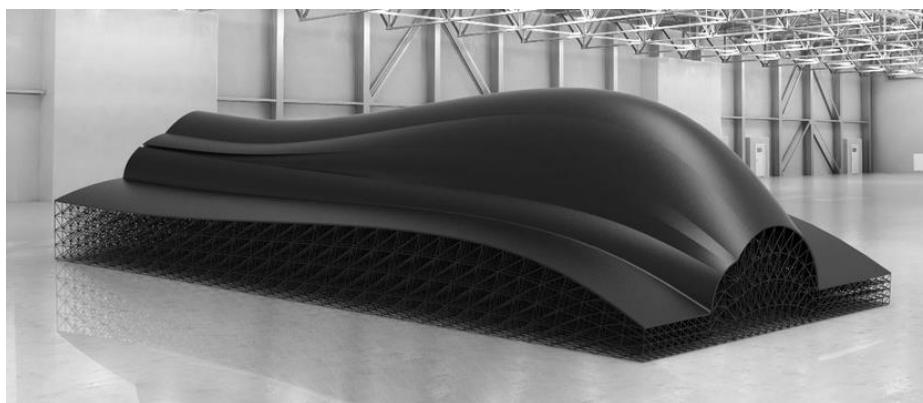
1	ÚVOD	16
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	18
2.1	Rešeršní metody	18
2.1.1	Přehled informačních zdrojů	18
2.1.2	Analýza dat	18
2.1.3	Sumarizace informačních zdrojů	19
2.1.4	Charakteristika zdrojů	19
2.2	Rešerše na stav techniky	20
2.2.1	Prutové struktury	20
2.2.2	FFF technologie	21
2.2.3	Propojení vláken	22
2.2.4	Tisk prutů do prostoru	22
2.2.5	Materiály pro 3D tisk	25
2.2.6	Tam	28
2.2.7	Liu	29
2.2.8	Syam	30
2.2.9	Eichenhofer	31
2.2.10	Wang	33
2.2.11	De Guevara	34
2.2.12	AI build	35
2.2.13	Branch technology	35
2.2.14	Latture	37
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	38
2.4	Identifikace novosti a příležitosti.	39
3	CÍLE PRÁCE	41
3.1	Vymezení problému	41
3.1.1	Název a druh produktu	41
3.1.2	Zákazník	41
3.1.3	Spotřebitel	41
3.1.4	Charakteristika problému	42
3.2	Cíle vývoje	43
3.2.1	Globální cíl	43
3.2.2	Dílčí cíle	43
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	44

4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	44
4.1.1	Analýza cílů	44
4.1.2	Specifikace omezení	45
4.1.3	Technická funkční analýza	46
4.2	Návrh alternativních řešení	47
4.3	Analýza alternativního řešení a výběr nejlepšího	48
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	50
5.1	Návrh experimentu	50
5.2	Použitá zařízení	52
5.2.1	Tisková hlava	52
5.2.2	Robotické rameno	53
5.2.3	ATOS 3D sken	54
5.2.4	Siloměr	54
5.3	Použitý materiál	55
5.4	MKP analýza	56
5.5	Návrh výrobního algoritmu	58
5.6	Odhad výrobních nákladů a výroby	59
6	DETAILNÍ NÁVRH	60
6.1	Tisk prostorových struktur	60
6.1.1	Parametry tisku	60
6.1.2	Výrobní strategie	61
6.1.3	Způsob napojení prutů	63
6.1.4	Korekce geometrie	65
6.1.5	Přesnost tisku	67
6.2	Výrobní algoritmus	68
6.2.1	První algoritmus	68
6.2.2	Druhý algoritmus	70
6.2.3	Třetí výrobní algoritmus	73
6.3	Tlakové testy prutových struktur	74
6.3.1	BCC topologie	75
6.3.2	Oktetová topologie	82
6.4	Konstrukční úpravy tiskové hlavy	87
6.5	Hodnocení parametrů	89

7	ZÁVĚR	93
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	94
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	95
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	98
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	99
12	SEZNAM TABULEK	102
13	SEZNAM PŘÍLOH	103

1 ÚVOD

Prostorové struktury vynikají svými mechanickými vlastnostmi kombinovanými s jejich nízkou hmotností. Podle topologie je možné prostorové struktury použít na aplikace vyžadující vysoké únosnosti nebo absorpci energie. V průmyslové oblasti se využívají struktury často jako soustava prutů tvořící buňky o určité topologii, které jsou pravidelně rozmístěné v prostoru. Aplikace prostorových struktur můžeme nalézt například v automobilovém a leteckém průmyslu, ale i ve stavebnictví a architektuře. Jejich využití je možné i při velkorozměrových aplikacích jako vyplnění prostoru s úsporou materiálu. Pro výrobu struktur je používáno různých druhů materiálů, podle požadavků aplikace.

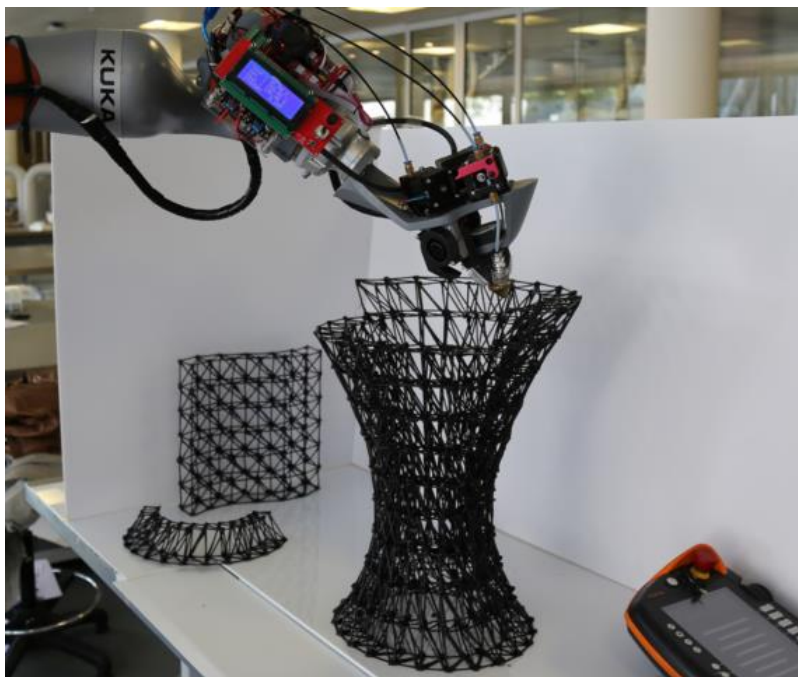


Obr. 1-1 Použití velkorozměrových struktur jako výplň formy [25].

Rostoucí popularita použití prostorových struktur z polymerních materiálů v poslední době je následkem usnadnění jejich výroby pomocí 3D tisku. Pomocí konvenčních technologií jsou tyto struktury velice obtížně vyrobitelné. Snahou je docílit co nejefektivnějšího procesu výroby a tím pádem tisknout co nejrychleji a s maximální úsporou materiálu, při zachování všech funkčních vlastností produktu. 3D tisk nabízí širokou škálu materiálů a technologií použitelnou pro výrobu. Velkorozměrové prostorové struktury z polymerních materiálů se nejčastěji tisknou technologií FFF (Fused Filament Fabrication). Tuto technologii je možné kombinovat s použitím robotického ramena jako manipulátoru. Vznikla tak technologie, při které jsou tisknuty pruty přímo do prostoru a vytlačený materiál je co nejrychleji chlazen, čímž je tvořena samonosná struktura. Rozsah robotického ramena zajišťuje velký pracovní prostor a velkou míru naklápění tiskové hlavy.

S prutovými prostorovými strukturami se velice silně pojí jejich mechanické vlastnosti. U vyrobených struktur touto technologií téměř neexistuje jednotný postup výroby a procesních parametrů, stejně tak jako informace o jejich mechanických vlastnostech. Cílem je přinést do této oblasti více informací o možnosti zatěžování a chování takto vyrobených struktur. Tento postup je klíčový pro zhodnocení a posunutí této technologie do náročnějších aplikací v průmyslovém odvětví.

Cílem je navrhnout obecný výrobní systém schopný výroby produktů z prutových struktur. Ověřit funkce současné konfigurace výrobního systému na experimentálním tisku spolu s návrhem vhodných efektivních procesních parametrů při zachování co nejlepší přesnosti výroby. Dále na vyrobených produktech provést tlakové testy ke zjištění zatížení, jakého jsou tyto struktury schopné přenést v porovnání s výpočtovým modelem s použitou ideální geometrií. Výpočetní model tvoří teoretické maximum potenciálu mechanických vlastností velkorozměrových struktur z polymerních materiálů.



Obr. 1-2 Prostorový tisk polymerních prutů [1].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

2.1.1 Přehled informačních zdrojů

V rámci zahrnutí celé oblasti zkoušek a výrobních systémů prutových struktur byl vytvořen rešeršní požadavek pro použití v databázi Scopus. Po obdržení velmi nízkého počtu výsledků hledání byla zahrnuta také databáze Google Scholar, která nabídla mnohem více nalezených prací. Nevýhodou této databáze je obtížná redukce počtu výsledků a velké množství z nalezených výsledků je silně nerelevantních vzhledem k zadanému rešeršnímu dotazu.

První část vyhledávání pokrývala robotickou aditivní výrobu se strukturálními zkouškami struktur. U každého tématu byly vybrány klíčová slova a jejich synonyma. Postupným vyhlazováním dotazů docházelo k redukci počtu vyhledaných článků na jednotky až desítky výsledků. Výsledná podoba prvního rešeršního dotazu je na Obr. 2-1, kde první dvě závorky obsahují klíčová slova pro použitou výrobní metodu. Následují klíčová slova pro oblast prutových struktur a synonyma pro oblast strukturálního zatěžování a testů. Na závěr je definován použitý materiál, který má velký vliv na počet získaných výsledků odstraněním studií o kovových materiálech.

*((3d AND truss) OR (spatial AND extrusion)) AND
(lattice OR cellular OR mesh) AND (load OR strength
OR structural) AND thermoplastics)*

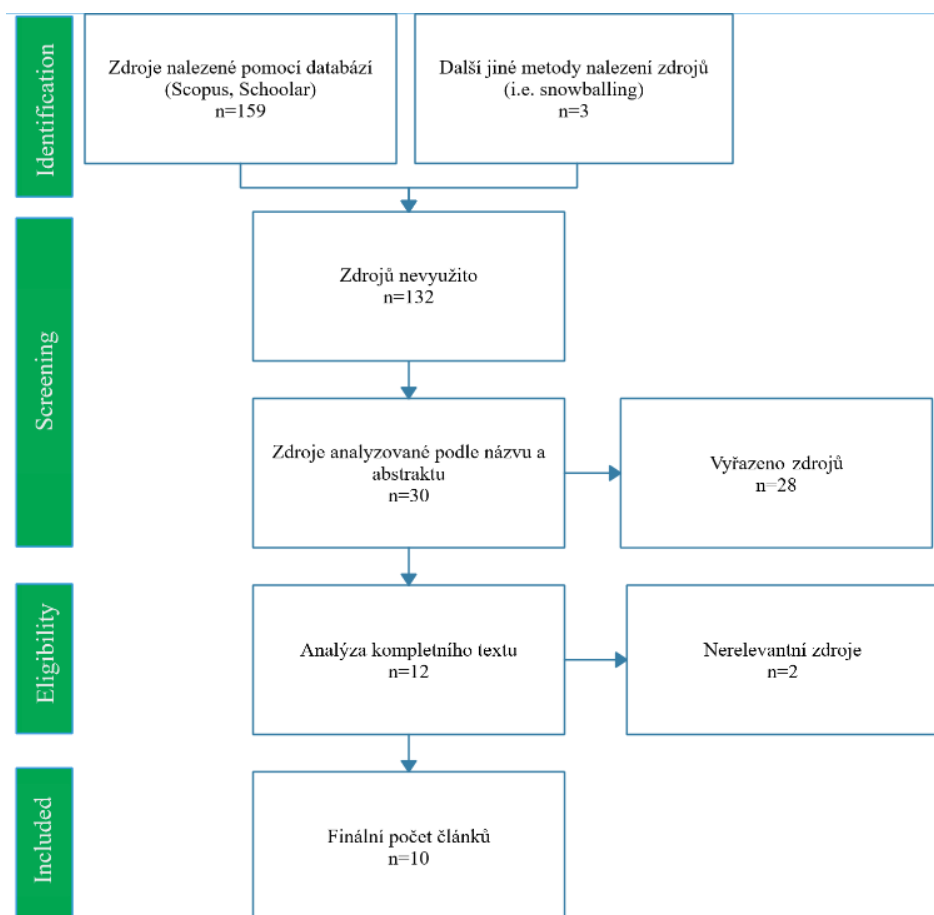
Obr. 2-1 Rešeršní dotaz

Dotaz byl pak ještě následně lehce upraven pro databázi Scholar aby došlo k redukci počtu výsledků. Počet výsledků byl pro databázi scopus 7 publikací a pro Scholar 135. Pomocí průzkumu zdrojů uvedených v nalezených publikacích bylo získáno několik dalších publikací zabývajících se geometrií a chováním prutových struktur při různém druhu zatížení a použitými systémy na výrobu struktur.

2.1.2 Analýza dat

Po nalezení a redukci výsledků byl u zbylých publikací prozkoumán abstrakt pro vybrání nejrelevantnějších zdrojů. Výsledný počet publikací ze všech dříve zmíněných částí byl 10, z nichž největší část zahrnuje výroba a testování prutových struktur. V konečném rozboru těchto 10 článků se vybíraly stěžejní části pro zahrnutí do rešerše a informace podstatné pro

diplomovou práci. V této fázi byly dvě publikace zaměněny z důvodu málo přínosného obsahu, který z abstraktu nebyl patrný. Schéma výběru je shrnuto na Obr. 2-2.



Obr. 2-2 vývojový PRISMA diagram

2.1.3 Sumarizace informačních zdrojů

Pro rozbor bylo vybráno deset informačních zdrojů. Zahrnují osm článků z oblasti robotické aditivní výroby a strukturálního testování prutových struktur, dva články obsahují popis chování prutových struktur. Všechny publikace jsou psány v anglickém jazyce.

2.1.4 Charakteristika zdrojů

Z grafu na Obr. 2-3 je patrné, že většina zdrojů jsou poměrně nově vydané publikace v posledních letech. Zdroje obsahují převážně výzkumné články jejichž počet je devět a jednu rešeršní práci, shrnující poznatky o mechanických vlastnostech prutových struktur.

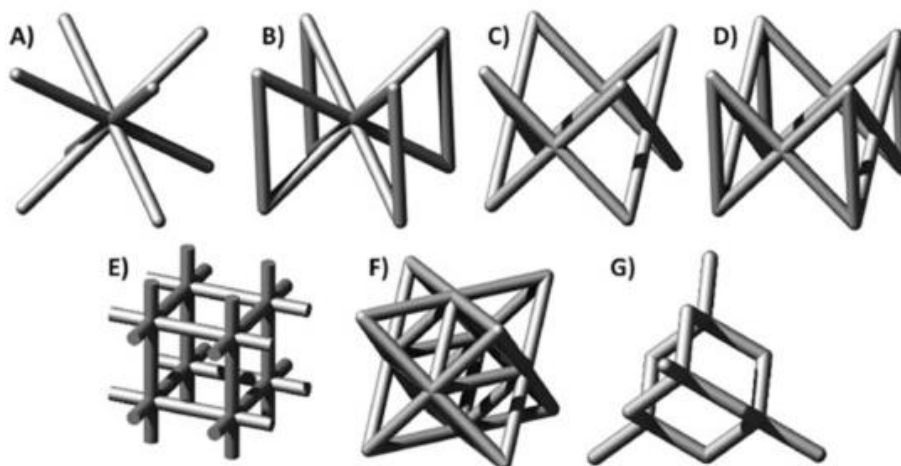


Obr. 2-3 Datum vydání publikací

2.2 Rešerše na stav techniky

2.2.1 Prutové struktury

Prutové struktury napodobují svým tvarem přírodní buněčné materiály jako dřevo, korek nebo kost. Spadají mezi ne-stochastické pravidelné struktury [2]. Díky své vysoké pevnosti a tuhosti jsou vhodné v mnoha konstrukčních aplikacích, zejména tam, kde se klade důraz na redukci hmotnosti. Užitečnou aplikací je také schopnost pohlcování energie. Prutové struktury jsou tvořeny pravidelnými opakujícími se buňkami ve všech směrech struktury. Existuje široká škála topologií buněk, jejichž vlastnosti jsou popsány v literatuře [2]. Nejběžnějšími prutovými topologiemi jsou prostorově středěná kubická mřížka (BCC), plošně středěná kubická mřížka (FCC) a jejich další varianty (BCCZ, FCCZ). Tyto mřížky jsou odvozené z krystalických struktur. Další často používané topologie jsou kubická, oktetová příhradová (octet-truss) a diamantová. Topologie prutových struktur lze rozdělit na základě jejich mechanické odezvy v prutech na dominantní působení ohybu a dominantní působení osového zatížení [3]. Mez pevnosti prutových struktur se stejnou relativní hustotou je mnohem vyšší při dominantním namáhání prutů tahem a tlakem než u struktur, kde dominuje namáhání ohybem. Struktury s dominantním namáháním prutů na tlak a tah jsou vzhledem k zatížení vzpěrem, a tím pádem vyšší únosnosti, vhodnější pro pevnostní aplikace. Struktury s dominantním působením ohybu na pruty jsou spíše vhodné pro aplikace k absorpci energie, díky jejich měkčí odezvě [4]. Nejpoužívanější struktury jsou znázorněny na Obr. 2-4.

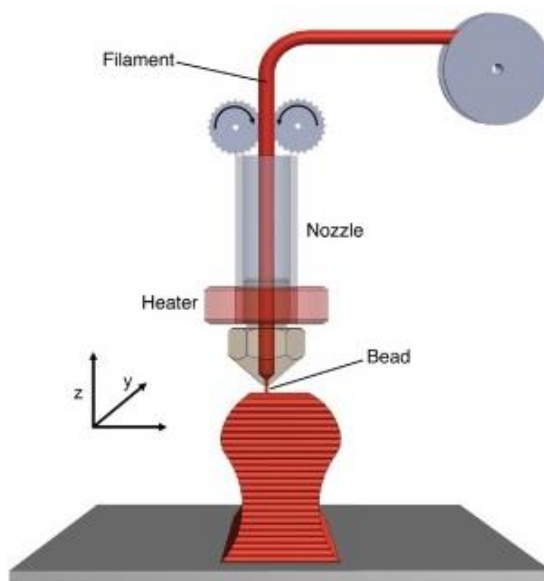


Obr. 2-4 Nejpoužívanější topologie buněk A) BCC, B) BCCZ, C) FCC, D) FCCZ, E) Cubic, F) Octet-truss, G) Diamond [3]

2.2.2 FFF technologie

FFF neboli Fused Filament Fabrication je nerozšířenější technologie aditivní výroby. Často se označuje také pod obchodním názvem FDM (Fused Deposition Modeling). Díky své nízké ceně a tím dobré dostupnosti je její využití rozšířeno mezi veřejnost, ale také průmysl. Nejčastějším materiálem pro tisk touto metodou jsou polymery [5].

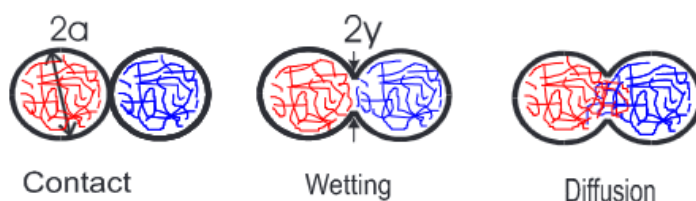
Schéma procesu výroby technologií FFF je na Obr. 2-5. Polymerní vlákno je taveno v zahřáté části extruderu a skrz trysku vytlačeno. Pomocí vytlačeného materiálu je nanášena vrstva, která následně chladne, až dojde ke ztuhnutí. Postupným nanášením jednotlivých vrstev vznikne tištěná součást. Pro kvalitní tisk a propojení vrstev je důležité nastavit vhodné parametry jako rychlost tisku, teplotu materiálu a rychlost extruze [5].



Obr. 2-5 Schéma technologie FFF [5]

2.2.3 Propojení vláken

Při tisku prutových struktur je jednou ze zásadních částí pevné spojení vláken v uzlech. Nejlepším možným propojením vláken je difuzní způsob (Obr. 2-6 vpravo). Ve spoji musí být dostatečně velká tepelná energie po dostatečnou dobu, aby již vytištěný materiál překonal teplotu skelného přechodu. Poté dojde k vzájemné difuzi polymerních řetězců mezi novým a již vytištěným vláknem. Takto vytvořený spoj má nejvyšší pevnost. Pokud je ve spoji nižší teplota, dojde k menší difuzi řetězců (Obr. 2-6 uprostřed). Propojení vláken tak není dostatečné a vytvořený spoj bude mít nižší mechanické vlastnosti. Pokud je teplota ve spoji příliš nízká, vznikne mezi vlákny pouze kontakt bez jakéhokoliv propojení řetězců, který nedosahuje žádných mechanických vlastností (Obr. 2-6 vlevo) [6].

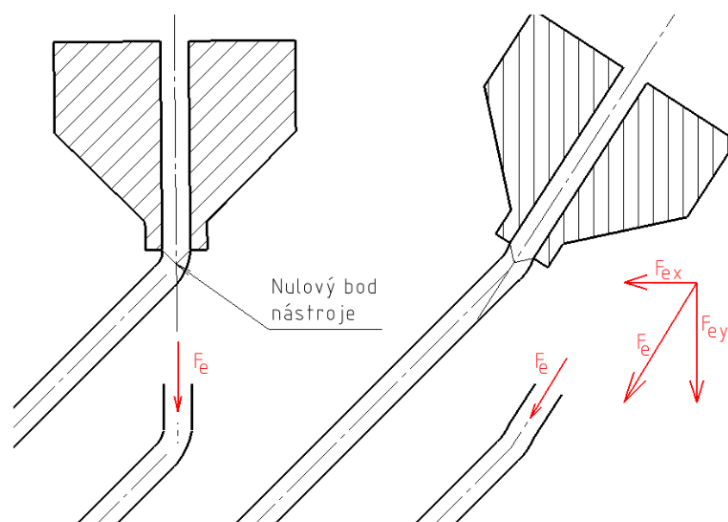


Obr. 2-6 Schéma typů spojení mezi vlákny materiálu [6]

2.2.4 Tisk prutů do prostoru

Vliv naklopení tiskové hlavy

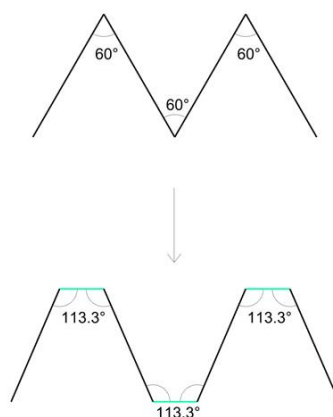
Vlivem naklopení tiskové hlavy, podobně jako v kapitole o silovém působení při tisku, došlo k významnému zlepšení přesnosti a tisknutelnosti prostorových prutů. V práci [7] Křivohlavý ukázal, že naklopení tiskové hlavy mělo největší vliv na přesnost tištěných prutů, ze všech zkoumaných parametrů. Jak je vidět na Obr. 2-7, při naklopení tiskové hlavy se mění rozložení silového působení síly extruze F_e , která vzniká při vytlačování materiálu z trysky. Při svislé poloze hlavy se síla extruze sčítá s gravitační silou a po dochází tak k posunutí tištěného materiálu. V případě naklopení hlavy u stoupajících prutů se svislá složka silového působení zmenšuje a zvětšená vodorovná složka sil vrací prut zpět do správné polohy. U klesajících prutů je zase odchylka způsobená především kolizí tištěného prutu s hranou trysky tiskové hlavy. Dalším pravděpodobným vlivem může být účinnější chlazení materiálu po naklopení hlavy díky lepšímu přísunu vzduchu. Velikost naklopení se označuje od 0 do 100 % z důvodu použití u různých úhlů prutů, kde 0 % značí svislou polohu tiskové hlavy a 100 % značí naklopení 45° vůči podložce. Pro úhel prutu 50° byl nejlepší výsledek 70 % [7].



Obr. 2-7 Schéma vlivu natočení tiskové hlavy [7]

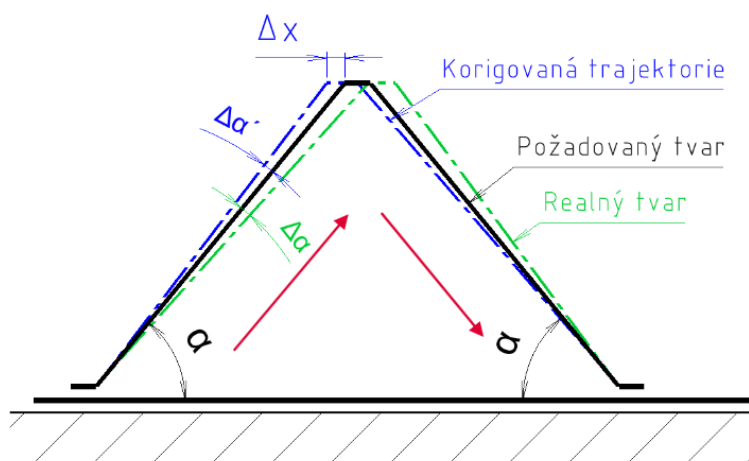
Korekce tiskové trajektorie

Při tisku prostorových prutů dochází u vytlačování materiálu po navržené trajektorii k výchytkám mezi požadovaným a reálným tvarem. Po dosažení vrcholu stoupajícího prutu by mělo dojít před zahájením tisku klesajícího prutu ke krátkému posunutí v horizontálním směru, jak je zobrazeno na Obr. 2-8. Zabráni se tak kolizi již vytištěného materiálu s tryskou tiskové hlavy [8].



Obr. 2-8 Úprava trajektorie ve vrcholech prutů [8]

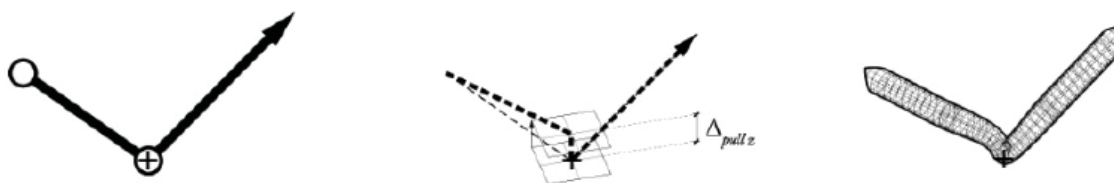
Při tisku stoupajících prutů také dochází k vychýlení tisknutého materiálu od požadovaného tvaru (Obr. 2-9). Horní základna lichoběžníku se nachází ve správné výšce, ale je posunutá vpravo ve směru tisku a tím dochází také ke zmenšení úhlu α prutu. Korekce spočívá v překlopení úhlu $\Delta\alpha$ na $\Delta\alpha'$, jak je zobrazeno na Obr. 2-9 a tím zvětšení úhlu stoupání prutu korigované trajektorie [7].



Obr. 2-9 Schéma vychýlení s navrženou korekcí [7]

Spoje

Základ pevnosti struktury tvoří spoje mezi jednotlivými pruty. Pro vytvoření spoje bylo v literatuře zkoumáno několik možných strategií. Hlavním cílem je vnesení dostatečného množství tepla do materiálu spoje, aby došlo k difuzi řetězců polymeru. V práci Tam [9] se nejvíce osvědčilo, v případě zakončení klesajícího prutu v místě spoje, vtlačení trysky do materiálu, jak je zobrazeno na Obr. 2-10. Vtlačená tryska měla tak dostatek času na prohřátí obou napojovaných vláken a vznikl tak pevný spoj.

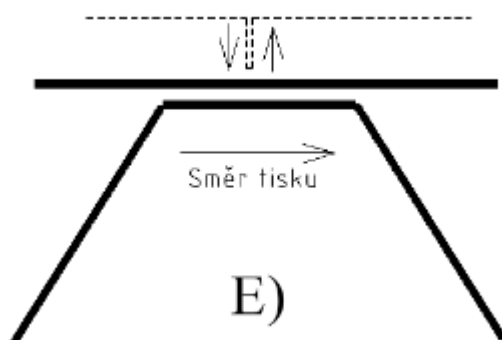


Obr. 2-10 Schéma strategie napojení [9]

U stoupajících prutů bylo testováno několik možností. Před dosažením vrcholu prutu byl nastaven posuv ve svislé ose, kdy došlo k narovnání a předeptnutí tištěného prutu, který má tendenci se mírně vychylovat. Další možností bylo odsazení vrcholu prutu v tištěné trajektorii ve svislé ose. Byla tak eliminována vertikální odchylka vzniklá při tisku prutu. Nakonec bylo podle výsledných výtisků použito vytvoření smyčky na vrcholu prutu. Vznikla tak velká plocha sloužící k lepšímu napojení ostatních prutů [9].

K metodě vtlačení trysky do materiálu spoje dospěl i Křivohlavý [7]. Při napojování prutů bylo aplikováno kolmé vtlačení trysky a následně opět kolmý výjezd, jak je zobrazeno na Obr. 2-11. V místě došlo k přeextrudování materiálu a vytvoření větší plochy k napojení. Zároveň byl lépe prohřát materiál, který tak vytvořil kvalitní spoj. Tato metoda díky posuvu

pouze ve svislé ose přesně cílíla na danou oblast a nejlépe se hodila na napojování dvou proti sobě kolmých prutů.



Obr. 2-11 Schéma způsobu napojení [7]

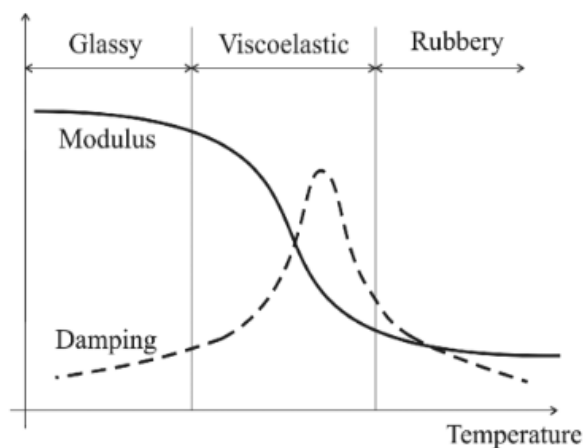
2.2.5 Materiály pro 3D tisk

Pro tisk technologií FDM dnes najdeme širokou škálu různých materiálů. Každý materiál musí vykazovat určité vlastnosti, které jsou vhodné pro tuto technologii výroby. Základní sledované vlastnosti jsou:

- Teplota skelného přechodu
- Teplota viskózního toku
- Index toku taveniny
- Koeficient tepelné roztažnosti
- Tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita
- Mechanické vlastnosti v tuhém stavu

Teplota skelného přechodu T_g

Při teplotě skelného přechodu je materiál mezi kaučukovitým a skelným stavem, jak je znázorněno na Obr. 2-12. Stav materiálu závisí na pohybu molekul. V této oblasti materiál skokově mění své vlastnosti. Nad teplotou T_g se polymerní řetězce pohybují volně a polymer je plastický. Pod teplotou T_g je pohyblivost řetězců omezená, materiál je tuhý a dosahuje vysoké tvrdosti, pevnosti a modulu pružnosti [10].



Obr. 2-12 Stav polymeru v závislosti na teplotě [10]

Teplota viskózního toku T_f

Při teplotě viskózního toku materiál získává vlastnosti vysoce viskózní kapaliny. Modul pružnosti má nulovou hodnotu. Materiál ztrácí soudržnost a dochází k vzájemnému pohybu makromolekul. Dosažení této teploty je nutné pro schopnost tisku technologií FDM. Zahříváním nad teplotu viskózního toku nesmí být dosaženo teploty, při které již materiál začíná degradovat [11].

