

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

**Studie struktur „Minimal Surface“ jako výplně 3D tištěných
těles a jejich vliv na pevnost v tlaku**

Petr Resl

**Diplomová práce
2020**

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Resl**
Osobní číslo: **C17539**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Technologie výroby a zpracování polymerů**
Téma práce: **Studie struktur „Minimal Surface“ jako výplně 3D tištěných těles a jejich vliv na pevnost v tlaku**
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Zásady pro vypracování

1. V teoretické části se zaměřte na přehled problematiky 3D tisku, různé technologie, jejich výhody či nevýhody a příklady využití v praxi.
2. V literární rešerši definujte pojem „Minimal Surface“ a popište jeho praktický význam.
3. V další části rešerše sepište přehled polymerních materiálů používaných pro FDM technologii 3D tisku se zaměřením na terpolymer ASA.
4. V grafickém editoru navrhnete a následně zhotovte pomocí 3D tisku jednotlivé vzorky na měření pevnosti v tlaku s rozdílnými typy výplní a různými geometriemi těles. Dále zhotovte výřezy struktur odvozených od „Minimal Surface“ k vyhodnocení průběhu deformace.
5. Jednotlivé připravené vzorky podrobte zkoušce pevnosti v tlaku a diskutujte vliv rozdílných typů výplní a geometrií těles. Poté vyhodnoťte průběh deformace jednotlivých typů struktur.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Datum zadání diplomové práce: **20. prosince 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **7. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2020

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Petr Resl

Poděkování patří především panu Ing. Prokúpkovi, Dr. za pomoc při řešení nejen diplomové práce, organizaci měření a podporu při studiu. Dále náleží také panu Mgr. Zajacovi, Ph.D. za uvedení do problematiky minimálních ploch a podnětné připomínky pro sepsání diskuze. V neposlední řadě děkuji doc. Ing. Švandovi, Ph.D. za možnost měření v prostorách Dopravní fakulty Jana Pernera.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Anotace

Cílem diplomové práce je vyhodnocení pevnosti v tlaku 3D tištěných těles, jejichž vnitřní výplň je tvořena strukturou minimálních ploch. Vybráno bylo pět struktur trojitě periodických minimálních ploch, TPMP (Triply Periodic Minimal Surface, TPMS), které tvoří výplně pro tři tvary těles. Tato tělesa byla podrobena zkoušce v tlaku a sledovány byly změny pevnosti a modulu pružnosti vůči tělesu pevného bloku stejného tvaru, vůči voštinové výplni a mezi jednotlivými tvary a strukturami navzájem. Jednotlivé struktury minimálních ploch byly navíc tištěny samostatně jako části nekonečné mříže a podrobeny tlakové zkoušce s pozorováním deformace. 3D tisk probíhal na komerční FDM/FFF 3D tiskárně Flashforge Dreamer. Za materiál byl zvolen terpolymer ASA (akrylonitril-styren-akrylát), jako vhodný zástupce konstrukčních termoplastů pro FDM/FFF 3D tisk.

Klíčová slova: 3D tisk; minimální plocha; ASA; fyzikálně-mechanické vlastnosti; pevnost v tlaku.

Annotation

Study of the Minimal Surface as an infill of the 3D printed solids and their affect of the compressive strength

The goal of this Diploma thesis is evaluation of the compressive strength of 3D printed objects with infill built by Triply Periodic Minimal Surface structures. Five Minimal Surface structures as an infill for three solids shapes were chosen. Thees objects had been tested in the compressive strength and the changes of the strength and modulus had been compered with the solid shapes with solid infill, with Honeycomb infill and between every Minimal Surface structure and the solid bulk shape. In addition the parts of an infinite lattice of Minimal surface was printed and tested in compressive strength and the deformation was visually determined. 3D print was realized on Flashforge Dreamer FDM/FFF 3D printer. Thermoplastic terpolymer ASA (acrylonitrile-styrene-acrylate) was chosen as an example of the constructional plastic for the FDM/FFF 3D printing.

Keywords: 3D print; minimal surface; ASA; physical-mechanical properties; compressive strength.

Obsah

ÚVOD.....	11
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1.1 Technologie 3D tisku.....	13
1.1.1 FDM/FFF 3D tisk.....	14
1.1.2 Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Selective Laser Melting.....	16
1.1.3 Stereolitografie, Digital Light Projecting, Continuous Liquid Interface Production.....	18
1.1.4 Polyjet, Multijet, Binder Jetting.....	19
1.1.5 3D tisk ve stavebním průmyslu.....	21
1.2 Trojitě periodické minimální plochy.....	24
1.2.1 Charakteristika trojitě periodických minimálních ploch.....	32
1.3 Materiály pro FDM/FFF 3D tisk.....	36
1.3.1 Terpolymer ASA (akrylonitril-styren-akrylát).....	36
1.3.2 Další materiály.....	38
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	41
2.1 Charakteristika materiálů.....	41
2.2 Stanovení indexu toku taveniny.....	41
2.3 Stanovení T_g pomocí TMA a DMA.....	42
2.4 Účel stanovení pevnosti v tlaku.....	43
2.5 Charakteristika zkušebních těles.....	44
2.6 Příprava dat.....	47
2.6.1 Blender.....	50
2.7 Parametry 3D tisku.....	76
2.8 3D tiskárna Flashforge Dreamer.....	81
2.9 Stanovení pevnosti v tlaku.....	82
3 VÝSLEDKY A DISKUZE.....	83
3.1 Pevnost v tlaku síťových výplní, průběhy deformací.....	83
3.1.1 Zkušební tělesa tvaru kvádrů.....	90
3.1.2 Zkušební tělesa tvaru válce.....	93
3.1.3 Zkušební tělesa tvaru spirály.....	96
3.1.4 Zkouška v tlaku výřezů z nekonečných mříží síťových těles a voštiny.....	98
3.1.5 Zkušební tělesa s jednotlivými výplněmi.....	101
3.2 Pevnost v tlaku blánových výplní, průběhy deformací.....	103
3.3 Výsledky ze zkoušky v tlaku zkušebních těles vyplněných strukturami odvozenými od TPMP.....	113
4 ZÁVĚR.....	119
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	121
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	126

Seznam obrázků

Obr. 1: Nejpopulárnější technologie 3D tisku v letech 2017 a 2018 [4].....	15
Obr. 2: FDM/FFF – proces tisku [6].....	16
Obr. 3: Počet prodaných Desktop 3D tiskáren celosvětově [7].....	16
Obr. 4: SLS – proces tisku [13].....	18
Obr. 5: SLA – proces tisku [13].....	19
Obr. 6: DLP/LCD, CLIP – proces tisku [19].....	20
Obr. 7: PolyJet/Multijet/BinderJetting – proces tisku [13].....	21
Obr. 8: Graf závislosti <i>cen</i> y výrobků na jejich <i>množství</i> při porovnání aditivní výroby a konvenční technologie [2].....	22
Obr. 9: New Story – neziskový projekt výstavby domů pro obyvatele zasažené přírodními katastrofami ve spolupráci se společností ICON započatý v roce 2017 v El Salvadoru [26].....	23
Obr. 10: The BOT, demonstrační projekt výstavby domu firmou COBOD, 2017 Dánsko [26].....	24
Obr. 11: Ocelový most zhotovený technologií aditivní výroby v roce 2015 v Nizozemí [26].....	24
Obr. 12: Listy cesmíny ostrolisté (vlevo [29]), sumýš Yellow Wall (vpravo [30]).....	25
Obr. 13: Sedlo jako příklad minimální plochy [32].....	26
Obr. 14: Katenoid (vlevo) [34] [35], Helicoid (vpravo) [36].....	27
Obr. 15: Riemannova minimální plocha (vlevo) [38], Scherkova minimální plocha <i>jednoduše</i> periodická (uprostřed) [37], Scherkova minimální plocha <i>dvojitě</i> periodická (vpravo) [37].....	28
Obr. 16: Schwarzovi minimální plochy: zleva Primitive, Diamond, Hexagonal, Crossed layers of parallels [39].....	28
Obr. 17: Batwing elementární buňka (vlevo), Batwing opakující se buňka (vpravo) [39].....	29
Obr. 18: a) identická (zrcadlově otočená) síťová struktura odvozená od minimální plochy, b) neidentická síťová struktura odvozená od minimální plochy [41].....	30
Obr. 19: Gyroid – síťové těleso (vlevo), blánové těleso (vpravo) [40].....	30
Obr. 20: Olympijský stadion v Mnichově [42].....	31
Obr. 21: Socha inspirovaná minimální plochou, Kazachstán [43].....	32
Obr. 22: Základní plocha zakřiveného čtyřúhelníku, 1/48 krychle [27] (vlevo), základní buňka Schwarz P TPMS (uprostřed), Schwarz P TPMS [39].....	33
Obr. 23: Základní buňka Schwarz D (uprostřed), opakující se buňka Schwarz D (vpravo) [39].....	34
Obr. 24: Výřez mřížce Gyroid v pohledu C3 symetrie (vlevo) a z prostorového otočení (vpravo) [46]...34	34
Obr. 25: Transformace Schwarz D v Gyroid a Schwarz P [46].....	35
Obr. 26: Výchozí minimální plocha (vlevo), elementární buňka Batwing TPMP (uprostřed), opakující se buňka Batwing cube [48].....	35
Obr. 27: Lidinoid [50].....	36
Obr. 28: Schéma výroby ASA [51].....	38
Obr. 29: Struktura ASA [51].....	38
Obr. 30: Tvary zkušebních těles.....	45
Obr. 31: Síťová tělesa odvozená od minimální plochy, zleva: Gyroid, Diamond, Schwarz P.....	47
Obr. 32: Síťová tělesa odvozená od minimální plochy, zleva: Batwing, Lidinoid, Voština.....	48
Obr. 33: Blánová tělesa odvozená od minimální plochy, zleva: Gyroid, Diamond, Batwing.....	48
Obr. 34: Opravení modelu v softwaru 3D Builder.....	49
Obr. 35: Blender.....	51
Obr. 36: Změna jednotek.....	52
Obr. 37: Změna velikosti (po stisku klávesy S).....	53
Obr. 38: Skrytí objektu, vložení objektu.....	54
Obr. 39: Boolean modifikátor.....	55
Obr. 40: Rotace segmentu.....	56
Obr. 41: Extruze spodní a horní stěny.....	57
Obr. 42: Doplnění stěny klávesou F.....	58
Obr. 43: Zobrazení a otočení normálových vektorů.....	59
Obr. 44: Zkušební těleso tvaru spirály s výplní Gyroid.....	60
Obr. 45: Nástroj 3D Print pro výpočet objemu.....	61
Obr. 46: Chyby při aplikaci Boolean modifikátoru.....	62
Obr. 47: Batwing elementární buňka.....	62
Obr. 48: Sjednocení duplicitních vektorů.....	64
Obr. 49: Batwing, opakující se buňka.....	65
Obr. 50: Batwing, výřez z nekonečné mřížce.....	66
Obr. 51: Lidinoid.....	67
Obr. 52: Zvětšení na rozměr (60 × 60 × 60) mm.....	68

Obr. 53: Nastavení modifikátoru Subdivision Surface.....	69
Obr. 54: Výběr dle podobnosti.....	70
Obr. 55: Odstranění stěn síťového tělesa.....	71
Obr. 56: Zobrazení normálových vektorů a přepočítání jejich směru (Alt + N).....	72
Obr. 57: Modifikátor Solidify pro zesílení stěn.....	73
Obr. 58: Vytvoření pravidelného šestiúhelníku.....	74
Obr. 59: Voština s nekonečně tenkou stěnou.....	75
Obr. 60: Označení stěn voštiny pro upravení rozměrů.....	76
Obr. 61: Vytvoření konečné tloušťky stěny voštiny.....	77
Obr. 62: Flashforge Dreamer [68].....	82
Obr. 63: Schwarz P síťové těleso.....	84
Obr. 64: Gyroid síťové těleso.....	85
Obr. 65: Diamond síťové těleso.....	85
Obr. 66: Batwing síťové těleso.....	85
Obr. 67: Lidinoid síťové těleso.....	86
Obr. 68: Voština.....	86
Obr. 69: Plné tvary.....	86
Obr. 70: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků kvádr Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo).....	87
Obr. 71: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků kvádr Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo).....	87
Obr. 72: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků kvádr Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo).....	87
Obr. 73: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebního vzorku plný kvádr.....	88
Obr. 74: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo).....	88
Obr. 75: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo).....	88
Obr. 76: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo).....	89
Obr. 77: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebního vzorku plný válec.....	89
Obr. 78: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků spirála Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo).....	89
Obr. 79: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků spirála Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo).....	90
Obr. 80: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků spirála Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo).....	90
Obr. 81: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebního vzorku plná spirála*.....	90
Obr. 82: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru kvádr, jednotlivé křivky odpovídají síťovým tělesům tvořících výplň.....	91
Obr. 83: Deformace ve vzpěru smykem zkušebního tělesa Schwarz P ST kvádr.....	92
Obr. 84: Deformace ve vzpěru smykem výřezu z mříže Schwarz P ST.....	92
Obr. 85: Deformace zkušebních těles plný kvádr (vlevo) a voština kvádr (vpravo).....	93
Obr. 86: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru válce, jednotlivé křivky odpovídají síťovým tělesům tvořících výplň.....	94
Obr. 87: Deformace zkušebních těles Gyroid ST válec (vlevo) a Diamond ST válec (vpravo).....	95
Obr. 88: Deformace výřezů mříží Gyroid ST (vlevo) a Diamond ST (vpravo).....	95
Obr. 89: Batwing ST mříž před deformací (vlevo) a po deformaci (vpravo).....	96
Obr. 90: Deformace zkušebního tělesa Batwing ST válec.....	97
Obr. 91: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru spirály, jednotlivé křivky odpovídají síťovým tělesům tvořících výplň.....	97
Obr. 92: Deformace zkušebního tělesa Lidinoid ST spirála (vlevo) a Lidinoid ST mříže (vpravo).....	98
Obr. 93: Deformace zkušebního tělesa Batwing ST spirála (vlevo) a Batwing ST mříže (vpravo).....	99
Obr. 94: Deformační křivky výřezů mříží Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo).....	99
Obr. 95: Deformační křivky výřezů mříží Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo).....	100
Obr. 96: Deformační křivky výřezů mříží Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo).....	100
Obr. 97: Deformace výřezů mříží síťových struktur Schwarz P (vlevo) a Gyroid (vpravo).....	101
Obr. 98: Deformace výřezů mříží síťových struktur Diamond (vlevo) a Batwing (vpravo).....	101
Obr. 99: Deformace výřezů mříží struktur Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo).....	102

Obr. 100: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo).....	102
Obr. 101: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo).....	102
Obr. 102: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků Lidinoid ST(vlevo) a voština (vpravo).....	103
Obr. 103: Deformační křivky zkoušky v tlaku plných zkušebních vzorků.....	103
Obr. 104: Gyroid blánové těleso; 1,4 mm (vlevo), 2 mm (vpravo).....	104
Obr. 105: Diamond blánové těleso; 1,4 mm (vlevo), 2 mm (vpravo).....	105
Obr. 106: Batwing blánové těleso; 1,4 mm (vlevo), 2 mm (vpravo).....	105
Obr. 107: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Gyroid BT 1,4 mm (vlevo) a Gyroid BT 2 mm (vpravo).....	106
Obr. 108: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Diamond BT 1,4 mm (vlevo) a Diamond BT 2 mm (vpravo).....	106
Obr. 109: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Batwing BT 1,4 mm (vlevo) a Batwing BT 2 mm (vpravo).....	106
Obr. 110: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru válce, jednotlivé křivky odpovídají blánovým tělesům tvořících výplň.....	107
Obr. 111: Deformace zkušebního tělesa tvaru válce vyplněného blánovou strukturou Batwing BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo).....	108
Obr. 112: Deformace zkušebního tělesa tvaru válce vyplněného blánovou strukturou Gyroid BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo).....	109
Obr. 113: Deformace zkušebního tělesa tvaru válce vyplněného blánovou strukturou Diamond BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo).....	110
Obr. 114: Deformační křivky zkoušky v tlaku výřezů z mříží Gyroid BT.....	110
Obr. 115: Deformační křivky zkoušky v tlaku výřezů z mříží Diamond BT.....	111
Obr. 116: Deformační křivky zkoušky v tlaku výřezů z mříží Batwing BT.....	111
Obr. 117: Deformace výřezu z nekonečné mříže Gyroid 2 mm; svislé sinusovky (vlevo), podélné sinusovky (vpravo).....	112
Obr. 118: Deformace výřezu z nekonečné mříže Diamond BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo).....	113
Obr. 119: Deformace výřezu z nekonečné mříže Batwing BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo).....	113
Obr. 120: Graf srovnání mezi pevností výplně Batwing BT.....	118
Obr. 121: Graf srovnání mezi pevností výplně Batwing BT.....	119

Seznam tabulek

Tabulka 1: Charakteristika materiálu ASA.....	41
Tabulka 2: Procentuální zastoupení objemové výplně.....	45
Tabulka 3: Parametry 3D tisku.....	72
Tabulka 4: Odpad z 3D tisku.....	74
Tabulka 5: Časy 3D tisku jednotlivých zkušebních těles.....	75
Tabulka 6: Tabulka výsledků zkoušky v tlaku všech vzorků.....	109
Tabulka 7: Tabulka hodnot měrných mezí pevnosti a poměrů ku pevnému tělesu.....	112

ÚVOD

3D tisk představuje moderní technologii zpracování materiálů. Umožňuje zhotovit objekty libovolného tvaru bez závislosti na formě. Tento fakt umožňuje široké uplatnění v mnoha nejen průmyslových odvětvích. Velký význam má ve strojním a stavebním průmyslu jako zařízení pro výrobu prototypů, což umožňuje real-time vizualizaci výsledného objektu, či konstrukce. Lze tak provádět okamžité změny v původních návrzích (reverse engineering), studovat stabilitu objektů nebo aerodynamické, či ergonomické vlastnosti. Dále se hodí pro malosériové zhotovování složitých dílů. Ve slévárenství se používají technologie 3D tisku pro výrobu forem pro odlévání výrobků. Obdobně je tomu při výrobě šperků. Tím lze velmi dramaticky snížit výrobní náklady. S průběžným nástupem průmyslu 4.0 se vyvíjejí prototypy strojů pro stavební průmysl schopné operovat s materiály na bázi betonu.

Jedny z hlavních předmětů vývoje v konstrukčním a stavebním průmyslu jsou pevnější a zároveň lehčí materiály. Jak vyplývá z různých studií zabývajících se výpočetní simulací deformací objektů, existují tvary, které by lépe rozkládali působení vnějších sil. Problémem je však jejich výroba. Často to jsou struktury, které nelze vyhotovit stávajícími technikami subtraktivní výroby. Příkladem mohou být struktury minimálních ploch (Minimal Surfaces), které umožňují redukci hmoty bez snížení mechanických vlastností. Nedosáhne se tedy přímo materiálu s menší hustotou, ale snížení hmotnosti se dosáhne vyhotovením duté struktury ze stávajících materiálů. Pro toto vyhotovení se musí použít technika aditivní výroby, kde se nejefektivněji hodí právě 3D tisk, tedy numericky řízená selektivní aditivní výroba.

Z definice je stěna minimální plochy nekonečně tenká. K reálnému zhotovení struktur minimální plochy se stěny musí převést na konečnou tloušťku. Tím vzniknou nové struktury odvozené od původní minimální plochy.

Vzhledem k tvaru a velikosti jednotlivých struktur je důležité zvolit správnou technologii 3D tisku. Každá technologie operuje s různou přesností a tím je dána různá minimální velikost objektu. I vstupní materiál má vliv na zhotovení těchto struktur, jde jednak o typ materiálu (polymer, kov...) dále o jeho stav (struna

termoplastu, prášek, kapalná pryskyřice, emulze...). Tavení struny bude vždy méně přesné než selektivní vytvrzování pryskyřice paprskem světla. Je také potřeba zohlednit náklady na požadovanou aplikaci.

1 TEORETICKÁ ČÁST

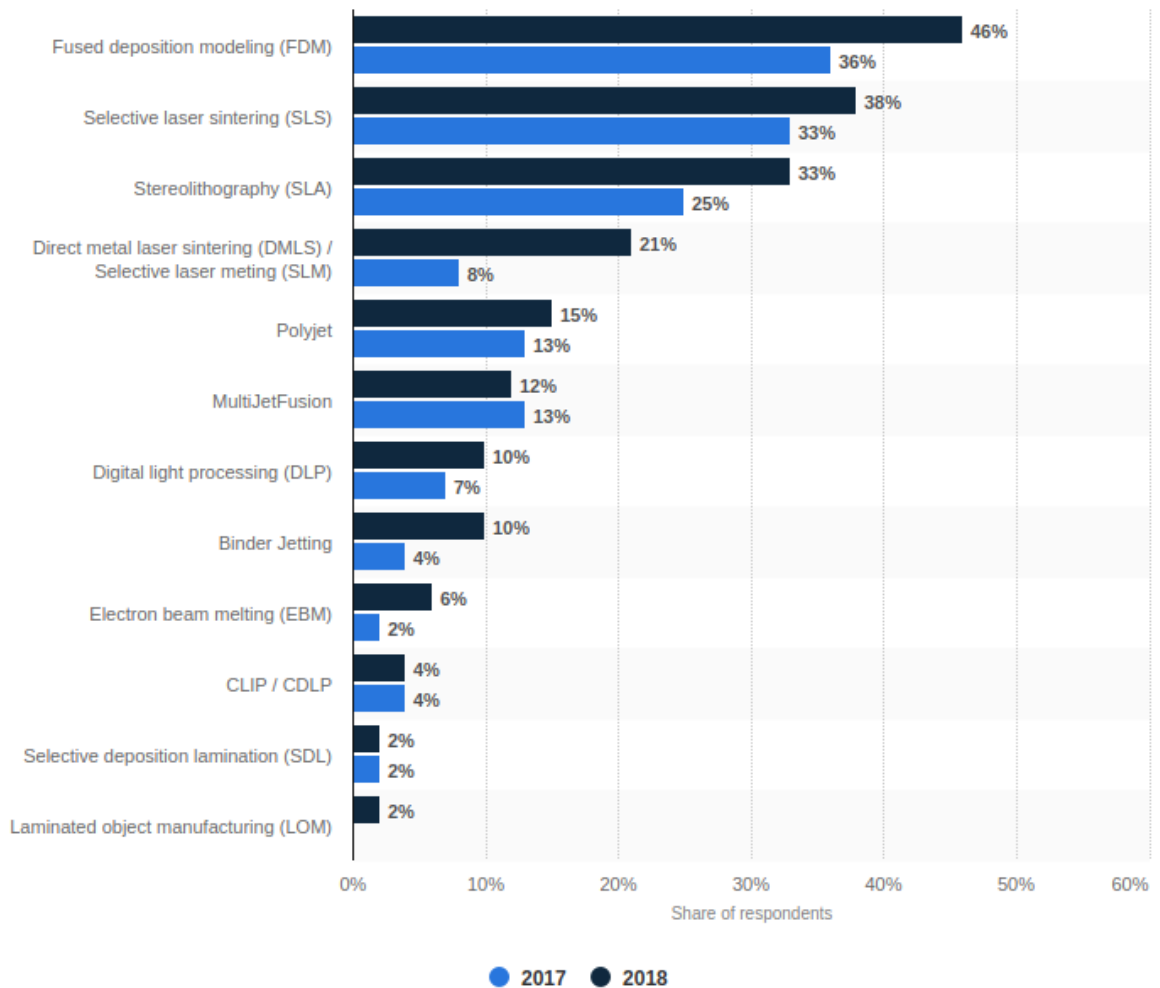
1.1 Technologie 3D tisku

3D tisk je označení pro techniku aditivní výroby, tedy postupného vrstvení materiálu na sebe do konečného tvaru. Předlohou je digitální 3D model, který je převeden do reálné podoby z požadovaného materiálu. Ať už jde o jakoukoliv technologii, platí pro ni tři rovnocenné segmenty: hardware, software a materiál, které pracují jako celek a jsou závislé jeden na druhém. V editoru je navržen 3D model, který se v dalším softwaru, převede na souřadnicový programovací jazyk, který je načten firmwarem 3D tiskárny, která podle něj hýbe osami stroje a tvoří tak navržený objekt z dostupných materiálů [1], [2]. Fakt, že je celý proces závislý na digitálním modelu, poskytuje 3D tisk unikátní řešení výroby objektů bez nutnosti použít formu. Materiál je kladen selektivně, tedy přesně tam kam má, v množství jakém má, což představuje prakticky bezodpadový způsob výroby. Na základě těchto skutečností lze 3D tisk označit za numericky řízenou selektivní aditivní výrobu.

První zmínky o 3D tisku sahají do šedesátých let minulého století, kdy britský sci-fi spisovatel a vynálezce, Arthur C. Clarke použil slovo „Replicarot“ pro zařízení schopné reprodukovat objekty [3]. O 20 let později Chuck Hull patentoval 3D tiskový stroj pracující na technologii stereolitografie a založil společnost 3D Systems. V devadesátých letech přichází FDM technologie a technologie SLS. V roce 2009 pozbyl platnost patent zahrnující mimo jiné i FDM technologii a ta se tak stává nejrozšířenější technologií 3D tisku na světě [2].

Současné technologie 3D tisku mají uplatnění v průmyslu i domácnostech. Poskytovatel statistik trhu a průmyslu Statista [4] zveřejnil seznam celosvětově nejpoužívanějších technologií 3D tisku za roky 2017 a 2018 (Obr. 1). Jsou to technologie zahrnující strojírenský, automobilový, letecký, slévarenský, stavební, šperkařský, zdravotnický aj. průmysl.

Most used 3D printing technologies in 2017 and 2018

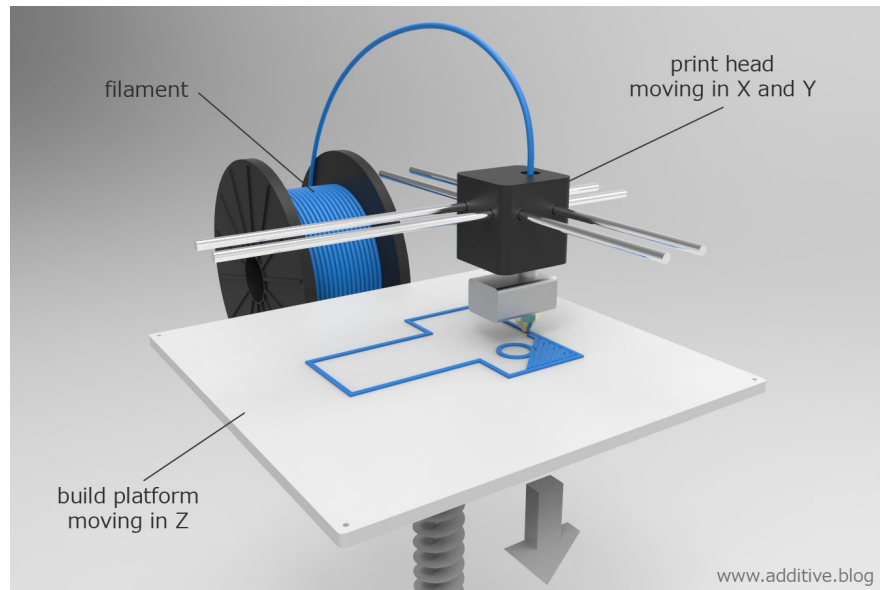


Obr. 1: Nejpoužívanější technologie 3D tisku v letech 2017 a 2018 [4]

1.1.1 FDM/FFF 3D tisk

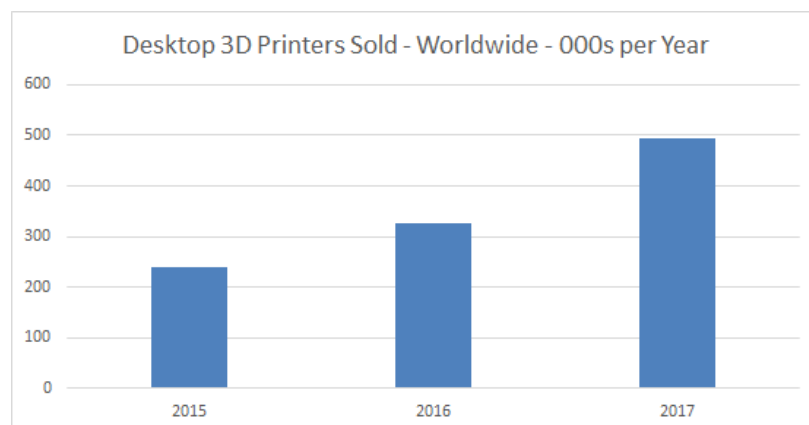
Celosvětově nejpoužívanější technologií je FDM/FFF (Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication), založená na principu extruze termoplastu ve formě struny (filamentu) skrz trysku na tiskovou podložku. Materiál je kladen selektivně po vrstvách na sebe, viz Obr. 2. Většina 3D tiskáren této technologie jsou jednoduché konstrukce [5], řízené open-source firmwarem, používající open-source software. Vzhledem k velikosti konstrukce se označují jako desktop 3D tiskárny vhodné pro domácnost i komerční využití.

Diplomová práce
TEORETICKÁ ČÁST



Obr. 2: FDM/FFF – proces tisku [6]

V roce 2017 bylo podle statistik firmy Context prodáno téměř pul milionu desktop 3D tiskáren a mezi lety 2015 a 2017 bylo prodáno více než jeden milion kusů (Obr. 3). Podle článku [7] je tento rapidní nárůst způsoben novými výrobci 3D tiskáren, většina problematiky FDM/FFF 3D tisku spadá pod open-source, tím je zaručen neustálý vývoj kvality i bezpečnosti provozu 3D tiskáren. V neposlední řadě za to mohou on-line portály pro zdrojová data 3D tisku a jejich editaci. Portály jako Thingiverse či Myminifactory jsou bezplatné sítě, kde lze velmi pohodlně nalézt, stáhnout a následně tisknout chtěný objekt. Případně portál Thinkercad umožňuje editaci existujících souborů, či vytvoření nových, rovněž on line a zcela zdarma.



Obr. 3: Počet prodaných Desktop 3D tiskáren celosvětově [7]

FDM/FFF technologie 3D tisku představuje jednoduché a dostupné řešení pro zhotovení výrobku v relativně krátkém čase, s minimálními náklady, avšak za cenu nižší přesnosti [8]. Ta se odvíjí od průměru trysky a od minimálního kroku motoru v osách X,Y a Z [9]. V případě Flashforge Dreamer se jedná průměr trysek 0,4 mm a o 0,011 mm v osách X a Y a 0,0025 mm v ose Z [10]. Navíc extrudovaný materiál má tendenci se rozpínat či smršťovat a dále tak snižuje přesnost tisku. Rychlost tisku se odvíjí od rychlosti krokových motorů a nastavené výšky vrstvy. Nicméně, rychlost je závislá na podstatě konstrukce. Tryska představuje bod, tedy nejprve se tiskne linka, a kladením linek vedle sebe se tvoří plocha, tím je celý proces pomalejší, oproti jiným technologiím. Kompenzováno je to nízkou spotřebou energie. Většinu 3D tiskáren tohoto typu pohání zdroj do 400 W [11].

Jedno z hlavních omezení FDM/FFF technologie spočívá v tisku převisů a ostrých úhlů [8]. Zde je nutné spolu s objektem tisknout podpory, které podrží převis. Po dokončení procesu tisku je nutné podpory odstranit, tím však vzniká odpad. Je-li 3D tiskárna vybavena dvěma extrudery, lze podpory tisknout buď polyvinylalkoholem, který lze rozpustit ve vodě, nebo biodegradabilním plastem. Dovoluje-li tvar objektu tisk bez podpor, poté jediný odpad připadá na extruzi tzv. skirtu kolem objektu, který se tvoří z důvodů předplnění trysky materiálem a vytyčením tiskového prostoru. Jedná se o dvě až čtyři kontury o šířce extruze odpovídající průměru trysky v jedné vrstvě. Tento skirt pomáhá odhadnout adhezi první vrstvy – přilne-li se skirt, s největší pravděpodobností přilne i první vrstva objektu. Spotřeba materiálu na skirt je takřka nezávislá na využití tiskového prostoru a lze jej vůči spotřebě materiálu na tisk objektu zanedbat.

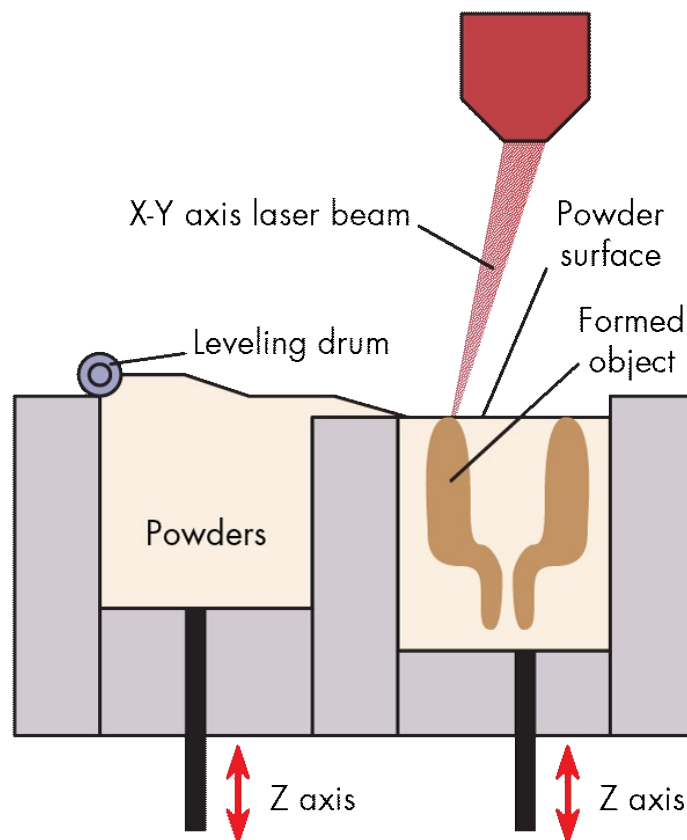
Tím, že tisk probíhá ve vrstvách extrudovaného termoplastu, se vytváří nerovný povrch. Vadí-li to aplikaci, je nutný následný postproces. Navíc toto vrstvení zapříčiňuje značnou anizotropii nejen mechanických vlastností [8].

1.1.2 Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Selective Laser Melting

Uvedené technologie pracují na principu tavení práškového materiálu laserovým paprskem, který, bodově obíhá tvar modelu a sintruje materiál do požadovaném tvaru. Zatímco SLS (Selective Laser Sintering) zahřívá materiál jen těsně pod teplotu tání a využívá převážně polymery a částicové kompozity, DMLS

(Direct Metal Laser Sintering) a SLM (Selective Laser Melting) operují s kovovými materiály a zahřívají materiál na teplotu tání (SLM) nebo jen na rekrystalizační teplotu (DMLS) [2].

Proces spočívá v nanesení tenké vrstvy práškového materiálu přes celou tiskovou plochu. Laser selektivně sintruje materiál do 3D modelem daného tvaru. Po dokončení jedné vrstvy zajede podložka směrem dolů a je nanesena další vrstva práškového materiálu. Takto se proces opakuje vrstvu po vrstvě dokud není hotov celý objekt. Proces tisku schematicky ukazuje Obr. 4. Neslinutý materiál slouží jako podpora pro převisy a po skončení tisku je možné jej recyklovat. Díky tomu lze technologie SLS, DLMS a SLM označit jako bezodpadové. Přesnost a preciznost těchto technologií je na velmi vysoké úrovni, díky tomu se uplatňuje v leteckém či automobilovém průmyslu. Materiály pro SLS jsou převážně polyamidy, pro DMLS a SLM to jsou nejrůznější slitiny kovů. Výrobky z těchto technologií jsou izotropní a konkurují tradičním zpracovatelským či slévárenským technologiím, problém je však jejich dostupnost. Jsou to technologie nákladné na pořízení i provoz [12].

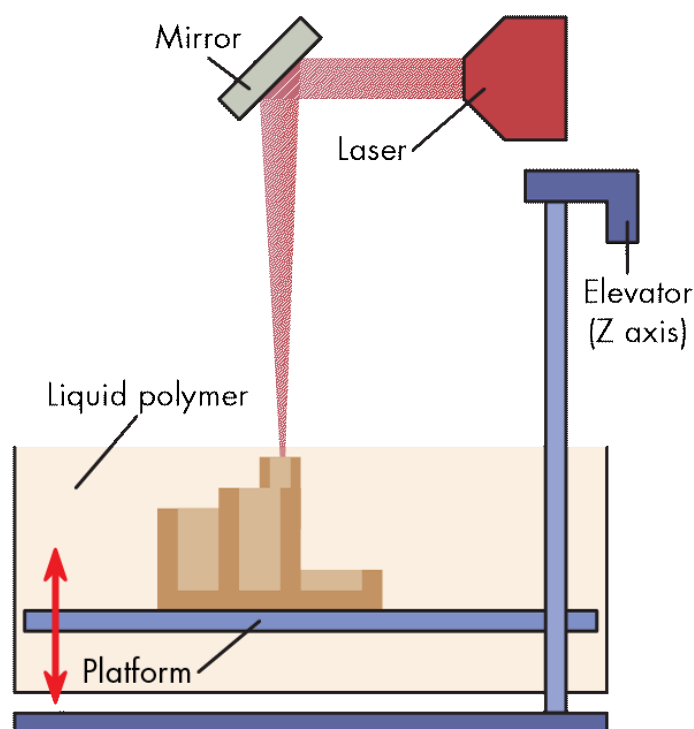


Obr. 4: SLS – proces tisku [13]

1.1.3 Stereolitografie, Digital Light Projecting, Continuous Liquid Interface Production

Společným prvkem pro tyto technologie je materiál. Tím jsou fotocitlivé reaktoplastické pryskyřice tvrzené světlem. SLA (Stereolitografie) využívá UV laseru jako zdroje světla pro iniciaci vytvrzení, DLP (Digital Light Projecting) či LCD (Liquid Crystal Display) a CLIP (Continuous Liquid Interface Production) využívají světla z projektoru, či displeje [2].

Při procesu 3D tisku stereolitografií obíhá laser bodově buď seshora, nebo zesponu po podložce, podobně jako tryska u FDM technologie, a výsledný objekt je buď ponořován do pryskyřice (Obr. 5), nebo vytahován směrem vzhůru – objekt je na podložce vzhůru nohama [14]. SLA byla první patentovaná technologie 3D tisku a podle této technologie se jmenuje i výchozí soubor pro 3D modely *.stl [15]. Stereolitografie je jednou z nejpřesnějších 3D tiskových technologií a využití našla v architektuře či strojírenství jako vizualizační nástroj pro reverse engineering.

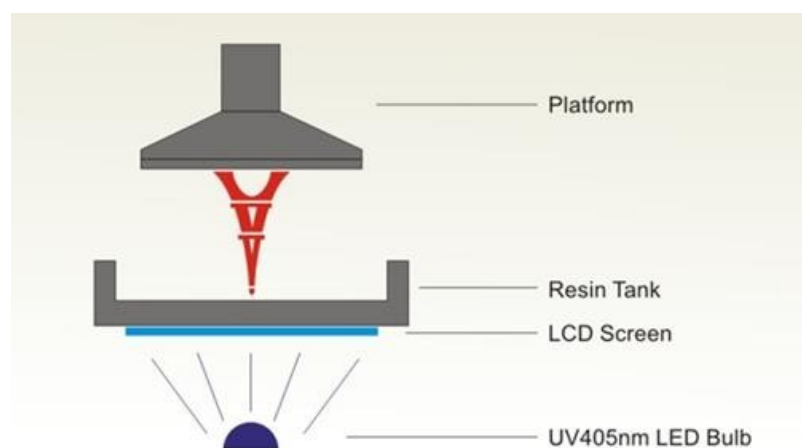


Obr. 5: SLA – proces tisku [13]

DLP/LCD 3D tiskárny jsou desktop zařízení podobná stereolitografii, ale tisknou rychleji. To z důvodů přítomnosti projektoru, či displeje, který vysvítí každou vrstvu

okamžitě v celé ploše. Zdroj o vlnové délce 380–405 nm svítí zespodu a objekt je postupně vytahován vzhůru nohama. Stejně jako u SLA, jednotlivé vrstvy se pohybují v rozměrech od 25 μm tedy poloviční oproti minimální vrstvě FDM 3D tisku, tím je povrch výrobku hladší. Přesnost v osách X a Y poté zaručuje rozlišení displeje, či projektoru [16].