Index toku taveniny

MFI (Melt Flow Index) označuje viskozitu taveniny materiálu při konstantním zatížení a nízké smykové rychlosti. Je měřena hmotnost materiálu, která proteče lisovacím přípravkem za 10 minut. Vyšší index znamená nižší viskozitu taveniny. Pro technologii FDM je vhodnější nízká hodnota indexu [12].

Koeficient tepelné roztažnosti

Koeficient tepelné roztažnosti je důležitým parametrem materiálů pro tisk. Jeho hodnota označuje, jak moc se zvýší objem materiálu při zvýšení teploty a také naopak k jakému smrštění materiálu dojde po ochlazení. Snahou je tedy hledat materiál s nízkým koeficientem tepelné roztažnosti [12].

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost udává s jakou rychlostí dochází k přenosu tepla materiálem v ustáleném stavu. Popisuje ji součinitel tepelné vodivosti λ , definovaný jako množství tepla, které projde plochou materiálu za určitý čas při rozdílné teplotě jednotlivých stran. Hodnota pomáhá určit dobu potřebnou na ohřátí či ochlazení materiálu [12].

Tepelná kapacita

Tepelná kapacita je množství tepla potřebné k ohřátí specifického množství materiálu o jeden stupeň. Používá se při výpočtu potřebného výkonu výhřevu extrudéru pro ohřev daného objemového průtoku materiálu. U polymerů se tepelná kapacita mění s teplotou [12].

Nejběžněji používané materiály

Nejčastějším materiálem ve výrobě pomocí 3D tisku jsou polymery. Vynikají rozmanitostí a snadným použitím. Výrobky ovšem často představují prototypy a jednoduché díly, u kterých není požadavek na vysokou pevnost. Stále probíhá výzkum a jsou vyráběny pokročilejší materiály s lepšími vlastnostmi [13].

ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) je jedním z prvních běžně používaných materiálů v 3D tisku. Jedná se o petrochemický triblokový kopolymer na bázi polybutadienu. Není biologicky rozložitelný a při kontaktu se vzduchem se smršťuje. Má dobrou pevnost, pružnost a tepelnou odolnost [14]. Má také dobrou chemickou odolnost a odolnost proti stárnutí [15].

PLA (Polyactic acid) je nejběžnějším materiálem. Jedná se o termoplast vyrobený z kukuřičného škrobu. Je snadno biologicky rozložitelný a biokompatibilní [14]. Díky své vysoké teplotě tání a nízké teplotě skleného přechodu vytváří širokou oblast teplot viskózního toku a tím je ideální pro nanášení při tisku. Materiál je univerzální a objevuje se i jako matrice u kompozitních materiálů. Je levný s průměrnou pevností v tahu a průměrnou tepelnou odolností. Při delším působení vysokých teplot dochází k jeho degradaci, není proto příliš vhodný k recyklaci [16].

PC (Polycarbonate) je univerzální materiál, vysoce pevný až do teploty 150 °C. Jeho pevnost je oproti ostatním typům polymerů bezkonkurenční v kombinaci jeho nízkou hmotností. Je náchylný k absorpci vzdušné vlhkosti, která může ovlivnit kvalitu tisku [14]. Materiál má nízké smrštění a vlastnosti zpomalující hoření. Nevýhodou je vysoká vrubová citlivost a vysoká cena. Je vhodný jako kompozitní materiál kombinovaný s ABS, jehož houževnatostí vznikne materiál s ještě lepšími mechanickými vlastnostmi [17].

Tab. 1 Vlastnosti materiálů [18][19][20]

Materiál	ABS	PLA	PC
Teplota skelného přechodu T_g (°C)	90	55	160
Teplota viskózního toku T_f (°C)	220-240	190-220	260-280
Tepelná vodivost α ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0,173	0,13	0,81
Měrná tepelná kapacita c_p ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1,67	1,8	1,2
Pevnost v tahu (MPa)	29	45	49

2.2.6 Tam

Tam v článku [9] provádí celý výrobní proces prutových struktur vyráběných robotickým 3D tiskem, od návrhu přes optimalizaci po výrobu dílu a otestování jeho mechanických vlastností. Navrhuje proces optimalizace struktury tak, aby vyhovovala výrobním omezením a robotickým programovacím strategiím. Srovnání strukturálních zkoušek z výpočetního modelu a sérií reálných zkoušek. Na základě zpětné vazby z již vyrobených dílů probíhá kalibrace výroby pro vývoj dílů z prutových struktur s větší mechanickou pevností a tuhostí. Výzkum v průběhu komplexního pracovního postupu zahrnuje optimalizaci struktur. Výpočetně generovaný díl je optimalizován pro zjednodušení jeho konstrukce. Je nutná konverze geometrie na pokyny pro výrobní zařízení. Výroba vzorků robotickou aditivní výrobou a jejich mechanické testy. Použití těchto metod je motivováno získáním klíčového vztahu mezi geometrií a strukturálním chováním.

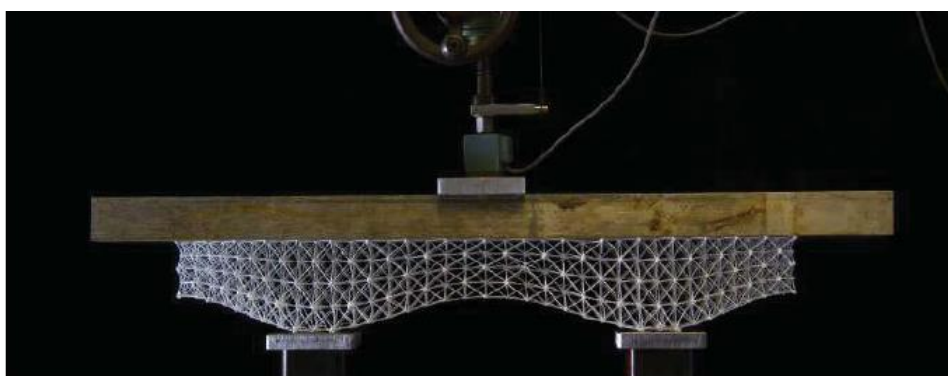
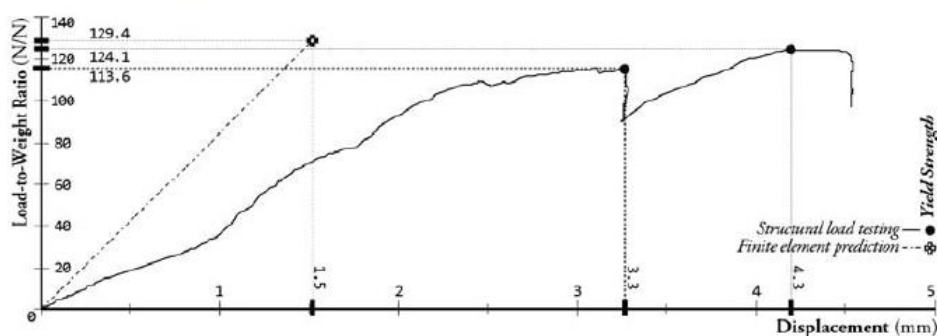


Figure 34 Load-displacement plot for the LCM beam design case – showing both load testing and FEA-prediction results



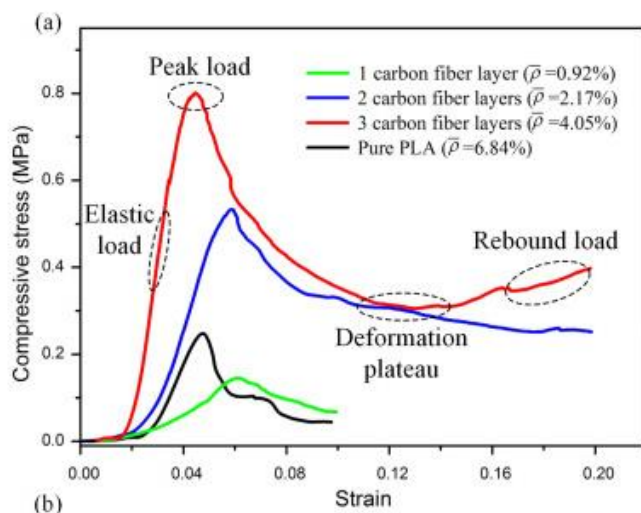
Obr. 2-13 Výsledný díl a záznam tlakové zkoušky [9]

Výzkum navrhl a ověřil nové výpočetní techniky pro řešení současného nedostatku metod procesu optimalizace komplexních geometrií s velkým počtem proměnných a konstrukčních prvků. Iterativní proces implementace výroby a strukturálního testování byl intenzivně začleněn do metodiky výzkumu, aby se identifikovaly příležitosti pro kalibraci výpočtových a výrobních parametrů. Tím by se zlepšila přesnost generativních a analytických modelů

Zvýšila by se pevnost a tuhost vyrobených dílů. Na vytištěných zkušebních strukturách proběhlo také zlepšení kvality spojů, díky které po úpravě vzrostl poměr maximální zátěže a hmotnosti struktury nových vzorků o 76,6 % a 69,5 %, oproti předchozím. Zároveň došlo při aplikaci zátěže na změnu průběhu deformace prutů. Selhání prutů bylo po aplikaci nových spojů způsobeno z velké části vzpěrem, na rozdíl od prvního vzorku před úpravou, kde docházelo především k rozpojování a porušení spojů struktury v počátku zatížení, čímž nedošlo na namáhání a porušování prutů a zásadně tak byla ovlivněna pevnost vytištěné struktury. Výsledkem je tedy schopnost této výrobní metody produkovat pevné a účinné struktury pro širokou oblast využití, ať už v architektonických aplikacích nebo v průmyslu. Nakonec byl vytvořen nový model složitější geometrie Obr. 2-13, aby mohl demonstrovat kompletní proces, jak navrhovaný pracovní postup vyvinutý v této práci může bezproblémově umožnit návrhářům navrhnout a vyrobit díly z prutových struktur. Po implementaci všech poznatků následovalo vyrobení konečného vzorku. Na něm byly pozorovány malé nedokonalosti, které mohou být odstraněny při dalším zlepšení procesu. Výsledné strukturální zkoušky ukázali rozdíl hodnot v porovnávaném poměru maximálního zatížení a hmotnosti struktury 12,6 % oproti výpočtovému modelu. Omezení této výrobní metody zatím spočívá ve špatné škálovatelnosti měřítka objektu. Vzhledem k možnosti výroby pouze jednou velikostí průřezu prutu dojde při zvětšení měřítka objektu ke snížení predikované únosnosti.

2.2.7 Liu

V článku se Liu [21] zabývá návrhem a použitím metody aditivní výroby prutových sendvičových struktur z kompozitního materiálu. Bylo potřeba navrhnout strategii pro generování volných prostorových cest. Následně provést srovnávací experimenty, které zkoumají zlepšení strukturální přesnosti a kvality této metody. Pro testy byly vyrobeny prutové struktury několika různých topologií, relativních hustot, objemového obsahu vláken a úhlů prutů. Strukturální testy struktur mají odhalit mechanismy porušování a přinést porovnání s již existujícími výsledky prutových struktur. Použitý materiál byl kompozitní termoplast, tvořený uhlíkovými vlákny a PLA matricí, jehož vyztužená vlákna zlepšují kontinuitu a strukturní tuhost tištěné struktury. Strukturální testy byly prováděny na univerzálním testovacím stroji za účelem zkoumání tlakové odezvy na vytištěných sendvičových vzorcích.



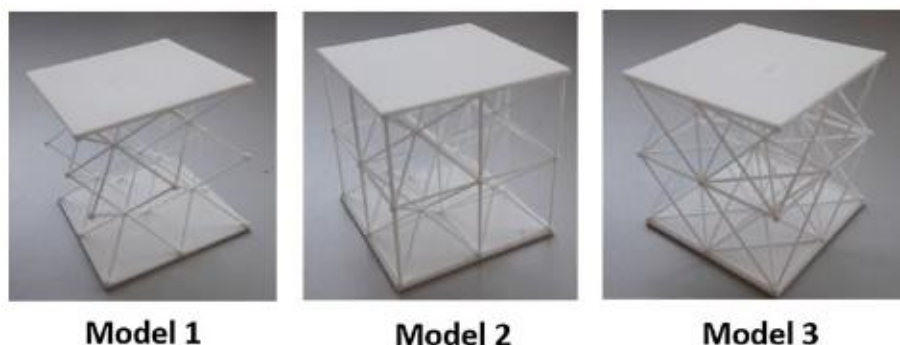
Obr. 2-14 Výsledky tlakových zkoušek [21]

Experimenty vyhodnocovali přesnost tisku metody. Muselo se přistoupit k úpravě trysky tiskové hlavy, aby nedocházelo ke kolizi s vytištěným materiálem a docházelo k lepší impregnaci vlákna kompozitu matricí. Při tisku docházelo k porušení vláken, uvolnění vazby a deformacím oproti tiskové dráze. Úpravou parametrů byla značně zvýšena přesnost tisku. Stále však existuje prostor ke zvýšení přesnosti pomocí systému zpětnovazební kontroly deformace. Kvůli nedostatečnému tlaku materiálu v trysce při tisku docházelo ke vzniku pórů v materiálu struktury, což vedlo ke zhoršení mechanických vlastností. Byly vyrobeny sendvičové struktury s různou relativní hustotou, délkou prutů a úhlu náklonu prutů. Při zatížení struktur byla pozorována počáteční pružná odezva na zatížení, následovaná vrcholem tlakového napětí Obr. 2-14. S rostoucí deformací napětí dále klesalo vlivem selhání nosníků na vzpěr, lokální vzpěr, sekundární vzpěr a delaminaci. Kompresní výkonnost kompozitního materiálu je vyšší než už čistého PLA. Délka a úhel prutů měli zásadní vliv na hodnoty komprese. Struktury vytištěné touto metodou jsou schopné plnit vyšší konstrukční požadavky při nízké hmotnosti

2.2.8 Syam

Syam [22] v tomto výzkumu vybíral vhodné prutové struktury z velkého počtu proveditelných návrhů, které měly stejný objem a byly vyrobeny ze stejného materiálu, ale měly rozdílné topologie. Výběr struktury závisel na schopnostech vysoké izolace struktury proti vibracím a zároveň udržení dostatečné strukturální integrity pod specifickým hmotnostním zatížením. Pro výběr vhodného typu struktury byly provedeny numerické výpočty vlastností na šesti topologiích struktur. Pro každý typ struktury se vypočítala hmotnost a setrvačný moment. Pro analýzu strukturální integrity se počítaly a analyzovaly axiální napětí na každé vzpěře. Pro odhad tuhosti a vlastní frekvence struktur byl použit

software Ansys. Reálné vlastnosti struktury byly nakonec ověřovány pomocí experimentálních zkoušek, které zahrnovali aplikaci vibrační a kompresní testy.



Obr. 2-15 Vybrané topologie [22]

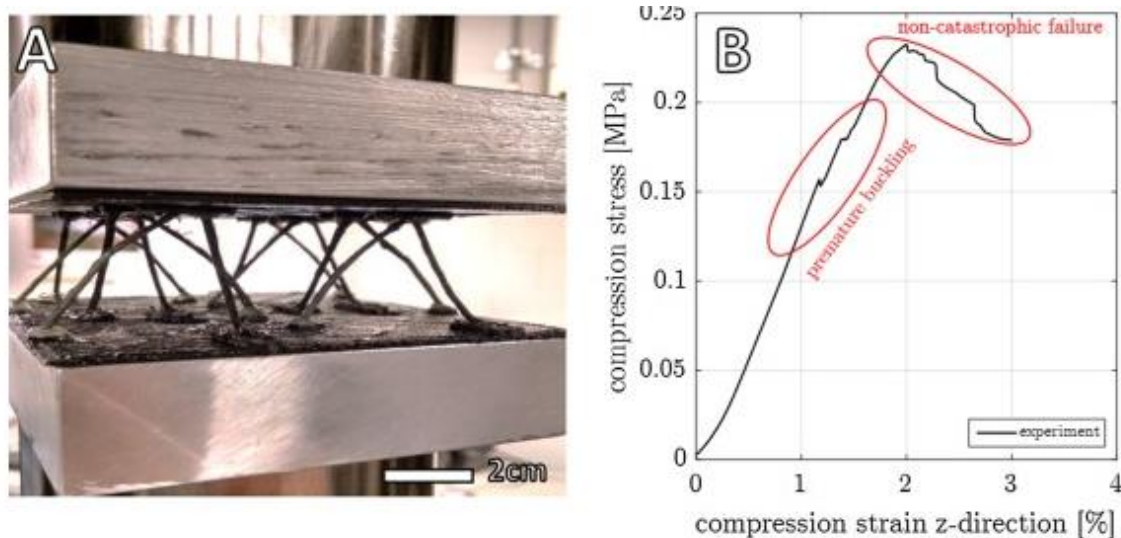
Z analýz byly získány minimální vlastní frekvence struktur. Pro další ověření a srovnání výsledků byly vyrobeny a otestovány modely struktury. Kompresní testy probíhaly rychlostí 1 mm/min na třech různých strukturách, pro kontrolu byly provedeny vždy tři zkoušky. Rozdíly mezi hodnotami z reálného experimentu a numerické analýzy se pohybují od 0,8 % do 26 %. Rozdíly jsou zřejmě způsobeny procesem výroby struktur, rozdílem vlastností materiálu vyrobených struktur a materiálu zadaného v simulačním softwaru a geometrickými odchylkami od CAD modelu, jako jsou například velikosti styčniců struktury a hustota prutů, která se od ideálního modelu liší. Model 2 má největší pevnost v tlaku 19,25 N a deformaci 0,68 mm, je tedy nejvhodnější k udržení zatížení bez působení vibrací. Model 1 měl nejmenší kompresní sílu 2,21 N a deformaci 1,62 mm. Model 3 měl tlakovou sílu 12,78 N a deformaci 1,13 mm. Ze šesti zkoumaných mřížek pouze čtyři splňují kritéria strukturální integrity pro udržení zatížení. Model 3 byl vybrán jako nejvhodnější struktura odolávající zároveň tlakovému zatížení a působení vibrací. Jeho únosnost je nižší než u modelu 1, ale vzhledem k nízké frekvenci a tím lepší odolnosti vibracím a zároveň dobré únosnosti zatížení se ukázala tato geometrie jako nejlepší.

2.2.9 Eichenhofer

Eichenhofer [23] v článku popisoval podrobnosti mechanismů procesu tisku kompozitních prutů a provedení předběžných experimentálních pokusů. Ty ukázaly schopnost orientace vláken do prostoru a změnu směru tištěného materiálu bez použití podpůrných konstrukcí. Dalším cílem bylo ověření strukturálních schopností vyrobeného sendvičového panelu s vynikajícími mechanickými vlastnostmi při nízké vlastní hmotnosti.

Pro výrobu vzorků sendvičových panelů byl použit volný tisk struktur do prostoru pomocí robotického ramena a kompozitní materiál. Při extruzi materiálu přes zužující se trysku dochází ke zpětnému vytlačování matrice a tím zvýšení tlaku v trysce. V kombinaci se

zvýšenými teplotami se tak zajišťuje lepší impregnace výztužných vláken materiálu. V práci jsou následně uváděny omezení tohoto typu výroby. Problém velikosti tiskové hlavy omezuje pohyb v okolí fyzických překážek, nebo v případě tisku prutu směrem dolů se nemůže tisková hlava pohybovat v ose prutu. Nakonec byly měřeny kompresní vlastnosti na univerzálním zkušebním stroji. Testovalo se 5 vyrobených vzorků. Testy zjišťovaly pevnost struktury při rychlosti zatížení 1 mm/min dokud nebyl pozorováno selhání ve vzpěru.



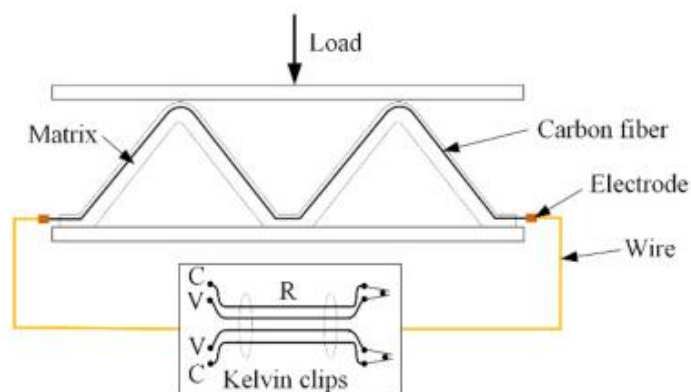
Obr. 2-16 A) Vyrobený vzorek, B) Záznam z tlakové zkoušky [23]

Autoři uvádějí, že kompozitní materiály jsou velmi citlivé na materiál, podmínky zpracování a konstrukční návrh. Největším nedostatkem je vznik pórů ve vytištěné struktuře, při nedostatečné impregnaci vláken materiálu. Optimalizací těchto technologických podmínek lze očekávat zlepšení už tak vynikajících mechanických vlastností. Pro testování byly vyrobeny tři vzorky struktur, které se skládaly z horní a spodní desky vyrobené z čistého PLA a byly spojené vytištěnými pruty z kompozitního materiálu. Na podložky musely být umístěny kotvící prvky, protože při tisku struktury docházelo vlivem rychlého ochlazení ke špatnému spojení materiálů. Ukázka vzorku je na Obr. 2-16 A). Při zkoumání vytištěné geometrie bylo zjištěno, že v místech ostrých záhybů prutů dochází ke vzniku velkých dutin vlivem ohybu a roztažení vláken. Při návrhu panelu byla jako vhodná hodnota úhlu naklonění prutů zvolena $54,7^\circ$ z důvodu nejlepších vlastností v odolávání tlaku. Výsledná struktura měla mez pevnosti 0,2 MPa a modul pružnosti 13,23 MPa pod tlakovým zatížením. Průběh zatížení je na Obr. 2-16 B). Tyto hodnoty překračují hodnoty uvedené v literatuře pro stejné hustoty materiálu. Výsledky byly dokonce vzhledem k hustotě struktury vysoké i ve srovnání s nejmodernějšími strukturami s ultra nízkými hustotami vyrobenými z různých materiálů, včetně kovů a keramiky, které využívají pečlivě upravené buněčné architektury.

2.2.10 Wang

Wang [24] se ve svém výzkumu zabýval zjištěním přesnosti výroby, mechanických vlastností a systém možného monitorování struktury přímo při působícím zatížení. Kompresní a cyklické testy aplikované na strukturu měly přinést informace o mechanismech selhání. V průběhu zatěžování měl být ověřen přístup monitorování podmínek zatížení v reálném čase pomocí měření elektrického odporu vláken.

Metodou výroby vzorků je prostorový 3D tisk s kompozitním materiálem složeným z matrice PLA a uhlíkových vláken. Výhody této metody spočívají v tom, že není zapotřebí žádných podpurných struktur. Kontinuální uhlíková vlákna slouží nejen jako výztuž materiálu, ale také jako senzorický materiál, který pomáhá při kontrole měření při zatížení. Experimentální testy vzorků probíhaly na univerzálním zařízení. Na struktury s různým úhlem prutů byla aplikována kompresní síla 50 N a cyklické zatěžování.



Obr. 2-17 Schéma testování vzorku [24]

Při zkoumání přesnosti tisku bylo zjištěno, že při tisku stoupajících prutů je úhel sklonu větší než hodnota úhlu prutu při tisku směrem dolů. Zároveň se také ukázalo, že průměr prutu je větší při směru tisku vzhůru než směrem dolů. Uvedené konstrukční rozměry vytvořených struktur ukázaly, že je tato metoda vhodná k výrobě, ale je stále nutné optimalizovat tiskové parametry pro dosažení vyšší přesnosti výroby. Byly vyrobeny a testovány vzorky s různými sklony prutů a to 45, 50, 55 a 60°. Rychlost zatěžování při kompresní zkoušce byla 0,5 mm/min a trvala až do poškození vzorků. Schéma zkoušky je na Obr. 2-17. Během zahájení zatěžování struktura vykazovala nízkou tlakovou odezvu, následovalo lineární elastické zvýšení napětí se zvětšením deformace. Modul pružnosti se zvyšuje se zvětšením úhlu sklonu prutů. S dalším zatížením se nelineárně zvyšuje tlakové napětí a po dosažení maximální hodnoty dochází k poklesu vlivem deformace prutů. Způsoby selhání jsou lom matrice, porušení meze vzpěrné stability a oddělení vláken.

2.2.11 De Guevara

Ve výzkumu De Guevara [8] navrhl fyzický nástroj na extruzi materiálu upevněného na robotickém rameni. Dalším předmětem výzkumu byl materiál tisku, výpočtový design a pracovní postupy při tvorbě dráhy nástrojů a její omezení. Dále také Implementace tisku v různých prostorových orientacích, které je možné vidět na Obr. 2-18.



Obr. 2-18 Výrobní HW při tisku [8]

Tisková hlava má všechny součásti připevněné na rameni robota včetně elektroniky a cívky materiálu. Extruder je navíc umístěn na rameni o délce 450 mm z důvodu tlumení při kolizi trysky a zabránění tak poškození. Použit je běžný komerční extruder, který je drobně upravený a má trysku o vnitřním průměru 1,75 mm. Vyhřívání je prováděno pomocí odporového drátu. Konec trysky je chráněn před okolní teplotou pomocí keramických vláken. Chlazení extrudovaného materiálu je prováděno pomocí čtyř vzduchových hadic. Nejlepší vzdálenost se ukázala jako 25-40 mm od konce trysky po konec hadic za tlaku 1 bar. Řízení je prováděno pomocí Arduino desky.

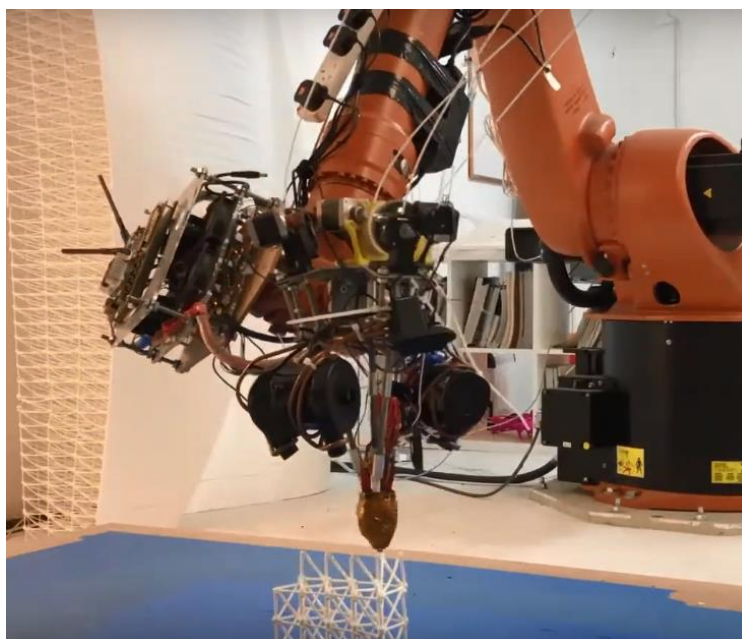
Výsledkem výzkumu byla úspěšná synchronizace pohybu robotického ramene, rychlosti extrudovaného materiálu a chladicího systému. Rychlost tisku byla 3 mm/s. Při různém směru tisku prutu jsou zapotřebí rozdílné čekací doby pro vznik spojení s již vytisknutým materiálem. Pro materiál PLA se ukázala být nejvhodnější teplota mezi 180-220°C. Příliš velká teplota způsobovala propadání vytisknutých segmentů, při příliš nízké teplotě měl vytisknutý materiál rychlým tuhnutím negativní vliv na geometrii. Vhodná teplota materiálu se také liší podle nastavení ostatních parametrů tisku, jako je rychlost posuvu, čekací doby a pohyb robota. Při tisku ostrých úhlů struktury docházelo po dosažení vrcholu úhlu ke kolizi trysky s již vytisknutým materiálem, proto musela být upravena trajektorie ramena. Díly byly vytisknuty v různých orientacích v prostoru a gravitační síla neměla skutečně vliv na míru deformace reálné geometrie v různých tiskových orientacích a pohybovala se okolo 7 % rozdílu od numerického modelu. Navzdory použití relativně jednoduchého výrobního nástroje na tisk materiálu autoři přiznávají, že byl vyžadován velmi sofistikovaný výpočetní

systém pro řízení celého procesu výroby, protože právě výrobní algoritmus je základním předpokladem úspěšně vyrobených dílů.

2.2.12 AI build

AI Build [25] je jedna z největších společností zabývající se velkorozměrovým 3D tiskem. Společnost byla založena ve Velké Británii. Zabývá se především architektonickými projekty, ale vývoj probíhá také v ostatních odvětvích průmyslu jako aerospace, automotive, stavebnictví, energetika a další.

Jejich cílem je vytvoření samořízené továrny s robotickým 3D tiskem, kterou si mohou zákazníci pronajmout a realizovat tu tak výrobu svých produktů. Pro nastavení 3D tisku používají vlastní aplikaci AI Sync, díky které vytvářejí celkové nastavení 3D tisku jako je řídicí trajektorie a procesní parametry.



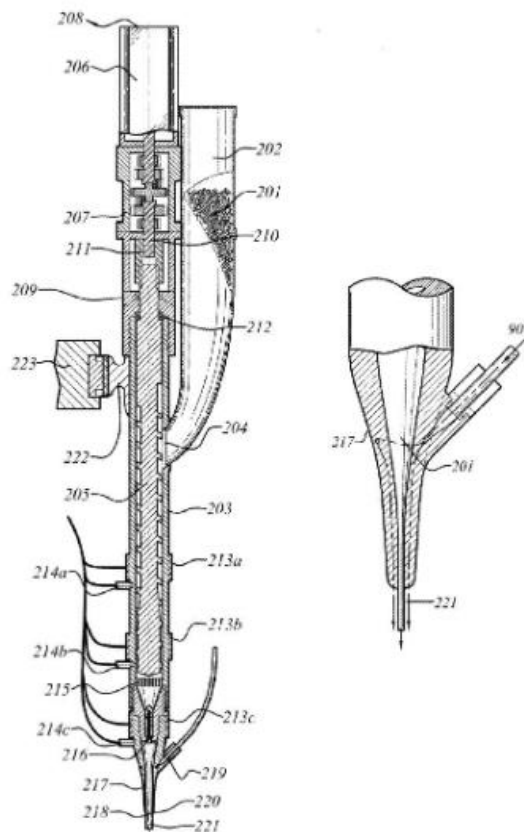
Obr. 2-19 Výrobní HW při tisku [25]

Hardware výrobního systému pro výrobu objemových struktur tvoří robotické rameno, na kterém je umístěna tisková hlava a box s elektronikou. Chlazení je obstaráno pomocí několika ventilátorů. Tisk probíhá bez naklápění tiskové hlavy a tisknuty jsou jednoduché „pily“ uzavřené horními vodorovnými pruty. Výrobní hw je vidět na Obr. 2-19.

2.2.13 Branch technology

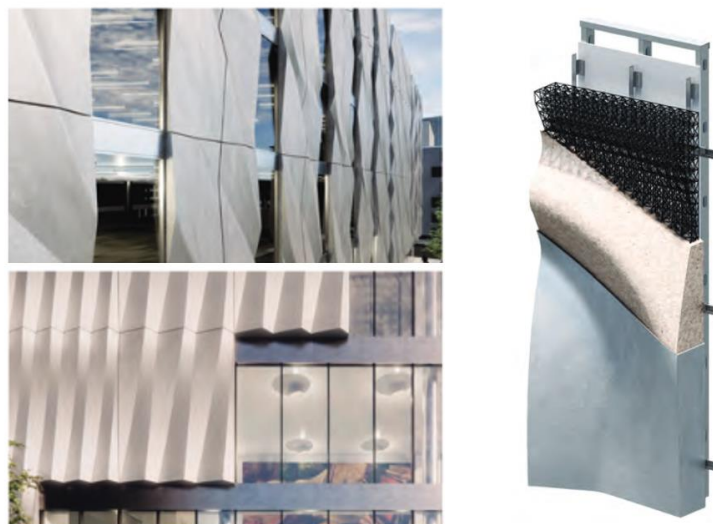
Jedná se o další společnost zabývající se velkorozměrovým 3d tiskem. Sídli v USA ve státě Tennessee. Jejich projekty jsou převážně architektonické. Jejich produktová řada nabízí

panely sloužící jako obklady fasád (BranchClad, StoPanel) a panel tvořený pouze otevřenou prutovou strukturou (BranchMatrix). Cílem těchto výrobků je oživení designu budov, jak je vidět na Obr. 2-21. Základem panelů je vytištěná prutová struktura různorodého tvaru podle designu budovy. Struktura je poté vyplněna izolační pěnou a na vrch nanесena povrchová vrstva. Celou část drží kotvící prvek, za který bude panel ukotven [27].



Obr. 2-20 Schéma extruderu Branch Technology s vnitřně chlazenou tryskou [26]

Výroba prutové struktury probíhá pomocí robotického ramena, na kterém je jako efektor umístěn extruder. Společnost má tiskovou technologii patentovanou pod názvem Cellular Fabrication. Použitý extruder tvoří podávací šroub, který vytlačuje peletky materiálu ze zásobníku, jeho schéma je na Obr. 2-20. Ty jsou v komoře taveny a tryskou vychází materiál, který je následně ochlazen. Chlazení zajišťuje stlačený vzduch proudící do místa tisku vnitřkem trysky tiskové hlavy [26].



Obr. 2-21 Vlevo vyráběný fasádový panel na budovách, vpravo řez panelem [27]

2.2.14 Latture

V publikaci [28] se Latture zabývá vlivem uzlů a vnějších hranic na tlakovou odezvu příhradových nosníků z tvrdého termoplastu. Byly vyrobeny vzorky struktur metodou SLS s rozdílným způsobem spojů, kdy v jednom případě bylo do spojů přidáno zaoblení. Následovalo podrobení zkoušce tlakem. Zároveň byly prováděny výpočty metodou konečných prvků a výsledky porovnány.

Uzlové spoje končící ve vnější části struktury mohou mít rozdílnou tuhost a pevnost od uzlů uvnitř struktury. Efekt se mění s délkou prutů a závisí na topologii buňky. Při zkoumání vlivu uzlů na vlastnosti struktury byl odhalen problém, kdy osová zatížení přenášené pruty se musí dále přenést přes uzly, ve kterých je menší nosná plocha kvůli překrývajícím se vzpěrám. To může vést k selhání v místech spoje. Ke zmírnění je možné použít zaoblení kolem prutů v uzlech, pokud to výrobní metoda dovoluje. V případě skupiny prutů, které určují nosnost a jsou stejně namáhané, je pevnost dána objemovým průměrem napětí v prutech, jakmile jsou všechny pod zátěží. Napětí pro pokračování ve vzpěru je stále konstantní, proto nemá vada struktury, která způsobí předčasný vzpěr takový vliv na pevnost. U struktur s malým poměrem štíhlosti prutů, kde nedochází ke vzpěru je pevnost dána mezí kluzu materiálu a nosnou plochou prutů. Toto tvrzení platí pro struktury jejichž rozměry výrazně přesahují velikost buňky. U menších struktur a křehkých materiálů může lokální lom způsobit celkové zhroucení [28].

Pro správný výpočet pevnosti buňky je nutné znát způsob, kterým budou pruty namáhány. Podle délky prutů mohou nastat dva stavy, namáhání na vzpěr nebo klasické tlakové namáhání.

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

Prutové struktury vynikají svojí schopností vysoké únosnosti vzhledem k nízké hmotnosti. Je tedy snahou využít jejich vlastností při návrhu dílů a vyplňování prostoru namísto použití plného objemu. Volba topologie buňky struktury má vliv na výsledné chování a schopnosti struktury nést zatížení a pohlcovat energii. Při dominanci osového silového působení v prutu jsou struktury vhodnější ke statické únosnosti, a naopak při dominujícím ohybovém zatížení je aplikace vhodnější k absorpci energie [1][3].

K efektivní výrobě velkorozměrových struktur z polymerních materiálů se využívá robotická aditivní výroba. Extrudovaný prut tisknutý do prostoru je efektivně chlazen a je tak tvořena samonosná struktura bez potřeby podpůrných elementů. Únosnost struktur závisí na kvalitě jejich výroby. Ta je složena z přesnosti jednotlivých prutů a kvalitních pevných spojů. Pro vytvoření pevného spoje je zásadní teplota materiálu v místě spoje a doba po kterou může vlivem teploty probíhat difuze řetězců polymeru [6]. Z toho důvodu se ve spojích ukázalo jako nejvhodnější řešení pozastavení pohybu nebo lépe krátké vtlačení trysky přímo do materiálu [9][7]. V případě přesnosti geometrie tištěných prutů má největší vliv na kvalitu naklopení tiskové hlavy ve směru tisku [7]. Významným parametrem je také schopnost chlazení vytlačovaného materiálu. Při tisku vytlačovaný prut přesně nekopíruje trajektorii trysky a jsou tak nutností korekce geometrie. Ty byly označovány jako $\Delta\alpha$, tedy hodnota úhlu, o kterou je prut napřímen [7].

Pro kvalitní výrobu prutových struktur je důležité vybrat správný materiál s vhodnými vlastnostmi. Nejčastěji používaný byl materiál PLA [7][8][9][22]. Často byl především u výroby sendvičových struktur použit jako matrice a vyztužen uhlíkovými vlákny [21][23][24]. Tyto práce byly zaměřeny na zvýšení pevnosti struktur použitím kompozitních materiálů a v jednom případě byl také zkoumán vliv zatížení na elektrický odpor vlákna. Nejlépe využitelný, vzhledem k jeho zpracovatelnosti, se tedy jeví materiál PLA, který má velmi nízkou teplotu skelného přechodu oproti ostatním materiálům. Mělo by tak být snadnější dosáhnout pevných spojů při potřebě menší teploty. Materiál se také méně smršťuje [16].

K získání informací o mechanických vlastnostech struktur prováděla většina studií na vyrobených vzorcích tlakové zkoušky [21][22][23][24] a jednu tříbodový ohyb [9]. Výsledky se udávali jako maximální síla, kterou struktura unesla, průběh napětí v závislosti na smrštění a také jako poměr únosnosti struktury a její hmotnosti. Kompozitní materiály se ukázaly jako vhodný prostředek pro významné zvýšení únosnosti struktur. Jejich tisk je ovšem náročnější a je nutné optimalizovat proces tisku k odstranění nežádoucích jevů při něm vznikajících. Výsledky z jediné dostupné literatury, kde se prováděly testy přímo struktur vyráběných volným 3D tiskem bez použití kompozitních materiálů ukázaly mnoho významných informací. Výrazným zlepšením únosnosti o hodnotu až 76,6 % došlo po úpravě topologie a zvětšení kontaktní plochy ve spojích. U výsledků ohybových testů vyšla

nejvyšší průměrná hodnota poměru maximální únosnosti a hmotnosti struktury 515,5 [N/N]. Vzorek měl průměr prutu 1,2 mm a rozměry 150x60x60 mm s velikostí buňky 30 mm. Výsledky experimentu, kde byl získán poměr maximálního zatížení a hmotnosti struktury se lišily o 12,6 % oproti výsledkům získaných z výpočtového modelu [9].

Shodným prvkem všech pokročilejších výrobních systémů prutových struktur je použití šestiosého robotického ramena. Tisková hlava je umístěna jako efektor a s elektronikou umístěnou taktéž na rameni robota. Použité extrudéry jsou nejčastěji vlastní výroby [9][25][26][27] nebo upravené komerční [8]. Nejpoužívanější vzhledem ke své jednoduché konstrukci tiskové hlavy je materiál ve formě struny, který je tlačěn do trysky a taven. Na chlazení nánosu se používá více různých variant. Nejčastěji rozvod stlačeného vzduchu trubičkami k trysce [8][9], dále pak vedení vzduchu vnitřkem trysky [26], nebo použití ventilátorů [25], pokud není dostupný stlačený vzduch. Používané nástroje a programy pro tvorbu tiskových strategií a výrobního kódu většinou nejsou detailněji popsány, případně jsou zveřejněny pouze základní informace. Vzhledem k faktu, že pro tyto aplikace nefunguje žádný oficiální postup, jsou způsoby tvorby kódu každého zařízení specifické a na míru použitému hardwaru.

U výpočtů metodou konečných prvků je zapotřebí zjistit způsob namáhání prutů. Podle délky prutů může nastat mezní stav vzpěrné stability nebo mezní stav pružnosti. Způsob spojení prutů má velký vliv na chování struktury pod zatížením [28].

2.4 Identifikace novosti a příležitosti.

Polymerní velkorozměrové prutové struktury začaly být častěji využívány s nástupem aditivních technologií výroby jako téměř jediným efektivním způsobem výroby. Je tedy snahou proces výroby dále vyvíjet a posouvat k větší produktivitě, kvalitě a úspornosti materiálu. V oblasti polymerních velkorozměrových prutových struktur je stále málo způsobů efektivní výroby. Potenciálně nejefektivnějším způsobem výroby polymerních velkorozměrových prutů by mohl být tisk prutů přímo do prostoru s aktivním chlazením nánosu. Tato technologie je ovšem stále málo rozšířená a její potenciál nebyl stále plně využit. Tím se objevuje prostor na trhu, ve kterém by existoval produkt nabízející možnost využít tuto technologii a nabídnout ji potencionálním zákazníkům. Je tedy snahou vyvinout produkt obsahující komplexní výrobní systém pro tento velkorozměrový tisk.

K využití produktů v běžném životě, případně v pokročilejších aplikacích v průmyslu, je nutné mít informace o pevnosti těchto struktur. Informací o mechanických vlastnostech takto vyrobených dílů je v literatuře výrazný nedostatek. Každá nová informace se v tomto směru stane přínosem a prokáže tak využitelnost struktur i v náročnějších aplikacích. Z předchozích výzkumů, na které tato práce navazuje, se podařilo dosáhnout velice dobré přesnosti výroby prutů, která nebývá v ostatních publikacích nijak diskutována. Je tak

snahou tyto získané informace přenést do výroby komplexnějších prostorových struktur a vytvořit produkt unikátních vlastností.

Algoritmus schopný převést vloženou geometrii na výrobní kód je stěžejní částí výrobního systému. Na trhu je výskyt podobného softwaru pro prutové struktury a tento specifický výrobní systém omezený. Rovněž nejsou více dostupné informace o používaném řešení výrobních algoritmů ve vydané literatuře. Poskytnutí algoritmu spolu se zbylými částmi systému vytvoří kompletní nástroj okamžitě použitelný k výrobě.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Vymezení problému

Jednou z technologií k výrobě polymerní velkorozměrové prutové struktury je FFF metoda upravená k tisku prutů do volného prostoru, kdy je vytlačený materiál co nejrychleji ochlazen a je tak tvořena samonosná struktura. Pro výrobu těchto struktur je potřeba navrhnout výrobní systém, který se bude skládat z výrobního hardwaru a tiskových strategií. Výrobní HW je již v současné době používán, proto bude proveden návrh obecného nejvhodnějšího řešení. S prutovými strukturami se pojí také jejich mechanické vlastnosti, které silně závisí na přesnosti geometrie struktury. Tiskové strategie tak mají zajistit co nejlepší přesnost této vyráběné geometrie a tím i možnosti predikce mechanických vlastností. Zároveň také zajistit nejvhodnější způsob seřazení a výroby prutů struktury z hlediska kvality, přesnosti a rychlosti výroby. Hardware systému zajistí dosažitelnost těchto tiskových strategií. Mechanické vlastnosti je také nutné validovat pomocí mechanických zkoušek tlakem, aby byly získány informace o chování struktur pod zatížením. Tyto zkoušky budou porovnány s výpočtním modelem ke zjištění rozdílu mezi maximální potenciální únosností a získanou únosností vyrobených struktur. Cílem celého procesu je pak posunutí výroby velkorozměrových struktur k použití při pokročilejších aplikacích v průmyslu a stavebnictví.

3.1.1 Název a druh produktu

Systém velkorozměrového 3D tisku produktů z prutových struktur. Jedná se o kombinaci výrobního zařízení tvořeného robotickým šestiosým ramenem, tiskovou hlavou a navrženými výrobními strategiemi.

Produkt je označen jako průmyslové zboží, které zabezpečuje výrobní procesy. Druhem zařízení je nástroj.

3.1.2 Zákazník

Produkt je vyvíjen pro firmu 3Deposition.

3.1.3 Spotřebitel

Osoby zajišťující výrobu produktů z prutových struktur. Tedy společnosti, které podnikají v aditivní výrobě a mají zájem o koupi systému na výrobu prutových struktur.

3.1.4 Charakteristika problému

V Tab. 2 je vypsaný přehled atributů, které musí daný produkt splňovat. Základním cílem vyvíjeného produktu a hlavní důvod jeho činnosti je jeho schopnost výroby kvalitní geometrie z prutových struktur. Dalším důležitým cílem je schopnost dosáhnout přesnosti predikce pevnosti v tlaku vyrobené struktury, bude tak možné výrobky přesněji dimenzovat na konkrétní aplikace. Nepostradatelná je možnost tvarovatelnosti a škálovatelnosti vyráběné geometrie. Při výrobě musí být možné nastavit všechny potřebné parametry výroby. Cíle zajišťující bezproblémovou práci se systémem jsou jeho bezpečnost, spolehlivost a případná opravitelnost.

Tab. 2 Přehled atributů produktu (C – cíle, O – omezení, F – funkce, P – prostředky)

Charakteristika	C	O	F	P
Schopnost výroby geometrie z prutových struktur	x			
Schopnost dosáhnout přesnosti predikce pevnosti v tlaku	x			
Tvarovatelnost geometrie	x			
Škálovatelnost geometrie	x			
Nastavení potřebných parametrů výroby	x			
Bezpečný	x			
Spolehlivý	x			
Opravitelný	x			
Estetický přívětivý	x			
Velké rozměry pracovního prostoru (jednotky metrů)		x		
Dlouhá živostnost (roky)		x		
Použití FFF technologie		x		
Konzistentní kvalita výroby		x		
Tvorba výrobního kódu			x	
Výroba prutových struktur			x	
Grasshopper algoritmus				x
Výrobní zařízení (robotické rameno, tisková hlava, elektronika)				x

Omezení pro výrobní systém je především velikost pracovního prostoru, která by se měla pohybovat aspoň okolo 2 m³. Měl by být zajištěn dostatek prostoru na výrobu i rozměrnějších dílů, na které bude tento systém použit. Zároveň je nutná dlouhá živostnost dílů systému v řádu let, podle výrobního nasazení a druhu jednotlivých komponentů systému. Výrobní proces je založen na technologii tisku FFF, kdy je materiál taven a vytlačován tryskou tiskové hlavy. Pro nasazení systému do výroby je potřeba zajistit konzistentní kvalitu výrobků.

Jednou z funkcí, kterou systém obsahuje ve své softwarové části je tvorba výrobního kódu. K té bude jako prostředek použit navržený algoritmus (slicer) v modulu Grasshopper softwaru Rhinoceros. Do něho bude vložena geometrie vyplnitelná buňkami prostorové struktury. Algoritmus z této geometrie vytvoří výrobní kód, podle kterého bude systém pracovat při výrobě geometrie. Druhou funkcí produktu je samotná výroba prutových struktur. K té bude jako prostředek použito výrobní zařízení skládající se z robotického ramena, tiskové hlavy a elektroniky. Do systému robota bude nahrán výrobní kód, z něhož bude čerpat informace také tisková hlava.

3.2 Cíle vývoje

3.2.1 Globální cíl

Globálním cílem práce je návrh částí vhodného výrobního systému pro výrobu součástí tvořených velkorozměrovými prutovými strukturami z polymerního materiálu. Pomocí současné podoby tohoto systému vyrobit a experimentálně ověřit parametry dílů s prutovou výplní. Z experimentálních testů dále získat informace o chování struktur při tlakovém zatížení a hodnoty únosností porovnat s výpočtním modelem ideální geometrie. Záměrem je posunout proces výroby velkorozměrových struktur k použití při pokročilejších aplikacích v průmyslu a stavebnictví.

3.2.2 Dílčí cíle

- Navrhnout geometrii vzorku
- Navrhnout rozměry geometrie (náklon a délka prutu) a procesních parametrů (rychlost extruze, teplota)
- Návrh úprav konstrukce 3D tiskové hlavy typu FFF
- Návrh experimentálního měření vyrobených vzorků
- Příprava tiskových drah pro tisk
- Provedení tlakových zkoušek vzorků
- Vyhodnocení vlastností navrženého systému a interpretace dosažených výsledků

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

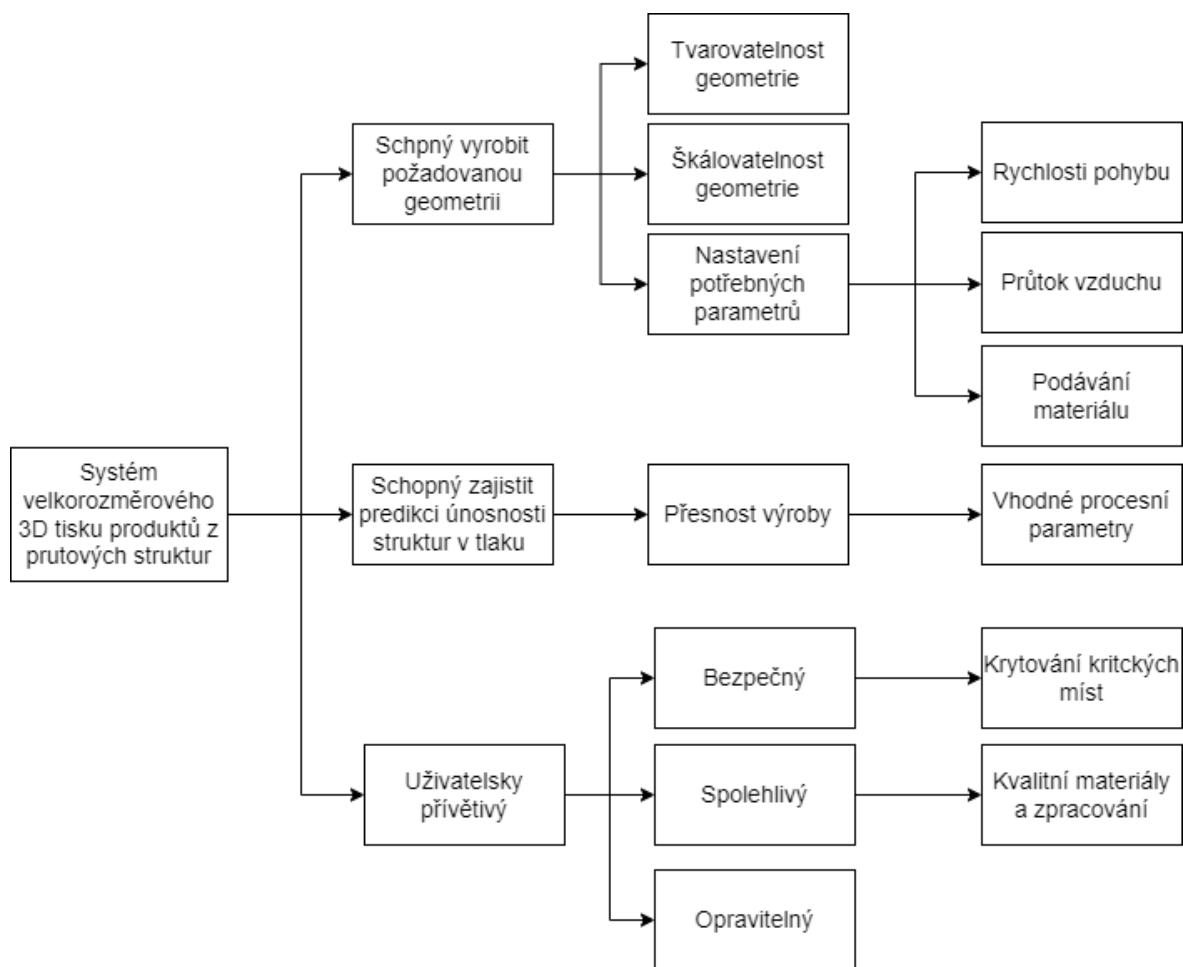
4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

4.1.1 Analýza cílů

Jako hlavní cíle byly stanoveny uživatelská přívětivost, schopnost vyrobit požadovanou geometrii a schopnost dosáhnout predikce přesnosti namáhání v tlaku. Pro uživatele je důležitými vlastnostmi produktu hlavně jeho bezpečnost, spolehlivost, případná opravitelnost. Pro odolnost v tlaku je zase zásadní přesnost geometrie, která zajistí nejlepší možné mechanické vlastnosti struktury. U schopnosti výroby geometrie z prutových struktur je důležitá tvarovatelnost a škálovatelnost geometrie, ty pomáhají v dosažení chtěného designu výrobku. Další nedílnou součástí je nastavení potřebných parametrů jako rychlosti tisku, průtoku vzduchu a posuvu materiálu k využití nejvhodnějších procesních parametrů. Strom cílů je dále zpracován na Obr. 4-1.

Tab. 3 Seznam cílů

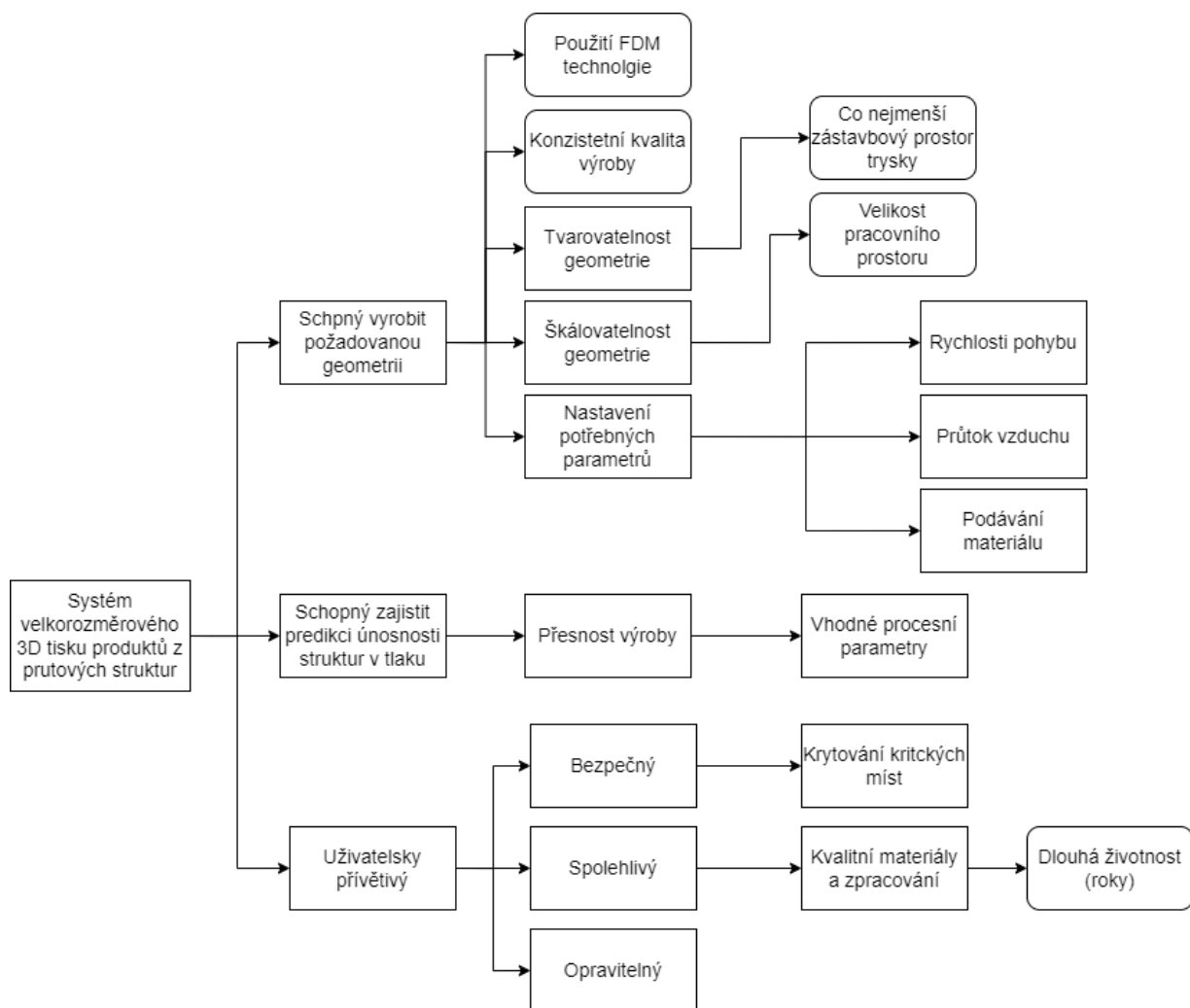
Cíl
Schopnost výroby geometrie z prutových struktur
Schopnost dosáhnout přesnosti predikce pevnosti v tlaku
Tvarovatelnost geometrie
Škálovatelnost geometrie
Nastavení potřebných parametrů výroby
Bezpečný
Spolehlivý
Opravitelný



Obr. 4-1 Strom cílů

4.1.2 Specifikace omezení

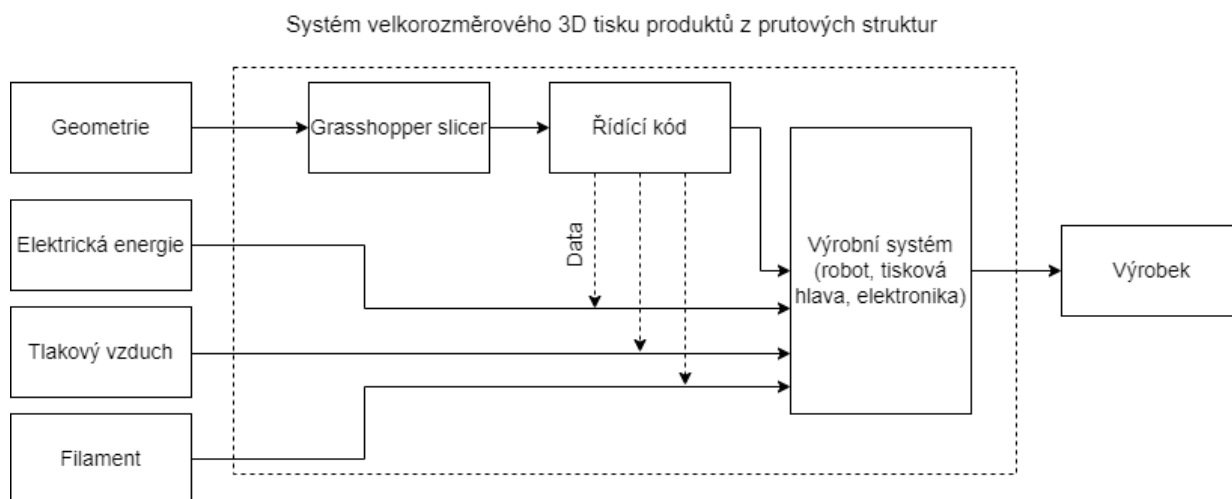
Na Obr. 4-2 je strom cílů rozšířen o omezení. Omezení týkající se procesu výroby jsou použití FFF technologie a konzistentní kvalita výroby. Pro dosažení co největší tvarovatelnosti geometrie musí být zástavbový prostor trysky co nejmenší, aby nedocházelo ke kolizím s již vytištěným materiálem. K výrobě velkorozměrových struktur je dále potřeba většího výrobního prostoru alespoň 2 m³.



Obr. 4-2 Strom cílů rozšířený o omezení

4.1.3 Technická funkční analýza

Na Obr. 4-3 je znázorněna technická funkční analýza systému. Vstupními prvky je požadovaná geometrie, elektrická energie, tlakový vzduch a materiál. Systém je tvořen grasshopper algoritmem (slicerem) a hardwarovým výrobním systémem. Geometrie je ve sliceru zpracována a je získán výrobní kód, ten obsahuje informace o dráze ramena a řídí přísun ostatních prvků, jako je vzduch a materiál. Výsledkem systému je pak vyrobená součást z prutových struktur. Tato součást je dimenzována díky informacím o únosnosti struktury získaných při experimentální měření.



Obr. 4-3 Glass box

4.2 Návrh alternativních řešení

Pomocí morfologické analýzy v Tab. 4 bylo pro každou souhrnnou funkci navrženo několik řešení. První souhrnnou funkcí je kinematický systém výrobního zařízení. Zde se nabízí řešení pomocí šestiosého robotického ramena, dále pak klasický tříosý systém, delta systém a tříosý systém s nakloněnou tiskovou hlavou. Další funkcí je způsob podávání struny materiálu. V tomto případě lze použít tažení struny s předřazeným enkodérem, který podává informace objemovém průtoku materiálu, tažení struny a tlačení struny bowdenem. U způsobu chlazení jsou řešení vzduch vedený vnitřním prostorem trysky po celém obvodu, nevzniká tak prostorové omezení kvůli vzduchovým tryskám a není nutné tisknout pouze v jednom směru naklopení hlavy, u použití vnějších chladících trysek po celém obvodu hrozí riziko kolize s vytištěným materiálem. Riziko kolize je pak menší u řešení s vnějším vedením trysek pouze na jedné straně, zde je ovšem nutné natáčet hlavu ve směru tisku. U slicing strategie se může prostorová struktura rozdělit na řešení po celých buňkách. Takové řešení umožňuje vytvoření trajektorie pro jednu buňku a tu pak rozšířit na ostatní buňky tvořící součást. Další možností je pak použití prutů nebo pouze bodů. Na závěr byl volen vhodný materiál, zde se nabízí PLA, ABS, PET a PC.

Tab. 4 Morfologická analýza

Souhrnná funkce	1	2	3	4
Kinematický systém	Robot 6DOF	XYZ systém	Delta systém	XYZ s nakloněnou hlavou
Způsob podávání struny	Tažení s encoderem	Tažení	Tlačení bowdenem	
Způsob chlazení	Vzduch vedený tryskou po celém obvodu	Vnější vedení kolem trysky po celém obvodu	Vnější vedení z jedné strany	Ventilátory po celém obvodu
Slicing strategie	Po buňkách	Po prutech	Po bodech	
Materiál	PLA	ABS	PET	PC

4.3 Analýza alternativního řešení a výběr nejlepšího

Z navržených řešení bylo vybráno nejlepší a zaznamenáno do Tab. 5 spolu s omezeními podle priority. Jako nejlepší bylo vyhodnoceno použití šestiosého robotického ramena, na kterém bude umístěna tisková hlava. Robotické rameno z navrhovaných variant nejlépe splňuje velký pracovní prostor s dobrou manévrovatelností uvnitř něho a schopností naklápění hlavy v osách. Výhodou také je, že se jedná o běžný komerční produkt, je tedy dobře dostupný. Cena robotického ramena je poměrně vysoká, ale ve srovnání s ostatními systémy, které by musely být speciálně navrženy pro takovéto pracovní prostory, se stále jeví jako vhodná volba. Dodávání struny materiálu by mělo být zajištěno pomocí tažení struny, kdy posuvné kladky jsou přímo v těle extruderu. Oproti tlačení materiálu je výhodou jednodušší konstrukce bez potřeby bowdenu. Pro chlazení materiálu bylo zvoleno vedení vzduchu vnějším prostorem trysky po celém obvodu. Vzhledem k použití vnějších elementů je důležité zahrnout riziko kolize s vytištěnou strukturou a omezení vyrobitelné geometrie. Vnitřní vedení tryskou ovšem v principu zvětší její rozměry, vzniká tak velké omezení prostoru už v oblasti trysky. S ohledem na komplikovanou konstrukci a hlavně vyrobitelnost takové trysky se tak vedení vzduchu vnějším prostorem zdá jako vhodnější varianta. Tvorba výrobních drah je nejvhodněji rozčleněna pomocí samostatných buněk struktury. Tato varianta nabízí největší tvarovou univerzálnost oproti tvorbě samotných prutů, či pouze koncových bodů. Jako nevhodnější materiál byl vybrán polymer PLA, který vyniká svojí dobrou zpracovatelností při použití v 3D tisku. Oproti ostatním materiálům je teplota skelného přechodu velice nízká a je tak zajištěna větší kvalita ve spojích prutů.