CLIP (Continuous Liquid Interface Production) je jednou z nejpokročilejších technologií 3D tisku. Jak název napovídá jde o kontinuální proces 3D tisku. Unikátní řešení dovoluje plynule vytvrzovat pryskyřici v průběhu tisku a zhotovit tak objekt bez nutnosti přerušování procesu tisku z důvodů čekání na vtečení pryskyřice pod objekt, jak je tomu u SLA i DLP/LCD technologie. Tím se dosáhne kompletně hladkého povrchu a izotropie [17]. Podobně funguje i nová technologie CDLM (Continuous Digital Light Manufacturing) [18]. Nevytvrzený materiál lze použít znovu. Proces tisku je znázorněn na obrázku 6.

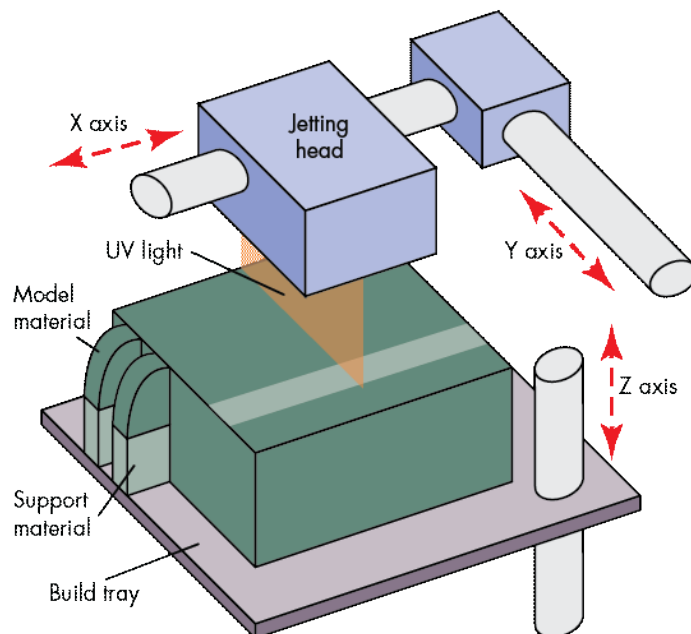


Obr. 6: DLP/LCD, CLIP – proces tisku [19]

1.1.4 Polyjet, Multijet, Binder Jetting

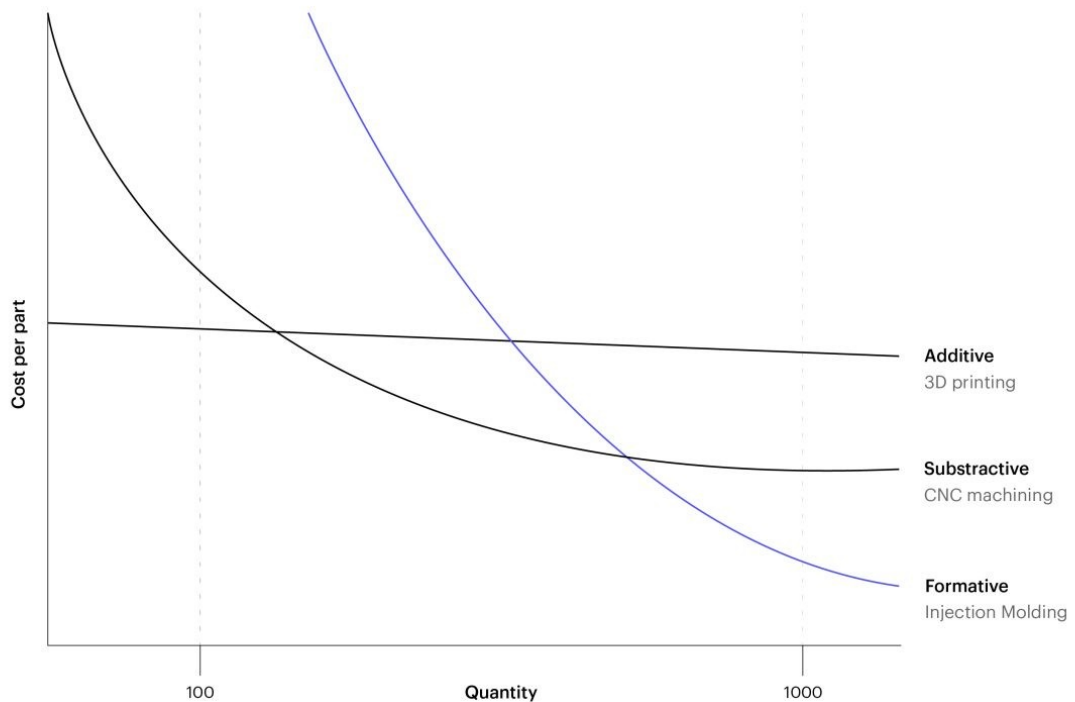
Jedná se o technologie 3D tisku, které se nejvíce podobají standardnímu inkoustovému tisku na papír. Tisk může probíhat rovnou na podložku, přičemž je materiál tvrzen UV zářením nebo je nanášen práškový materiál podobně jako u SLS a ten je poté slepen naneseným polymerem [20], [21]. Materiál je z tiskové hlavy depositován na principu piezoelektrického efektu skrze mnoho trysek. Tisková hlava přejíždí lineárně a soustava na sobě nezávislých trysek selektivně klade materiál. Celý proces schematicky popisuje Obr. 7. Podpůrný materiál je buď bez UV

iniciátoru nebo jej představuje neslepený práškový materiál. V případě nanášení práškového materiálu je nespornou výhodou zaplnění celého tiskového prostoru. Prášek je pokládán v celé tiskové ploše a lze jej postupně nanést i nad hotový výrobek a vytvořit si tak novou počáteční vrstvu pro další výrobek. Podobně je tomu u SLS i SLA technologie. Lze připojit více vstupů materiálu, tím lze docílit i plně barevného tisku. Jedná se o nejpřesnější technologii 3D tisku, která našla uplatnění ve slévárnictví či šperkařství pro tisk ztracených tavných forem nebo v medicíně pro tisk implantátů. Rozlišení tisku sahá až k 16 mikronům.



Obr. 7: PolyJet/Multijet/Binder Jetting – proces tisku [13]

V průmyslových oblastech nastupují 3D tiskové technologie jako nenahraditelný prvek výroby. Umožňují vyrobit dříve nevyrobitelné, zrychlují i zlevňují výrobu, umožňují rychle měnit návrhy a jejich investice se může vrátit už s jedinou zakázkou [22]. Obrázek 8 ukazuje náklady na 3D tisk v porovnání s konvenčními technologiemi zpracování materiálů a jejich závislost na počtu kusů. U 3D tisku je běžné, že jsou náklady na jeden kus prakticky stejné jako na více kusů, vyjma spotřeby materiálu.



Obr. 8: Graf závislosti ceny výrobků na jejich množství při porovnání aditivní výroby a konvenční technologie [2]

1.1.5 3D tisk ve stavebním průmyslu

Nástup 3D tiskových technologií nevynechal ani stavební průmysl. Za posledních pět let se objevila spousta návrhů i realizací staveb postavených aditivní technologií známou jako Concrete Printing či Contour Crafting. Komerční využití se v dohledné době ještě neočekává, avšak vývoj technologií pokročil až k provoznímu měřítku, jak informuje článek [23]. Nejpokročilejší vývoj pocházejí právě od Contour Crafting Corporation [24].

3D tisk ve stavebnictví slibuje výrazné změny v dosavadních realizacích budov, mostů a dalších staveb. Nejvýraznějšími výhodami jsou finanční a časové úspory, dále lze opět využít nezávislost na tvaru konkrétního produktu. Díky numerickému řízení lze zavést do stavby zakřivené prvky, které by nahradily dočasné rohové prvky a zvýšily by tak pevnost stavby. Lze uvažovat i o úspoře materiálu [23]. Navržené jsou i výstavby stropů, zavedení rozvodů elektřiny, odpadů, topení i izolací [25].

Diplomová práce
TEORETICKÁ ČÁST

Beton, který se používá pro stavbu, je modifikovaný supreplastifikátory, tedy polymerními látkami, které jsou schopné vázat vodu z betonu a zapříčinit tak jeho reologické i mechanické vlastnosti vhodné pro aplikaci v aditivní výrobě [25].

3D tiskárny pro stavební průmysl mají různou podobu, jsou to buď velké konstrukce pohybující se po kolejkách kolem základů stavby, nebo to jsou pásové mobilní stroje s robotickou rukou. V článku [26] je popsáno více jak třicet realizací staveb pomocí aditivní výroby, na obrázcích 9–11 jsou uvedeny příklady některých z nich.



Obr. 9: New Story – neziskový projekt výstavby domů pro obyvatele zasažené přírodními katastrofami ve spolupráci se společností ICON započatý v roce 2017 v El Salvadoru [26]

Diplomová práce
TEORETICKÁ ČÁST



*Obr. 10: The BOT, demonstrační projekt výstavby domu firmou COBOD, 2017
Dánsko [26]*



Obr. 11: Ocelový most zhotovený technologií aditivní výroby v roce 2015 v Nizozemí [26]

1.2 Trojitě periodické minimální plochy

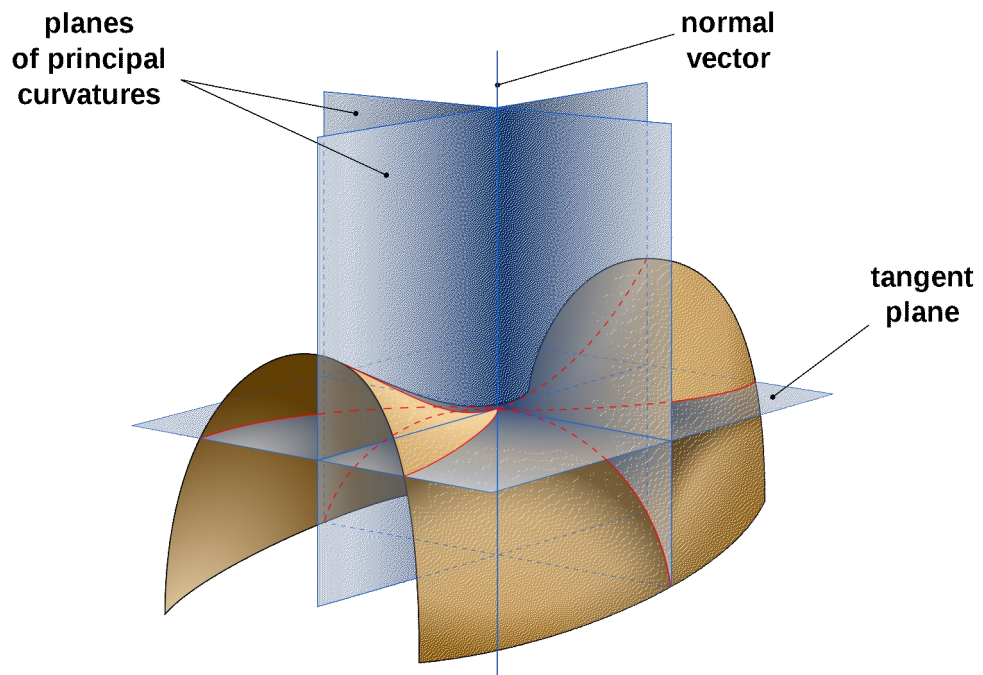
Trojitě periodické minimální plochy představují struktury, které do nástupu 3D tisku nebylo možné snadno zhotovit. Jejich oblým tvarům nelze přesně dosáhnout substraktivní výrobou rovinnými a válcovými nástroji, proto jsou pro 3D tisk, jako výrobní technologii nezávislou na tvaru výrobku, slibnou výzvou. Pod pojmem minimální plocha (Minimal Surface) se rozumí takové tvarované dvourozměrné plochy (blány, plátina, rozhraní dvou prostředí) v prostoru, které již dále nezmenší svůj povrch při libovolně malé změně tvaru [27]. Z matematického hlediska jde tedy vždy o plochu, jejíž povrch jako funkce tvarových proměnných tvoří alespoň jedno lokální minimum mezi danými hranami. Takové plochy jsou známé z chování povrchově aktivních látek, kdy roztok tenzidu spontánně zaujme tvar právě minimální plochy (Obr. 14) [28]. Fyzikální i chemické jevy se svou podstatou snaží minimalizovat svoji energii, stejně tak i povrchové napětí. Výsledkem jsou tak různé blány napnuté mezi pevnými hranami. Příkladem může být kapka rosy ulpívající na trávě, listy cesmín či různé blány živočichů, např. lem mořských sumýšů (Obr. 12).



Obr. 12: Listy cesmíny ostrolisté (vlevo [29]), sumýš Yellow Wall (vpravo [30])

U vybrané plochy lze posoudit, zda je její povrch minimální i bez porovnávání s jejími všemi alternativami propojení daných hran. V každém jejím bodě lze posoudit tzv. střední zakřivení, tedy průměr zakřivení ve všech směrech, nejčastěji ve dvou hlavních směrech. Je-li tento průměr roven nule ve všech bodech plochy, poté je splněna podmínka minimálního povrchu pro celou plochu. [31]. Pro přiblížení lze ilustrovat příklad sedla, viz Obr. 13. Sedlový bod má největší záporné zakřivení (průhyb) ve směru hřebene a největší kladné zakřivení (vyklenutí) po spádnících.

Změnou křivosti jednoho zakřivení se mění hodnota křivosti druhého zakřivení a současně i jejich střední hodnota. Pokud se dosáhne takové křivosti, že si jsou obě zakřivení v každém bodě rovna, platí, že je jejich střední hodnota rovna nule a plochu kterou uzavírají lze nazývat minimálním povrchem.



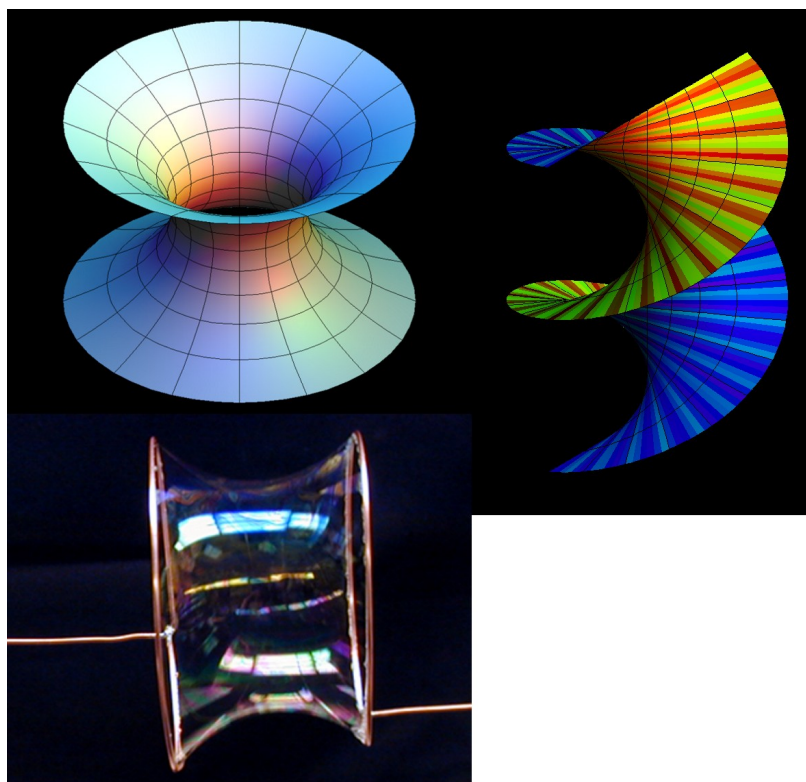
Obr. 13: Sedlo jako příklad minimální plochy [32]

Matematicky lze definice minimální plochy popsat Lagrangeovou rovnicí [31] (1):

$$(1+h_v^2)h_{uu}-2h_uh_vh_{uv}+(1+h_u^2)h_{vv}=0 \quad (1)$$

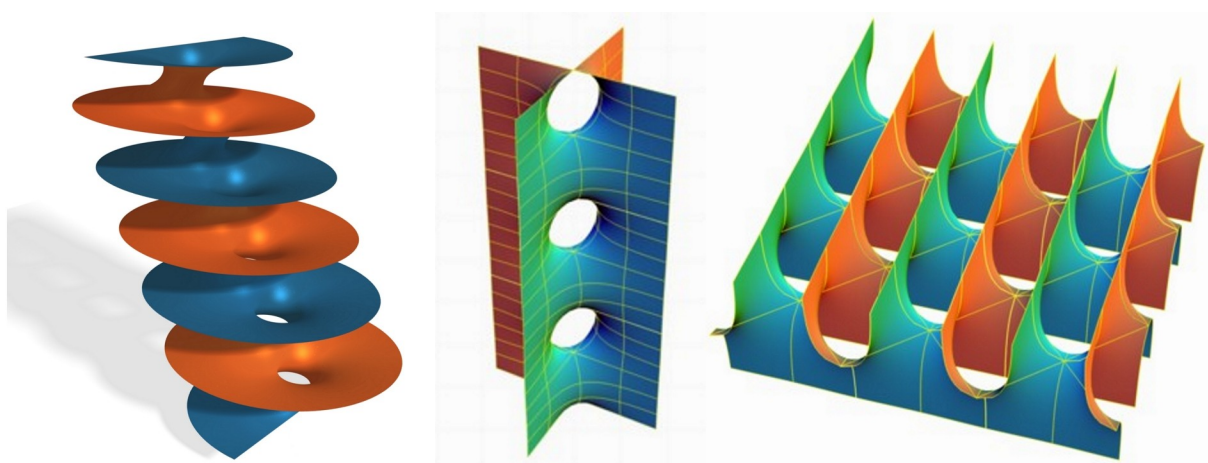
kde spodní indexy představují první, respektive druhé parciální derivace plochy h v běžných souřadnicích xy .

Úkol nalezení tvaru minimální plochy mezi danými hranicemi, které by odpovídalo řešení Lagrangeovy rovnice se potýká s problémem mnoha variant výsledků, někdy nazýván Plateauův problém. Ten se týká výpočtu minimální plochy v tom smyslu, že může existovat buď jedno, více, či žádné řešení [33]. Řešení Lagrangeovy rovnice se podařilo najít v roce 1776 Meusenierovi a Eulerovi při definici minimálních ploch zvaných Katenoid (rotovaná řetězovka) a Helicoid (přímková šroubovice) (Obr. 14, viz níže). Tím byla ověřena platnost této rovnice a bylo dokázáno, že minimální plocha je dvojrozměrná. Plateauův problém byl vyřešen v roce 1890 Hermannem Schwarzem, který zároveň představil jím odvozenou škálu minimálních ploch. [31].

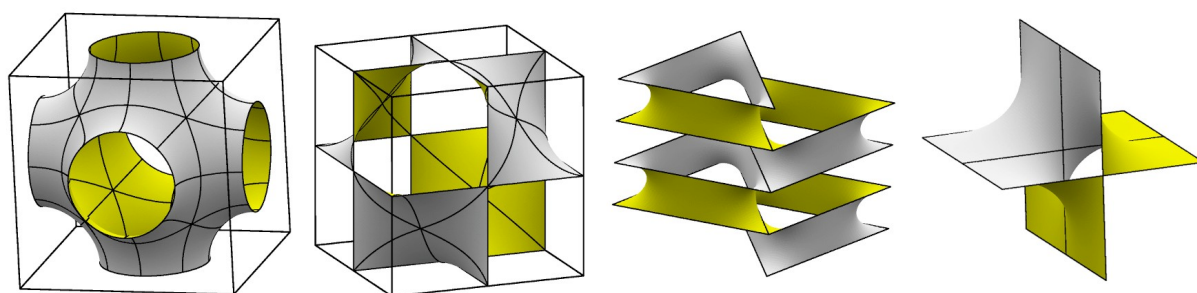


Obr. 14: Katenoid (vlevo) [34] [35], Helicoid (vpravo) [36]

Dalším, kdo přispěl v definici minimální plochy byl Bernard Riemann. Věnoval se popisu základních minimálních ploch jako rotovaná řetězovka či přímková šroubovice a popsal svoji Riemannovu minimální plochu (Obr. 15 vlevo) a dokázal její opakovatelnost v prostoru, tedy periodicitu. Periodicita může být jednoduchá, tedy v jednom směru, jako např. Helicoid, Scherkova minimální plocha, nebo právě Riemannova minimální locha (Obr. 15 vlevo a uprostřed), ve dvou směrech, tedy dvojitá (Scherkova minimální plocha, Obr. 15 vpravo) a ve třech směrech, tedy trojitá (Schwarz Primitiv, Obr. 16) [37].