Tab. 5 Vybrané řešení v tabulce s prioritami

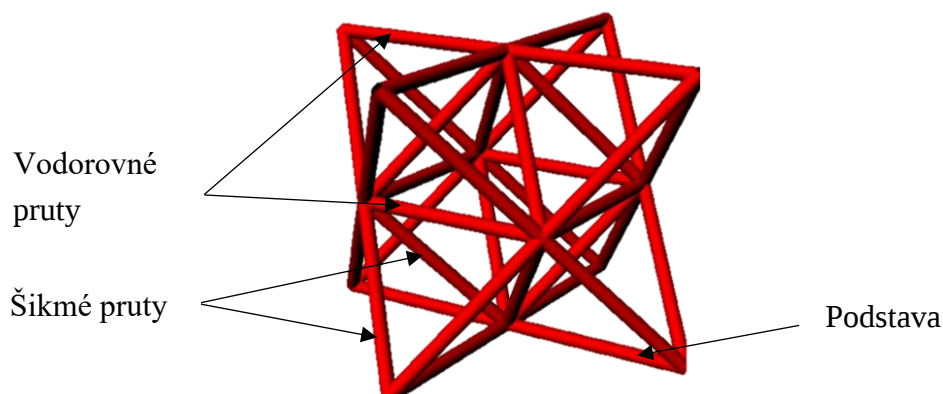
Funkce a omezení	Priorita	6DOF, tažení struny, chlazení vnějšími elementy po celém obvodu, slicování po buňkách, materiál PLA
Schopný vyrobit požadovanou geometrii	xxx	*
Uživatelsky přívětivý	xxx	*
Pracovní prostor musí dosahovat velkých rozměrů (jednotky m)	xxx	*
Dlouhá životnost (měsíce, roky)	xx	*
Použití FDM technologie	xxx	*
Cenová dostupnost	xx	*
Konzistentní kvalita výroby	xxx	*

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

5.1 Návrh experimentu

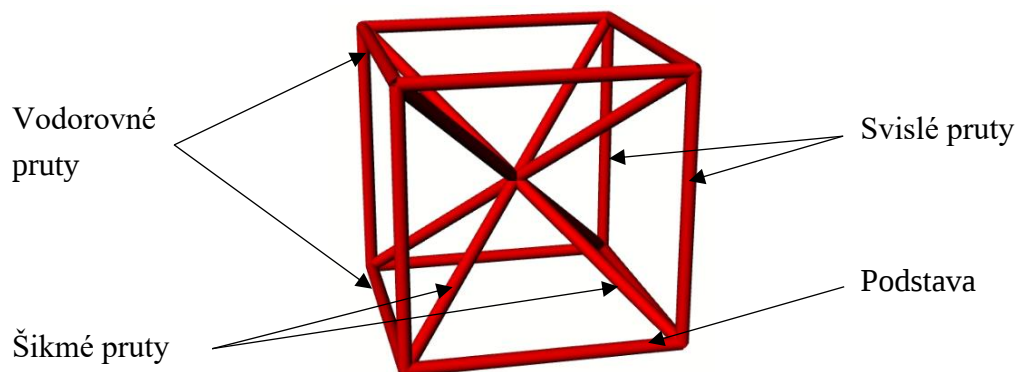
Pro experimenty ověřující únosnost a chování struktur pod tlakovým zatížením byly vybrány dva typy topologie buněk struktury. První z nich je hojně využívaná oktetová příhradová mřížka a druhá prostorově centrovaná mřížka bcc (body centered cubic).

Oktetová příhradová struktura (Octet-truss) se skládá z šikmých a vodorovných prutů. Pruty diagonálně spojují rohové body stěn stejně jako plošně centrovaná mřížka. Uvnitř buňky se nachází pruty spojující středy stěn a tvoří oktahedron. Pro rozlišení prutů je v této práci buňka rozdělena na šikmé pruty stoupající a klesající a vodorovné pruty.



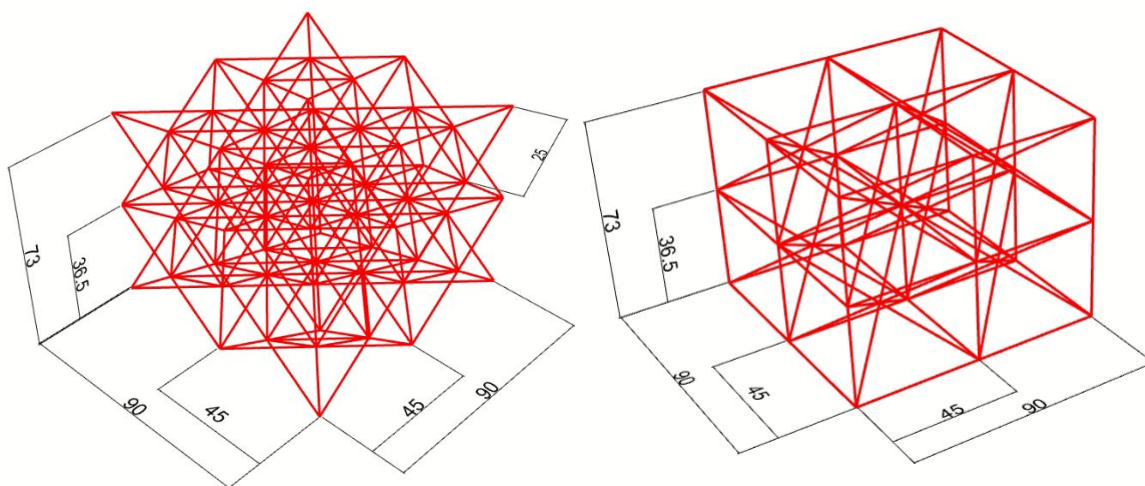
Obr. 5-1 Buňka oktetové příhradové struktury s popisem

Bcc mřížka je tvořena šikmými pruty spojujícími se ve středu buňky. Pro účely tisku byla rozšířena z důvodu značného zvýšení pevnosti při použití svislých a vodorovných prutů, které zároveň zacelují tvar struktury a eliminují tak ostré rohy při napojování samotných buněk. Takováto struktura bývá také označována jako BCCXYZ [34]. Tímto vyhlazením povrchu je struktura vhodnější pro výrobu produktů. Pro rozlišení prutů je v této práci buňka rozdělena na šikmé pruty, vodorovné pruty a svislé pruty.



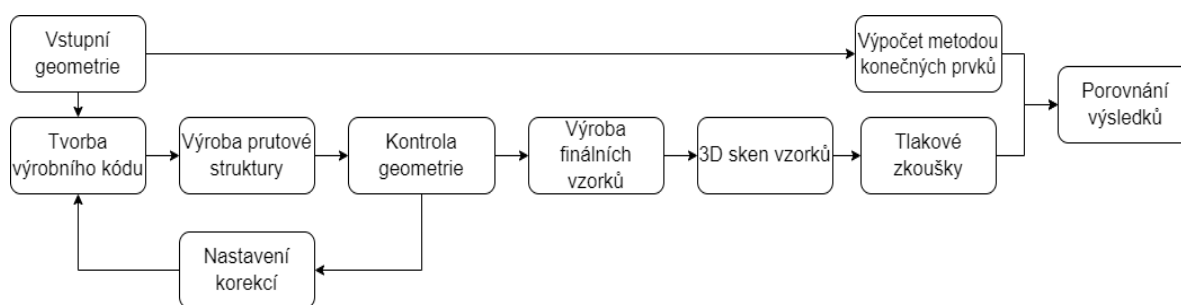
Obr. 5-2 Buňka bcc struktury s popisem

Délka stoupajících prutů byla volena po předchozích experimentech Křivohlavého [7] mezi 25 mm a 35 mm, na základě nejlepší tisknutelnosti. Tyto rozměry se rovněž dají považovat za velkorozměrové. Budou vyrobeny tři typy vzorků o délce prutů 25 mm, 30 mm a 35 mm pro každou ze dvou topologií buňky. Takto bude možné zkoumat vliv délky prutů na únosnost struktury. Počet buněk struktury byl s ohledem na pracovní prostor testovacího zařízení tlakových zkoušek omezen na 2 x 2 x 2. Úhel stoupání prutů je z důvodu aktuální geometrie hotendu tiskové hlavy 43°, při tomto úhlu je struktura plně vyrobitelná a nedochází ke kolizím materiálu s tiskovou hlavou. Vybraným materiálem pro výrobu je polymer PLA vzhledem ke své dobré zpracovatelnosti a dobrým výsledkům v předchozích experimentech.



Obr. 5-3 Ukázka navržených vzorků s délkou šikmých prutů 25 mm (vlevo octet-truss, vpravo BCC)

Postup experimentu je zobrazen na Obr. 5-4. Základem je vstupní geometrie o dané topologii buňky, délky prutů a úhlu prutů. Z geometrie bude vytvořen výrobní kód pomocí sliceru v softwaru Grasshopper. Při výrobě struktur musí být nastaveny vhodné korekce geometrie zajišťující přesnost geometrie a tím úspěšné napojení navazujících prutů v přesných místech spojů. Po odladění geometrie budou vyrobeny finální vzorky. Pro každou konfiguraci parametrů budou vyrobeny čtyři kusy vzorků k validaci výsledků zkoušek. Paralelně s tímto postupem bude provedena analýza zatížení pomocí metody konečných prvků v softwaru Ansys Mechanical. Získané hodnoty maximálního zatížení před selháním struktury budou porovnány z obou částí experimentu. Z výsledků má být zjištěn rozdíl únosnosti vyrobených vzorků v porovnání s ideálně přesnou geometrií MKP výpočtu znázorňující potenciální maximum, kterého můžou struktury dosáhnout. Na závěr experimentu budou vyhodnoceny výsledky a vliv délky a úhlu prutů na únosnost struktury.



Obr. 5-4 Schéma experimentu

5.2 Použitá zařízení

Současná konfigurace výrobního systému je pouze hardwarová část, která je tvořena robotickým ramenem KUKA, kde je jako efektor umístěna tisková hlava. Box s elektronikou je umístěn externě mimo robotické rameno a s tiskovou hlavou je propojen kabely. Hardware je umístěn v laboratoři robotické aditivní výroby Ústavu konstruování VUT v Brně. Laboratoř dále disponuje rozvodem tlakového vzduchu.

5.2.1 Tisková hlava

Použitá konfigurace tiskové hlavy je zobrazena na Obr. 5-5. Jedná se o novou verzi tiskové hlavy, která byla vyvinuta na Ústavu konstruování VUT. Tisková hlava se skládá z extruderu a chladicího okruhu umístěných na základní desce. Materiál je vsunut do podavače, kde je posouván pomocí dvojice kladek, z nichž jedna je hnaná a druhá přitlačná. Dále prochází do heatsinku, jeho úkolem odvod tepla a tím zamezení šíření tepla od hotendu do zbytku částí extruderu. Za heatsinkem se nachází heatbreak, který odděluje teplou a studenou část tiskové hlavy. Na konci extruderu je umístěn hotend. V něm je zašroubována tryska o vnitřním koncovém průměru 2 mm. Zde je materiál taven a následně vytlačován ven. Další součástí jsou dvě topné patrony o výkonu 2 x 40 W a napětím 24 V. Pro kontrolu teploty je vedle patron umístěn termistor. Na extruderu je umístěn držák pro ventilátor, který proudícím vzduchem ochlazuje heatsink. Vedení tlakového vzduchu z rozvodu laboratoře je řízeno pomocí elektromagnetického pneumatického ventilu. Následně vzduch proudí do průtokoměru. Data z průtokoměru slouží k řízení ventilu čímž je dosaženo požadovaného průtoku vzduchu. Pro vedení vzduchu k trysce materiálu byla použita kloubová hadice. Je tak možné libovolné nastavení směru průtoku vzduchu a vzdálenost od konce hadice od trysky extruderu. Je tak zamezeno kolizi hadice s vytištěným materiálem. Nevýhodou je chlazení pouze z jedné strany, které je ovšem možné snadno rozšířit do více hadic. Box s elektronikou je umístěn mimo rameno robota a je propojen kabely taženými po rameni.

5.2.3 ATOS 3D sken

K získání 3D modelů struktur je použita technologie 3D skenování. U takto tvarově obsáhlejších struktur je ovšem velmi náročné pomocí této technologie naskenovat veškerý povrch. Použit je model ATOS TripleScan 8M s optikou MV170. Měřicí plocha skeneru je 170 x 130 mm ze vzdálenosti 440-2000 mm. Skener dosahuje rozlišení 8 milionů bodů na sken. Ke zrychlení procesu skenování je součástí také otočný stůl [30].



Obr. 5-7 ATOS TripleScan [30]

5.2.4 Siloměr

Tlakové zkoušky struktur jsou prováděny na zařízení MX2-2500N od společnosti IMADA. Zařízení se skládá z motorizovaného stolu a elektronického siloměru. Zařízení využívá celou řadu vyměnitelných čelistí pro širokou škálu tahových a tlakových testů. Rychlost posuvu je možné nastavit od minimální hodnoty 10 mm/min až po 300 mm/min. Maximální délka zdvihu je 290 mm. Maximální síla, kterou může být siloměr zatížen je 2500 N. Velikost měřicí podstavy je 140 x 200 mm, průměrná výška je 300 mm a mění se podle použitých čelistí [32]. Siloměr zaznamenává hodnotu síly každých 0,005 sekundy a pomocí hodnoty rychlosti posuvu lze dopočítat posunutí. Data mohou být exportována do výstupního listu nebo tabulky zaznamenaných hodnot v excelu.



Obr. 5-8 IMADA MX2-2500N [32]

5.3 Použitý materiál

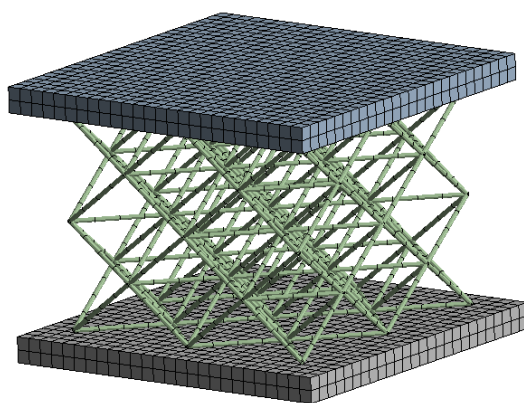
Zvoleným materiálem z důvodu nejlepší zpracovatelnosti a dobrým výsledkům z předchozích výzkumů byl polymer PLA. Materiál je ve formě struny namotané na cívce. Označení materiálu je PLA Extrafill od společnosti Fillamentum. Podrobné vlastnosti materiálu jsou zobrazeny v Tab. 6 [31].

Tab. 6 Vlastnosti materiálu PLA Extrafill [31]

Vlastnost materiálu	Hodnota	
Hustota	1,24	g/cm ³
Index toku taveniny	6	g/10 min
Průměr struny	2,85	mm
Pevnost v tahu	53	MPa
Modul pružnosti	3600	MPa
Teplota skelného přechodu	55-60	°C
Doporučená teplota při tisku	190-210	°C

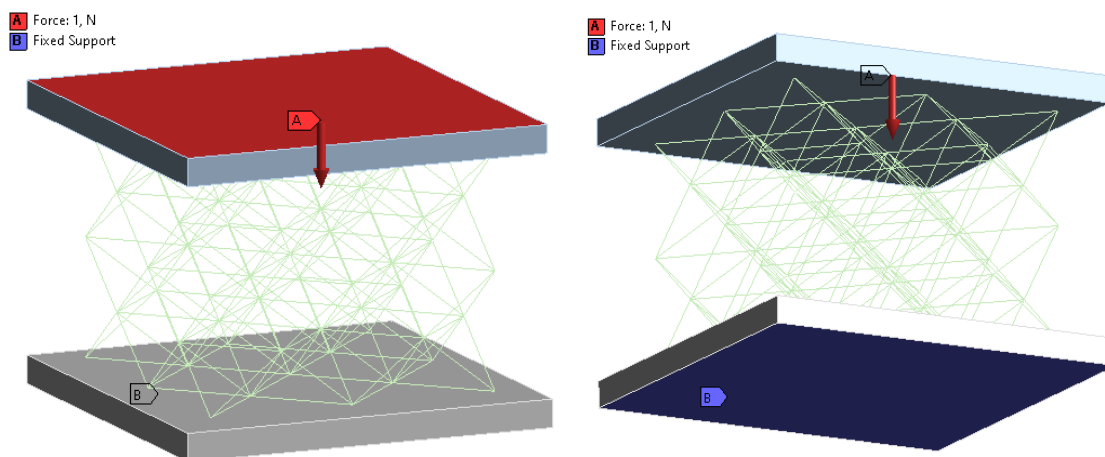
5.4 MKP analýza

Výpočet metodou konečných prvků byl prováděn v softwaru Ansys Mechanical. Použité analýzy byly lineární a nelineární statická strukturální a lineární vzpěr. Zatížení potřebné pro plastickou deformaci prutů bylo vyšší než kritická vzpěrná síla, tím pádem dochází v prutech k namáhání vzpěrem. Struktury byly tedy počítány na mezní stav vzpěrné stability, kde byla výsledkem maximální kritická síla.



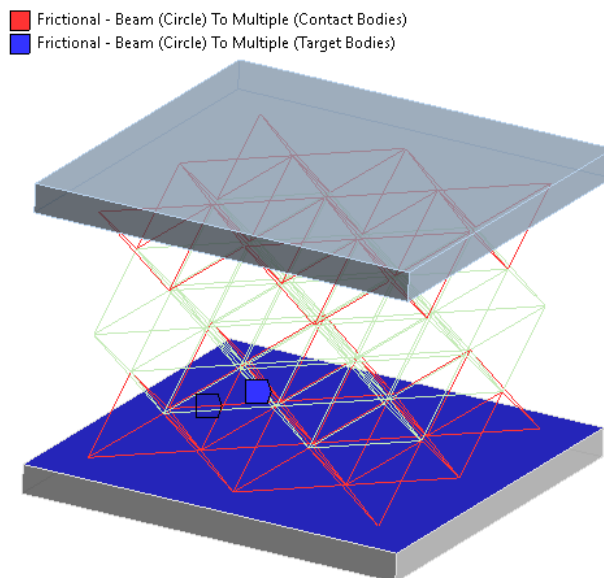
Obr. 5-9 Síť prvků vstupní geometrie

3D model struktury byl vytvořen v softwaru Rhinoceros Grasshopper a přes formát IGES importován jako drátový model do Ansysu. Model byl tvořen jednotlivými pruty spojenými v uzlech, proto byla v Ansys Spaceclaim geometrie prutů pro zjednodušení výpočtů spojena do jednoho celku. Zároveň byly na spodní a horní straně vymodelovány desky, které simulují zatěžovací plochu stejně jako při reálných experimentech. V prostředí *Mechanical* byl prutům přiřazen kruhový průřez o průměru 1,82 mm stejně jako rozměr tištěných prutů. Síť prvků byla nastavena na výchozí a její podoba je zobrazena na Obr. 5-9.



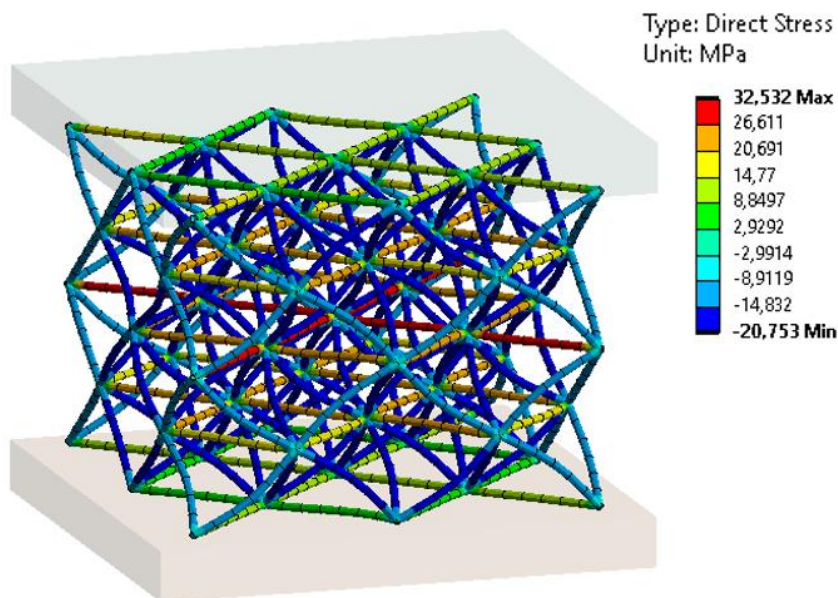
Obr. 5-10 Umístění okrajových podmínek (vlevo silové zatížení, vpravo fixní vazba)

Na vytvořené geometrii byly nastaveny okrajové podmínky (Obr. 5-10). Na spodní plochu podstavy byla nastavena pevná vazba. Působící síla byla umístěna na horní plochu zatěžovací desky. Kontakt mezi tělesem struktury a zatěžovacími deskami byl nastaven jako se třením a se součinitelem tření 0,2 (Obr. 5-11). K ošetření rozhraní byla zvolena funkce *adjust to touch*.



Obr. 5-11 Umístění kontaktů

Výpočet začíná v nastavení okrajových podmínek, kde je hodnota síly nastavena na 1 N. Následně je provedena statická analýza určující předzatížení, po které následuje analýza lineárního vzpěru (*eigenvalue buckling*). Výsledkem analýzy na vzpěr je maximální lineární kritická síla po jejímž překročení nastane mezní stav vzpěrné stability. Předdeformovaný model je z výsledku analýzy na vzpěr přenesen do nové nelineární statické strukturální analýzy. Počet kroků výpočtu byl nastaven na 50. Kritická síla je zjišťována pomocí nastavené reakční síly pevné vazby. Hodnota reálné kritické síly je poslední zkonvergovaná vypočtená hodnota. Zatížení struktury před porušením mezního stavu vzpěrné stability je na Obr. 5-12.



Obr. 5-12 Výsledné hodnoty napětí oktetové struktury 25 mm

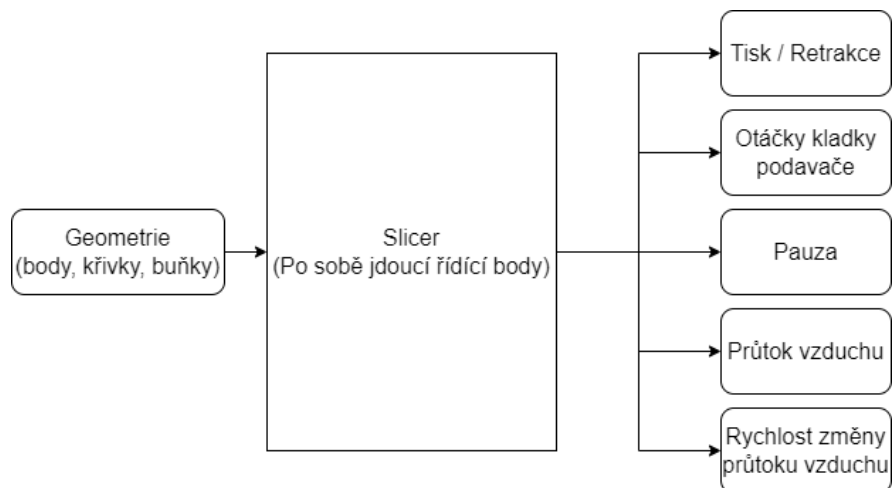
5.5 Návrh výrobního algoritmu

Řídící program, podle kterého se robotické rameno pohybuje je ve formátu SRC kódu. V modulu Grasshopper je pro generování řídicích kódů pro roboty Kuka speciální plugin Kuka|prc. Ten převede potřebné výstupy na formát zpracovatelný systémem robota. Soubor s kódem je poté nahrán do řídicího systému robota a spuštěn. Parametrem navrhovaného výrobního algoritmu neboli sliceru, je tedy převést vstupní geometrii na požadované výstupy pro výrobu.

Z nahrané geometrie, která má být vyrobena, vytvoří algoritmus přesně po sobě jdoucí řídicí body. Tyto body jsou zapsány ve výrobním kódu spolu s rychlostí pohybu. Body představují polohu konce trysky tiskové hlavy. V každém bodě je definováno natočení tiskové hlavy ve všech osách. Trajektorii mezi body tvoří přímka a v případě změny natočení tiskové hlavy se tak děje rovnoměrně v průběhu celého přesunu mezi body. Zároveň je pro každý bod vygenerováno několik příkazů popisující kompletní chování celého systému. Systém po dosažení jednoho bodu načítá informace o chování pro následující bod, nastavené hodnoty tedy již platí na trajektorii vedoucí do onoho bodu.

Výstupy kódu jdoucí do řídicího systému ovládání tiskové hlavy jsou vytvořeny pomocí Python skriptů umístěných v algoritmu. Jednotlivě jsou výstupy zobrazeny na schématu na Obr. 5-13. Prvním z nich je volba, zda se jedná o tisk materiálu a je tak spuštěna extruze, případně zda se jedná o retrakci a přejezd, při čemž dochází pouze k přesunu mezi tištěnými trajektoriemi a extruze je vypnuta. Dalším z výstupů jsou otáčky kladky podavače, tím je

řízen posuv struny související s množstvím vytlačeného nataveného materiálu. Dále je možné v každém bodě udělat časovou pauzu. Toho je využíváno například ve spojích, kde je záměrem nejlepší prohřátí materiálu. Výstupy ovlivňující chlazení materiálu jsou průtok vzduchu udávaný v litrech za minutu a rychlost s jakou dojde ke změně tohoto průtoku vzduchu.



Obr. 5-13 Schéma vstupů a výstupů řídicího programu

5.6 Odhad výrobních nákladů a výroby

Výrobní náklady hardwaru systému bez uvažování robotického ramena se pohybují zhruba na 75 000 Kč. V ceně je zahrnuta tisková hlava a box s elektronikou. Vyráběné díly tiskové hlavy jsou hotend a feeder. Cena výroby těchto dílů je zhruba 27 000 Kč. Cena kupovaných dílů vyhřívání a ovládání chladicího vzduchu se pohybuje okolo 13 000 Kč. Cena všech součástí boxu s elektronikou je zhruba 9 000 Kč. Odhadovaná cena práce potřebná na výrobu hardwaru je 26 000 Kč. Předpokládaná výroba bude kusová při objemu výroby maximálně 100 kusů ročně. Výroba dílů bude probíhat konvenčně třískovým obráběním polotovaru, případně aditivní výrobou.

6 DETAILNÍ NÁVRH

6.1 Tisk prostorových struktur

6.1.1 Parametry tisku

Při tisku prostorových prutů musí dojít na správnou konfiguraci všech parametrů jejichž hodnoty na sebe vzájemně navazují. Pro danou rychlost pohybu musí být zvolena vhodná rychlost extruze k zachování materiálového průtoku. Rychlost pohybu musí být taková, aby byl proudící vzduch ochlazující vytlačený materiál schopný včas snížit teplotu pod hranici skelného přechodu a tím zajistit udržení tvaru prutu. Přesnost nastavení výrobních parametrů tedy zásadně ovlivňuje přesnost výsledné geometrie prutů.

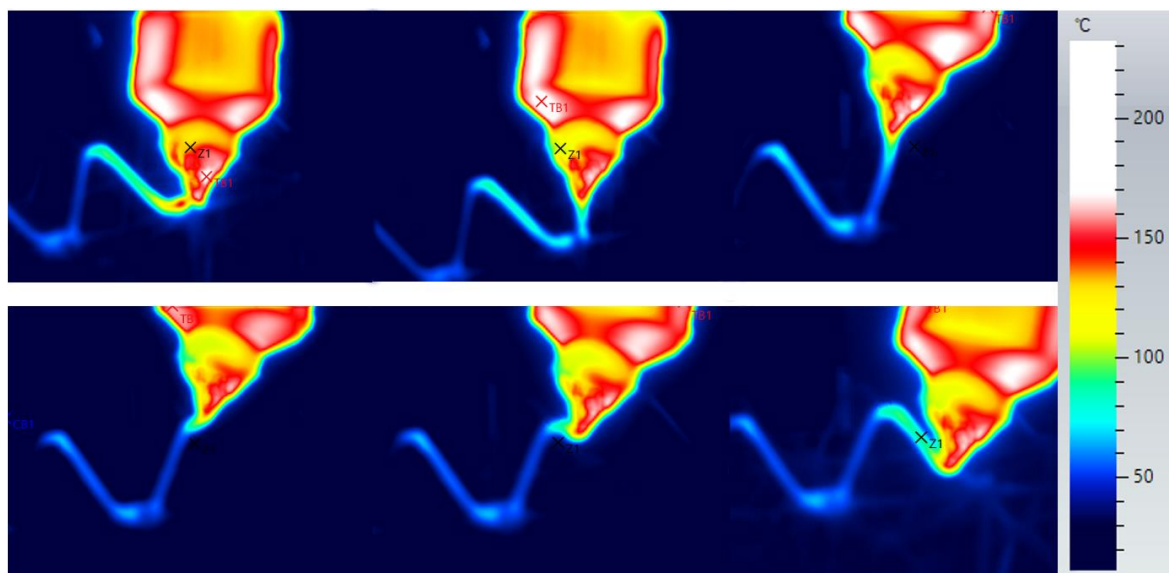
Procesní parametry tisku jsou uvedeny v Tab. 7. V průběhu experimentů se podařilo navýšit rychlost pohybu tiskové hlavy z 1,5 mm/s na 3,1 mm/s. Pro tuto rychlost byla nastavena teplota 240 °C, která je vyšší než doporučený rozsah pro materiál PLA. Vyšší teplota zlepšila kvalitu tisku a pevnost spojů prutů. Během chlazení totiž docházelo k poklesu teploty hotendu vlivem úniků tepla až o 40 °C při nejvyšších průtocích vzduchu. Při otáčkách kladky 0,96 ot/min byl materiálový průtok 8,06 mm³/s. Výsledkem byly pruty o průměru 1,82 mm. Na chlazení byl použit průtok 60 l/min stlačeného vzduchu z rozvodu v laboratoři.

Tab. 7 Procesní parametry tisku

Název		Počáteční nastavení	Konečné nastavení
Teplota	[°C]	240	240
Otáčky kladky	[ot/min]	0,5	0,96
Rychlost pohybu	[mm/s]	1,5	3,1
Materiálový průtok	[mm ³ /s]	3,9	8,06
Průtok vzduchu	[l/min]	35	60

Pro ověření dostatečného chlazení při rychlosti pohybu 3,1 mm/s bylo provedeno snímání tisknutých prutů termokamerou. Na Obr. 6-1 je vidět série snímků zachycujících teplotní průběh při tisku šikmých prutů BCC struktury. Na prvním snímku se tryska nachází v místě spoje prutů, chlazení je zde vypnuto a teplota materiálu ve spoji se pohybuje na 130 °C. Tato teplota je dostatečná k překročení teploty skelného přechodu na již vytištěném prutu a mělo by tak dojít k vytvoření pevného spoje. Na druhém snímku probíhá tisk stoupajícího prutu, proud vzduchu zapnutý hned po zahájení stoupání ochlazuje vytlačený materiál. Došlo

rovněž k ochlazení spoje. Teplota stoupajícího prutu se pohybuje na 40 °C, tedy s dostatečnou rezervou pod teplotou skelného přechodu. Teplota materiálu po výstupu z trysky se pohybuje na 80 °C, je tak dosaženo rychlého chlazení přímo za tryskou. Vrchol prutu na 5. snímku je stále plně chlazen. Při tisku klesajícího prutu na 6. snímku je průtok vzduchu omezen na 2/3 původní hodnoty a teplota se pohybuje na 70 °C, materiál zůstává mírně tvárný. Prut je pohybem tiskové hlavy při klesání mírně natahován a není třeba tak intenzivního chlazení.



Obr. 6-1 Série snímků z termokamery tisku šikmých prutů BCC struktury

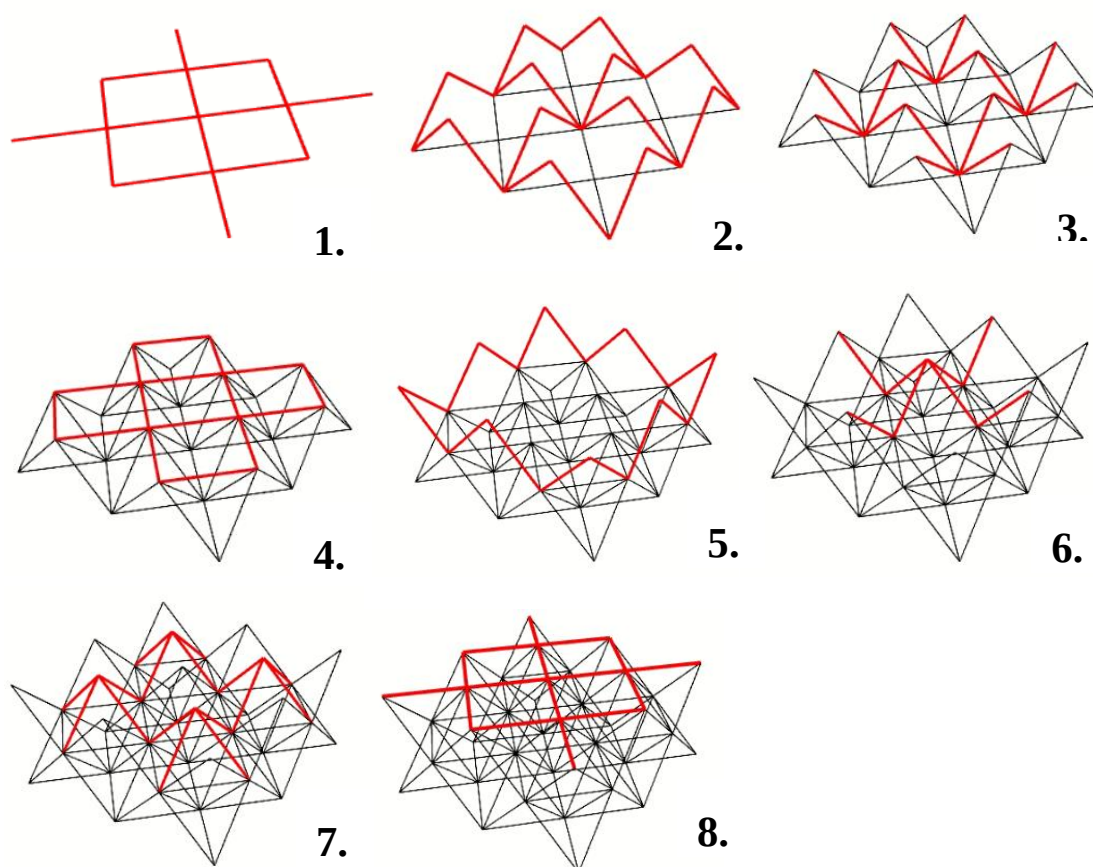
6.1.2 Výrobní strategie

Pro každou ze dvou zvolených topologií buněk byla použita rozdílná výrobní strategie. Oktetová příhradová struktura se skládá pouze z klesajících, stoupajících a vodorovných prutů. U kombinace bcc topologie jsou navíc obsaženy také svislé pruty, jejichž výroba do této doby na tomto zařízení neprobíhala a bylo tak potřeba navrhnout vhodný postup.

Oktetová příhradová topologie

Stavba oktetové topologie začínala podstavou tvořenou na sebe kolmými vodorovnými pruty (Obr. 6-2 pozice 1). Zde byla nastavena vyšší rychlost tisku bez použití chlazení a naklopení tiskové hlavy. Následovala první skupina šikmých prutů (poz. 2) s naklopením tiskové hlavy o 30° ve směru tisku a chlazení probíhalo po celou dobu tisku mimo spoju s podkladovými pruty. Počátek a konec druhé skupiny šikmých prutů začíná na vrcholech první skupiny šikmých prutů (poz. 3). U tisku nebyla naklopena tisková hlava z důvodu průchodnosti trysky mezi již vytištěným materiálem a chlazení bylo vypínáno v místech spojů. V polovině buněk byly tištěny vodorovné pruty (poz. 4) bez naklopení tiskové hlavy a vypínání chlazení probíhalo ve spojih. K tisku jedné skupiny šikmých prutů v druhé polovině buněk by byly

potřeba svislé pruty, ze kterých by tisk začínal vzhledem k umístění jejich počátku v prostoru. Svislé pruty by ovšem musely být následně odstraněny, protože by ovlivňovaly výsledky tlakových zkoušek. Následoval proto tisk krajních šikmých prutů (poz. 5), který byl rozdělen na dvě poloviny a začínal vždy v místě spoje s již vytištěnými vodorovnými pruty. Tisk probíhal s 30° naklopením tiskové hlavy ve směru tisku a chlazení bylo vypínáno v místech spojů. Na tyto krajní pruty byly dále navázány zbylé šikmé pruty struktury (poz. 6 a 7) vyráběné bez naklopení tiskové hlavy. Jako poslední byly vytištěny další vodorovné pruty, na kterých můžou pokračovat šikmé pruty dalšího patra struktury a celý proces se opakuje.

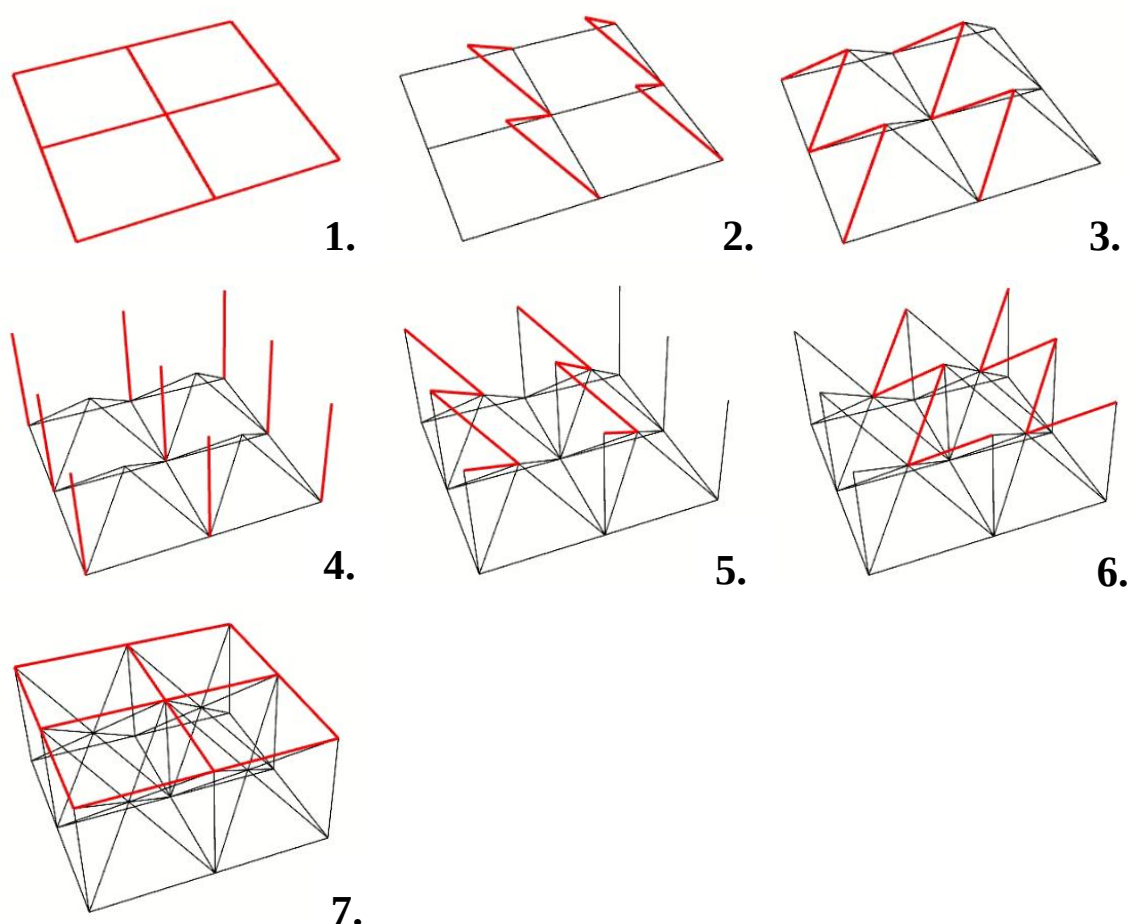


Obr. 6-2 Výrobní strategie struktury oktet příhradová

BCC topologie

Výroba bcc mřížky začíná čtvercovou podstavou (Obr. 6-3 poz. 1) bez naklopení tiskové hlavy s vypnutým chlazením a vyšší rychlostí tisku. Šikmé pruty buňky byly rozděleny na polovinu a stavěny ve sklonu. U prvních šikmých prutů (poz. 2) byla tisková hlava naklopena kolem dvou os tak, aby osa trysky byla více kolineární s osou stoupajícího prutu. Druhá polovina spodních šikmých prutů (poz. 3) byla tisknuta bez naklopení tiskové hlavy z důvodu zamezení kolize s již vytištěným materiálem. Následoval tisk svislých prutů (poz.

4). Během přejezdu, kdy tisková hlava byla nad místem počátku tisku prutu, byla spuštěna extruze. Po cestě k počátku prutu bylo vyextrudováno malé množství materiálu, které se po dosažení polohy počátku prutu rozptýlilo a vytvořilo větší plochu spoje držící stavěný prut. Následoval tisk prutu až do konečné polohy. Zde byla nastavena pauza, během které byl stále extrudován materiál a vzniklo tak silnější ukončení prutu s větší plochou pro vytvoření spoje. Následovala druhá skupina šikmých prutů (poz. 5 a 6). U obou částí bylo tisknuto bez naklonění tiskové hlavy. Nakonec byla struktura uzavřena dalšími vodorovnými pruty čtvercového tvaru (poz. 7).

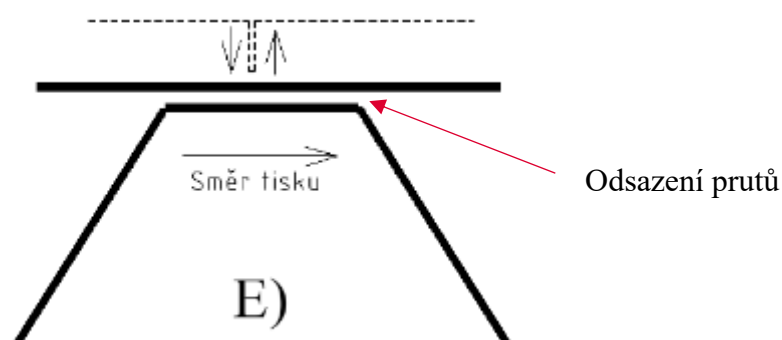


Obr. 6-3 Výrobní strategie struktury BCC

6.1.3 Způsob napojení prutů

Napojení prutů bylo u oktetových struktur realizováno metodou získanou z řešeršní části. V místě spoje byla tryska zasunuta o 0,7 mm kolmo do materiálu jako na Obr. 6-4. Zároveň byl v místech všech spojení vypnut proud chladicího vzduchu. U bcc struktur byl zvolen jiný postup k zjednodušení tvorby řídicích bodů z prutů. Do míst spojení byl přidán příkaz s pozastavením pohybu ramena po daný časový úsek. Ve spoji tak došlo k setrvání a stále

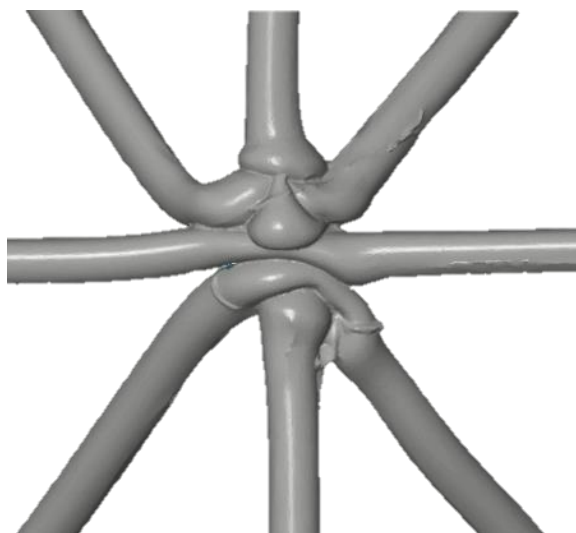
extruzi, čímž došlo k nahromadění materiálu a dostatečnému prohřátí spoje. Experimenty začínaly na délce pauzy 2 sekundy, tento časový úsek se ukázal jako zbytečně dlouhý. Pro vytvoření pevného spoje je minimální doba v řádu desetin sekundy. K dosažení pevného spoje s větším množstvím materiálu je optimální doba 0,5 sekundy.



Obr. 6-4 Metoda napojení prutů [7]

Důležitou součástí kvalitního spoje je překrytí prutů v místě spojů vlivem odsazení prutů, to je dáno vzdáleností os prutů ve spoji znázorněné na Obr. 6-4 Metoda napojení prutů [7]. Bylo přistoupeno k použití menších odsazení prutů. Prvním důvodem je vytlačení materiálu do stran a tím zvětšení plochy, na které je spoj vytvořen. Větší kontaktní plocha zvýší pevnost spoje. Dalším důvodem byla snaha zmenšit konečnou výšku buňky, která nabývá o hodnoty odsazení spojů prutů. Při velkých počtech buněk struktury tvoří součty odsazení ve všech spojích poměrně velké změny rozměrů konečné výšky struktury a je s tímto efektem nutné počítat při návrhu modelu produktu. Příkladem může být struktura bcc, u které bylo výsledné zvětšení výšky buňky součtem všech odsazení 4 mm. Buňka struktury s výškou 58 mm je tedy vyrobena vysoká 62 mm, při použití 10 buněk nad sebou je již výsledná výška výrobku o 40 mm větší. Řešením je snížení výšky buňky čímž se změní délky svislých a šikmých prutů.

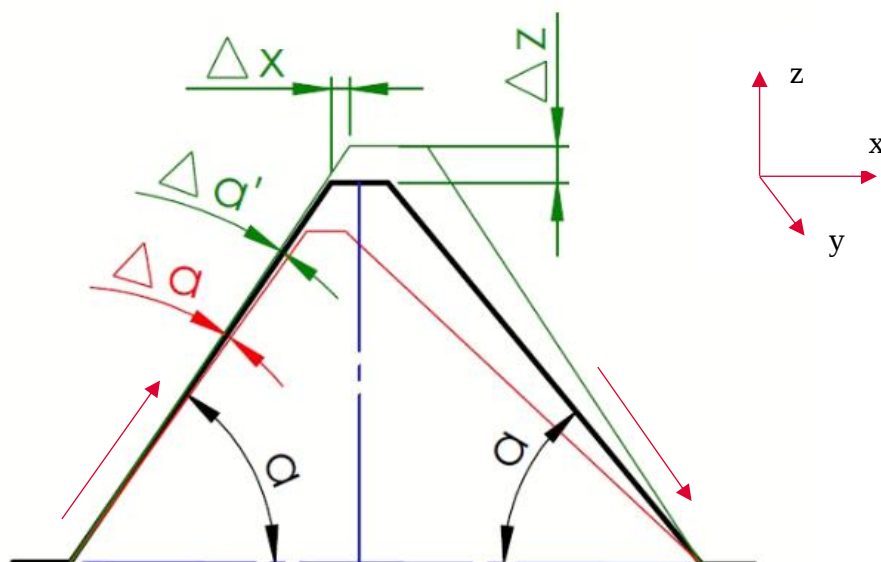
Velikosti odsazení byly voleny v závislosti na tisknutém prutu. Každá varianta vyžadovala jiné hodnoty. U tisku šikmých a vodorovných prutů struktur byla nejvhodnější hodnota odsazení 0,5 mm. Při tisku svislých prutů byla nejvhodnější hodnota odsazení 2,4 mm. Podoba výsledného spoje několika druhů prutů bcc struktury je zobrazena na Obr. 6-5.



Obr. 6-5 Detail spoje BCC struktury

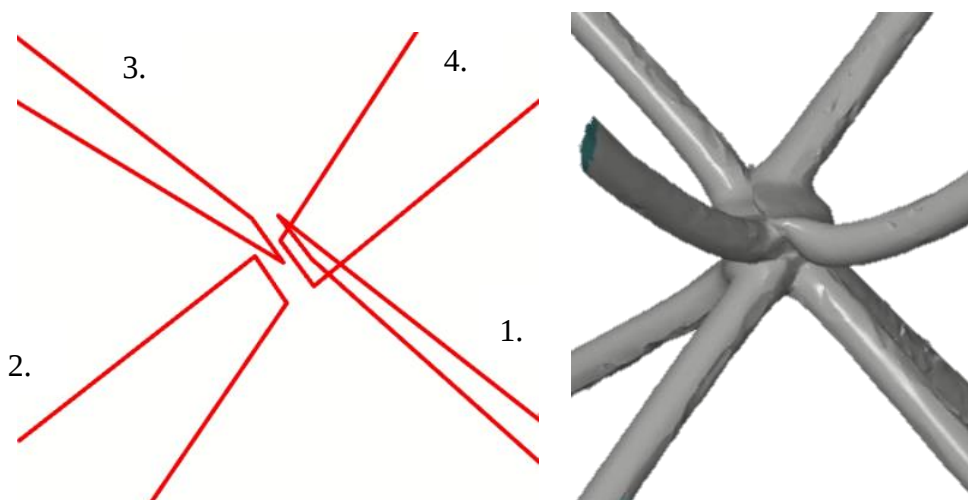
6.1.4 Korekce geometrie

U tisknutých prutových struktur musela být korigována geometrie šikmých prutů. Stejně jako u popsaného efektu v rešeršní části byla geometrie šikmých prutů nahrazena lichoběžníky tvořené základnou a rameny. Důvodem je zamezení kolize s již vytištěným materiálem. Dalším způsobem korekce byla úprava výrobní trajektorie. Schéma korekce je zobrazeno na Obr. 6-1. Červené šipky označují směr tisku. Černý lichoběžník představuje požadovaný tvar lichoběžníku, červená tvar lichoběžníku získaný použitím trajektorie kopírující černý lichoběžník, zelená korekci trajektorie pro získání černého lichoběžníku. Při tisku nebyla dosažena požadovaná výška a délka horní základny lichoběžníku. Trajektorie tak byla upravena pomocí parametrů Δx a Δz . Hodnoty korekcí byly experimentálně upravovány tak, aby byla zajištěna co nejvyšší přesnost napojení prutů. Kvalitou a přesností míst spojů byla ověřena přesnost geometrie prutů a správnost korekcí. U oktetové struktury byly parametry korekcí lichoběžníků popsány na Obr. 6-6 $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$ a $\Delta z = 1 \text{ mm}$. Délka horní základny lichoběžníku byla u všech struktur 3 mm.



Obr. 6-6 Korekce šikmých prutů

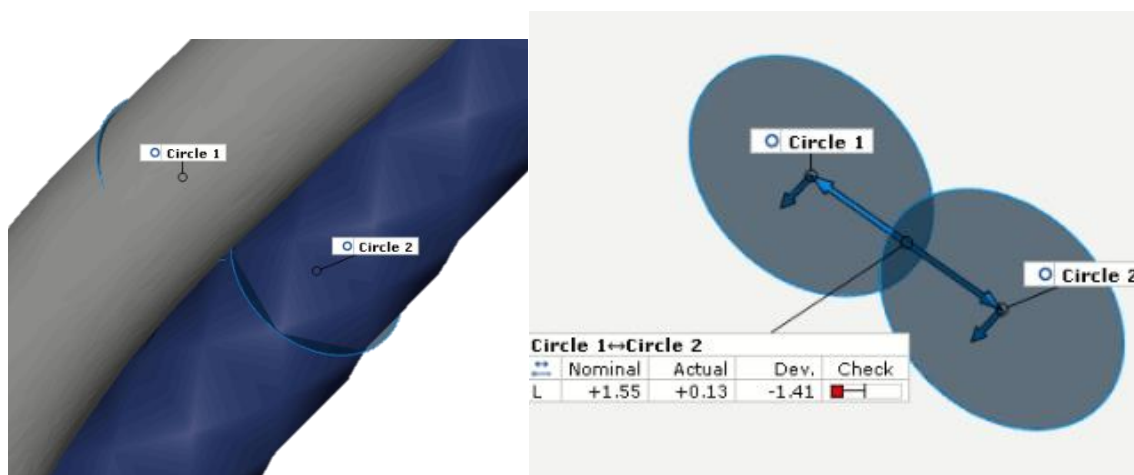
U bcc struktury byla trajektorie prvních šikmých prutů (popis prutů podle Obr. 6-3) upravena na $\Delta x = 1 \text{ mm}$ a $\Delta z = 2,5 \text{ mm}$. Pruty jsou naklopeny ve dvou osách a docházelo k většímu poklesu prutu. Proto byla upravena poloha horní základny lichoběžníku ose y o $\Delta y = 0,5 \text{ mm}$. Schéma spoje všech prutů je na Obr. 6-7. Druhý lichoběžník (Obr. 6-7 vlevo dole) se již ve vrcholu opíral o předchozí vytištěný prut, korekce byla tedy $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$, $\Delta z = 1 \text{ mm}$ a $\Delta y = -0,5 \text{ mm}$. Horní lichoběžníky již navazovali na vytvořený spoj. Třetí lichoběžník (Obr. 6-7 vlevo nahoře) měl korekci $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$, $\Delta z = -0,5 \text{ mm}$ a $\Delta y = -0,5 \text{ mm}$. Druhý horní lichoběžník (Obr. 6-7 vpravo nahoře) měl korekci $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$, $\Delta z = -1,5 \text{ mm}$ a $\Delta y = -0,5 \text{ mm}$. Tímto způsobem bylo dosaženo pevného a plného spojení prutů.



Obr. 6-7 Vlevo korigované trajektorie ve spoji šikmých prutů BCC struktury, vpravo vytvořený spoj

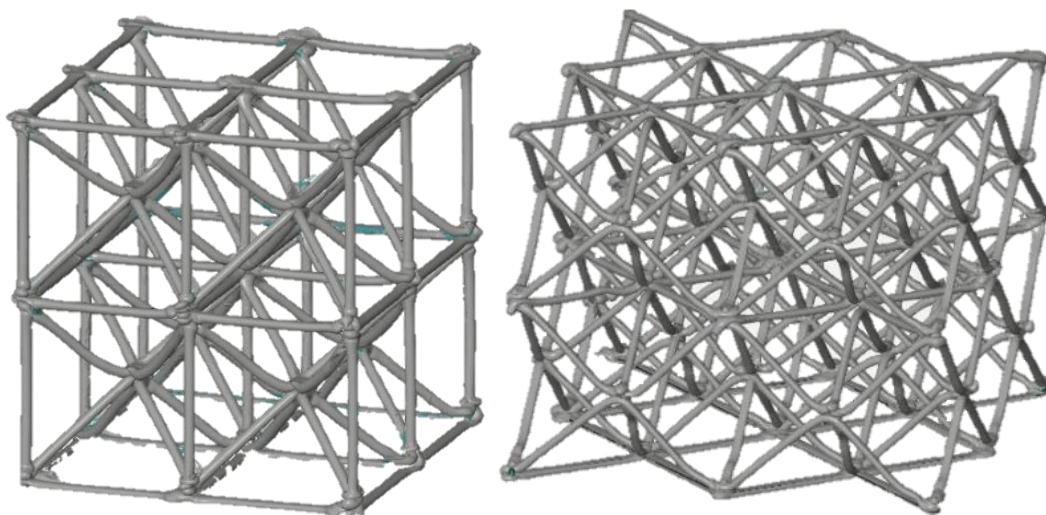
6.1.5 Přesnost tisku

Na vytištěných strukturách byla porovnávána přesnost tisku. 3D sken struktur byl v softwaru GOM Inspect 2018 porovnáván s ideálním modelem a následně byly porovnávány struktury mezi sebou. Byla tak zjišťována přesnost opakovatelnosti tisku. Odchytky prutů byly měřeny pomocí proložení prutů kružnicemi v jednom místě a změřením vzdálenosti jejich středů, jak je zobrazeno na Obr. 6-8.



Obr. 6-8 Prokládání prutů kružnicemi při měření odchylek (vlevo proložené pruty, vpravo naměřená odchylka)

Při porovnání skenů s ideální geometrií vykazovala struktura poměrně dobré výsledky přesnosti. Ukázka 3D skenů struktur je na Obr. 6-9. Polohy spojů prutů byly na stejných pozicích. Rozdíly byly v přímosti prutů, kde na reálných vzorcích docházelo k prohnutí prutů v oblastech u spojů. To je způsobeno korekcemi geometrie, kdy ve vrcholech šikmých prutů dochází k vodorovnému posuvu z nutnosti vyhnutí kolize s již vytištěným materiálem a ve spodních bodech z důvodu vytvoření prostoru pro napojení kolmo jdoucího prutu. Největší naměřené odchylky v lokálních místech se pohybovaly od 1,5 mm do 1,8 mm, jejich počet byl nízký 1 až 2 případy na vzorek. Běžnou odchylkou prutů tak byly řády desetin milimetru. Pro zvýšení přesnosti bylo používáno naklopení tiskové hlavy ve směru tisku o 30° u oktetových struktur a o 20° u bcc struktur. Velikost úhlu představuje úhel mezi svislou polohou a naklopenou polohou tiskové hlavy. Toto naklopení bylo aplikováno ve zhruba polovině případů u oktetových struktur a pouze u jedné skupiny prutů bcc struktur. Důvodem byly velké zástavbové prostory hotendu tiskové hlavy a tím vznik kolize s již vytištěným materiálem a hotendem tiskové hlavy. Na základě tohoto omezení tak musely být zbylé pruty tisknuty bez naklopení tiskové hlavy, což způsobovalo podstatné zvýšení nepřesnosti vyrobených prutů.



Obr. 6-9 3D skeny vyrobených struktur (vlevo bcc, vpravo oktet)

Jako další byly porovnávány 3D skeny vzorků stejných parametrů. Rozdíly mezi strukturami byly pouze při lokálních vyhnutích prutů a vyskytovaly se ojediněle. Zde docházelo k výchyilkám až 1,7 mm. Mimo tato místa si struktury velmi dobře odpovídaly a odchylky tak byly v řádu setin, maximálně desetin milimetru.

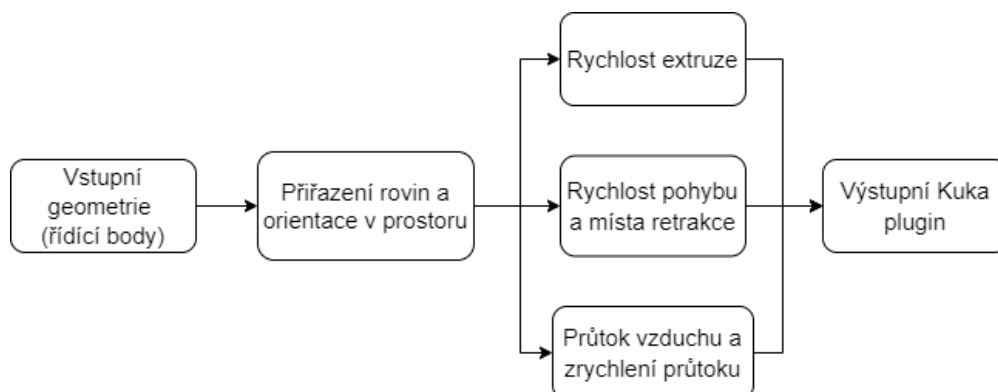
6.2 Výrobní algoritmus

V rámci práce byly postupně vytvořeny tři typy výrobního algoritmu. První algoritmus využívá stejné části struktury jako vytvořil Křivohlavý [7] ve své diplomové práci. Byla vytvořena oktetová geometrie a celky přepracovány na použití pro velkorozměrové struktury. Druhý algoritmus vznikl úpravou algoritmu vytvořeného Ing. Martinem Krčmou a Ing. Petrem Křivohlavým na Ústavu konstruování pro tisk prutových struktur extruderem na granulový materiál. Části byly přepracovány na bcc topologii buňky použitou v této práci s přidáním korekcí a upraveny pro tiskovou hlavu používaného výrobního HW. Třetí algoritmus využívá nově navržený princip tvorby a mapování geometrie na buňky. Zbylá část upravující geometrii je obdobná s druhým algoritmem.

6.2.1 První algoritmus

Výrobní algoritmus pro oktetovou topologii je tvořen pěti hlavními částmi. První část slouží k vytvoření bodů geometrie. Body pro každý typ prutů jsou dále rozděleny do samostatných po sobě jdoucích celků a odpovídají rozdělení podle Obr. 6-2. Polohy bodů jsou tvořeny základními funkcemi jako jsou posunutí a otočení. Pro zjednodušení jsou body z prvních celků využity pro celky navazující a je pouze upravena jejich poloha. Při takto tvořené

geometrii je pozice bodů velice variabilní a je možné nezávisle provádět úpravy jejich polohy, toho je hojně využíváno při nastavení korekcí. Výstupem této části jsou seřazené body tvořící výrobní trajektorii, po které se bude pohybovat tisková hlava.



Obr. 6-10 Schéma prvního výrobního algoritmu

V druhé části je každému bodu přiřazena rovina orientující tiskovou hlavu v prostoru. Nastavuje se orientace tiskové hlavy v ose trysky po směru tisku při použitím jednosměrném chlazení a dále naklopení tiskové hlavy pro stavbu šikmých prutů. Body jsou stále zařazeny do svých celků. Výstupem jsou orientované roviny v místech bodů.

Třetí část algoritmu má dvě funkce. První funkcí je nastavení rychlosti pohybu tiskové hlavy při tisku prutů a rychlosti při přejezdu a retrakci, tedy pohybu, kdy nedochází k extruzi materiálu. Druhá funkce zajišťuje nastavení bodů, ve kterých dojde k počátku a konci přejezdů. Body jsou v tomto případě zadávány ručně pomocí jejich pořadového čísla. Příkaz o retrakci slouží k pokynu vtažení struny materiálu zpět a zastavení extruze. Tento příkaz je posílán do systému tiskové hlavy, z toho důvodu je formát upraven pomocí python skriptu.

Čtvrtá část algoritmu má opět dvě funkce stále rozdělené podle částí struktury. První funkcí je nastavení průtoku vzduchu k chlazení vytlačeného materiálu. Nastaveno je pořadí několika prvních bodů a mění se pouze jejich počet v závislosti na velikosti struktury. Hodnota průtoku je udávána v l/min. Druhou funkcí je hodnota zrychlení, s jakou dojde ke změně průtoku vzduchu. Stejně jako průtok vzduchu, je i jeho zrychlení přiřazováno ke každému bodu. Nulová hodnota zrychlení označuje okamžitou změnu průtoku. Pro převedení do čitelného formátu pro tiskovou hlavu je použitý python skript pro obě funkce. Příkazy ovládají regulační pneumatický ventil.

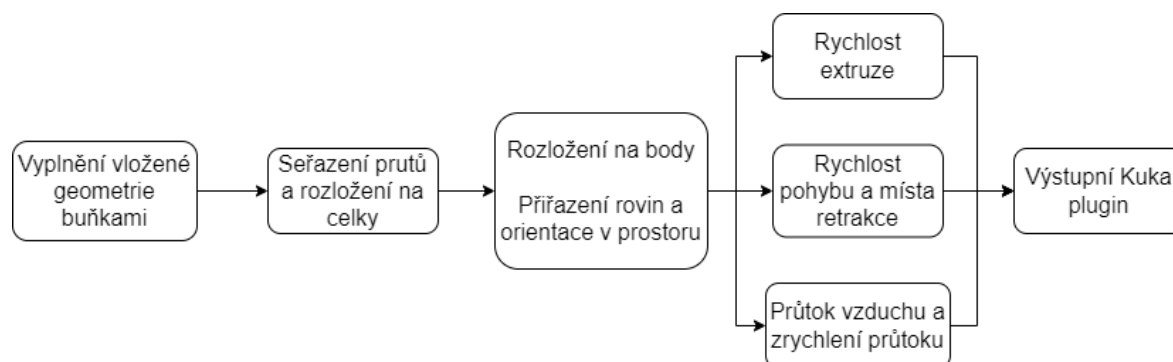
Pátou nezávislou částí je počet otáček podávací kladky extruderu, která posouvá strunu materiálu. Zde jsou nastaveny parametry zařízení, průměru filamentu, průměru prutu a podle objemového průtoku jsou vypočítány otáčky. Rychlost extruze se mění v závislosti na rychlosti tisku, tak aby byl zajištěn odpovídající objemový průtok. Formát výstupu je opět upraven python skriptem.