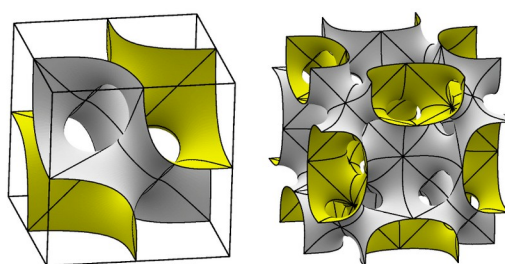


Obr. 15: Riemannova minimální plocha (vlevo) [38], Scherkova minimální plocha jednoduše periodická (uprostřed) [37], Scherkova minimální plocha dvojitě periodická (vpravo) [37]



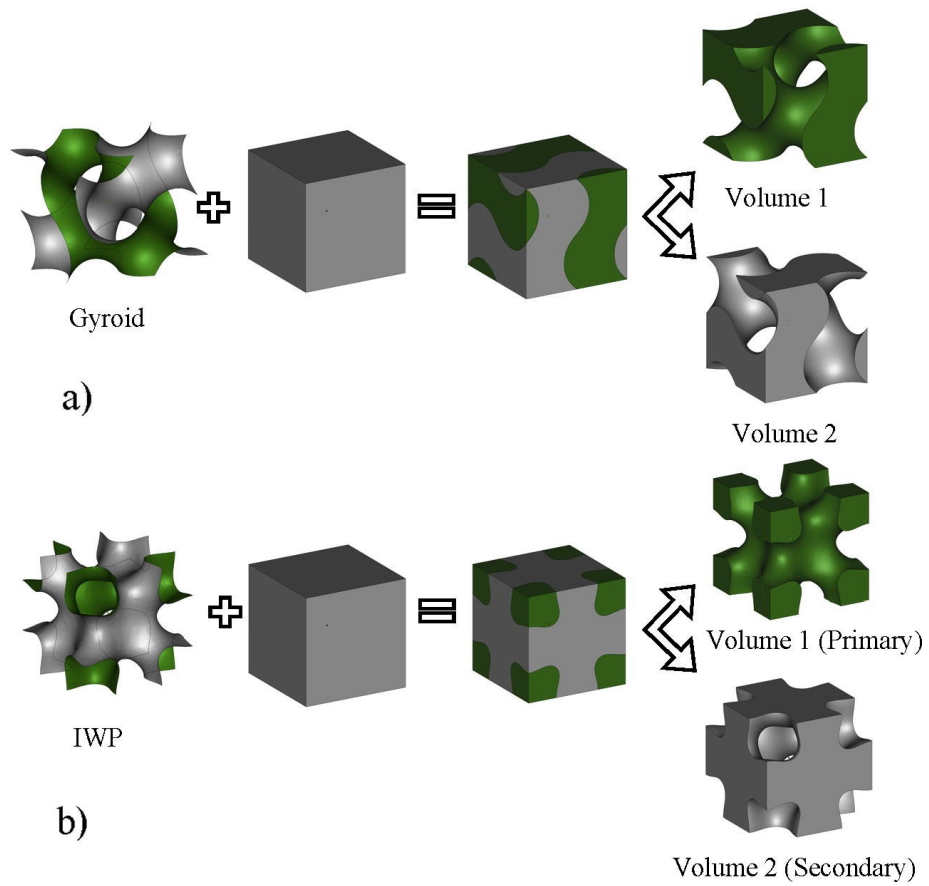
Obr. 16: Schwarzovi minimální plochy: zleva Primitive, Diamond, Hexagonal, Crossed layers of parallels [39]

Trojitě periodické minimální plochy TPMP (Triply Periodic Minimal Surface, TPMS) tvoří nekonečné prostorové mříže s do tří směrů opakující se buňkou. Opakující se buňka nemusí být vždy základní buňkou. Základní buňka může vykazovat dvojrozměrnou periodicitu a např. až po zrcadlení, do směru třetího. Nebo až se zrcadlením podle všech tří rovin se dosáhne minimální plochy, která už je trojitě periodická. Elementární buňka je tak jednou osminou opakující se buňky. Příkladem takového chování může být Schoenovo „netopýří křídlo“ (Batwing) (Obr. 17) [39].

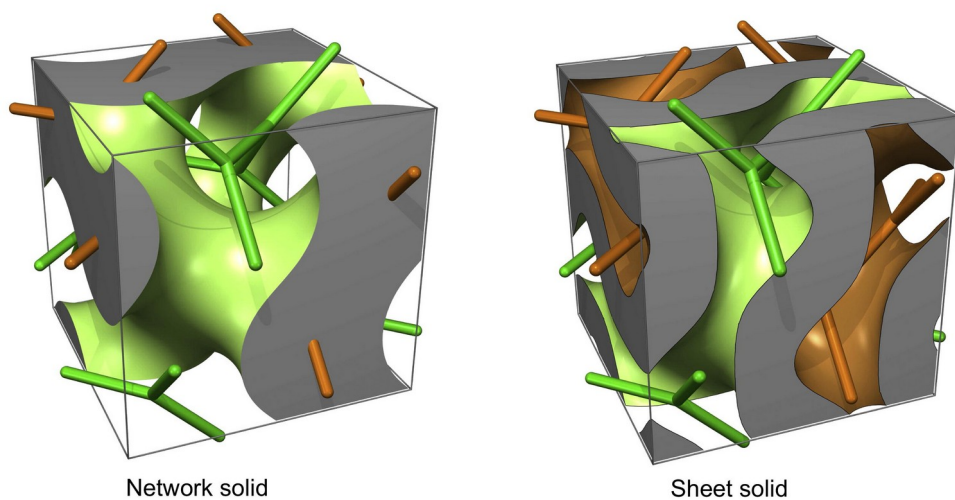


*Obr. 17: Batwing elementární buňka (vlevo),
Batwing opakující se buňka (vpravo) [39]*

Skutečnost, že je minimální plocha dvojrozměrná, ztěžuje její realizaci. Minimální plochy mají nulovou vlastní tloušťku, tedy při aplikaci jako 3D tisk, je nutné odvodit od minimální plochy strukturu konečné tloušťky. V této práci jsou dva způsoby převedení minimální plochy do tisknutelné podoby. Prvním je navrstvení materiálu na jedné straně minimální plochy až do úplného vyplnění prostoru za zvolenou stranou této plochy. Vznikne tak jednostranně vyplněné, tzv. síťové těleso (Network Solid). Druhý způsob spočívá v zesílení stěn minimální plochy a označuje se jako blánové těleso (Sheet Solid), odvozené od minimální plochy. Rozdíl mezi nimi spočívá v zaplnění vlastního objemu. Obě zesílené struktury rozdělují prostor na dvě části. U jednostranně vyplněné minimální plochy je toto rozdělení buď identické (často zrcadlově převrácené), či neidentické. Vlastní objemová výplň spojuje dvě nejbližší kontury minimální plochy. U blánových těles je druhá část prostoru vždy neidentická. Zaplňuje objem mezi zesílenými konturami minimální plochy [40],[41]. Toto rozdělení lépe popisují obrázky 18 a 19.



Obr. 18: a) identická (zrcadlově otočená) síťová struktura odvozená od minimální plochy, b) neidentická síťová struktura odvozená od minimální plochy [41]



Obr. 19: Gyroid – síťové těleso (vlevo), blánové těleso (vpravo) [40]

Diplomová práce
TEORETICKÁ ČÁST

Pro tuto práci byla primárně použita síťová tělesa odvozená od trojitě periodických minimálních ploch a to z důvodů snadnější přípravy dat k 3D tisku, ale zejména kvůli rozlišení FMD/FFF 3D tisku. Je tím zaručen bezpečný tisk těchto struktur i bez nutnosti podpor.

Přípravou síťových těles z trojitě periodických minimálních ploch, nese za následek tvorbu struktur s vlastním objemem a možným výskytem zeslabení, tzv. krčků. Za předpokladu, že nejpevnější podporou pro deformaci v tlaku je pilíř, tvorbou jednostranně vyplněných struktur vznikají dutiny v těchto pilířích, tím lze předpokládat určité snížení pevnosti v tlaku. Využitím jiné vhodnější technologie 3D tisku by bylo možné dosáhnout blánových těles, které by šetřily materiál více a využívala by lepšího rozkládání vnějších sil vlivem napínání či ohýbání jednotlivých blán současně bez tvorby krčků.

Uplatnění minimálních ploch lze nalézt v architektuře jako vysuté střechy, které jsou známe z cirkusových šapitó. Na tomto principu je postaveno, např. zastřešení olympijského stadionu v Mnichově (Obr. 20). Dále to jsou designové prvky, sochy a sousoší (Obr. 21).



Obr. 20: Olympijský stadion v Mnichově [42]



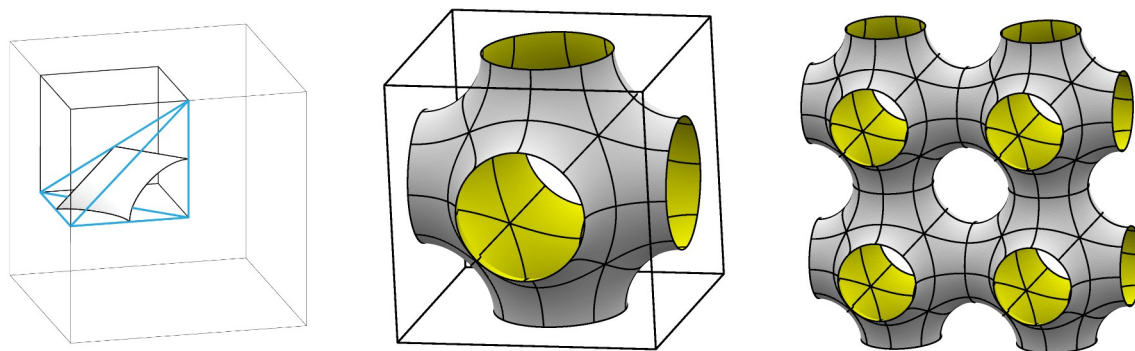
Obr. 21: Socha inspirovaná minimální plochou, Kazachstán [43]

Zajímavostí je, že se trojitě periodické minimální plochy objevují i u molekulárních struktur. Např. blokové kopolymery polystyren-blok-poly(1,2 butadien)-blok-polytercbutylmethakrylát tvoří svou strukturou trojitě periodickou minimální plochu zvanou Gyroid [44]

1.2.1 Charakteristika trojitě periodických minimálních ploch

Schwarz Primitiv (P)

Trojitě periodická minimální plocha Schwarz Primitiv je tvořena z plochy zakřiveného čtyřúhelníku v tetraedru jedné osminy krychle. Tato plocha tvoří 1/48

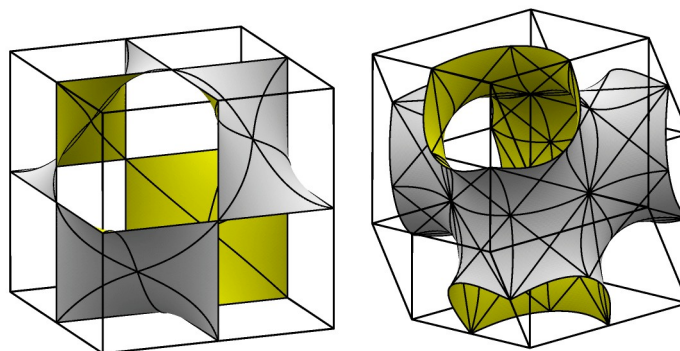


Obr. 22: Základní plocha zakřiveného čtyřúhelníku, 1/48 krychle [27] (vlevo), základní buňka Schwarz P TPMS (uprostřed), Schwarz P TPMS [39]

povrchu krychlové opakující se buňky se symetrií C_2 . (Při otočení o 360° se dvakrát promítne ve stejné poloze. Osa symetrie představuje spojnicí protějších stran tetraedru.) Tato plocha je rozložena v prostoru do uskupení tvořící právě Schwarz P minimální plochu. Toto rozložení se nazývá evolving [27]. Otočením o 90° podle prostorového úhlu označovaného jako Bonnet angle (Bonnet rotation) [45] lze docílit odvozeného Schwarz D TPMS [46]. Obrázek 22 ukazuje výchozí minimální plochu, 1/48 krychle (vlevo), elementární buňku Schwarz P TPMP (uprostřed) a část mříže (vpravo).

Schwarz Diamond (D)

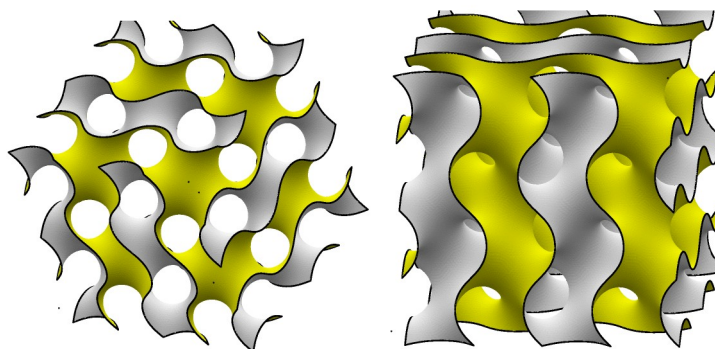
Trojitě periodická minimální plocha Schwarz Diamond patří do rodiny Schwarz TPMP pod označením D. Vychází ze stejné plochy jako Schwarz P, jen otočené o prostorový úhel 90° (Bonnet angle). Mříž vzniká translací elementární buňky (Obr. 23 vlevo) a získává charakteristickou strukturu ve tvaru kosočtverečného dvanáctistěnu (Obr. 23 vpravo). Podle toho byl odvozen název Diamond [46].



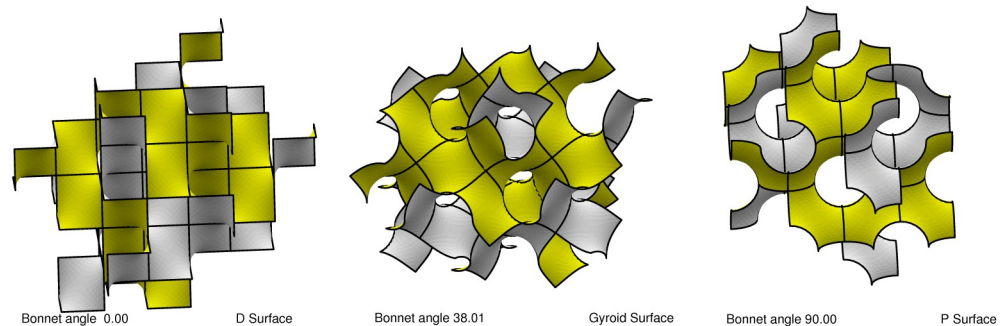
Obr. 23: Základní buňka Schwarz D (uprostřed), opakující se buňka Schwarz D (vpravo) [39]

Gyroid

Trojitě periodická minimální plocha Gyroid byla objevena výzkumníkem z NASA Alanem Schoenem v roce 1970. Představuje trojrozměrnou mříž s trojnásobnou rotační symetrií C_3 (Při otočení o 360° se třikrát promítne ve stejné poloze. Osa symetrie je diagonálou krychlové opakující se buňky.) Nejsou zde žádné vložené přímky nebo zrcadlové symetrie. Obrázek 24 vlevo ukazuje Gyroid v pohledu C_3 symetrie a v prostorovém pohledu. Základní plochou je zde opět plocha zakřiveného čtyřúhelníku v tetraedru jedné osminy krychle, tedy $1/48$ plochy krychlové elementární buňky. Je to přechodová minimální plocha mezi Schwarz P a Schwarz D minimální plochou. Otočením Schwarz D plochy o 38.01° v prostorovém úhlu (Bonnet angle) se dosáhne Gyroidového uspořádání, otočením o 90° , Schwarz D přejde na Schwarz P (Obr. 25) [27], [46].



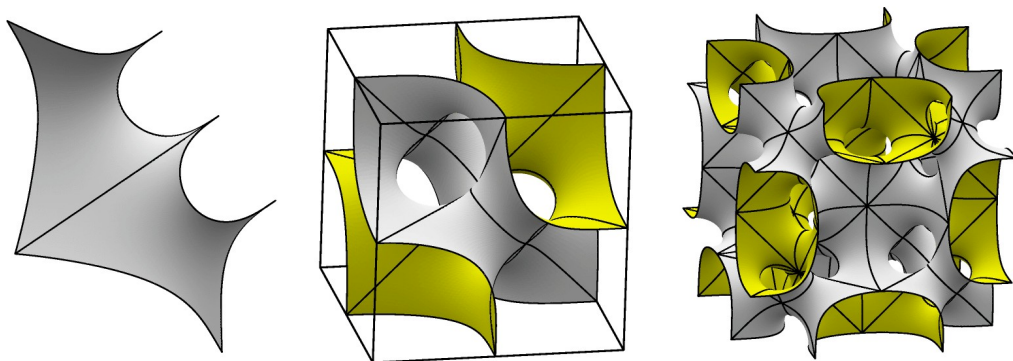
Obr. 24: Výřez mříže Gyroid v pohledu C_3 symetrie (vlevo) a z prostorového otočení (vpravo) [46]



Obr. 25: Transformace Schwarz D v Gyroid a Schwarz P [46]

Batwing

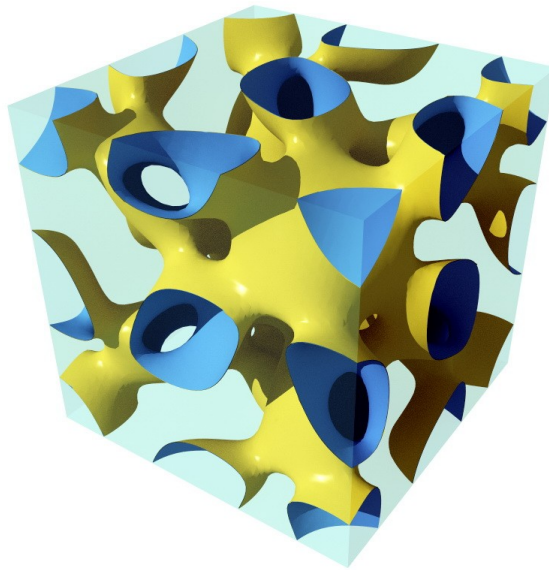
Trojité periodická minimální plocha Batwing, objevená opět Alanem Schoenem, získala své jméno podle zdvojené výchozí minimální plochy ve tvaru netopýřího křídla. Tu představuje opět $1/48$ krychle opakující se buňky se symetrií C_2 , ale kaleidoskopicky uspořádanou (Obr. 26, vlevo) [47]. Zrcadlením podle všech os a následným posunutím do tří směrů (evolving) se získá elementární buňka minimální plochy Batwing (Obr. 26, uprostřed). Tato buňka se jeví jako opakující se, nicméně na sebe navenavazuje, musí se opět zrcadlit a posunout, tím vznikne opakující se buňka po celé mříži, Batwing cube (Obr. 26, vpravo) [48].



Obr. 26: Výchozí minimální plocha (vlevo), elementární buňka Batwing TPMP (uprostřed), opakující se buňka Batwing cube [48]

Lidinoid

Trojitě periodická minimální plocha Lidinoid (Obr. 27) byla objevena v roce 1990 švédským matematikem Svenem Lidinem. Jedná se o plochu vycházející z hexagonálního TPMP Schwarz H otočením o prostorový úhel, tím přechází do krychlové mříže. Je tedy podobně jako Gyroid přechodovou plochou [49]. Podobně jako Batwing má i Lidinoid opakující se buňku složenou z osmi elementárních.