Všechny výstupy jsou nakonec spojeny a posílány do příkazu pluginu Kuka, kde je podle nastavení typu robotického ramena a nastavení nástroje vygenerován výrobní kód. Zároveň je možné přehrávat simulace výsledného programu.

Výhodou tohoto algoritmu je vysoká variabilita geometrie, která je vhodná především k detailnímu nastavení korekcí geometrie. Nevýhodou je velká náročnost při úpravě vstupní geometrie, čímž je algoritmus vhodný převážně pro výrobu vzorků. Tvorba geometrie pomocí bodů je poměrně zdlouhavá a způsobuje velký rozsah algoritmu, který je pak hůře čitelný pro ostatní osoby.

6.2.2 Druhý algoritmus

Na základě nedostatků prvního algoritmu byl přepracován algoritmus s optimalizovanějším rozkladem geometrie používaný na tisk s jiným typem tiskové hlavy. Části byly přepracovány na jinou topologii buňky použitou v této práci s přidáním korekcí a upraveny pro tiskovou hlavu používaného výrobního systému. Algoritmus používá topologii bcc mřížky. Jeho strukturu je také možné rozdělit na několik částí.



Obr. 6-11 Schéma druhého algoritmu

První část obsahuje cílovou geometrii. Nejprve je vytvořena vzorová topologie struktury pro jednu buňku tvořená úsečkami představující pruty. Paralelně s tím je vložena výsledná geometrie součásti, která může mít s několika omezeními libovolný tvar. Tato geometrie je poté rozložena na jednotlivé buňky, které budou tvořit výslednou strukturu. Buňky mají daný rozměr, který je možné měnit a zaujmou celý vnitřní objem nahrané geometrie. Jejich počet závisí na velikosti objemu a nastavené velikosti. Následně je na buňky navázána vzorová topologie a vznikne tak model výsledné prutové struktury tvořený úsečkami. V dalším kroku je pak pomocí série příkazů srovnáno pořadí úseček tak, aby byla možná jejich vyrobitelnost. Nakonec jsou seřazené úsečky rozděleny na jednotlivé segmenty struktury zobrazené na Obr. 6-3 tak, jak budou postupně tisknuty. Každá úsečka má v sw Rhino definovaný počáteční a koncový bod čímž je dán její směr. Posledním krokem je sjednocení směru úseček v každém ze segmentů. Výstup této části tvoří seřazené úsečky představující

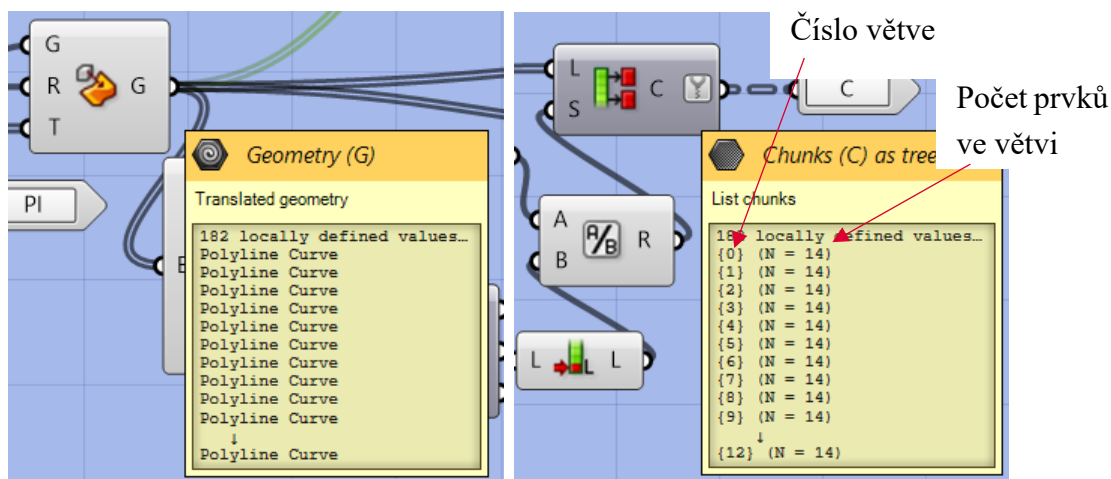
vodorovné pruty, dvě skupiny spodních šikmých prutů, svislé pruty a dvě skupiny horních šikmých prutů.

V druhé části algoritmu jsou používány clustery pro zpřehlednění algoritmu. Pomocí clusteru je možné zabalit skupinu příkazů do jednoho obsahujícího všechny vstupy a výstupy, které se ve skupině nachází. Zároveň je možné jeden cluster použít vícekrát a při jeho úpravě dojde ke změně ve všech jeho kopiích. V první skupině clusterů se úsečky rozloží na řídicí body. Přidány jsou nájezdové a výjezdové body do spojů a body trajektorie retrakcí. V této části jsou také nastavovány hodnoty korekcí geometrie. Dále je zde nastavován příkaz pro pauzu, kdy dojde k zastavení pohybu ramena po stanovený časový úsek. Využíván je ve spojích k přenesení více tepla, případně před zahájením tisku po retrakci k opětovnému dosažení plné extruze. Poslední funkcí je nastavení průtoku vzduchu k chlazení tištěného materiálu. Zrychlení průtoku vzduchu bylo odebráno z důvodu jeho nízkého využití a jeho hodnota je tedy konstantně nastavena na nulovou hodnotu, tedy okamžitá změna průtoku.

V třetí části algoritmu se nachází další skupina clusterů. Nastavují se rychlosti tisku a přejezdů v jednotlivých bodech. Zároveň jsou nastaveny body, ve kterých dojde k retrakci. Zde je zadávání bodů řešeno automaticky pomocí počátečních a koncových bodů křivek. Clustery dále obsahují přiřazení orientované roviny každému z bodů. Orientace roviny ovlivňuje naklopení a natočení tiskové hlavy.

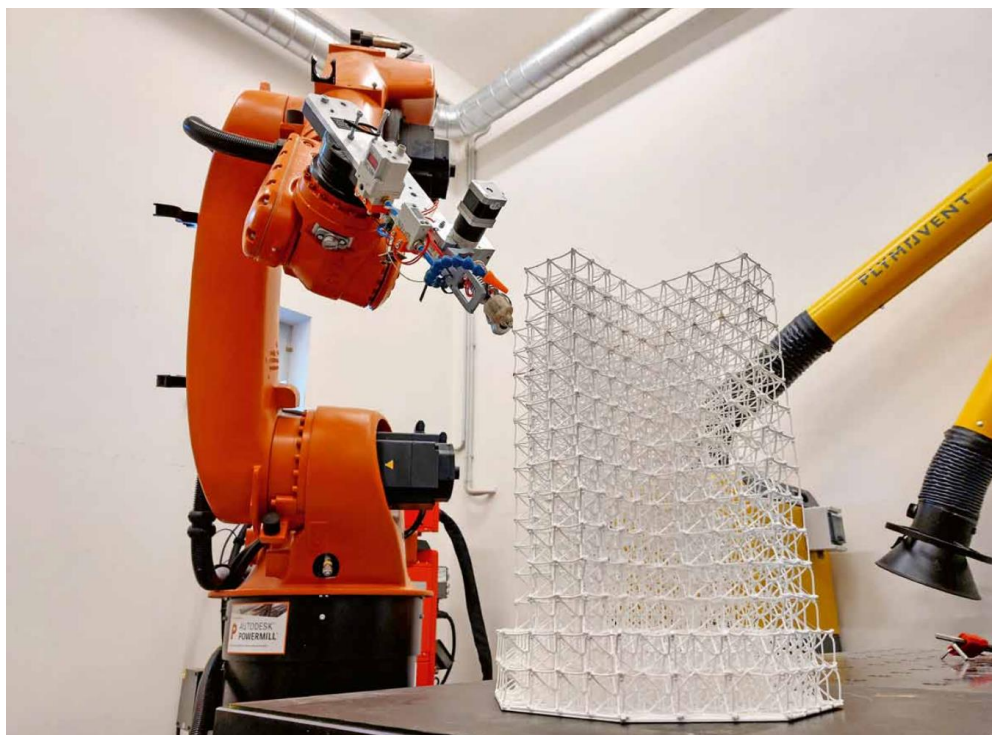
V závěru jsou všechny celky spojeny. Připojena je rychlost extruze jejíž nastavení je shodné s předešlým algoritmem. Výstupy jsou převáděny pomocí Kuka pluginu na formát rozpoznatelný robotem.

Algoritmus funguje na principu datové stromové struktury, kde každý datový strom obsahuje datové větve. Každá větev má svou úroveň a označení. Tyto větve mohou být díky svým periodickým číselným označením snadno separovány na části, podle kterých je potřeba geometrii rozdělit pro výrobu. V části algoritmu, kde se s celky pracuje odděleně a jsou na ně navázány další body a příkazy dochází k růstu jejich obsahu, ovšem číselné označení zachovávající místo v původním celku zůstává neměnné. V závěru algoritmu jsou tak části opět složeny do jednoho celku tvořícího celou výrobní geometrii a jeho pořadí odpovídá pořadí přiděleného na počátečním rozřazení. Informace o rychlosti extruze, která je nadřazená a platí pro několik geometrických celků zároveň má datové větve o úroveň vyšší. Ukázka je na Obr. 6-12, kde je datový list (vlevo) rozložen do datových větví (vpravo).



Obr. 6-12 Příklad použití datových větví

Výhoda tohoto algoritmu spočívá v jeho uživatelské jednoduchosti. Po nahrání geometrie dojde k automatickému zpracování na výrobní kód bez dalších potřebných kroků. Systém třídění křivek dosahuje mnohem menšího rozsahu příkazů a spolu s použitím clusterů se stává algoritmu snadněji čitelný a pochopitelný. Omezení algoritmu spočívají v možnostech nahrané geometrie. Lze nahrát pouze buňky, které jsou rovnoběžné s hlavními osami prostoru a nejsou vůči sobě nijak pootočené. Dále je omezené tisknout převísle buňky, jejichž podkladová vrstva by začínala volně v prostoru. U takového tisku by musely být vyčnívající buňky tištěny s upravenou orientací tiskové hlavy. Převísly tisk je možný pouze v případě překlenutí mezery mezi částmi struktury.

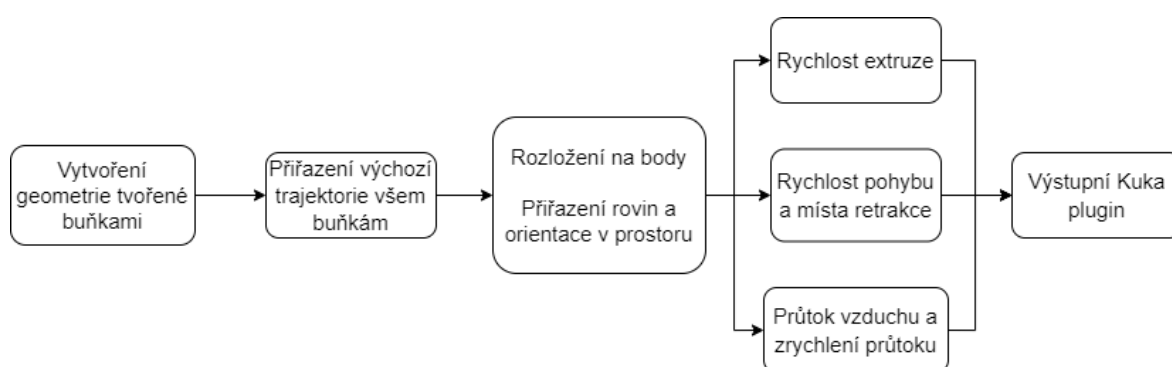


Obr. 6-13 Experimentální ověření algoritmu na dílu podstavce

Funkčnost algoritmu byla ověřena na tisku stoličky na Obr. 6-13. Nejprve byl vytištěn podklad osmiúhelníkového tvaru. Na něho pak byla tištěna prutová struktura. Délka tisku struktury byla 20 hodin. Spotřebovaný materiál je 947 g. Rozměry stoličky jsou 310 x 310 x 420 mm.

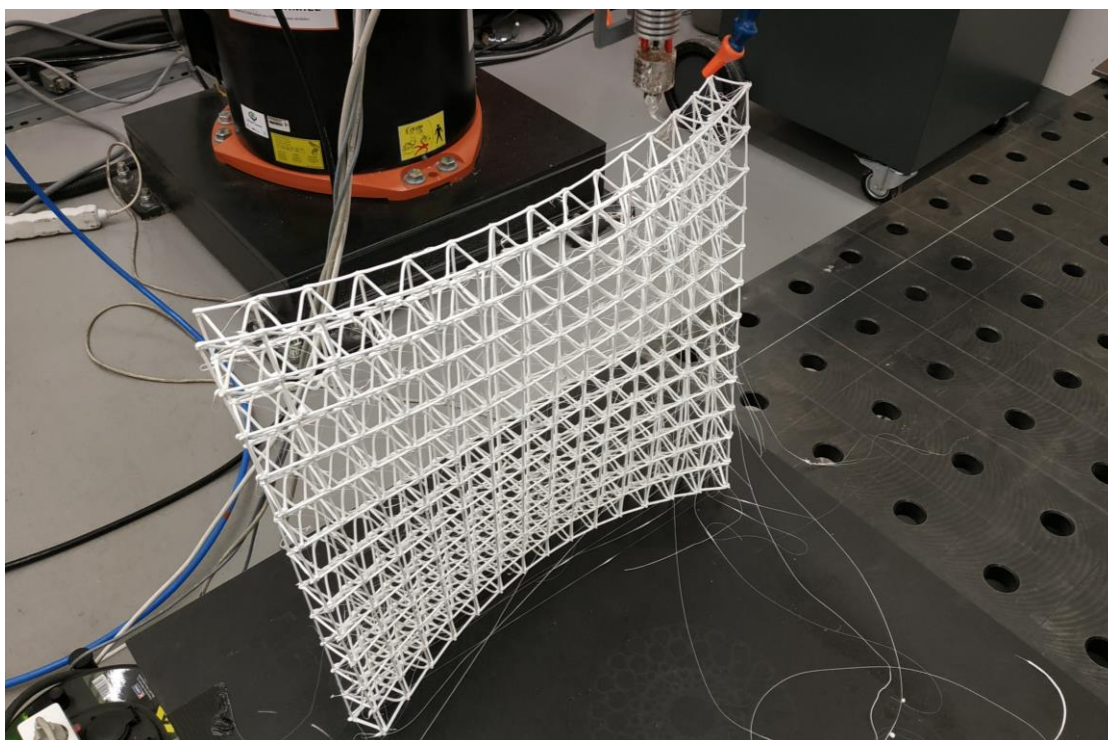
6.2.3 Třetí výrobní algoritmus

Třetí algoritmus se od druhého algoritmu liší po část se zpracováním rozložené geometrie. Bylo vytvořeno nové mapování trajektorie na buňky struktury. Je tedy použita stejná část algoritmu s rozdělením skupin prutů na řídicí body a k nim přiřazeny veškeré parametry. Schéma výrobního algoritmu je na Obr. 6-14. Důvodem vytvoření tohoto algoritmu je možnost výroby geometrie s tvarovými plochami a deformovanými buňkami.



Obr. 6-14 Schéma třetího algoritmu

První část tohoto algoritmu začíná vložením tvarové plochy. Z její plochy je vytvořena síť křivek, které jsou dále odsazeny, až vznikne odvozená stěna z jedné vrstvy buněk stejného tvaru jako má vložená plocha. Paralelně je vložena jedna výchozí buňka s geometrií prutů. Na této buňce je podle pořadí jejích krajních bodů vytvořena trajektorie. Použití právě hlavních bodů buňky je důvodem možného použití deformovaných buněk. Dělení je stejné jako u druhého algoritmu, tedy vodorovné pruty, dvojice šikmých prutů, svislé pruty, druhá dvojice šikmých prutů a opět vodorovné pruty. Tato trajektorie, nebo přesněji seřazené po sobě jdoucí body jedné buňky, jsou namapovány na buňky vytvořené stěny, které jsou seřazené tak, jak bude postupovat výroba. Po převedení trajektorií na všechny buňky struktury zůstávají části separované a jsou z nich vytvořeny pruty. Tyto skupiny prutů už tvoří stejný výstup jako rozložení vstupní geometrie v druhém algoritmu a jsou tak vstupem do již v předchozím případě vytvořené části algoritmu.

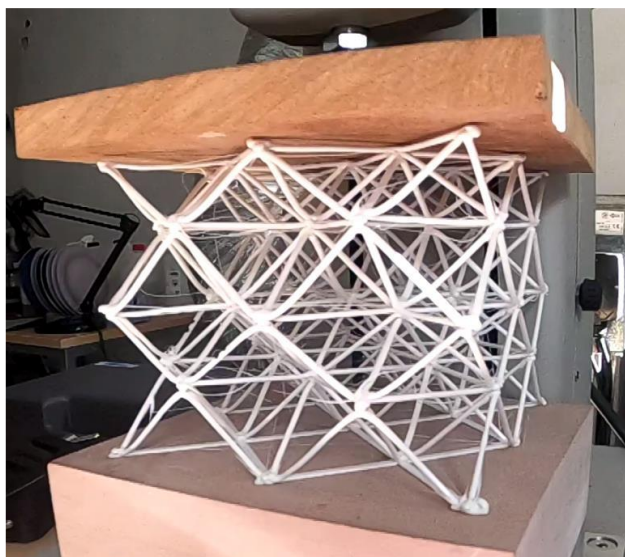


Obr. 6-15 Experimentální ověření algoritmu na dílu tvarové stěny

Funkčnost algoritmu byla ověřena na tisku tvarové stěny zobrazené na Obr. 6-15. Stěna postupně přechází z konkávního tvaru na konvexní. Zároveň jsou použity deformované buňky. Pruty mezi buňkami jsou přímé, tvar je tvořen pozicí koncových bodů buněk. Při tomto tisku bylo také ověřeno použití chlazení pomocí dvou kloubových hadic z protilehlých stran. Díky tomu došlo k výraznému zlepšení přesnosti vytištěných svislých prutů. Délka tisku trvala okolo 8 hodin. Objem spotřebovaného materiálu byl 268 g.

6.3 Tlakové testy prutových struktur

Pomocí vytvořených algoritmů a výrobního zařízení byly vyrobeny vzorky prutových struktur dvou topologií oktetová příhradová a bcc mřížka s různými délkami prutů. Pro každou kombinaci parametrů byly vyrobeny čtyři kusy vzorků velikosti 2 x 2 x 2 buňky. Průměr prutů byl 1,82 mm. Vzorky byly na zkušebním zařízení umístěny mezi dvě desky, které na ně působily tlakovou silou. Rychlost zatěžování byla 20 mm/s. U všech testů bylo nejdříve provedeno předzatížení na 20 N. Následovalo zatěžování až do porušení celistvosti struktury. Umístění struktury v testovacím zařízení je zobrazeno na Obr. 6-16.



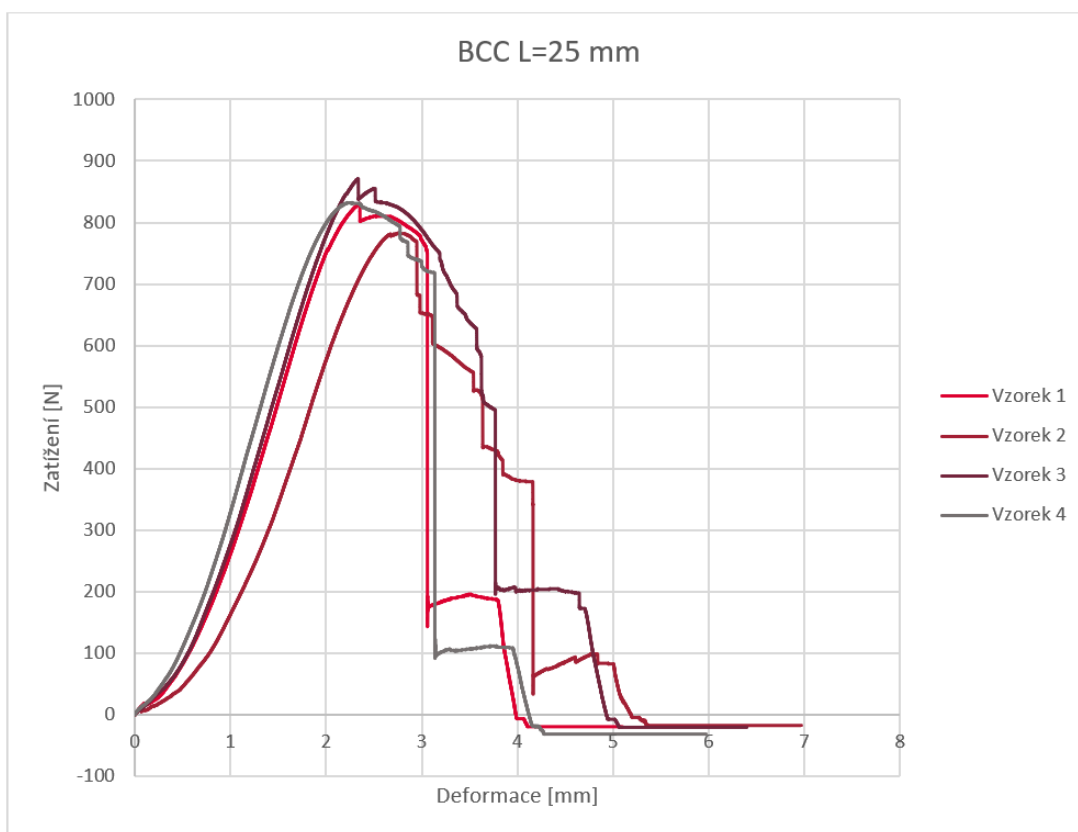
Obr. 6-16 Umístění struktury v testovacím zařízení

6.3.1 BCC topologie

BCC 25

Podle provedených tlakových testů bcc struktur měla nejvyšší únosnost struktura s délkou šikmých prutů 25 mm. Zároveň dosáhla nejlepší opakovatelnosti naměřených maximálních hodnot ze všech bcc struktur s variačním koeficientem 3,76 %. Na Obr. 6-17 je graf zatěžovacích charakteristik v závislosti na deformaci struktury všech čtyř vzorků. Na počátku stlačení struktura odolávala zatížení. Došlo nejprve k přenosu zatížení na svislé pruty, ty se začaly s rostoucí silou deformovat. Pruty nejsou od výroby dokonale přímé a dochází tak přímo k započetí deformace. Porušení mezního stavu vzpěrné stability je tak překonáno již po započetí zatěžování. Po deformaci svislých prutů přenesly zatížení především šikmé pruty. Při dalším zatěžování došlo k deformaci zbylých nosných prutů až do porušení jejich celistvosti a následovalo zhroucení struktury. V oblasti maximálních zatížení jsou u vzorků 3 a 1 zřetelné ostré poklesy a vzrůsty zatížení vzniklé při lomu jednoho z prutů struktury. Síla je pak přenesena ostatními pruty a dochází k opětovnému mírnému vzrůstu naměřeného zatížení. U všech třech vyrobených variant struktur docházelo zřídka k porušení v místech spojů.

V Tab. 8 jsou uvedeny všechny parametry týkající se testovaných vzorků a experimentálního měření. Struktura má objemovou hustotu 0,036 oproti plnému materiálu. Vyhodnocení struktur je provedeno pomocí poměru průměrného maximálního zatížení a průměrné hmotnosti vzorků. Tento poměr vyšel 6261,6 [N/N]. Z MKP výpočtu byla získána teoretická maximální síla, při které dojde k porušení ideálního tvaru geometrie. Ta byla porovnána s maximální silou reálného experimentu a získaná hodnota je rozdíl 23,2 %.



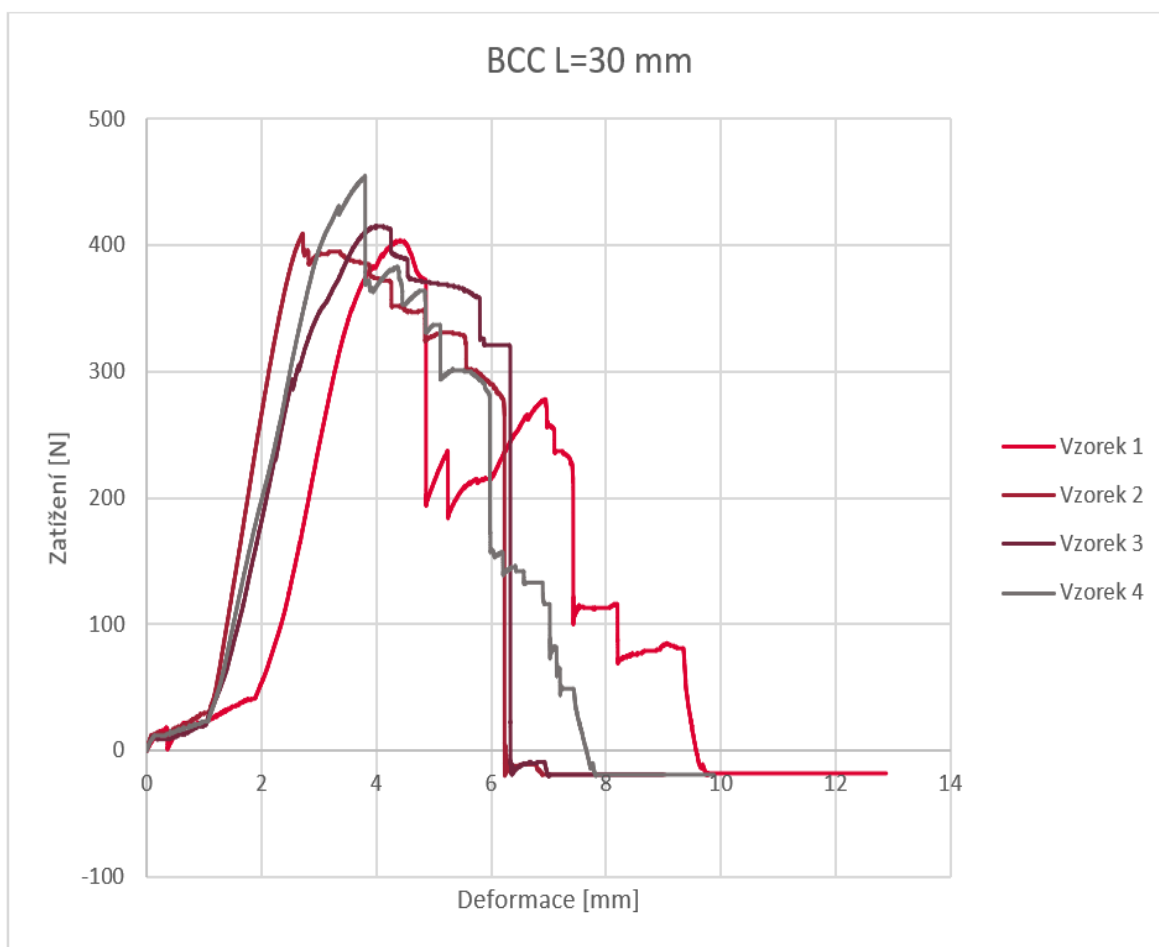
Obr. 6-17 Graf průběhu zatěžování bcc struktury s délkou šikmých prutů 25 mm

Tab. 8 Tabulka hodnot pro bcc struktury s délkou šikmých prutů 25 mm

Název	BCC-25 1	BCC-25 2	BCC-25 3	BCC-25 4
Rozměr [mm]	58,5 x 58,5 x 63			
Výrobní čas [min]	24			
Hustota	0,036			
Hmotnost [g]	13,4	13,6	13,6	13,4
Max. zatížení [N]	831	783	871	832
Průměrné zatížení [N]	829,25			
Variační koeficient [%]	3,76			
Zatížení/hmotnost [N/N]	6261,6			
MKP kritická síla [N]	1080			
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]	23,2			

Struktura bcc s délkou šikmých prutů 30 mm měla rovněž nízkou odchylku mezi maximálními hodnotami zatížení a variační koeficient byl 4,80 %. Jejich charakteristika zatížení a deformace je zobrazena na Obr. 6-18. Chování struktury bylo v průběhu zatěžování stejné jako u délky 25 mm. S delšími svislými pruty se více projevila nepřesnost výroby a došlo k jejich rychlejší deformaci. Na začátku průběhů je vidět úsek s mírnějším nárůstem zatěžovací síly a velké deformace. Tato část je způsobena deformací nerovností na vrchní nezarovnané straně vzorků a postupným dosedáním čelisti na celou plochu horních vodorovných prutů. U vzorku 1 nedošlo k totálnímu selhání struktury, ale k postupným lokálním selháním s nižšími skoky poklesu zatížení.

V Tab. 9 jsou uvedeny hodnoty vlastností a výsledků testů struktury bcc s délkou šikmých prutů 30 mm. Hustota struktury oproti plnému objemu byla 0,0255. Průměrné zatížení dosahovalo hodnot 420,75 N. Vyhodnocený poměr průměrné maximální zatěžovací síly a průměrné hmotnosti vzorků byl 2840,4 [N/N]. Maximální síla získaná z MKP výpočtu ideální geometrie byla 680 N a při porovnání s reálnými experimenty byl výsledkem rozdíl 38,1 %. Tato vysoká hodnota je způsobena zvýšenou nepřesností svislých prutů z výroby.



Obr. 6-18 Graf průběhu zatěžování bcc struktury s délkou šikmých prutů 30 mm

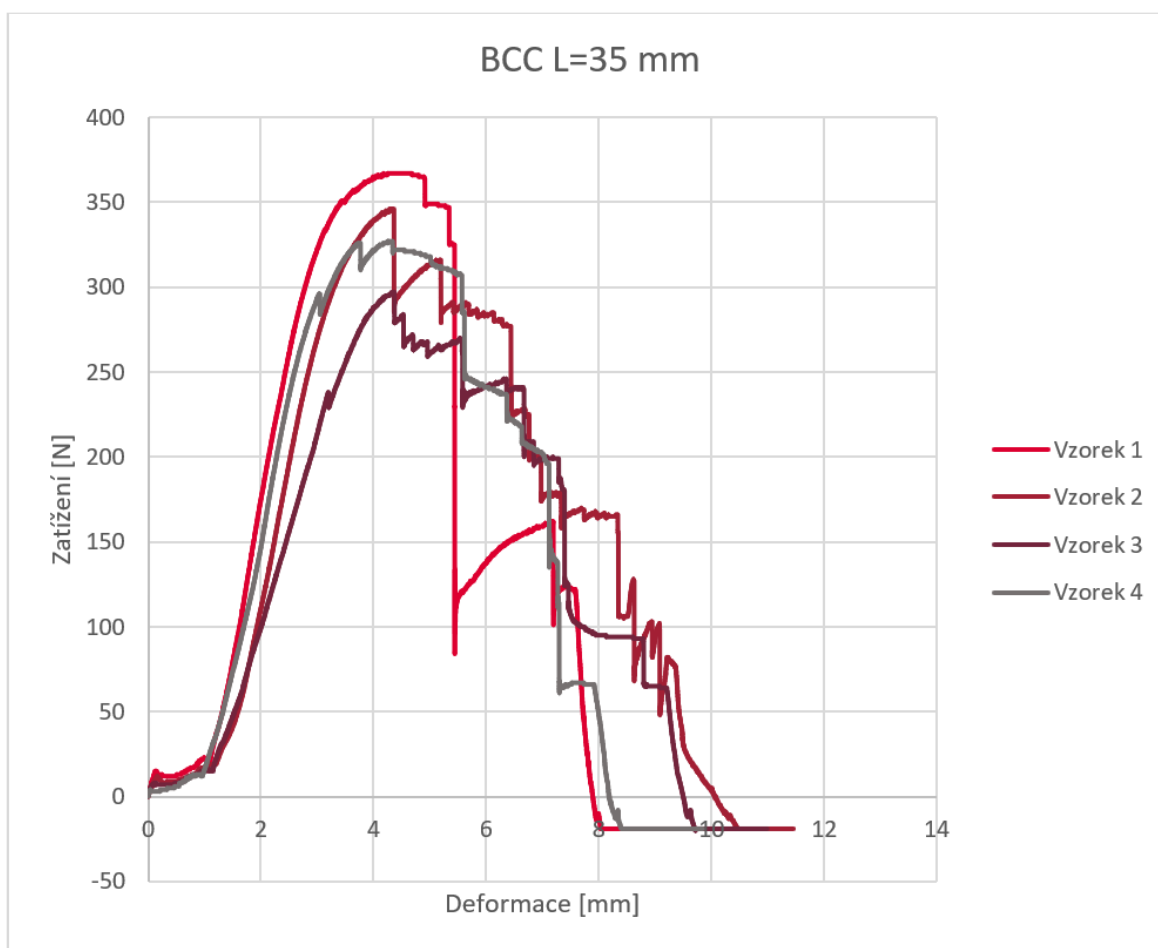
Tab. 9 Tabulka hodnot pro bcc struktury s délkou šikmých prutů 30 mm

Název	BCC-30 1	BCC-30 2	BCC-30 3	BCC-30 4
Rozměr [mm]			70 x 70 x 71	
Výrobní čas [min]			25	
Hustota			0,0255	
Hmotnost [g]	15,2	15,0	15,1	15,1
Max. zatížení [N]	404	409	415	455
Průměrné zatížení [N]		420,75		
Variační koeficient [%]		4,80		
Zatížení/hmotnost [N/N]		2840,4		
MKP kritická síla [N]		680		
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]		38,1		

BCC 35

Posledními testovanými vzorky z této série je topologie bcc s délkou šikmých prutů 35 mm. Charakteristika zatížení a deformace získaná z experimentu je na Obr. 6-19. Opakovatelnost má ze všech tří variant nejhorší výsledek s variačním koeficientem 7,70 %. Lze tedy říci, že přesnost opakovatelnosti klesá s růstem délky prutů struktury. Na počátku zatěžování je opět viditelná oblast velké deformace s nízkým nárůstem zatěžovací síly. Ve třech případech nedošlo u struktur k totálnímu skokovému selhání po dosažení maximální síly, ale postupnému klesání únosnosti s malými skoky. S růstem délky prutů se tedy zvyšuje míra a snižuje rychlost deformace struktur.

Konkrétní hodnoty vlastností a výsledků experimentu pro strukturu bcc délky šikmých prutů 35 mm jsou uvedeny v Tab. 10. Hustota struktury oproti plnému objemu se zvětšující se délkou prutů dále klesala na 0,0182. Průměrné maximální zatížení přenesené vzorky bylo 334,25 N. Vyhodnocovaný poměr průměrné maximální hodnoty zatížení a průměrné hmotnosti vzorků byl 1911,5 [N/N]. Maximální síla získaná MKP výpočtem ideální geometrie byla 534 N a porovnání s reálným experimentem ukázalo rozdíl 37,4 %.



Obr. 6-19 Graf průběhu zatěžování bcc struktur s délkou šikmých prutů 35 mm

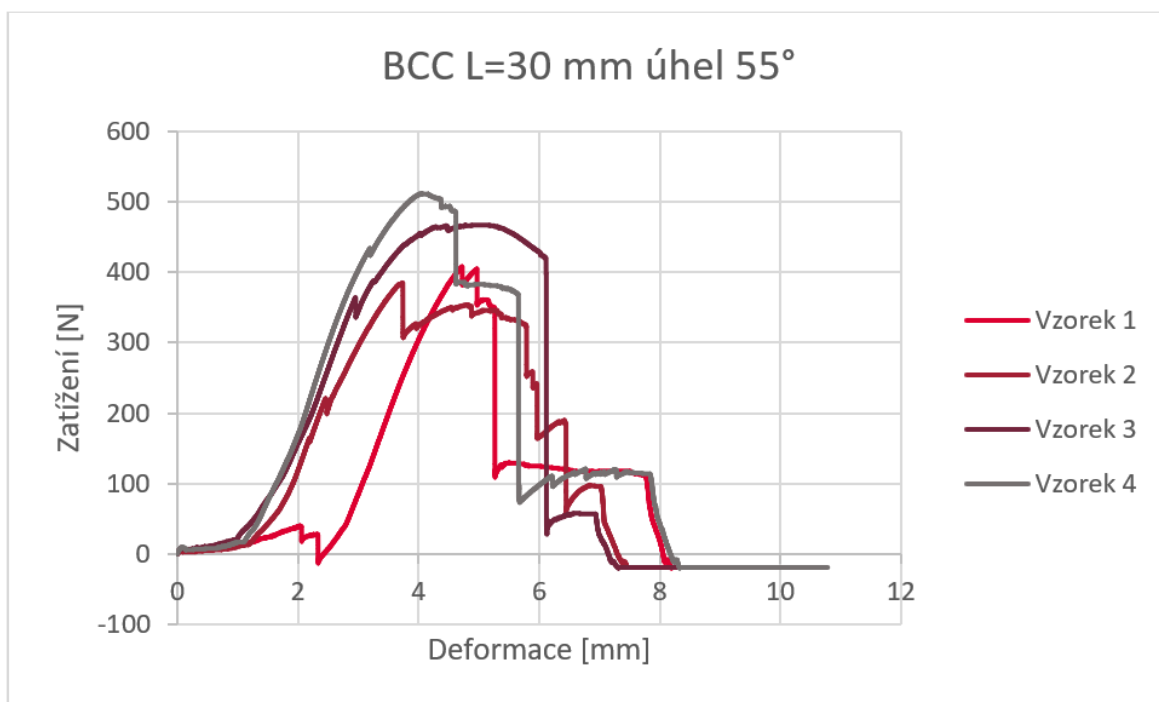
Tab. 10 Tabulka hodnot pro bcc struktury s délkou šikmých prutů 35 mm

Název	BCC-35 1	BCC-35 2	BCC-35 3	BCC-35 4
Rozměr [mm]	86 x 86 x 86			
Výrobní čas [min]	27			
Hustota	0,0182			
Hmotnost [g]	17,8	17,8	17,8	17,9
Max. zatížení [N]	367	346	297	327
Průměrné zatížení [N]	334,25			
Variační koeficient [%]	7,70			
Zatížení/hmotnost [N/N]	1911,5			
MKP kritická síla [N]	534			
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]	37,4			

BCC 35 / 55°

Pro porovnání úhlů struktur byla vyrobena a vyhodnocována série bcc topologií vzorků s délkou šikmých prutů 30 mm a úhlem stoupání prutů 55° jejíž zatěžovací charakteristika je zobrazena na Obr. 6-20. Opakovatelnost dosažení maximální hodnoty zatěžovací síly byla horší než u vzorků s úhlem stoupání 43° a to s hodnotou variačního koeficientu 11,24 %. Při zatěžování docházelo k většímu počátečnímu přenášení síly také šikmými pruty. Nedocházelo k tak velké deformaci pouze svislých prutů. Častým důvodem selhání struktury bylo porušení ve spojích nacházejících se ve středu buněk spojujících všechny čtyři šikmé pruty. Důvodem je malá plocha spojů a poměrně vysoká potenciální únosnost struktury. Pruty dokážou přenést velké síly, které způsobí selhání nedostatečně silného spojení. Vliv na nízkou plochu spoje mají šikmé pruty, jejichž vysoký úhel zmenšuje rozměry buňky ve dvou osách a vznikne tak menší prostor pro možný spoj, než je tomu u struktur s menším úhlem stoupání.

Hodnoty vlastností a výsledků experimentu bcc struktur s délkou šikmých prutů 30 mm a úhlem stoupání prutů 55° jsou uvedeny v Tab. 11. Hustota struktury oproti plnému objemu byla z BCC struktur druhá nejvyšší s hodnotou 0,0328. Průměrné maximální zatížení, které struktury dokázaly přenést bylo 443 N. Poměr průměrného maximálního zatížení a průměrné hmotnosti vzorků byl 2970,9 [N/N]. Maximální síla získaná z MKP výpočtu na ideální geometrii byla 702 N a rozdíl v porovnání se skutečnými experimenty byl 36,9 %. I přes selhávání spojů struktury při zatížení se rozdíl od ideální geometrie použité ve výpočtu liší méně, než u variant s nižším úhlem stoupání a délkou prutů 30 a 35 mm. Výsledky ukazují na menší citlivost nepřesností výroby u struktur s vyšším stoupáním úhlu prutů. Tento fakt je navíc posílen rozdílem délek svislých prutů, které jsou u struktur s vyšším úhlem stoupání mnohem delší. Mělo by tak dojít, podle předchozích zjištění, k nárůstu rozdílu výsledků MKP výpočtů a výsledků reálných experimentů.



Obr. 6-20 Graf průběhu zatěžování bcc struktur s délkou šikmých prutů 30 mm a úhlem stoupání 55°

Tab. 11 Tabulka hodnot pro bcc strukturu s délkou šikmých prutů 30 mm a úhlem stoupání 55°

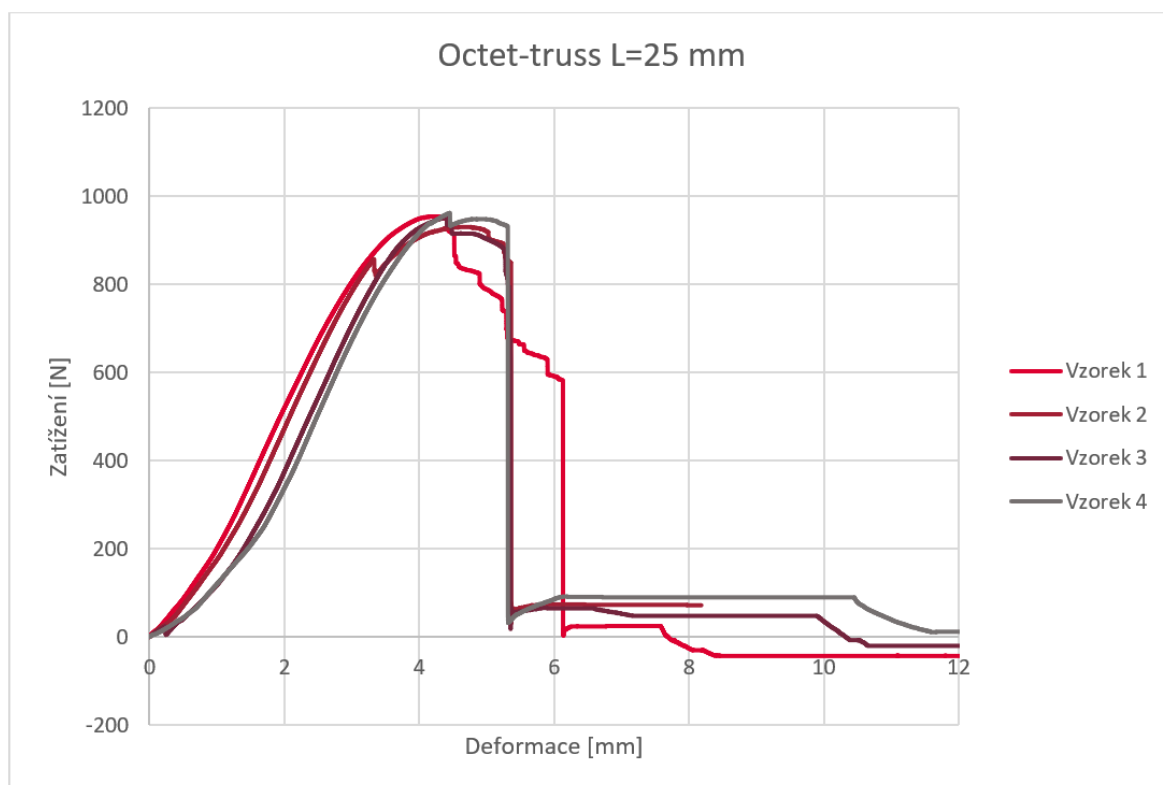
Název	BCC-30/55 1	BCC-30/55 2	BCC-30/55 3	BCC-30/55 4
Rozměr [mm]	55 x 55 x 98			
Výrobní čas [min]	25			
Hustota	0,0328			
Hmotnost [g]	15,2	14,9	15,1	15,0
Max. zatížení [N]	408	385	467	512
Průměrné zatížení [N]	443			
Variační koeficient [%]	11,24			
Zatížení/hmotnost [N/N]	2970,9			
MKP kritická síla [N]	702			
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]	36,9			

6.3.2 Oktetová topologie

Oktet 25

Další testovanou sérií vzorků byla oktetová příhradová topologie buňky. Nejlepší opakovatelnosti dosahovala struktura s délkou šikmých prutů 25 mm, charakteristika zatížení a deformace získaná z experimentů je zobrazena na Obr. 6-21. Variační koeficient byl 1,25 %. Při aplikaci zatěžovací síly struktura odolávala zatížení. Nejvíce zatěžované byly vodorovné pruty umístěné ve střední části buněk, namáhány byly na tah. Následovala deformace šikmých prutů jejichž geometrie nebyla od výroby dokonale přímá, mezní stav vzpěrné stability byl od počátku překonán a probíhala přímo deformace prutů. Při překročení mezního stavu porušení prutů došlo k lomu. Lom jednoho nebo více prutů následně spustil řetězovou reakci a došlo k totálnímu selhání struktury, při kterém klesla únosnost struktury skokově na nulové hodnoty.

Hodnoty oktet struktur s délkou šikmých prutů jsou uvedeny v Tab. 12. Hustota struktury oproti plnému objemu tělesa stejných rozměrů je 0,0255, stejně jako bcc struktura s pruty 30 mm. Průměrné maximální zatížení přenesené strukturou bylo 949,5 N. Vyhodnocovaný poměr průměrné maximální zatěžovací síly a průměrné hmotnosti struktury byl 4032,9 [N/N]. Maximální síla získaná z MKP výpočtu ideální geometrie byla 1098,5 N. Při porovnání výsledků je tedy rozdíl mezi vypočtenou ideální hodnotou a hodnotou získanou z experimentů 13,6 %, který je nejlepší ze všech struktur.



Obr. 6-21 Graf průběhu zatěžování oktet struktur s délkou šikmých prutů 25 mm

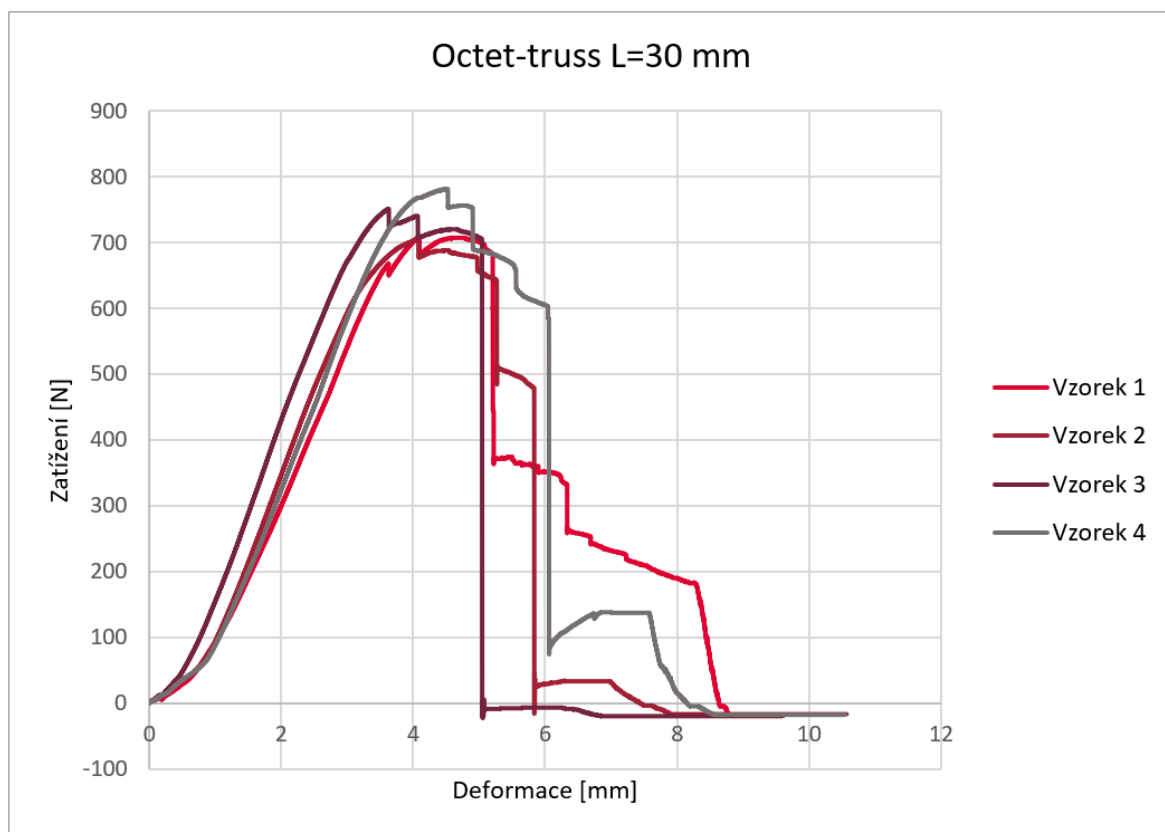
Tab. 12 Tabulka hodnot pro oktet struktury s délkou šikmých prutů 25 mm

Název	Oktet-25 1	Oktet-25 2	Oktet-25 3	Oktet-25 4
Rozměr [mm]	90 x 90 x 73			
Výrobní čas [min]	45			
Hustota	0,0255			
Hmotnost [g]	24,0	24,1	24,0	23,9
Max. zatížení [N]	954	930	952	962
Průměrné zatížení [N]	949,5			
Variační koeficient [%]	1,25			
Zatížení/hmotnost [N/N]	4032,9			
MKP kritická síla [N]	1098,5			
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]	13,6			

Oktet 30

Struktura oktet s délkou šikmých prutů 30 mm rovněž vykazovala dobrou opakovatelnost výsledků při získání hodnoty maximálního zatížení. Charakteristika zatížení a deformace je zobrazena na Obr. 6-22. Variační koeficient byl 4,23 %. Po dosažení maximálních hodnot zatížení u struktur opět docházelo ke skokovému selhání struktury. V oblasti maximálních zatížení se často objevují silové výkyvy způsobené lokálními selháními a přenesením zatížení jinými pruty.

V Tab. 13 jsou uvedeny vlastnosti a výsledky experimentu oktet struktur s délkou šikmých prutů 30 mm. Hustota v porovnání s plným objemem byla 0,0239. Průměrné maximální zatížení struktury bylo 736,75 N. Poměr maximálního průměrného zatížení a průměrné hmotnosti byl 2565,4 [N/N]. Maximální vypočtená zatěžující síla vyšla 840 N a při porovnání s výsledkem reálného experimentu byl rozdíl mezi hodnotami 12,3 %.



Obr. 6-22 Graf průběhu zatěžování oktet struktur s délkou šikmých prutů 30 mm

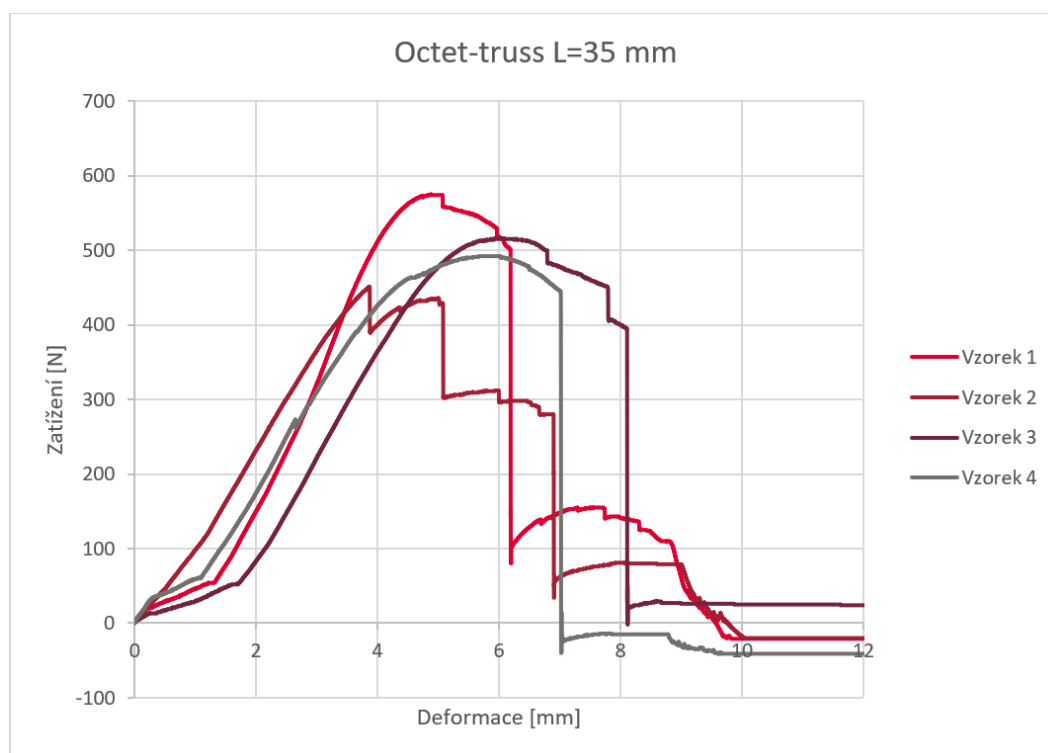
Tab. 13 Tabulka hodnot pro oktet struktury s délkou šikmých prutů 30 mm

Název	Oktet-30 1	Oktet-30 2	Oktet-30 3	Oktet-30 4
Rozměr [mm]	105 x 105 x 84			
Výrobní čas [min]	52			
Hustota	0,0239			
Hmotnost [g]	29,3	29,4	29,3	29,1
Max. zatížení [N]	709	706	751	781
Průměrné zatížení [N]	736,75			
Variační koeficient [%]	4,23			
Zatížení/hmotnost [N/N]	2565,4			
MKP kritická síla [N]	840			
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]	12,3			

Oktet 35

Poslední testovanou strukturou je topologie oktet s délkou šikmých prutů 35 mm. Zatěžovací charakteristiky vzorků jsou vykresleny na Obr. 6-23. Opakovatelnost výsledků maximálního zatížení byla horší než u předešlých dvou struktur. Variační koeficient byl 8,83 %, tedy víc jak dvojnásobný oproti struktuře oktet struktuře 30 mm. Tento výsledek značí horší kvalitu struktur, která se může více projevit s delšími pruty. Dalším možným důvodem je vzduchová bublina v materiálu, případně lokální zúžení prutu. Z charakteristik je pozorovatelný odlišný průběh vzorku 2, který mohl negativně ovlivnit výsledky.

Výsledky vlastností a experimentu struktur oktet s délkou šikmých prutů 35 mm jsou uvedeny v Tab. 14. Hustota struktury v porovnání s plným objemem je 0,0181, hodnota je téměř stejná jako struktura bcc s délkou šikmých prutů 35 mm. Průměrné maximální zatížení struktur bylo 508,5 N. Poměr maximálního průměrného zatížení a průměrné hmotnosti byl 1449,9 [N/N]. Maximální síla vypočtená z ideální geometrie metodou MKP byla 693,8 N. Při porovnání výsledků s experimentem je získán rozdíl zatížení 26,7 %.



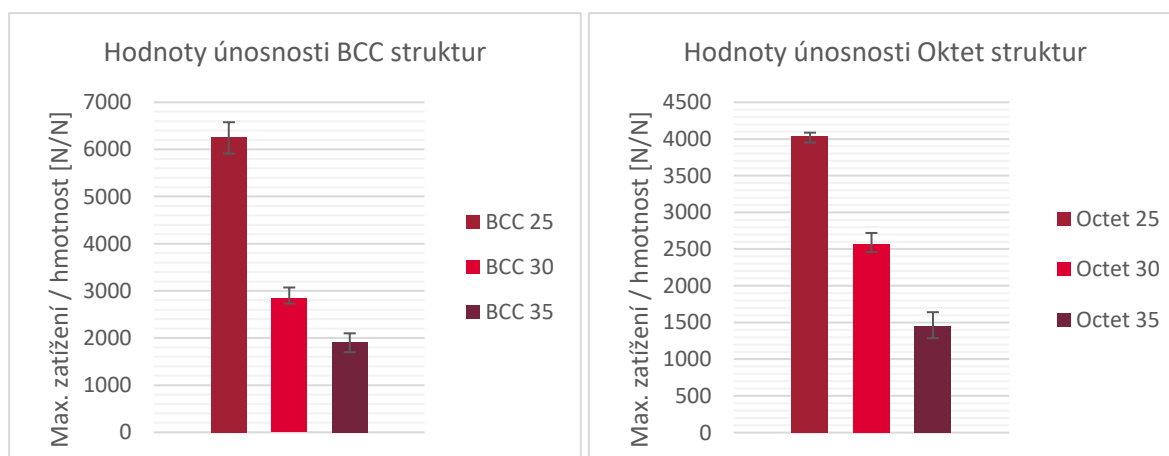
Obr. 6-23 Graf průběhu zatěžování oktet struktur s délkou šikmých prutů 35 mm

Tab. 14 Tabulka hodnot pro oktet struktury s délkou šikmých prutů 35 mm

Název	Oktet-35 1	Oktet-35 2	Oktet-35 3	Oktet-35 4
Rozměr [mm]	120 x 120 x 95			
Výrobní čas [min]	58			
Hustota	0,0181			
Hmotnost [g]	36,0	36,0	35,4	35,6
Max. zatížení [N]	575,0	451,0	516,0	492,0
Průměrné zatížení [N]	508,5			
Variační koeficient [%]	8,83			
Zatížení/hmotnost [N/N]	1449,9			
MKP kritická síla [N]	693,8			
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]	26,7			

Shrnutí

Na sloupcových grafech na Obr. 6-24 jsou shrnuty maximální hodnoty poměrů maximálních zatížení a hmotností struktur. Nejvyšší hodnoty 6261,6 [N/N] dosáhla bcc struktura s délkou šikmých prutů 25 mm. U oktetových struktur byla nejvyšší hodnota poměru 4032,9 [N/N] u struktury s délkou šikmých prutů 25 mm. Z grafů je patrné, že se zvětšující se délkou prutů poměr klesá. Výsledky všech experimentů jsou shrnuty v Tab. 15.



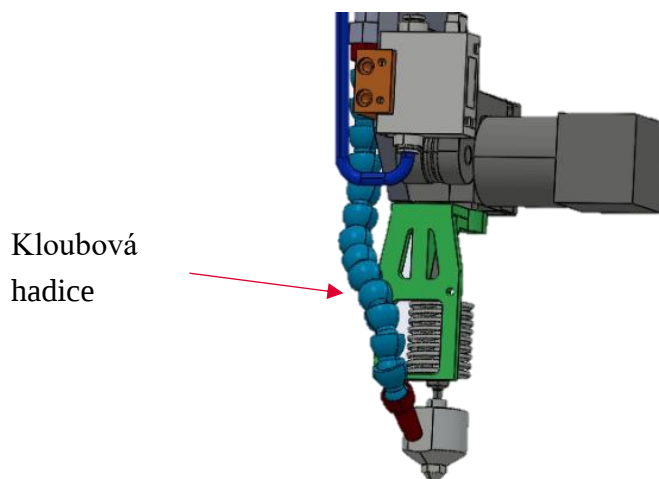
Obr. 6-24 Poměr max. zatížení a hmotnosti struktur (vlevo bcc, vpravo oktet)

Tab. 15 Shrnutí výsledků experimentu

Název	BCC-25	BCC-30	BCC-35	BCC-35/55	Oktet-25	Oktet-30	Oktet-35
Výrobní čas [min]	24	25	27	25	45	52	58
Hmotnost [g]	13,5	15,1	17,8	15,0	24,0	29,3	35,8
Max. zatížení [N]	871	455	367	512	962	781	575
Průměrné zatížení [N]	829,25	420,75	334,25	443,00	949,50	736,75	508,50
Variační koeficient [%]	3,76	4,80	7,70	11,24	1,25	4,23	8,83
Zatížení/hmotnost [N/N]	6261,6	2840,4	1911,5	2970,9	4032,9	2565,4	1449,9
MKP kritická síla [N]	1080	680	534	702	1099	840	694
Rozdíl MKP a reálného zatížení [%]	23,2	38,1	37,4	36,9	13,6	12,3	26,7

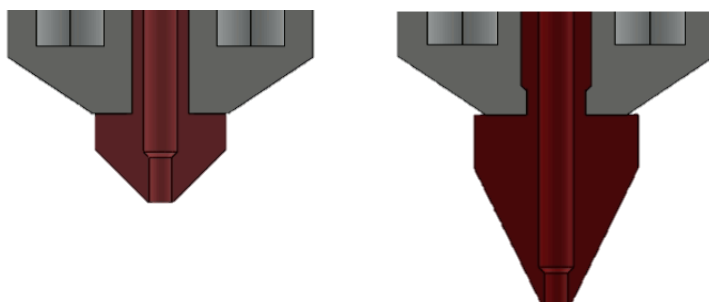
6.4 Konstrukční úpravy tiskové hlavy

Úprava konstrukce tiskové hlavy se týkala hotend části a systému chlazení. Chladicí systém byl pro účely experimentů vytvořen z kloubových hadic o rozměru 1/4 palce viz Obr. 6-25. Výhodou použití kloubových hadic je jejich rychlá nastavitelnost a tvarovatelnost. Konec hadice byl osazen tryskou o výstupním průměru 3,2 mm. Napojení mezi průtokoměrem a kloubovou hadicí zajišťuje rychloupínací přímá spojka s maticí s kuželovým závitem. Následně byl přidán druhý vývod hadice pro pokrytí větší části obvodu materiálu. U některých typů prutů docházelo při použití chlazení z jedné strany k deformaci. Důvodem bylo rychlé ochlazení a smrštění jedné strany prutu, které způsobilo jeho deformaci. Při použití dvojice hadic bylo nutné také zdvojnásobit průtok vzduchu. Při proudění vzduchu dochází ke ztrátám a chlazení tak bylo při stejném průtoku nedostatečné.



Obr. 6-25 Varianta tiskové hlavy s jednou kloubovou hadicí

Pro zlepšení průchodnosti tiskové hlavy bylo potřeba upravit geometrii hotendu tiskové hlavy. Vzhledem k otestovanému a zkalibrovanému dosavadnímu řešení bylo přistoupeno pouze k úpravě geometrie výstupní trysky, která je zašroubována do hliníkového těla osazeného topnými patronami a termistorem. Podobu trysky před a po úpravě je možné vidět na Obr. 6-26. Úhel naklopení výrobitelných šikmých prutů stoupl na 58° oproti původním 43° .