Obr. 27: Lidinoid [50]

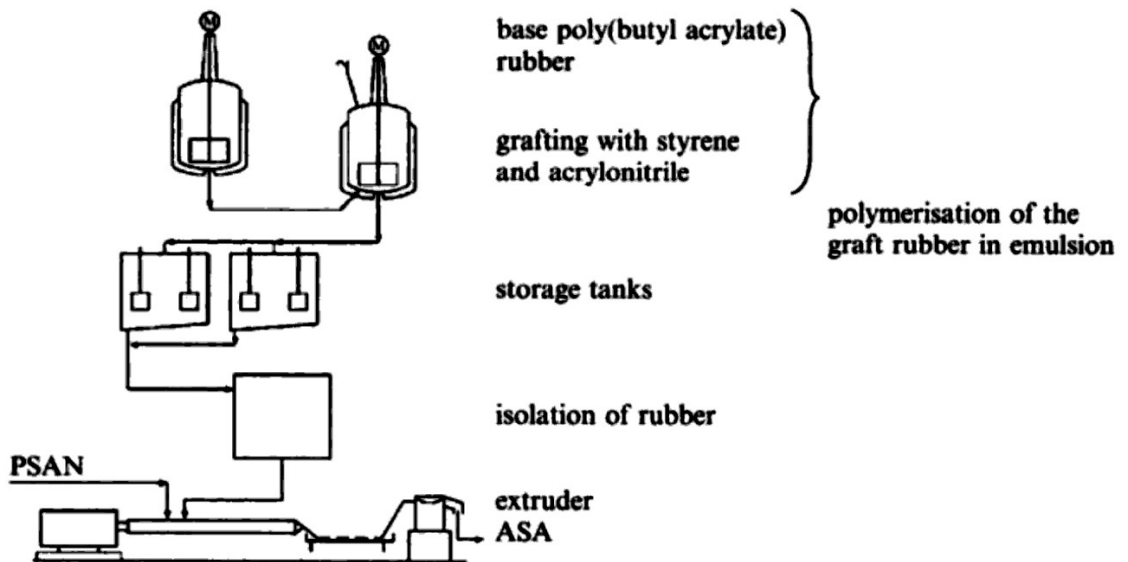
1.3 Materiály pro FDM/FFF 3D tisk

FDM/FFF technologie 3D tisku využívá nejrůznějších termoplastických polymerů ve formě struny navinuté na cívce (filament). Škála materiálů sahá od designových přes konstrukční až po funkční filamenty (např. elektricky vodivé). Pro tuto práci byl vybrán konstrukční termoplast ASA (akrylonitril-styren-akrylát), vlastnostmi velmi podobný známému ABS (akrylonitril-butadien-styren).

1.3.1 Terpolymer ASA (akrylonitril-styren-akrylát)

Termoplastický terpolymer ASA je jedním ze škály styrenových kopolymerů, kam patří např. SAN (styrenakrylonitril), SBR (styrenbutadienový kaučuk) či ABS (akrylonitril-butadien-styren). ASA je svou strukturou i vlastnostmi velmi podobný právě ABS, avšak je zde záměna butadienového kaučuku za akrylátový, což vede ke kompletnímu odstranění dvojných vazeb z řetězce kopolymeru a tudíž ke zlepšení odolnosti vůči povětrnostním vlivům, hlavně vůči UV záření [51].

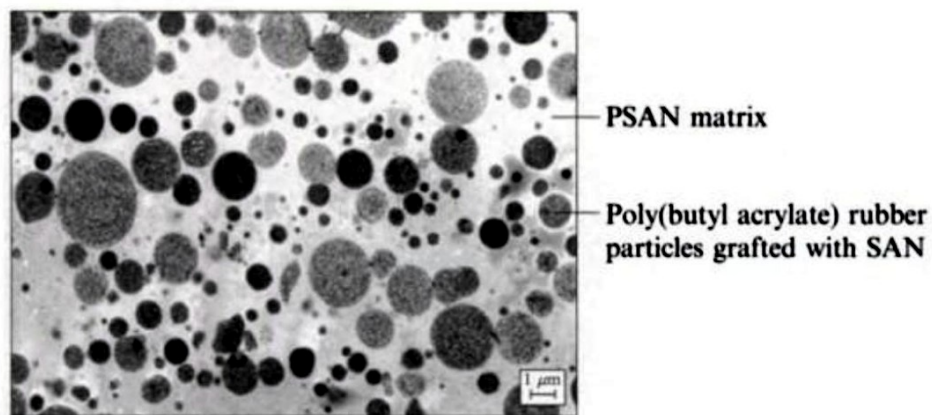
Výroba ASA spočívá v kopolymeraci a následném roubování monomerů. Použit lze blokovou, suspenzní i emulzní polymeraci. Emulzní je využívána nejvíce [52]. Emulzní polymerace je prováděna ve dvou, či třech krocích. Při dvoustupňovém procesu výroby je nejprve připraven akrylátový kaučuk. Tím je homopolymer či kopolymer akrylátů, nejčastěji buthylakrylát či ethylhexylakrylát. Ten je řídce zesíten síťujícími činidly, jako allylmethakrylát či dihydrodicyklopentadienylakrylát [52]. Další fází je roubování kopolymeru styrenakrylonitril na již připravený kaučuk. Dodatečně lze použít ještě akryláty pro zvýšení počtu roubovacích míst, příkladem může být methylmethakrylát. Od toho se poté odvíjejí vlastnosti daného terpolymeru. Roubovaný styrenakrylonitril tvoří obal okolo kaučukové domény a většinou je nezesítený [51]. V prvním kroku je použit iniciátor tercbutyl peroxid a ve druhém persíran sodný [52]. Před extruzí výsledného materiálu je třeba separovat nenaroubovaný kaučuk. Provádí se při sušení buď koagulací či sprejováním. Schéma dvoustupňové výroby zobrazuje obrázek 28.



Obr. 28: Schéma výroby ASA [51]

Třístupňový proces výroby zahrnuje míšení styrenakrylátového kopolymeru s částicemi kaučuku. Styrenakrylát je připraven kopolymerací při roubování za přítomnosti kaučuku [52].

Výsledkem je tak heterogenní termoplast s dobrou chemickou odolností, rázovou houževnatostí, teplotní stálostí a především stálostí na povětrnosti. Ve sklovité styrenakrylátové fázi jsou rozptýlené domény akrylátového kaučuku s naroubovaným styrenakrylátovým kopolymerem (Obr. 29), což zapříčiňuje jeho mechanické vlastnosti, jako pevnost, modul pružnosti či rázovou houževnatost.



Obr. 29: Struktura ASA [51]

Mechanické vlastnosti ASA jsou téměř shodné s terpolymerem ABS, ASA je křehčí. Hustota je velmi podobná s ABS (ASA – 1,07 g/cm³, ABS – 1,04 g/cm³) [53]. Chemická odolnost je lepší vůči ABS, zejména při působení alkoholů a čistících prostředků [51]. Vzhledem k absenci dvojných vazeb ASA vyniká odolností proti degradaci UV zářením. Zlepšeny jsou ale všechny odolnosti vůči stárnutí na povětrnosti. ASA je až pětkrát odolnější oproti ABS při multiaxiálním namáhání při dlouhodobém působení povětrnostních vlivů a šestkrát odolnější vůči tomuto namáhání při dlouhodobém vystavení zvýšené teploty [51]. ASA lze použít jako složku pro směsné polymery, příkladem blendy PC/ASA nebo ULTEM, tedy blend polyetherimidu a ASA. ASA tak slouží jako tepelný či UV „stabilizátor“ [52].

Tyto vlastnosti vedou k širokému uplatnění terpolymeru ASA v dopravě, elektrotechnice, zahradnictví či telekomunikaci. V automobilovém průmyslu se ASA používá na díly vystavené vnějšímu prostředí, žebrované kryty chladičů, zpětná zrcátka, aj. Další uplatnění ASA najde jako zahradní nábytek, kryty bezpečnostních čidel, fotovoltaika, kryty dopravního osvětlení, satelity a další.

ASA je velmi oblíbený materiál pro 3D tisk zejména kvůli nižšími koeficientu tepelné roztažnosti než tomu je u ABS. Hodnota koeficientu tepelné roztažnosti α činí u ASA $11 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a u ABS je tato hodnota $15 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [54]. Teplotní kontrakce u ASA je 0,7 %, zatímco u ABS je 1,6 % [55]. Tento rozdíl zapříčiňuje snadnější 3D tisk, zakrytování tiskového prostoru a vypnutí chlazení materiálu je stále vyžadováno, ale materiál je méně náročný na udržení okolní teploty. Teplota podložky musí být alespoň 90 °C, aby se zamezilo deformaci výrobku vlivem tepelné kontrakce.

1.3.2 Další materiály

PLA

PLA (polylactic acid, polymléčná kyselina) je jedním ze skupiny polymerů, jejichž výchozí suroviny lze získat z obnovitelných zdrojů. Pro syntézu PLA se hojně využívá kukuřičný škrob jako zdroj glukosy, ze které se bakteriálním kvašením získá mléčná kyselina, která se následně zpolymeruje. Z tohoto hlediska se jedná o materiál, který lze považovat za ekologickou alternativu k syntetickým polymerům a navíc je biodegradabilní. Polymléčná kyselina patří mezi semikrystalické termoplastické vláknovité polymery. Vyznačuje se elektroizolačními vlastnostmi, odolností vůči

hydrolýze a teplotám do 60 °C [56]. Teplota skelného přechodu T_g kyseliny polymléčné se pohybuje okolo 60 °C a teplota tečení T_f začíná na 160 °C. Velká výhoda je minimální objemová teplotní roztažnost, jak je přehledně uvedeno v interaktivní tabulce [57], díky čemuž je PLA jeden z nejčastějších materiálů pro 3D tisk.

PETG (Glykolem modifikovaný polyethyltereftalát)

Jedná se o termoplastický kopolymer polyethyltereftalátu a různých glykolů, např. cyklohexanglykolu, propylenglykolu či diethylenglykolu, jak uvádí patent [58]. Tyto modifikující glykoly kondenzují z etylenglykolem za vzniku lineárních částí, které oddalují aromatické kruhy od sebe. Takovéto modifikace vedou ke snížení teploty tečení T_f a zároveň ke snížení teploty skelného přechodu T_g oproti nemodifikovanému polyethyltereftalátu (PET). T_g PET je přibližně 175 °C a T_f 350 °C, na rozdíl od PETG, kde jsou tyto hodnoty cca T_g 75 °C a T_f 225 °C. Díky tomu se velmi hodí pro zpracování 3D tiskem. Stejně jako PET je i PETG vláknatý.

TPU (Termoplastický polyuretan)

Termoplastické polyuretany jsou blokové polymery lineárních segmentů, kde se střídají elastické a rigidní řetězce. Rigidní segmenty jsou bloky isokyanátů, elastické jsou zastoupeny polyesterovými, či polyetherovými bloky. Oba segmenty mohou být aromatické i alifatické. Tím je zapříčiněna široká řada variací monomerů a tím jsou dány výsledné vlastnosti. Např. polyetherové TPU je odolné vůči organickým rozpouštědlům. Nejpoužívanější aromatický isokyanát je MDI (4,4'-diisokyanatodifenylmetan) a alifatický je H12MDI (4,4'-Diisokyanatodicyclohexylmethan) nebo IPDI (Isophorondiisokyanát). TPU může být jak tvrdý plast, tak i termoplastický elastomer. Výchozím poměrem monomerů lze určovat tvrdost výsledného elastomeru. Není vyžadováno změkčovadel. Aplikace TPU je rovněž rozmanitá, nejvíce se uplatňuje v automobilovém průmyslu, TPU jsou měkké na dotek a protiskluzné. Dále jsou používány jako složky blendů. Hojně zastoupení mají i v textilním průmyslu jako elastická vlákna [59], [60]. 3D tiskem je vcelku snadno zpracovatelný. Jelikož je TPU filament pružný, posouvání struny musí být velmi pomalé. 3D tištěné objekty z TPU jsou rovněž pevné a ohebné.

Nylon

Nylon je komerční označení pro polyamid 66, tedy polyamid připravený polykondenzací kyseliny adipové a hexamethyldiaminu. Jedná se tedy o alifatický lineární vláknitvorný polyamid. Jak je uvedeno v knize [61], vyrábí se ve dvou krocích přes tzv. nylonovou sůl (AH-sůl), tím se zajistí stechiometrický poměr reaktantů pro dosažení potřebné konverze ke vzniku polymeru. Nylon se vyznačuje vysokou pevností po směru vláken, vysokým bodem tání. Nevýhodou je značná navlhavost. Z hlediska zpracování 3D tiskem se jedná o jeden z nejnáročnějších materiálů.

PC

Polykarbonát patří do skupiny aromatických polyesterů kyseliny uhličité a bisfenolu A. Vyrábí se především dvěma způsoby – reesterifikací nebo přímou fosgenací [61]. Při reesterifikaci se reakce účastní difenylkarbonát, který se váže na bisfenol A za odštěpení fenolu. Výroba polykarbonátu fosgenací probíhá ve vodném roztoku NaOH, který na sebe váže odštěpující se chlorovodík, za přítomnosti dichlormethanu, jakož to rozpouštědla pro fosgen i PC. Výsledný polymer disponuje velmi dobrými optickými vlastnostmi (index lomu, propustnost světla), vyniká svou vysokou rázovou houževnatostí a teplotní stabilitou do 140 °C. Dále je chemicky odolný, avšak navlhavý. Uplatnění nachází jako materiál vhodný pro střešní krytiny, kryty světlometů automobilů nebo jako matrice pro bezpečnostní skla. Použit byl i pro výrobu prototypu teplovodivých strun pro FDM/FFF 3D tisk [62], [63].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Charakteristika materiálů

Charakteristika polymerního materiálu pro 3D tisk ASA (akrylonitril-styren-akrylát) je uvedena v tabulce 1.

Tabulka 1: Charakteristika materiálu ASA

ASA Extrafill Trafic Red	
Výrobce	Fillamentum, ČR
Hustota [g/cm ³]	1,07
Index toku taveniny [g/10min]*	9,8
Index toku taveniny [cm ³ /10min]*	10,1
Pevnost v tahu [MPa]	40
Modul pružnosti v tahu [MPa]	1726
Prodloužení při porušení [%]	35
Teplota tečení [°C]	220
Teplota skelného přechodu [°C]*	124
Teplota tisku [°C]	235–255

* Naměřené hodnoty

2.2 Stanovení indexu toku taveniny

Index toku taveniny udává množství taveniny, které proteče tryskou za 10 minut při předepsaných podmínkách a to buď v g (MFR – hmotnostní index toku [g/10 min]) nebo v cm³ (MVR – objemový index toku [cm³/10 min]). Stanovení spočívá v měření času, za který se vytlačí dané množství roztaveného termoplastu z komory. Vytlačený materiál se zváží. Stanovení podléhá normě ČSN EN ISO 1133.

Tato norma udává podmínky stanovení indexu toku taveniny polymeru ASA, teplota 220 °C, dobu předehřívání 6 min, zatížení 10 kg a čtecí kruh 2,54 cm. Výsledné hodnoty se počítají dle následujících vzorců (2), (3):

$$MFR = \frac{2,54 \cdot 427 \cdot d}{t} \quad d = \frac{m}{1,804} \quad (2)$$

$$MVR = \frac{2,54 \cdot 427}{t} \quad (3)$$

2.3 Stanovení T_g pomocí TMA a DMA

T_g neboli teplota skelného přechodu je teplota, při níž dochází ke změně struktury amorfního polymeru z vláčného kaučukovitého stavu na křehký sklovitý stav. Je charakteristickou teplotou pro každý polymerní materiál a odvíjí se od ní technologie zpracování i aplikace.

Termomechanická analýza TMA využívá změn výšky měřeného materiálu v závislosti na teplotě, čase a vložené síle. Touto metodou lze stanovit mimo jiné i teplotu skelného přechodu T_g . Zkušební vzorky o rozměrech 4×4×2 mm se proměří za daného teplotního režimu. T_g se určí z grafické závislosti výšky vzorku na teplotě jako průsečík tečen. Měření bylo provedeno na přístroji TMA CX04R od firmy RMI.

Proces měření se skládal z čtyřech teplotních cyklů. První krok byl ohřev do 150 °C rychlostí 3 °C/min, druhý krok ochlazení na 30 °C rychlostí 3 °C, třetí krok opět ohřev do 150 °C stejnou rychlostí a posledním krokem bylo ochlazení opět na 30 °C rychlostí 3 °C/min. Výsledkem byla teplota skelného přechodu T_g 124,1 °C.

Dynamická termomechanická analýza DMA pracuje na principu nedestruktivního mechanického namáhání vzorku při teplotním režimu. Snímá deformační odezvu (modul pružnosti) materiálu na harmonický mechanický podnět za předpokladu, že u viskoelastického materiálu se deformace opoždí za mechanickým napětím právě o ztrátový faktor, jakož to fázový posun harmonického namáhání.

Tento proces odpovídá matematickému modelu komplexního čísla, kdy reálná složka modulu pružnosti vyjadřuje elastické chování materiálu a imaginární složka reprezentuje viskózní chování materiálu. Zkušební tělískem je kvádr o rozměrech (30 × 4 × 2) mm. Výstupem analýzy je graf závislosti reálné a imaginární složky modulu pružnosti, či ztrátového faktoru na teplotě a odečíst z něho lze teploty T_1

a T_2 jakožto teploty blízké T_g . T_1 odpovídá tangenti křivky reálné složky modulu pružnosti a T_2 odpovídá maximu na křivce imaginární složky modulu pružnosti. Stanovení bylo provedeno na přístroji DMA DX04T od firmy RMI.

Měření DMA probíhalo v měřícím módu jednoduchý vetknutý nosník deformací $\pm 0,15$ mm, frekvencí 1 Hz při teplotním režimu od laboratorní teploty do 180 °C. Rychlostí 3 °C/min. Výsledkem jsou dvě teploty $T_1 = 100,72$ °C a $T_2 = 117,40$ °C.

2.4 Účel stanovení pevnosti v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku spočívá ve zjištění deformačních křivek a z nich vyplývajících modulů pružnosti a mezí pevnosti v tlaku zkušebních těles, jež jsou vyplněna strukturami trojitě periodických minimálních ploch. Účelem je stanovit pevnost jednotlivých výplní a porovnat je, jak mezi sebou, tak s jednou z nejpoužívanějších výplní – voštinou (Honeycomb) a s pevným tělesem (100% výplň). Z důvodů rozlišení 3D tiskárny, které je dané průměrem trysky a minimálním posunem v ose X a Y, byly primárně vybrány síťové struktury TPMP. Síťová tělesa jsou bezpečně tisknutelná tryskou 0,4 mm. Takto bylo vybráno 5 trojitě periodických minimálních ploch (Gyroid, Diamond, Schwarz P, Batwing a Lidinoid) a byly z nich odvozeny síťové struktury, které tvoří výplň pro zkušební tělesa. Dále byly zvoleny tři tvary těles, standardní válec, kvádr a kvádr stočený do spirály. Výsledné procentuální objemové zastoupení výplně v tělesech je důsledkem tvaru jednotlivých struktur trojitě periodických minimálních ploch i tvarů těles. Porovnání pevnosti jednotlivých těles je vztaženo na tyto hodnoty.