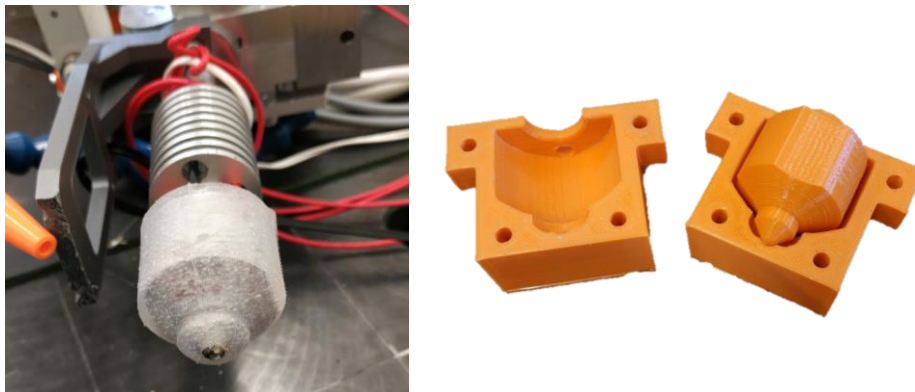


Obr. 6-26 Úprava geometrie trysky (vlevo původní, vpravo po úpravě)

Při chlazení tištěného materiálu v průběhu stavby struktury dochází vlivem proudění vzduchu kolem ústí trysky k jejímu ochlazování. Teplota trysky tak podle experimentů může při nejvyšších průtocích vzduchu klesnout až o 40°C . V případě tak vysokého teplotního gradientu hrozí narušení průběhu tisku. Při podchlazení trysky dojde k ochlazení tištěného materiálu. Následkem toho může být nedostatečná kvalita u spojení prutů vlivem nízkého dodaného tepla. V nejhorším případě vzroste vlivem tuhnutí materiálu v trysce odpor při jeho vytlačování na takovou mez, že dojde ke snížení extruze až nakonec k jejímu úplnému přerušení vedoucí k nutnosti zásahu obsluhy. Důvodem kompletního přerušení extruze je zpětný tok materiálu vznikající v části hotendu s taveninou. Kombinace stálého přísunu

nového materiálu a ucpaného odtoku zapříčiní tok taveniny zpět proti směru vsunovaného materiálu kde dojde k jeho zatuhnutí a vzniku zátky blokující posuv materiálu.

K zamezení úniku tepla z těla trysky byl vyroben silikonový obal, kopírující tvar hotendu (Obr. 6-27 vlevo). Obal má tloušťku 1 mm. Výroba obalu probíhala odlitím tekutého silikonu spolu s tužidlem do 3D tištěné formy (Obr. 6-27 vpravo).



Obr. 6-27 Vlevo silikonový obal, vpravo odlévací forma

6.5 Hodnocení parametrů

Hodnocení parametrů výrobního systému bylo rozděleno podle hlavních cílů na tři oblasti. Schopnost vyrobit požadovanou geometrii, schopnost zajistit predikovanou hodnotu únosnosti struktur a uživatelská přívětivost. Shrnutí naplnění cílů je uvedeno v Tab. 16.

Schopnost systému výroby geometrie byla ověřena na třech typech produktů. Vyráběné vzorky pro tlakové testy ukázaly možnost škálovatelnosti geometrie při změně délky prutů a celkových rozměrů struktur. Škálování průměru prutů je velmi omezené, je dán rozměry trysky tiskové hlavy. Drobné úpravy rozměru okolo dvou desetín milimetru je možné docílit změnou rychlosti extruze a rychlosti pohybu. U oktetových struktur bylo nutné pro každou rozměrovou variantu upravovat hodnoty korekcí. Změna rozměrů s sebou tedy nese nutnost kontroly správnosti korekcí. Bcc struktury nevyžadovaly u všech čtyř variant úpravu korekcí. Díky robotickému ramenu je potenciální výrobní prostor dostatečně velký i pro rozměrné struktury.

Tisk obsáhlejších struktur byl experimentálně ověřen na tisku stoličky s velkým počtem buněk. Přepracovaný druhý algoritmus pro tento účel se tak ukázal jako funkční a spolehlivý. Při vhodně navržené a orientované vstupní geometrii uživatel pouze uloží vygenerovaný řídicí kód. Algoritmus je tedy vhodný pro univerzální použití při výrobě geometrií tvořených rovinnými plochami. Pro tvarovatelnější geometrie slouží vytvořený třetí algoritmus. Jeho experimentální ověření proběhlo na tisku tvarované stěny tvořené buňkami. Algoritmus se ukázal být funkční a spolehlivý. Použití tohoto algoritmu by mělo být nejuniverzálnější při

správném seřazení buněk struktury postupně tak, jak mají být vyrobeny. Tvarování probíhá pomocí řídicích bodů, pruty mezi body jsou tedy přímé. U vytváření řídicích bodů z prutů geometrie jsou odsazené body vrcholu prutů tvořící lichoběžník posouvány pouze ve dvou osách. Toto odsazení způsobuje při větším zakřivení ostré hrany na geometrii struktury a narušuje hladký tvar. Lepším způsobem odsazení by bylo navázání směru podle osy prutů. Oba univerzální algoritmy také dovolují snadnou změnu velikosti buněk struktury.

Při tisku bylo dosaženo maximální rychlosti posuvu 3,1 mm/s. Tato rychlost by mohla být dále navýšena. Byla by nutná úprava konstrukce chlazení i hotendu tiskové hlavy. Snížením zástavbových rozměrů hotendu by bylo možné umístit vývody chlazení přímo k jeho trysce bez rizika kolize s již vytištěnou strukturou. Zmenšením vzdálenosti proudu vzduchu by byla navýšena intenzita chlazení a zároveň by bylo možné snížit průtoky vzduchu. Další výhodou by bylo přesnější směřování proudu vzduchu přímo na tištěný materiál. Eliminoval by se tak efekt podchlazování trysky hotendu a tím navazujících vzniklých potíží končících až úplným zastavením extruze. Rovněž by se snížil odvod tepla z těla hotendu, což by zlepšilo hospodárnost ohřevu.

V oblasti zatěžování prutových struktur bylo dosaženo velmi dobrých výsledků u několika variant vyrobených struktur. Nejlepší výsledky dosahovaly varianty s délkou šikmých prutů 25 mm. Nejlepší opakovatelnost maximálního zatížení s variačním koeficientem 1,25 % vykazala oktetová topologie struktury. Struktura je složena pouze z šikmých a vodorovných prutů jejichž výroba dosahuje velmi dobrých přesností a tím je dosaženo vysokých mechanických vlastností a také opakovatelnosti. Bylo tak dosaženo přesnějších výsledků, než uvádí současná literatura [9], zde byl variační koeficient opakovatelnosti zatěžovacích testů 12,5 %, jednalo se ovšem o třibodový ohyb. U bcc struktury s nejlepším variačním koeficientem 3,7 % je opakovatelnost o více jak dvojnásobek horší než u oktetové struktury.

Hlavní důvod horších výsledků je přesnost výroby svislých prutů, které přenášejí největší část zatížení bcc struktury a jejich geometrie obsahuje deformace již před zatížením. Tyto nepřesnosti pak zásadně ovlivňují pokles maximálního zatížení, které je struktura schopná přenést. Problém výroby svislých prutů byl následně vyřešen přidáním druhé kloubové hadice tak, aby proud vzduchu chladil větší část obvodu prutu. Zatímco u šikmých prutů nerovnoměrné chlazení nemá vliv na přesnost geometrie, u svislých prutů způsobuje odchylky. Konfigurace dvou hadic byla použita při tisku tvarové stěny a bylo dosaženo lepších výsledků přesnosti. Bylo by tak nutné zopakovat experimenty pro dosažení přesnějších výsledků.

Experimenty dále poukázaly na zhoršující se opakovatelnost dosažení maximální hodnoty zatížení se zvětšujícími se rozměry prutů. Se zvětšující se délkou prutů jsou mechanické vlastnosti citlivější na nepřesnosti geometrie. Při porovnání výsledků reálných experimentů s MKP výpočtem ideální geometrie bylo zjišťováno, jakého pevnostního potenciálu dosáhnou reálně vyrobené struktury při znalosti jejich teoretického maxima. Nejmenšího rozdílu hodnot 12,3 % dosáhla oktetová struktura s délkou šikmých prutů 30 mm a 13,6 %

oktetová struktura 25 mm. Tyto poměrně dobré výsledky ukazují na přesnou geometrii této topologie struktur. Téměř stejných výsledků při porovnání s výpočtovým modelem bylo dosaženo i v publikaci Tam[9] a to 12,6 % u tříbodového ohybu. Poslední oktetová struktura 35 mm měla rozdíl 26,7 %. Na nejdelších prutech se tedy zřejmě více projevila nepřesnost geometrie. Tvrzení, že se zvětšující se délkou prutů bude rozdíl narůstat zde ovšem u prvních dvou struktur neplatí. Bcc struktura s délkou šikmých prutů 25 mm měla rozdíl oproti výpočetnímu modelu 23,2 %. Nepřesnost svislých prutů a tím horší únosnost se projevila podle předpokladu i u rozdílu mezi výpočetním modelem. Následující dvě struktury bcc s délkou šikmých prutů 30 a 35 mm měly rozdíl maximálního zatížení struktury a síly z výpočetního modelu 38,1 % a 37,4 %. Tento výsledek již ukazuje podstatný rozdíl únosnosti vyrobených struktur oproti jejich teoretickému maximu ideální geometrie. Ukazuje se tedy, že přesnost svislých prutů má zásadní roli v únosnosti bcc struktur. Další vyrobenou sérií byly bcc vzorky 30 mm s úhlem stoupání prutů 55°. Zde byla zaznamenána horší opakovatelnost získání stejných výsledků při tlakových zkouškách. Variační koeficient byl 11,24 % a rozdíl od výpočetního modelu 36,9 %. Vliv na takový rozdíl má porušování ve spojích struktury, které bylo rozebráno v kapitole s výsledky. Řešením tohoto problému je zvětšení rozměrů buňky a vytvoření větší plochy pro spojení prutů.

Na závěr byly porovnány hodnoty poměrů maximálního zatížení a hmotností struktur. Maximální poměr zatížení a hmotnosti struktury byl 6261,6 [N/N] u topologie bcc 25 mm a snižoval se zvětšující se délkou prutů. U oktetových příhradových struktur byl nejvyšší poměr 4032,9 [N/N] u varianty 25 mm a rovněž byl zaznamenán pokles s narůstající délkou prutů. K použití v pokročilejších aplikacích vyžadujících vyšší únosnosti jsou podle výsledků vhodnější varianty s nejkratší délkou prutů. V případě požadavku na vyplnění prostoru pomocí prutových struktur bez zvýšených nároků na únosnost je vhodnější varianta s nejdelšími pruty. Při použití bcc buňky pro názornost, je plocha podstavy struktury u varianty s 25 mm pruty o více než polovinu menší (3422 mm²) než u varianty s pruty 35 mm (7396 mm²), výrobní čas se ovšem liší pouze o 3 minuty. Podobně je tomu i u oktetové struktury. Varianty struktur s nejdelšími pruty jsou tedy mnohem vhodnější pro efektivní vyplnění prostoru při nižších nárocích na únosnost než struktury s nejkratšími pruty. Kompromisem mohou být struktury s pruty délky 30 mm s efektivnější schopností vyplnění prostoru oproti 25 mm variantě, ale při vyšší únosnosti struktury oproti 35 mm varianty.

Byla rovněž zkoumána uživatelská přívětivost systému. Z pohledu bezpečnosti jsou všechny rotační části tiskové hlavy umístěné uvnitř těla, takže nehrozí riziko poranění. Jediné nebezpečné místo je hotend, který má vysokou teplotu a při doteku hrozí popálení. Tato část je ovšem vzdálená od manipulačních prostorů jako je zavádění struny materiálu. Zároveň je systém vyroben z kvalitních součástí a materiálů, čímž by měla být zajištěna dobrá životnost a případná opravitelnost.

Výroba produktů je spojena z několika částí tvořících výrobní náklady při použití systému. Hlavní části tvoří elektrická energie, stlačený vzduch, spotřebovaný materiál, sazba za

obsahu a použití robotického ramena. Naměřená průměrná spotřeba elektrické energie celého systému včetně robotického ramena byla 2 kW na hodinu tisku. Cena jedné kilowatt hodiny se pohybuje v řádu korun v závislosti na nastaveném tarifu. Spotřeba stlačeného vzduchu byla maximálně 60 l/min. Pokud by byla uvažována průměrná spotřeba při tisku, kdy dochází ke změně průtoku vzduchu, 40 l/min s průměrnou cenou 0,5 Kč za 1 m³ stlačeného vzduchu na 7 barů [33], pohybovala by se hodinová sazba na 1,2 Kč. Cena spotřebovaného materiálu se pohybovala na 0,6 Kč za gram PLA. Při maximálním materiálovém průtoku 8 mm³/s a hustotou PLA 1,25 g/cm³ je hodinová sazba za materiál zhruba 21,6 Kč. Největší položku nákladů při použití výrobního systému bude mít cena obsluhy a cena využití robotického ramena.

Tab. 16 Posouzení naplnění cílů

Cíl	Metrika	Závěr	Výsledek
Schopnost vyrobit požadovanou geometrii	Experimentální výroba produktů	Dobrá opakovatelnost výroby s velkým pracovním prostorem, možnost zlepšení přesnosti geometrie	Splněno
Schopnost zajistit predikovanou únosnost struktur v tlaku	Výsledky tlakových testů pro různé varianty	Dobrá opakovatelnost získaných výsledků zatížení u vybraných variant, dobrá shoda s výpočtním modelem	Splněno
Uživatelská přívětivost	Posouzení bezpečnosti a konstrukce systému	Systém je bezpečný a kvalitně vyrobený	Splněno

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem výrobního systému pro tvorbu produktů z prutových struktur. Tisk prutů probíhá do volného prostoru bez nutnosti podpor s aktivním chlazením nánosu. Na začátku práce byla zpracována rešerše zabývající se materiály, procesy a parametry tisku, zatěžováním prutových struktur a výrobními systémy na výrobu prutových struktur. Cílem práce bylo obecné navržení vhodného řešení systému pro výrobu těchto struktur. Pomocí současné konfigurace HW systému experimentálně navrhnout a ověřit parametry výroby. Následně vyrobít vzorky tvořené prutovými strukturami, otestovat je na tlakové zatížení a výsledky porovnat s výpočtovým modelem. Byl proveden obecný návrh řešení vhodné podoby výrobního systému. Systém je dělen na výrobní HW a tiskové strategie. Tisk produktů byl proveden na současné podobě HW výrobního systému. Ta je tvořena robotickým ramenem KUKA, kde je jako efektor umístěna tisková hlava s externím uložením elektroniky mimo robotické rameno. Pro tisk struktur byly přepracovány dvě verze výrobních algoritmů a vytvořena jedna verze využívající nový princip. Algoritmy generovaly řídicí program pro systém robota KUKA. Každá verze byla experimentálně ověřena tiskem produktu z prutových struktur. Kromě vzorků pro experimenty byly vyrobeny dva velkorozměrové produkty různých geometrií z prutových struktur. Rychlost tisku byla 3,1 mm/s při teplotě 240 °C, objemovém průtoku materiálu 8,06 mm³/s a maximálního průtoku vzduchu 60 l/min. Dále byly vyrobeny vzorky prutových struktur dvou topologií mřížek oktetová příhradová a bcc. Na nich byly provedeny tlakové zkoušky, ze kterých bylo vyhodnoceno maximální zatížení, opakovatelnost získaných hodnot a poměr maximálního zatížení struktury a její hmotnosti. Bylo dosaženo přesnější opakovatelnosti experimentů. Variační koeficient získaných výsledků maximálního zatížení byl od 1,25 % do 11,24 % podle použité varianty. Nejlepších výsledků opakovatelnosti získání maximálního přeneseného zatížení dosahovaly oktetové struktury. Rozdíl reálných výsledků od ideálního výpočetního modelu byl 12,3 % až 38,1 % podle varianty, s nejlepšími výsledky dosaženými u oktetových struktur. Tyto výsledky odpovídají výsledkům v současné literatuře. Maximální poměr zatížení a hmotnosti struktury byl 6261,6 [N/N] u topologie bcc. U topologie byl tento poměr 4032,9 [N/N]. Pro aplikace vyžadující vyšší únosnost struktury je nejvhodnější varianta struktur s nejkratšími pruty. Pro efektivní vyplnění prostoru s nižšími požadavky na únosnost je nejvhodnější varianta s nejdelšími pruty. Nakonec byly zhodnoceny cíle a parametry systému. Pomocí dosažených závěrů a použitím výrobního systému je možné tisknout produkty z prutových struktur pro běžné aplikace. Budoucí práce by se mohly zabývat dalšími typy strukturálních testů na ověření mechanických vlastností těchto prutových struktur. Zároveň by mohly být testovány jiné druhy materiálů. Jak vyplývá z rešeršní části práce, se směřováním výroby těchto struktur na použití kompozitních materiálů by mělo být dosaženo mnohem vyšších únosností struktur oproti použití samostatného čistého materiálu.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Typ produktu: funkční vzorek (RIV-G/B)

Apollo ID: 177934

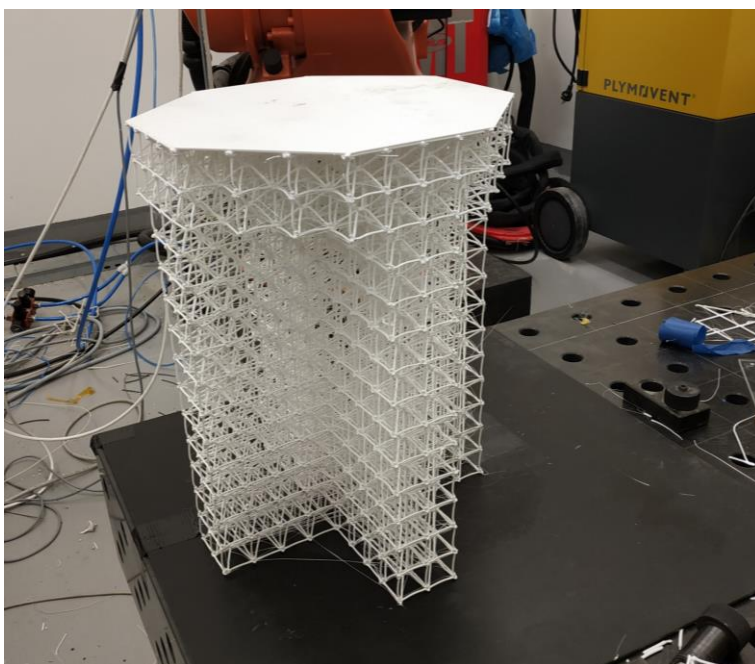
Název: Výrobek validující výrobní systém velkorozměrových prutových struktur z termoplastů

Popis: Jedná se o experimentální produkt představující stoličku na sezení, která ověřuje typické zatížení, na které byl výrobní systém navrhován.

Autoři: Bc. Marek Vašátko, Ing. David Škaroupka Ph.D., Ing. Petr Křivohlavý, Ing. Petr Krejčířík, Ing. Martin Krčma

Místo uložení: D5/121 FSI VUT v Brně, Technická 2

Fotodokumentace:



9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROB|ARCH 2018 | Full Workshop 8. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <http://www.robarch2018.org/adaptive-spatial-3d-printing-mechano-adaptive-space-frame-structures/>
- [2] GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. Cellular solids: Structure and properties, second edition. *Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition*. 2014, s. 1–510.
- [3] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. *SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges*. Materials and Design. 2019, roč. 183 [vid. 11. květen 2022]. ISSN 18734197. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures
- [4] DESHPANDE, V. S., M. F. ASHBY a N. A. FLECK. Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*. 2001, roč. 49, č. 6, s. 1035–1040. ISSN 13596454.
- [5] OSSWALD, Tim A., John PUENTES a Julian KATTINGER. Fused filament fabrication melting model. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 22, s. 51–59. ISSN 2214-8604.
- [6] SUN, Q, Gm M RIZVI, Ct T BELLEHUMEUR a P GU. Experimental Study of the Cooling Characteristics of Polymer Filaments in FDM and Impact on the Mesostructures and Properties of Prototypes. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*. 2003, č. 403, s. 313–323 [vid. 11. květen 2022].
- [7] KŘIVOHLAVÝ, Petr. *Aditivní výroba prostorových prutů z polymerních materiálů*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [8] DE GUEVARA, Manuel Ladron, Luis BORUNDA, Jeremy FICCA, Daragh BYRNE a Ramesh KRISHNAMURTI. Robotic free-oriented additive manufacturing technique for thermoplastic lattice and cellular structures. 2019.
- [9] TAM, Kam-Ming, Daniel J MARSHALL, Mitchell GU, Jasmine KIM, Yijiang HUANG, Justin LAVALLEE a Caitlin T MUELLER. *Fabrication-aware structural optimisation of lattice additive-manufactured with robot-arm*. 2018.
- [10] ZHANG, Y., R. D. ADAMS a Lucas F.M. DA SILVA. A rapid method of measuring the glass transition temperature using a novel dynamic mechanical analysis method. *Journal of Adhesion*. 2013, roč. 89, č. 10, s. 785–806 [vid. 11. květen 2022]. ISSN 00218464.

- [11] BALANI, Kantesh, Vivek VERMA, Arvind AGARWAL a Roger NARAYAN. Physical, Thermal, and Mechanical Properties of Polymers. *Biosurfaces*. 2015, s. 329–344.
- [12] GILES, Harold F., John R. WAGNER a Eldridge M. MOUNT. *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. 2005. ISBN 0815514735.
- [13] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018, roč. 143, s. 172–196. ISSN 13598368.
- [14] PUGLIESE, Raffaele, Benedetta BELTRAMI, Stefano REGONDI a Christian LUNETTA. Polymeric biomaterials for 3D printing in medicine: An overview. *Annals of 3D Printed Medicine*. 2021, roč. 2, s. 100011 [vid. 11. květen 2022]. ISSN 26669641.
- [15] EHRENSTEIN, Gottfried W. (Gottfried Wilhelm) a R. P. (Richard P.) THERIAULT. Polymeric materials : structure, properties, applications. 2001, s. 277.
- [16] PRINGLE, Adam M., Mark RUDNICKI a Joshua M. PEARCE. Wood furniture waste-based recycled 3-D printing filament. *Forest Products Journal*. 2018, roč. 68, č. 1, s. 86–95. ISSN 00157473.
- [17] SHI, Yusheng, Chunze YAN, Yan ZHOU, Jiamin WU, Yan WANG, Shengfu YU a Ying CHEN. Polymer material for additive manufacturing–filament materials. *Materials for Additive Manufacturing*. 2021, s. 361–401.
- [18] *Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk*. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <https://www.lke.cz/cz/mechanicke-vlastnosti-materialu-pro-3d-tisk/>
- [19] *3D Printing Materials - 3D Print Material Optimization Tool | SD3D Printing*. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <https://www.sd3d.com/3d-printing/materials/>
- [20] *Filaments | Fillamentum*. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/>
- [21] LIU, Shuting, Yingguang LI a Nanya LI. A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures. *Materials and Design*. 2018, roč. 137, s. 235–244. ISSN 18734197.
- [22] SYAM, Wahyudin P., Wu JIANWEI, Bo ZHAO, Ian MASKERY, Waiel ELMADIH a Richard LEACH. Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation. *Precision Engineering*. 2018, roč. 52, s. 494–506. ISSN 01416359.
- [23] EICHENHOFER, Martin, Joanna C.H. WONG a Paolo ERMANNI. Continuous lattice fabrication of ultra-lightweight composite structures. *Additive Manufacturing*. 2017, roč. 18, s. 48–57. ISSN 22148604.

- [24] WANG, Zhenwei, Congcong LUAN, Guangxin LIAO, Xinhua YAO a Jianzhong FU. Mechanical and self-monitoring behaviors of 3D printing smart continuous carbon fiber-thermoplastic lattice truss sandwich structure. *Composites Part B: Engineering*. 2019, roč. 176, s. 107215. ISSN 13598368.
- [25] AI BUILD. Enterprise software that unlocks the true potential of additive manufacturing. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <https://ai-build.com>
- [26] BOYD, Robert Platt, Christopher WELLER, Anthony DISANTO, Melody REES a Bruce HILBERT. *Cellular Fabrication and Apparatus for Additive Manufacturing*. 2017, roč. US2017, č. 19.
- [27] *Products - BRANCH TECHNOLOGY*. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <https://branchtechnology.com/products/>
- [28] LATTURE, Ryan M., Ricardo X. RODRIGUEZ, Larry R. HOLMES a Frank W. ZOK. Effects of nodal fillets and external boundaries on compressive response of an octet truss. *Acta Materialia*. 2018, roč. 149, s. 78–87. ISSN 13596454.
- [29] Robots KR 30, 60-3 CR; KR 60 HA-CR Specification KUKA Roboter GmbH. 2017.
- [30] MCAE SYSTEMS S.R.O. ATOS Triple Scan Profesionální 3D optický skener 3D souřadnicové měření Skenování a inspekce Kontrola kvality výroby a reverzní inženýrství. 2020 [vid. 11. květen 2022].
- [31] FILLAMENTUM MANUFACTURING CZECH S.R.O. *PLA Extrafill*. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: www.fillamentum.com
- [32] IMADA CO.,LTD. *Motorized test stand MX2-1000N/2500N*. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <http://www.forcegauge.net/wp-content/uploads/Specifications-for-MX2-1000N-2500N.pdf>
- [33] *Katalogy | AIR Consult*. [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: <https://www.airconsult.cz/ke-stazeni/katalogy>
- [34] MANTOVANI, Sara, Mauro GIACALONE, Andrea MERULLA, Elena BASSOLI a Silvio DEFANTI. Effective Mechanical Properties of AlSi7Mg Additively Manufactured Cubic Lattice Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2021. ISSN 2329-7662.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

FFF	Fused filament fabrication
FDM	Fused deposition modeling
BCC	Body centered cubic
T _g	Teplota skelného přechodu
T _f	Teplota viskózního toku
ABC	Acrylonitrile butadiene styrene
PLA	Polyactic acid
PC	Polycarbonate
α	Teplená vodivost
C ₀	Měrná tepelná kapacita
CAD	Computer aided design

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Použití velkorozměrových struktur jako výplň formy [25].	16
Obr. 1-2 Prostorový tisk polymerních prutů [1].	17
Obr. 2-1 Rešeršní dotaz	18
Obr. 2-2 vývojový PRISMA diagram	19
Obr. 2-3 Datum vydání publikací	20
Obr. 2-4 Nejpoužívanější topologie buněk A) BCC, B) BCCZ, C) FCC, D) FCCZ, E) Cubic, F) Octet-truss, G) Diamond [3].	21
Obr. 2-5 Schéma technologie FFF [5]	21
Obr. 2-6 Schéma typů spojení mezi vlákny materiálu [6].	22
Obr. 2-7 Schéma vlivu natočení tiskové hlavy [7].	23
Obr. 2-8 Úprava trajektorie ve vrcholech prutů [8]	23
Obr. 2-9 Schéma vychýlení s navrženou korekcí [7]	24
Obr. 2-10 Schéma strategie napojení [9]	24
Obr. 2-11 Schéma způsobu napojení [7]	25
Obr. 2-12 Stav polymeru v závislosti na teplotě [10].	26
Obr. 2-13 Výsledný díl a záznam tlakové zkoušky [9].	28
Obr. 2-14 Výsledky tlakových zkoušek [21]	30
Obr. 2-15 Vybrané topologie [22]	31
Obr. 2-16 A) Vyrobený vzorek, B) Záznam z tlakové zkoušky [23].	32
Obr. 2-17 Schéma testování vzorku [24].	33
Obr. 2-18 Výrobní HW při tisku [8].	34
Obr. 2-19 Výrobní HW při tisku [25]	35
Obr. 2-20 Schéma extruderu Branch Technology s vnitřně chlazenou tryskou [26]	36
Obr. 2-21 Vlevo vyráběný fasádový panel na budovách, vpravo řez panelem [27]	37
Obr. 4-1 Strom cílů	45
Obr. 4-2 Strom cílů rozšířený o omezení	46
Obr. 4-3 Glass box	47
Obr. 5-1 Buňka oktetové příhradové struktury s popisem	50

Obr. 5-2 Buňka bcc struktury s popisem	50
Obr. 5-3 Ukázka navržených vzorků s délkou šikmých prutů 25 mm (vlevo octet-truss, vpravo BCC)	51
Obr. 5-4 Schéma experimentu	52
Obr. 5-5 Tisková hlava	53
Obr. 5-6 Pracovní rozsahy robotického ramena [29].....	53
Obr. 5-7 ATOS TripleScan [30].....	54
Obr. 5-8 IMADA MX2-2500N [32]	55
Obr. 5-9 Síť prvků vstupní geometrie	56
Obr. 5-10 Umístění okrajových podmínek (vlevo silové zatížení, vpravo fixní vazba)	56
Obr. 5-11 Umístění kontaktů	57
Obr. 5-12 Výsledné hodnoty napětí oktetové struktury 25 mm	58
Obr. 5-13 Schéma vstupů a výstupů řídicího programu	59
Obr. 6-1 Série snímků z termokamery tisku šikmých prutů BCC struktury	61
Obr. 6-2 Výrobní strategie struktury oktet příhradová	62
Obr. 6-3 Výrobní strategie struktury BCC.....	63
Obr. 6-4 Metoda napojení prutů [7].....	64
Obr. 6-5 Detail spoje BCC struktury	65
Obr. 6-6 Korekce šikmých prutů.....	66
Obr. 6-7 Vlevo korigované trajektorie ve spoji šikmých prutů BCC struktury, vpravo vytvořený spoj	66
Obr. 6-8 Prokládání prutů kružnicemi při měření odchylek (vlevo proložené pruty, vpravo naměřená odchylka)	67
Obr. 6-9 3D skeny vyrobených struktur (vlevo bcc, vpravo oktet)	68
Obr. 6-10 Schéma prvního výrobního algoritmu	69
Obr. 6-11 Schéma druhého algoritmu	70
Obr. 6-12 Příklad použití datových větví	72
Obr. 6-13 Experimentální ověření algoritmu na dílu podstavce	72
Obr. 6-14 Schéma třetího algoritmu	73
Obr. 6-15 Experimentální ověření algoritmu na dílu tvarové stěny	74
Obr. 6-16 Umístění struktury v testovacím zařízení	75

Obr. 6-17 Graf průběhu zatěžování bcc struktury s délkou šikmých prutů 25 mm	76
Obr. 6-18 Graf průběhu zatěžování bcc struktury s délkou šikmých prutů 30 mm	77
Obr. 6-19 Graf průběhu zatěžování bcc struktur s délkou šikmých prutů 35 mm	79
Obr. 6-20 Graf průběhu zatěžování bcc struktur s délkou šikmých prutů 30 mm a úhlem stoupání 55°	81
Obr. 6-21 Graf průběhu zatěžování oktet struktur s délkou šikmých prutů 25 mm	82
Obr. 6-22 Graf průběhu zatěžování oktet struktur s délkou šikmých prutů 30 mm	84
Obr. 6-23 Graf průběhu zatěžování oktet struktur s délkou šikmých prutů 35 mm	85
Obr. 6-24 Poměr max. zatížení a hmotnosti struktur (vlevo bcc, vpravo oktet).....	86
Obr. 6-25 Varianta tiskové hlavy s jednou kloubovou hadicí	88
Obr. 6-26 Úprava geometrie trysky (vlevo původní, vpravo po úpravě)	88
Obr. 6-27 Vlevo silikonový obal, vpravo odlévací forma.....	89

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti materiálů [18][19][20].....	27
Tab. 2 Přehled atributů produktu (C – cíle, O – omezení, F – funkce, P – prostředky).....	42
Tab. 3 Seznam cílů.....	44
Tab. 4 Morfologická analýza	48
Tab. 5 Vybrané řešení v tabulce s prioritami	49
Tab. 6 Vlastnosti materiálu PLA Extrafill [31]	55
Tab. 7 Procesní parametry tisku	60
Tab. 8 Tabulka hodnot pro bcc struktury s délkou šikmých prutů 25 mm	76
Tab. 9 Tabulka hodnot pro bcc struktury s délkou šikmých prutů 30 mm	78
Tab. 10 Tabulka hodnot pro bcc struktury s délkou šikmých prutů 35 mm.....	79
Tab. 11 Tabulka hodnot pro bcc strukturu s délkou šikmých prutů 30 mm a úhlem stoupání 55°	81
Tab. 12 Tabulka hodnot pro oktet struktury s délkou šikmých prutů 25 mm	83
Tab. 13 Tabulka hodnot pro oktet struktury s délkou šikmých prutů 30 mm	84
Tab. 14 Tabulka hodnot pro oktet struktury s délkou šikmých prutů 35 mm	86
Tab. 15 Shrnutí výsledků experimentu.....	87
Tab. 16 Posouzení naplnění cílů	92

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výrobní algoritmus č.1

Příloha 2: Výrobní algoritmus č.2

Příloha 3: Výrobní algoritmus č.3

Příloha 4: Výrobní výkres trysky hotendu

Příloha 5: Laboratorní protokol