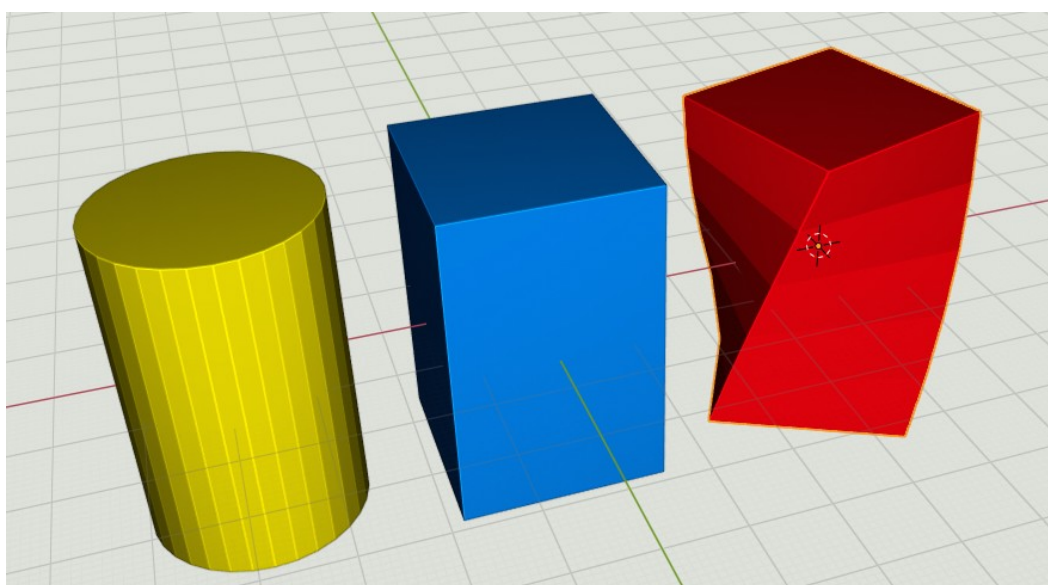
Dále se podařilo u některých struktur TPMP připravit i blánová tělesa. Byla tak připravena další tělesa, tentokrát jen válcová, vyplněná blánovými strukturami a porovnána se síťovými strukturami. Navíc byly tyto blánové struktury připraveny s dvěma šířkami stěn. U těchto těles se zachovává blánová struktura, která netvoří krčky. Změna pevnosti by se tak při zeslabení stěn neměla projevit. Očekává se tedy navýšení meze pevnosti oproti síťovým strukturám s odlišným průběhem deformace.

Sledovaná mez pevnosti se týká dutých těles, neodpovídá tedy přesně definici meze pevnosti pro homogenní materiál. Mez pevnosti je vztažena na procentuální zastoupení jednotlivých výplní.

Dále byly zhotoveny výřezy nekonečné mříže jednotlivých síťových struktur TPM. U nich byl stanoven vizuální průběh deformace.

2.5 Charakteristika zkušebních těles

Zkušební tělesa pro zkoušku v tlaku byla navržena na základě normy ČSN EN ISO 604. Ta udává těleso tvaru válce o rozměrech 15 mm na výšku a 10 mm v průměru. Vzhledem k faktu, že tělesa mají být vyplněna strukturami trojitě periodických minimálních ploch a vzhledem k rozlišení 3D tiskárny, bylo nutné zkušební tělesa zvětšit při zachování poměru 3/2 výšky ku průměru na rozměr 45 mm na výšku a 30 mm v průměru. Další změny se týkaly tvaru tělesa. Byl zvolen nejen válec, ale i kvádr a kvádr stočený do spirály. Kvádr má rozměry (30 × 30 × 45) mm. Spirála, odvozená od tohoto kvádrů, se skládá z pěti segmentů otočených vůči sobě o 9° tak, aby poslední segment byl vůči podstavě otočený o 45°. Vnitřek těles je poté vyplněn strukturami trojitě periodických minimálních ploch. Na obrázku 30 jsou zobrazeny tvary těles použité pro výsledná zkušební tělesa.



Obr. 30: Tvary zkušebních těles

Pro porovnávání jednotlivých struktur TPMP byl zvolen jednotný rozměr elementární buňky mříže TPMP. Tento rozměr činí 15 mm ve všech směrech, tedy každou elementární buňku lze vepsat do krychle o straně 15 mm. Do zkušebního tělesa o rozměru (30 × 30 × 45) mm lze vložit v osách X a Y dvě elementární buňky a ve směru osy Z lze vložit tři tyto buňky. Každá elementární buňka zaujímá jiný tvar,

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

od toho se odvyjí výsledné zastoupení objemové výplně ve zkušebním tělesu. Výplň je ohraničena konturou daného tělesa o tloušťce 0,8 mm, což odpovídá dvěma tištěným linkám tryskou o průměru 0,4 mm.

Trojitě periodické minimální plochy jako Batwing a Lidinoid mají opakující se buňku složenou z osmi elementárních buněk tím pádem zaujmají dvojnásobný rozměr oproti ostatním, kde je elementární buňka zároveň opakující se. To znamená, že opakující se buňku výplní Batwing a Lidinoid lze vložit do zkušebního tělesa pouze jednou v osách X a Y a jeden a půl krát v ose Z. Tím se tyto struktury dostávají pod mez periodičnosti.

V případě blánových struktur trojitě periodických minimálních ploch byl zachován rozměr elementární buňky na 15 mm, a zesílení stěn bylo zvoleno dle hodnot softwarového modifikátoru na hodnoty 1,4 mm a 2 mm v nejširším bodě zesílení. U každé struktury to však odpovídá jinému zastoupení procentuální objemové výplně. Blánová tělesa se podařilo připravit z TPMP Gyroid, Diamond a Batwing. Přesné procentuální zastoupení výplně je uvedeno v tabulce 2.

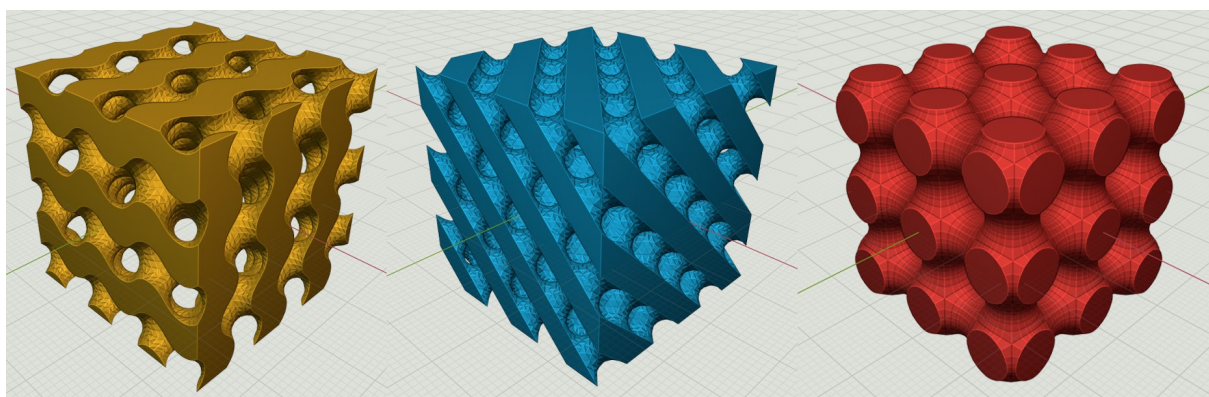
Tabulka 2: Procentuální zastoupení objemové výplně

Odvozená minimální plocha	Tvar tělesa	Zastoupení výplně [obj %]
Gyroid síťové těleso	Válec	50,30
	Kvádr	50,00
	Spirála	49,42
Diamond síťové těleso	Válec	50,30
	Kvádr	50,00
	Spirála	50,00
Batwing síťové těleso	Válec	49,63
	Kvádr	51,56
	Spirála	48,31
Schwarz P síťové těleso	Válec	47,41
	Kvádr	43,31
	Spirála	47,41

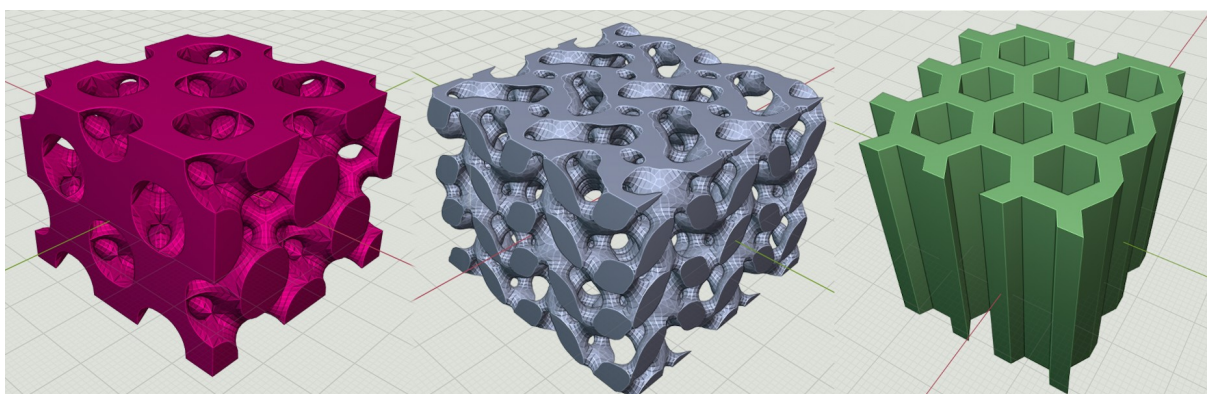
Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Lidinoid síťové těleso	Válec	41,39
	Kvádr	39,16
	Spirála	39,18
Voština	Válec	48,08
	Kvádr	49,14
	Spirála	45,31
Gyroid blánové těleso	Válec 1,4 mm	39,47
	Válec 2 mm	53,34
Diamond blánové těleso	Válec 1,4 mm	39,20
	Válec 2 mm	51,98
Batwing blánové těleso	Válec 1,4 mm	24,84
	Válec 2 mm	35,19

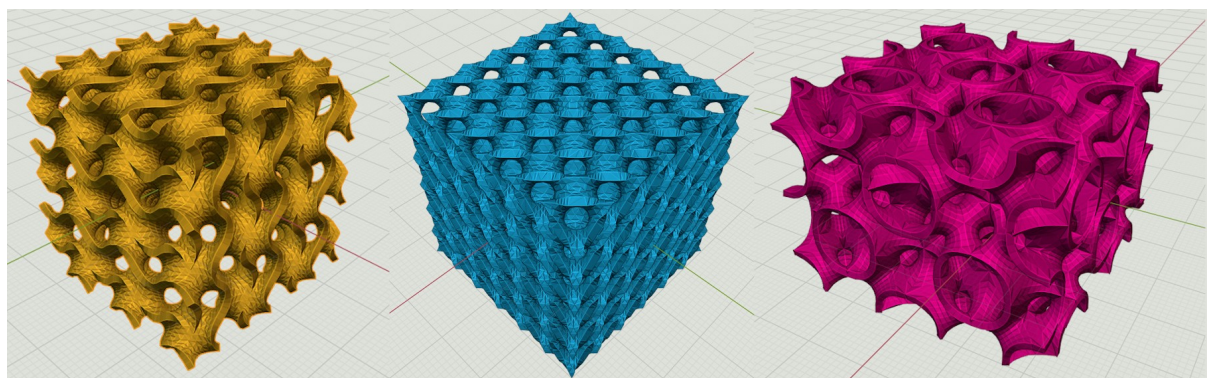
Následující obrázky 31–33 zobrazují jednotlivá síťová tělesa odvozená od trojitě periodických minimálních ploch jako samostatné mříže použité pro výplně jednotlivých těles, včetně voštiny. Dále jsou zobrazena připravená blánová tělesa.



Obr. 31: Síťová tělesa odvozená od minimální plochy, zleva: Gyroid, Diamond, Schwarz P



Obr. 32: Síťová tělesa odvozená od minimální plochy, zleva: Batwing, Lidinoid, Voština



Obr. 33: Blánová tělesa odvozená od minimální plochy, zleva: Gyroid, Diamond, Batwing

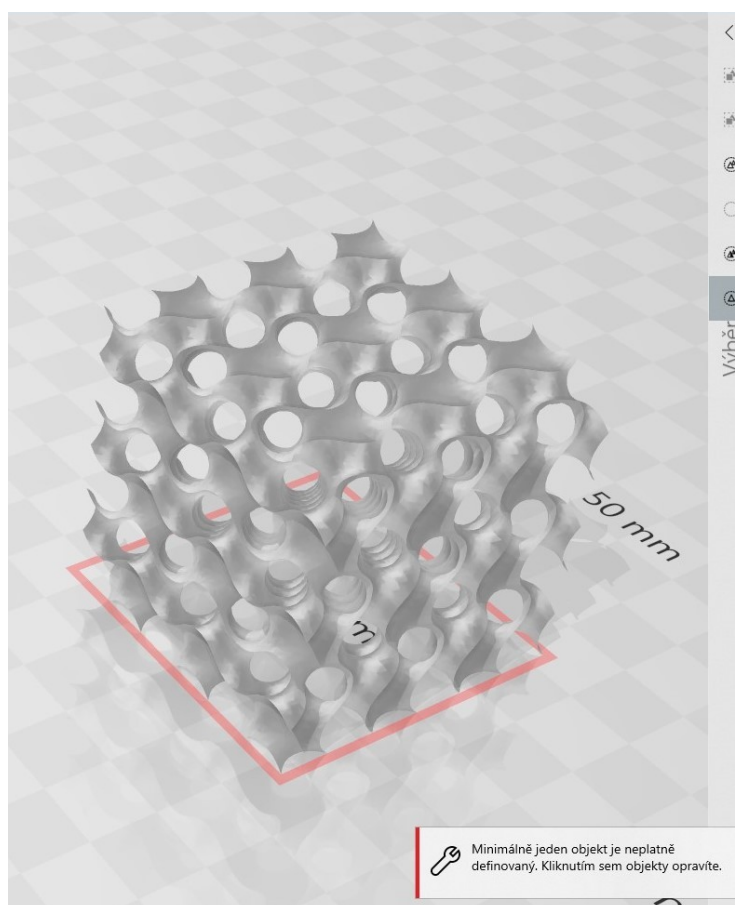
2.6 Příprava dat

Výchozími daty pro přípravu dat byl volně dostupný soubor ze Sketchfab obsahující kolekci minimálních ploch [64]. Na základě tohoto souboru bylo díky simulaci 3D tisku v softwaru Simplify3D rozhodnuto, z které minimální plochy by bylo možné připravit tisknutelná data. Takto bylo vybráno pět nejvhodnějších výše zmíněných struktur. Pro odvození tisknutelných struktur byly jako výchozí určeny síťové objekty. Jednotlivé struktury byly vyexportovány do .stl souborů a převedeny na síťové struktury.

Nejjednodušší cestou je otevření vyexportovaného .stl souboru v dalším softwaru, 3D Builder. Tento software je základní výbavou Microsoft Windows 10, případně lze doinstalovat z Microsoft Store. Jelikož jsou výchozí data dvojrozměrná, software tuto skutečnost vyhodnotí jako chybu a automaticky nabídne opravu dat. Oprava vede právě k síťovým tělesům. (Obr. 34) Nástroj pro opravu dat

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Microsoftem je k dispozici i on-line [65]. Vyžadováno je přihlášení přes účet Microsoft. Alternativou je on-line nástroj poskytovaný společností Autodesk, Netfabb [66], zde je vyžadován účet Autodesk.



Obr. 34: Opravení modelu v softwaru 3D Builder

Z tohoto souboru však byla dále použita jen data pro Batwing a Lidinoid, neboť Gyroid, Diamond i Schwarz P vykazují v tomto souboru geometrické nepřesnosti. U výplně Gyroid jsou různé průměry děr při pohledu z různých úhlů a u Schwarz P i Diamond neodpovídá zakřivení, které by bylo shodné se strukturou Gyroid. Schwarz P, Diamond i Gyroid vycházejí ze stejné minimální plochy a liší se mezi sebou pouze prostorovým deformačním úhlem (Bonnet Angle). Data pro další zpracování těchto struktur byla převzata z jiné volně dostupné kolekce na Thingiverse [67], kde si data odpovídají.

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Data z Thingiverse jsou již v základu navržena jako síťová tělesa, jako výřez z nekonečné mříže s rozměry $(30 \times 30 \times 30)$ mm s rozměrem elementární buňky $(10 \times 10 \times 10)$ mm. Poměrovým zvětšením na rozměr elementární buňky $(15 \times 15 \times 15)$ mm vznikly výřezy z nekonečné mříže s rozměry $(45 \times 45 \times 45)$ mm.

Data ze Sketchfabb byla použita pro zhotovení výřezů nekonečné mříže minimálních ploch Batwing a Lidinoid. Lidinoid má v souboru jak opakující se buňku, tak výřez z nekonečné mříže, který je nejprve nutné zvětšit na rozměr elementární buňky $(30 \times 30 \times 30)$ mm. Následně lze tento výřez zduplikovat a nastavit na rozměr $(60 \times 60 \times 45)$ mm.

Batwing v souboru obsahuje elementární buňku, kterou je nutné nejprve zvětšit na rozměr $(15 \times 15 \times 15)$ mm, následně zduplikovat a poté zrcadlit do všech tří směrů, aby vznikla opakující se buňka s rozměry $(30 \times 30 \times 30)$ mm, kterou lze poté rozkopírovat do tří směrů za účelem vzniku výřezu z prostorové mříže. Tento výřez má rozměry opět $(60 \times 60 \times 45)$ mm.

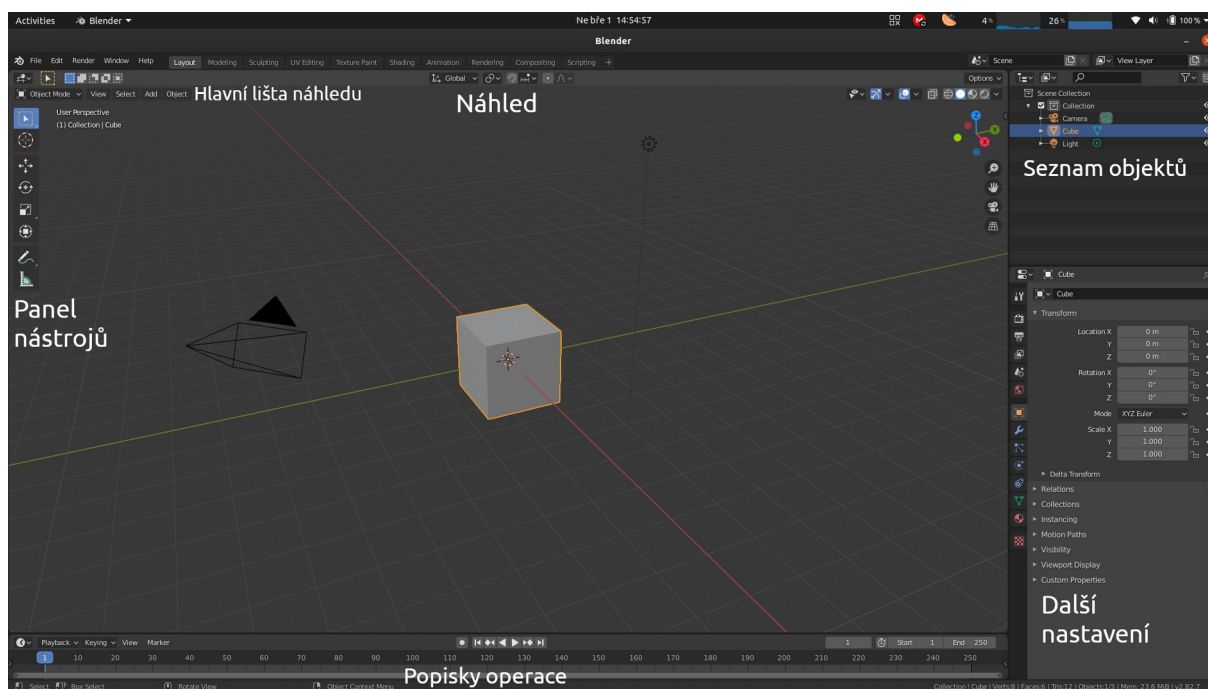
Po navržení těchto dvojrozměrných struktur ze síťových těles dosáhne opravením v softwaru 3D Builder či v některém z online nástrojů popsanych výše.

Blánové těleso odvozené od trojitě periodické minimální plochy lze připravit ze stejných dat. Je však nutné vyjít z dvojrozměrných objektů. V případě Batwing a Lidinoid minimálních ploch jsou dvojrozměrná data v základu v souboru ze Sketchfabb. U minimálních ploch Gyroid, Schwarz P a Diamond je nutné nejprve odstranit stěny spojující sousední hrany, tím se dosáhne dvojrozměrné struktury. Dále aplikací modifikátoru pro zesílení lze jednotlivým blanám přiřadit vlastní tloušťku. Je však nutné dát pozor na orientaci normálových vektorů jednotlivých polygonů.

Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.6.1 Blender

Pro navrhování dat byl použit open source software Blender. V dalším textu je popsán podrobný návod pro přípravu dat v softwaru Blender v 2.82 (Obr. 35).



Obr. 35: Blender

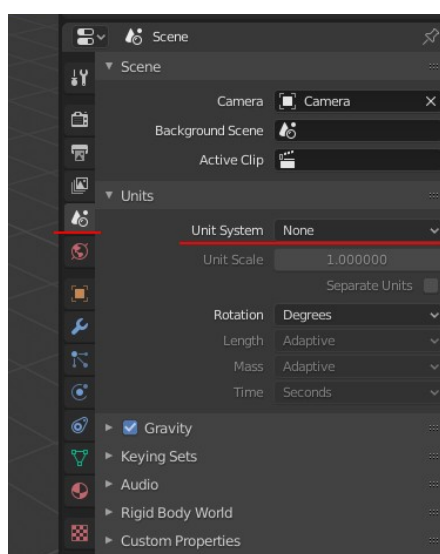
Navigace pohledové kamery v 3D prostoru Blenderu je následující. Stiskem kolečka myši lze otáčet kamerou, rolováním kolečka se přibližuje a oddaluje kamera a Shift + stisk kolečka se posouvá obraz. Základní zobrazení nabízí krychli, světlo a kameru pro render. Pro navrhování tiskových dat kamera a světlo není třeba, lze je tedy levým tlačítkem označit a smazat (klávesa Delete). Na noteboocích bez myši je nutné v Preferencích aktivovat alternativní ovládání. Vlevo nahoře v menu Edit, se zvolí Preferences a na kartě Input se zaškrtně Emulate 3 Button Mouse. Poté se kamera ovládá levým tlačítkem doplněným klávesou Alt pro otáčení a Shift + Alt pro posouvání.

Primárně se Blender nachází v Object mode, klávesou Tab se přepíná do editačního modu Edit mode. Klávesou Z se zobrazuje plná výplň a průhledný režim, tzv. Wireframe. Wireframe má výhodu, že označením tahem levým tlačítkem myši se

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

označí všechny objekty, popřípadě vrcholy, strany či stěny v dosahu i v překryvu. V Edit mode lze vpravo nahoře měnit výběr podle vrcholů, hran či stěn. (Odpovídají tomu klávesy +, ě, š)

Dalším vhodným krokem před startem je dobré změnit v Blenderu zobrazované jednotky z metrických na jednotky Blenderu (Blender unit, 1 BU = 1 mm). To se provede v pravé dolní nabídce Scene v menu Units, přepnutím Unit system None, viz obrázek 36.



Obr. 36: Změna jednotek

Posun, rotace a zvětšení objektu se provádí buď přes nástroj v levém nástrojovém panelu nebo klávesovými zkratkami G pro posun, R pro rotaci a S pro zvětšení. Najetím kurzorem myši na daný nástroj se zobrazí popisek tohoto nástroje.

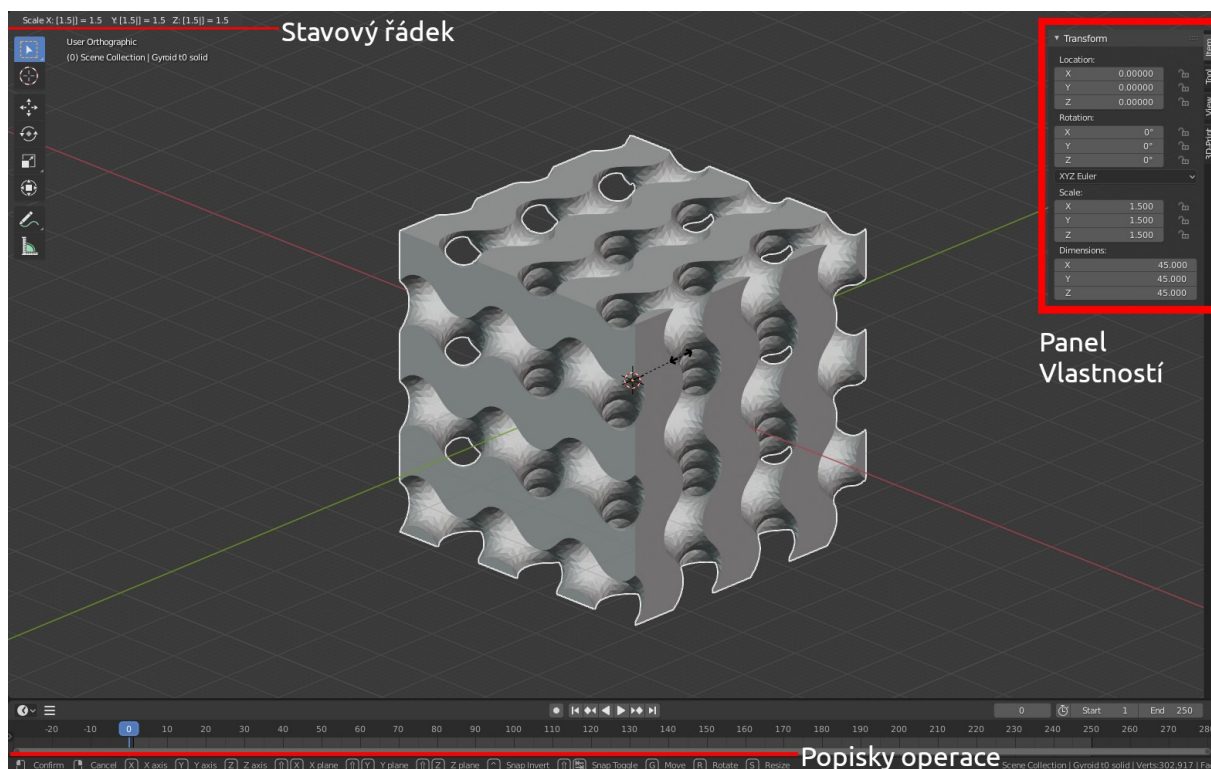
Zkušební tělesa s výplní tvořenou síťovými strukturami Gyroid, Schwarz P a Diamond

Výchozími daty pro Gyroid, Schwarz P a Diamond jsou data z Thingiverse [67]. Jedná se o síťové struktury výřezů z nekonečné mříže trojitě periodických minimálních ploch. Prvním krokem je import do Blenderu, přes File, Import, stl. Vybere se soubor a potvrdí se import.

Tyto modely mají shodné rozměry elementární buňky (10 × 10 × 10) mm a celkový rozměr (30 × 30 × 30) mm. Zvětšení se v Blenderu provádí přepsáním

Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

hodnoty v panelu vlastností na pravé straně (zobrazení klávesou N) v okně Transform na kartě Scale. Objekt musí být označen. Popřípadě lze použít klávesovou zkratku S a vepsáním poměru. V levém horním rohu náhledu se zobrazí stavový řádek s napsanými hodnotami. V tomto případě je poměr 1,5. (Obr. 37) Tím jsou data připravená k exportu do G .stl souboru.



Obr. 37: Změna velikosti (po stisku klávesy S)

Export .stl souboru se provádí přes menu File, export, stl. Zobrazí se tabulka, kde se zvolí název souboru a jeho umístění. Pokud je v Blenderu přítomno více objektů, zaškrtnutím tlačítka Selection Only se vyexportuje pouze označený objekt.

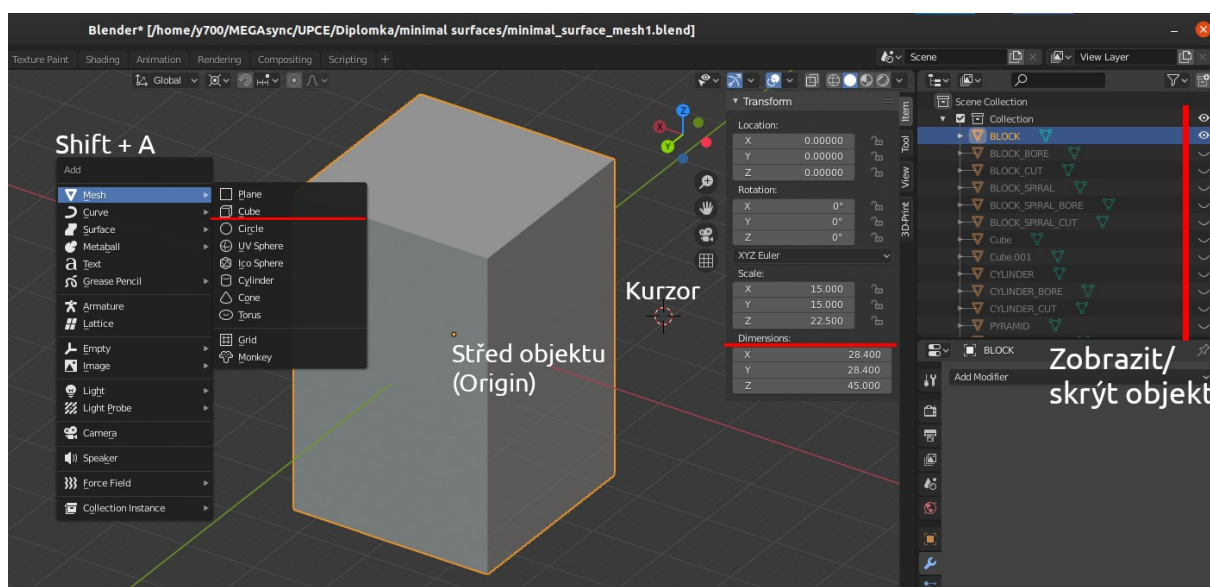
Pro vytvoření zkušební tělesa tvaru válce, kvádrů a kvádrů stočeného do spirály je zapotřebí z těchto mříží vykrojit výřez daného tvaru. K tomu slouží modifikátor Boolean.

Vytvoření formy

Nejprve je nutné připravit daný tvar jako formu, podle které má modifikátor aplikovat řez. Zkušební těleso se skládá z kontury a výplně. Forma pro řez je tedy daný tvar bez kontury. Konturu představují dvě tištěné linky tryskou o průměru

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

0,4 mm, tedy o celkové šířce 0,8 mm. Výplň v podobě minimální plochy není zatím třeba, lze ji tedy schovat kliknutím na ikonu oka v pravém horním rohu, v seznamu objektů Scene Collection (Obr. 38). Pro vytvoření objektu je nejjednodušší stisknout klávesovou zkratku Shift + A, objeví se kontextová nabídka, kde se vybere Mesh a požadovaný tvar, např. Cube. (Objekt se vkládá na souřadnice kursoru, ty lze měnit nástrojem Cursor v levém nástrojovém panelu – druhý shora – kliknutím myši. Užitečná je i klávesová zkratka Shift + S.) Tím se vytvoří krychle o straně 2 mm (2 BU). Změnou měřítka nebo rozměrů v pravém panelu vlastností (Transform, Scale, Dimensions) se nastaví rozměr na (28,4 × 28,4 × 45) mm, viz obrázek 38.

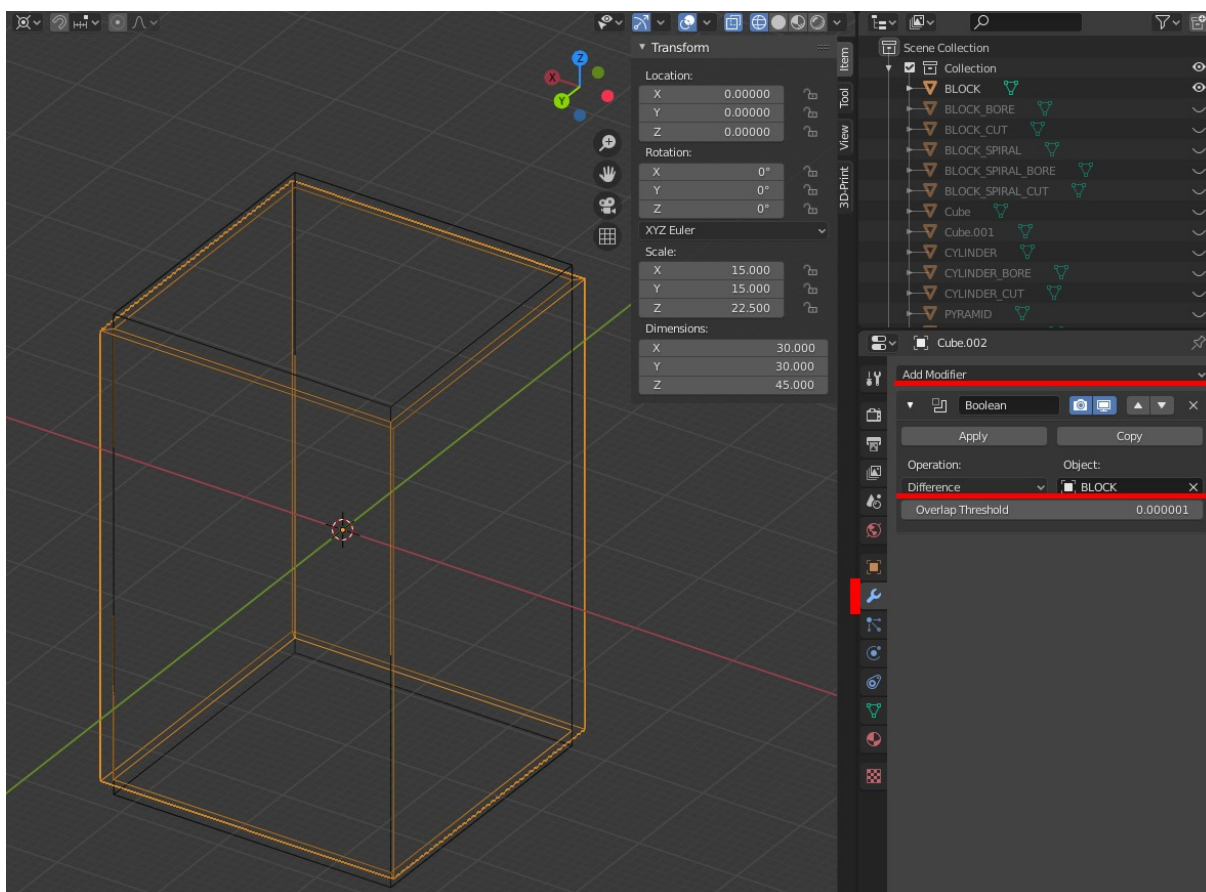


Obr. 38: Skrytí objektu, vložení objektu

Kontura se připraví stejným oříznutím podle této výplně. Vytvoří se opět kvádr, tentokrát o rozměrech (30 × 30 × 45) mm. Pro lepší vizualizaci je lepší se přepnout do průhledného modu přes tlačítko Z. Tím se zobrazí tzv. Wireframe. Podmínkou pro Boolean je přesah formy nad řezaným objektem. Zvětší se tedy výška formy (Dimensions Z) nad 45 mm, aby vyčnívala nad řezaný objekt a použije se modifikátor. Ten se nachází vpravo v dolní nabídce pod ikonou klíče, viz obrázek 39. Označen musí být řezaný objekt. Tlačítkem Add Modifier se zobrazí nabídka dostupných modifikátorů a ve druhém sloupci se nachází Boolean. Zde se zvolí operace Difference podle vybraného objektu v poli vpravo. Kapátkem lze vybrat objekt, pro tento případ forma výplně s výškou přesahující 45 mm. Poté už jen stačí

Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

modifikátor aplikovat tlačítkem Apply. Vráťí se zpět původní rozměr výšky na 45 mm a tím je připravená jak kontura, tak výplň podle které se ořízne model minimální plochy. Tento postup lze použít i pro válec.



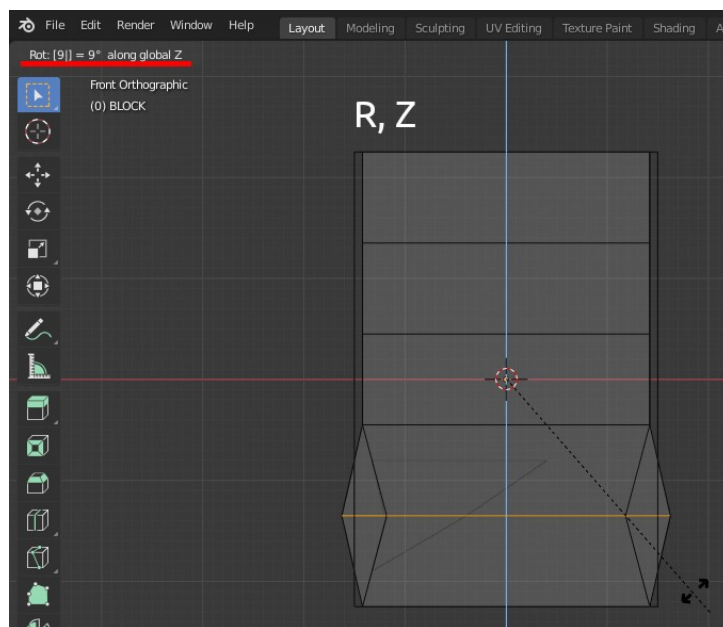
Obr. 39: Boolean modifikátor

Připravení kvádru stočeného do spirály je zapotřebí vytvoření opět kvádrů o rozměrech (30 × 30 × 45) mm a druhého o rozměrech (28,4 × 28,4 × 45) mm. Poté se z aktuálního Object mode přepne klávesou Tab do editačního Edit mode. Klávesou 5 na numerické klávesnici se přepne orthografické zobrazení bez perspektivy a klávesou 1 se přepne na nárys. (V případě klávesnice bez numerického bloku je v Blenderu přítomen doplněk. V menu Edit v levém horním rohu se zvolí Preferences a na kartě Add-ons lze vyhledat Pie menu – Interface: 3D Viewport Pie Menus, zaškrtnutím se aktivuje. Dále klávesovou zkratkou Alt + Q lze zobrazit koláčové menu kolem myši, kde lze otáčet kamerou a přepínat

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

orthografické zobrazení. Koláčová menu se tímto doplňkem zobrazují u všech častých klávesových zkratk. Dobré je i v Preferencích na kartě Navigation vypnout autoperspective.)

Pro vymodelování spirály se v Edit mode přepne Wireframe a klávesovou zkratkou Ctrl + R lze objekt rozdělit na segmenty. Najetím myši tak, aby segmenty byly horizontálně, se zatočením kolečka myši zvýší jejich počet. Zvolí se 4 segmenty a potvrdí se kliknutím levého tlačítka myši. Nyní lze se segmenty pohybovat nahoru a dolů, ale zde je zapotřebí je mít rovnoměrně, odklikne se tedy pravým tlačítkem a segmenty se uzamknou. Tahem levého tlačítka lze označit celý segment a editovat jej. Rotovat lze klávesou R podle osy Z (stiskem příslušné klávesy X, Y, Z se zamykají osy operací.) Otočí se všemi segmenty po 9° tak, aby vrchní stěna byla vůči spodní otočena o 45°. K tomu stačí napsat požadovanou hodnotu úhlu stočení a potvrdit Entrem. Napsaná hodnota se zobrazuje v pravém horním rohu ve stavovém řádku, viz obrázek 40. Toto se provede u obou kvádrů. K tomu je potřeba návrat zpět do Objekt mode klávesou Tab a označit druhý kvádr. Znovu se přepnout do Edit mode a zopakovat postup.

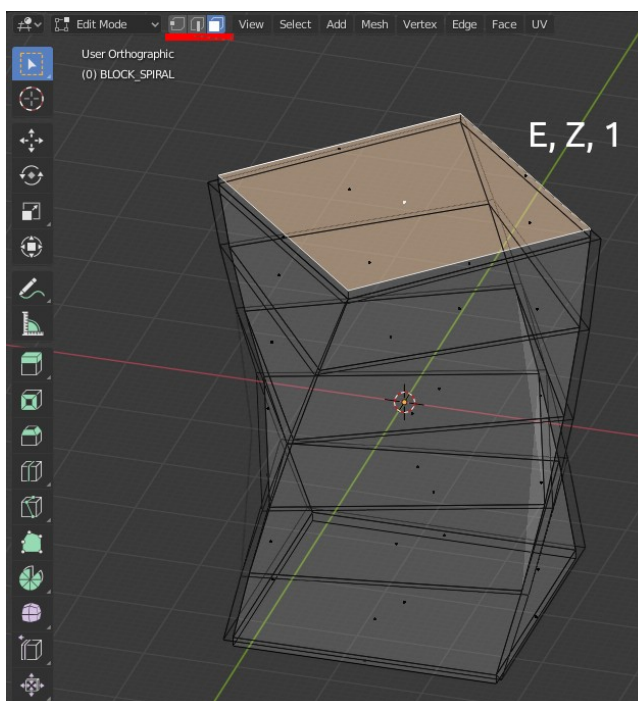


Obr. 40: Rotace segmentu

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

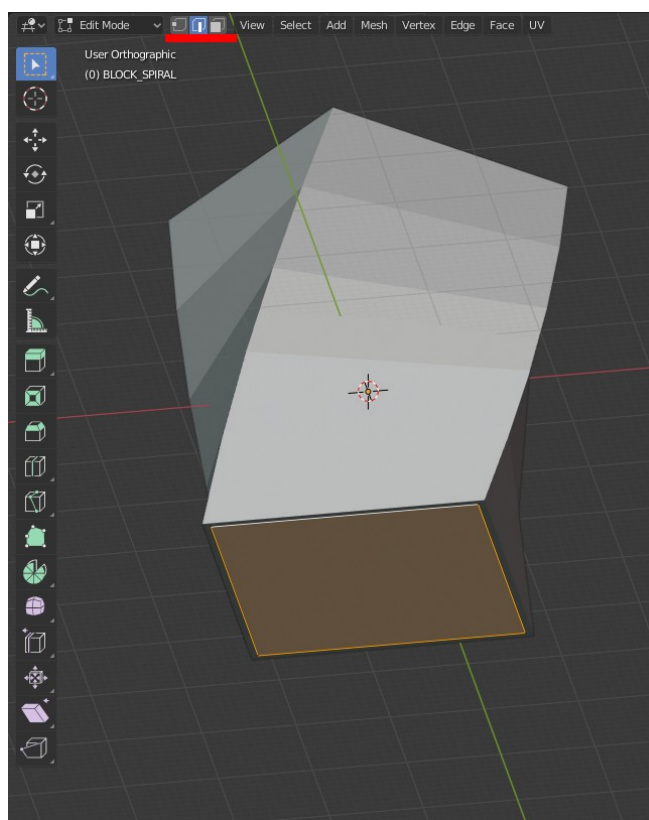
Aby aplikace Boolean modifikátoru proběhla úspěšně, musí se u menší spirály extrudovat horní a spodní stěna, aby přesahovala skrz větší spirálu. Tím se docílí opět navržené kontury a výplně, jako formy pro ořez TPMP struktury.

Opět v editačním modu se označí nejprve horní stěna (klávesou š se přepne do označování stěn) a klávesou E se extruduje stěna podle osy Z. Zvolením rozměru, např 1, se extruze zastaví na 1 mm od původní stěny. (Obr. 41) Potvrdí se stiskem levého tlačítka nebo klávesou Enter. Spodní stěna se extruduje stejným způsobem. Tím je připraveno použití Boolean modifikátoru. Je vyžadován návrat do Objekt mode a opět se označí řezaný objekt, vybere se Boolean z nabídky modifikátorů a aplikuje se Difference podle přesahující formy. Nyní je potřeba vrátit zpět rozměr původní výplni. V Edit mode se označí extrudované stěny a klávesou X se zobrazí nabídka odstranění. Zvolí se vrcholy (Vertices), přičemž se smažou všechny hrany spojující se ve vrcholech. Nyní si lze všimnout že chybí podstavy. Je tedy zapotřebí vrátit je zpět. Klávesou ě se přepne do označování hran, dvojklikem na jednu z hran okolo chybějící stěny se označí celá kontura a klávesou F se doplní stěna. (Obr. 42) Takto se doplní spodní i horní stěna.



Obr. 41: Extruze spodní a horní stěny

Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

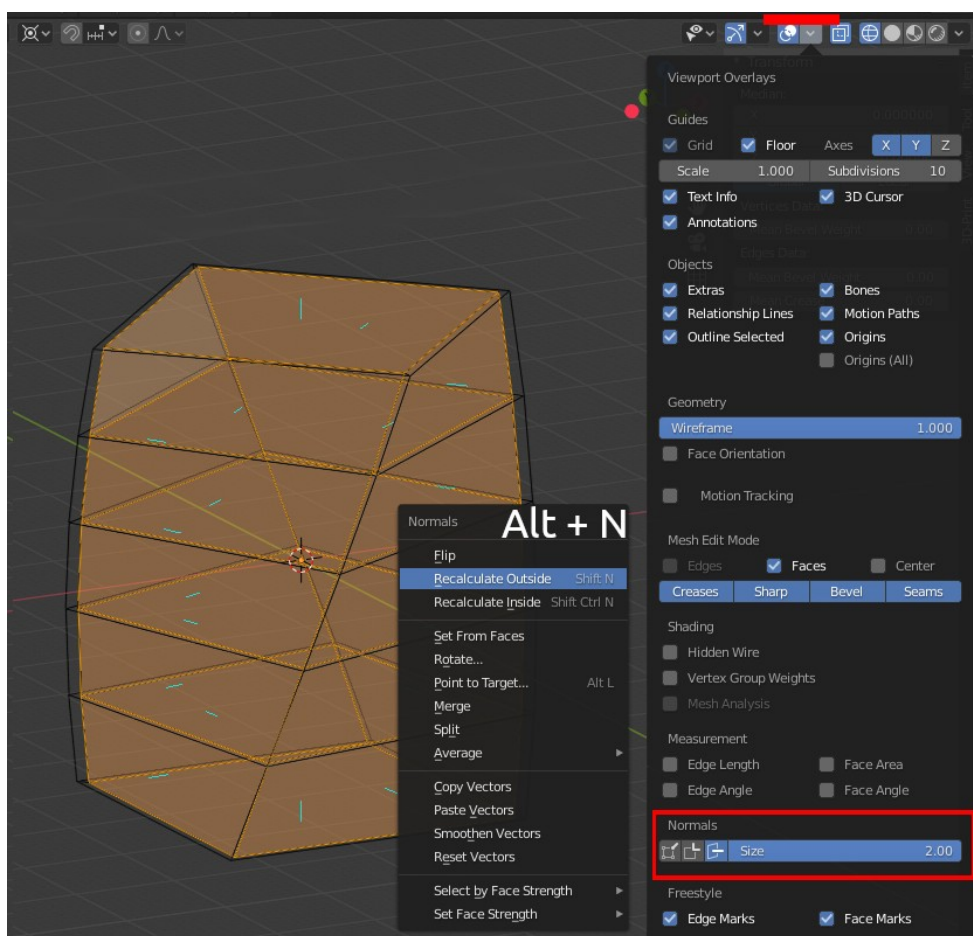


Obr. 42: Doplnění stěny klávesou F

Vytvoření zkušebního tělesa s výplní síťových struktur odvozených od TPMP

U takto připravených forem a kontur se nejprve překontrolují normálové vektory stěn. V Edit mode se zobrazují normály přes menu Overlays v pravém horním rohu náhledu. Dole v nabídce se nachází řádek pro zobrazení normálových vektorů a jejich velikost. Zapne se zobrazení normál u stěn a posuvníkem lze zvětšit jejich velikost pro lepší vizualizaci. Všechny normály musí směřovat ven z objektu, aby ořezávání proběhlo správně. Pokud tomu tak není, označí se celý objekt buď tažením myši při zapnutém Wireframe režimu nebo klávesou A. Nyní lze spustit menu pro ovládání normál, které se spouští klávesovou zkratkou Alt + N a vybere se možnost Recalculate Outside, viz obrázek 43.

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



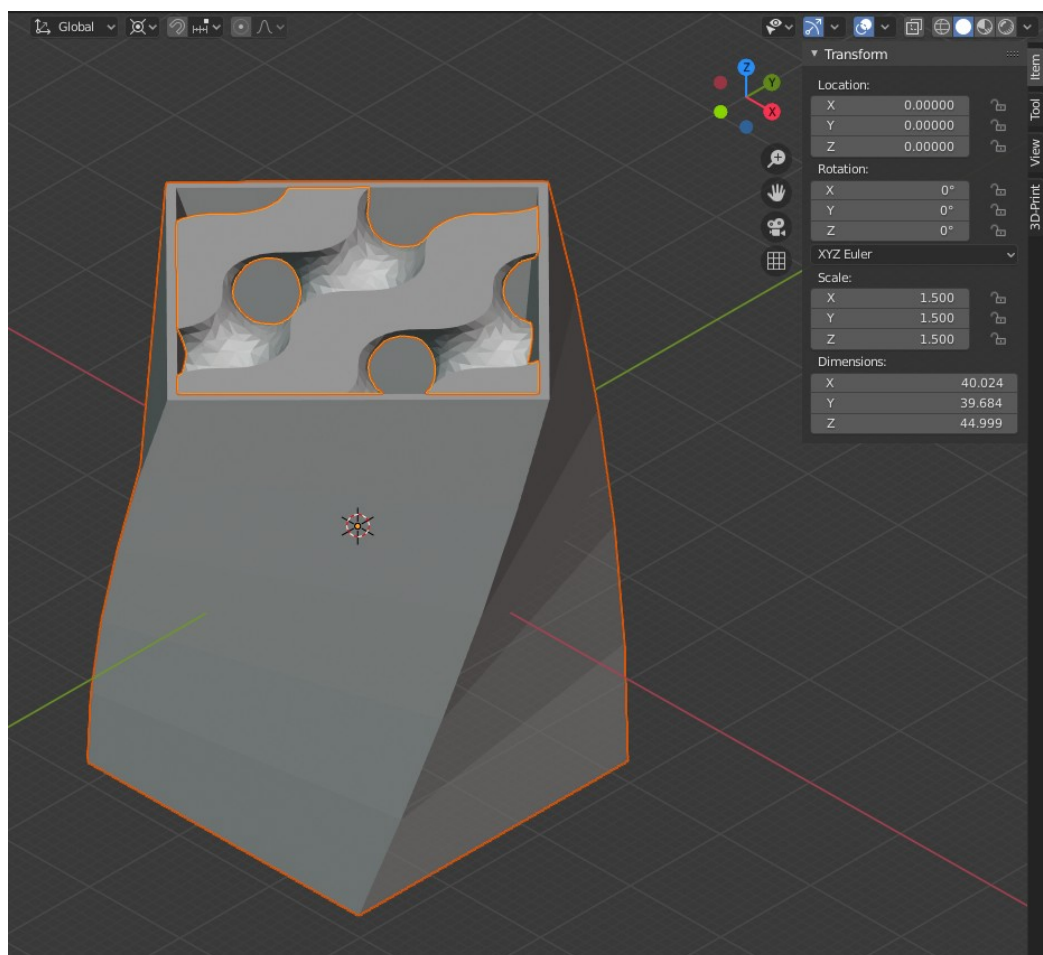
Obr. 43: Zobrazení a otočení normálových vektorů

Pro vytvoření finálního zkušební tělesa tvaru válce, kvádrů a kvádrů stočeného do spirály nezbyvá, než vytvořit výřez ze struktury minimální plochy a vložit jej do kontury. K tomu slouží opět modifikátor Boolean. Výřez z nekonečné mřížky síťové struktury minimální plochy by měl být stále skrytý v pravém horním poli v seznamu objektů. Kliknutím na ikonu zavřeného oka se znovu zviditelní objekt. Klávesou Tab se přepne opět Object mode a zkontroluje se, pro jistotu umístění středu objektu. To se provede kliknutím na Object na horní liště náhledu a zvolí se Set Origin a Origin to Center of Mass (Surface). Tím je střed skutečně ve středu objektu a nyní se zkontroluje poloha objektu středu souřadnicového systému v panelu vlastností (Location) na pravé straně. Přepsáním hodnot na 0 se objekt umístí do středu. Toto aplikujeme na všechny objekty.

Nyní se Klávesovou zkratkou Shift + D (potvrzení entrem) duplikuje výřez síťové struktury pro aplikování výřezu pro kvádr, válec a spirálu, duplikace se tedy provede

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3x. V seznamu objektů se skryjí dvě z nich, aby nepřekážely a přejde se k ořezávání. Označí se struktura minimální plochy a opět se vybere modifikátor Boolean, nyní však s operací Intersect. Aby operace proběhla správně, musí být rozdílná výška objektů. Proto je nutné změnit výšku struktury minimální plochy na 44.999. Tímto vznikne chyba v rozměru v řádech jedné tisíce mm, která je však pod mezí rozlišení 3D tisku, tudíž se neprojeví na výsledném zkušebním tělese. Modifikátor se aplikuje podle formy plné výplně tělesa. Nyní se označí kontura spolu s nově vzniklou výplní z minimální plochy (Shift + levé tlačítko) a zvolí se export těchto dvou objektů. Při exportu musí být zaškrtnutá volba Selection Only (Obr 44).

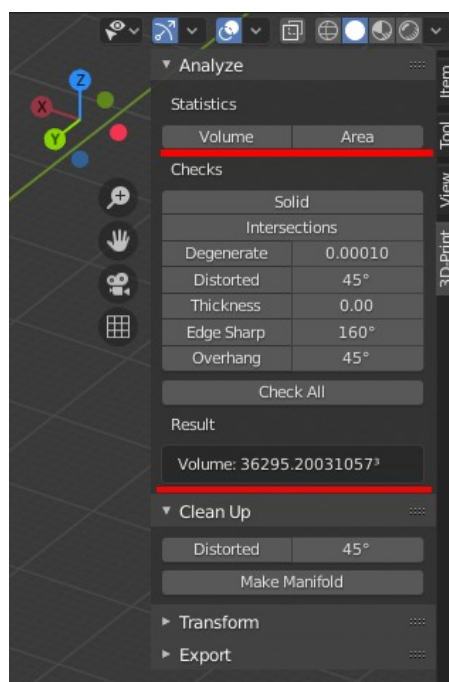


Obr. 44: Zkušební těleso tvaru spirály s výplní Gyroid

Pro zjištění procentuální hodnoty objemové výplně existuje doplněk Mesh: 3D print toolbox, který lze zapnout v Preferencích Blenderu na kartě Add-ons. Tento nástroj se zobrazí stejně jako panel vlastností klávesou N a přepnutím na kartu

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3D Print. Hned první volba je statistika objektu, kde lze vypočítat objem a povrch objektu kliknutím na příslušné tlačítko (Obr. 45). Poměr objemů výplně z minimální plochy a plné výplně (formy pro ořez) udává procentuální výplň ve zkušebním tělese.

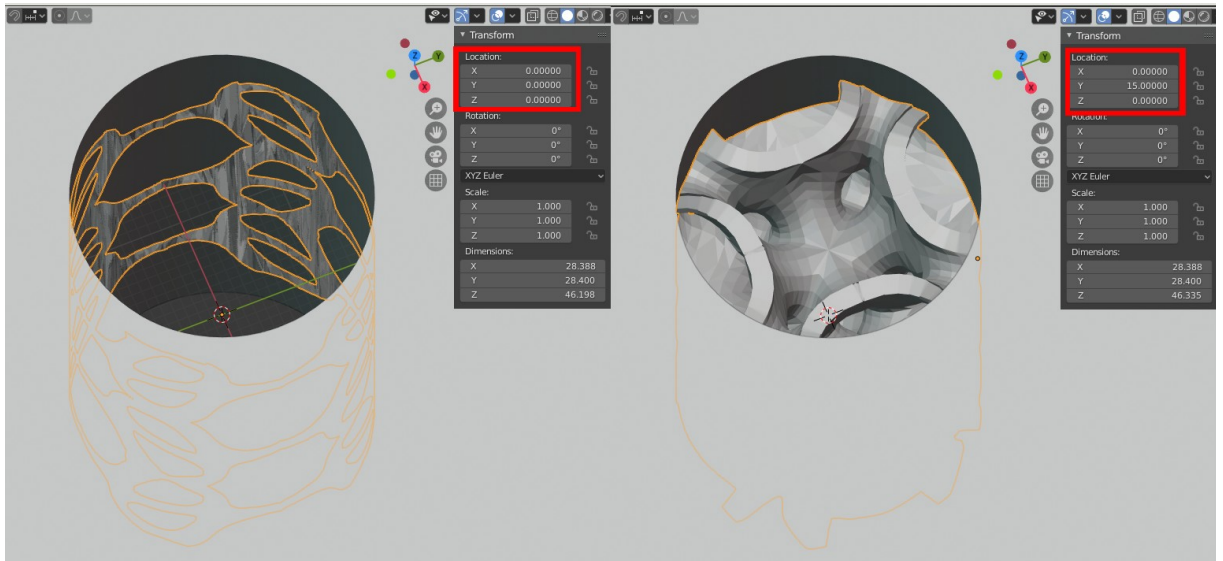


Obr. 45: Nástroj 3D Print pro výpočet objemu

Po exportu zkušebního tělesa se může oříznutá výplň smazat klávesou Delete a postup se zopakuje pro zbylé tvary. Tento postup lze rovněž aplikovat pro všechny soubory z kolekce na Thingiverse.

Může nastat případ, že oříznutá struktura nezůstane celá, viz obrázek 46. Tuto chybu lze odstranit posunem mříže v osách X a Y ještě před aplikací Boolean modifikátoru, dle obrázku 46. (Vzhledem k přepočtu nových souřadnic pro aplikaci modifikátoru může nastat prodleva několika sekund před projevením změny.)

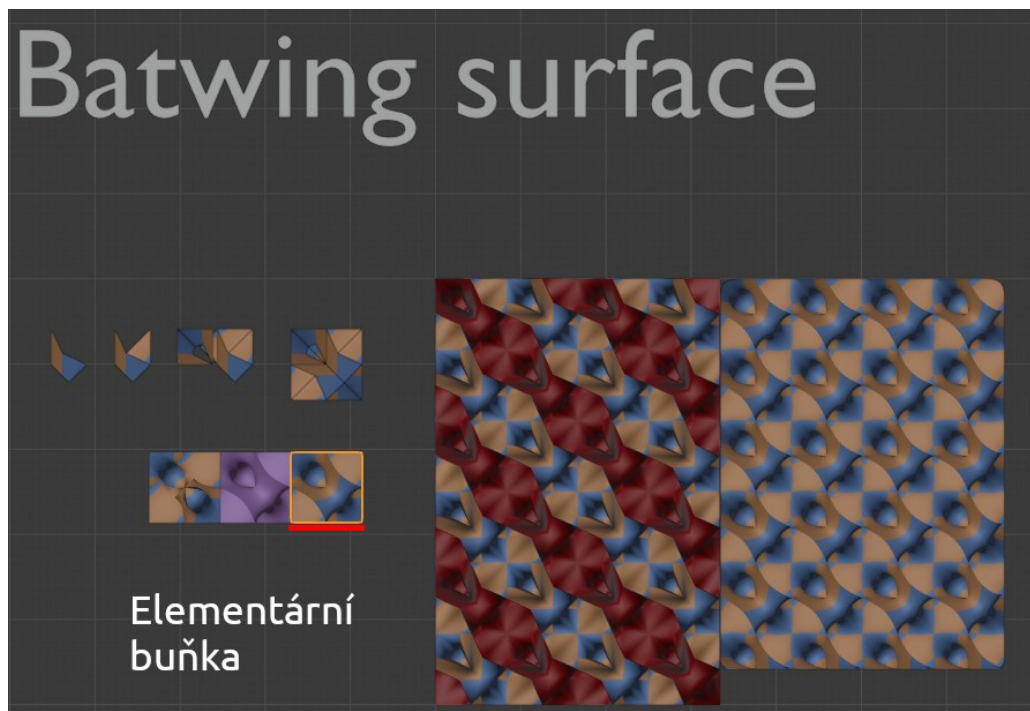
Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 46: Chyby při aplikaci Boolean modifikátoru

Zkušební tělesa s výplní tvořenou síťovým tělesem Batwing

Zkušební tělesa s výplní tvořenou síťovým tělesem odvozeným od trojítě periodické minimální plochy Batwing lze připravit z kolekce dostupné na Sketchfab [64]. Tam se nachází elementární buňka tohoto TPMP, viz obrázek 47.



Obr. 47: Batwing elementární buňka

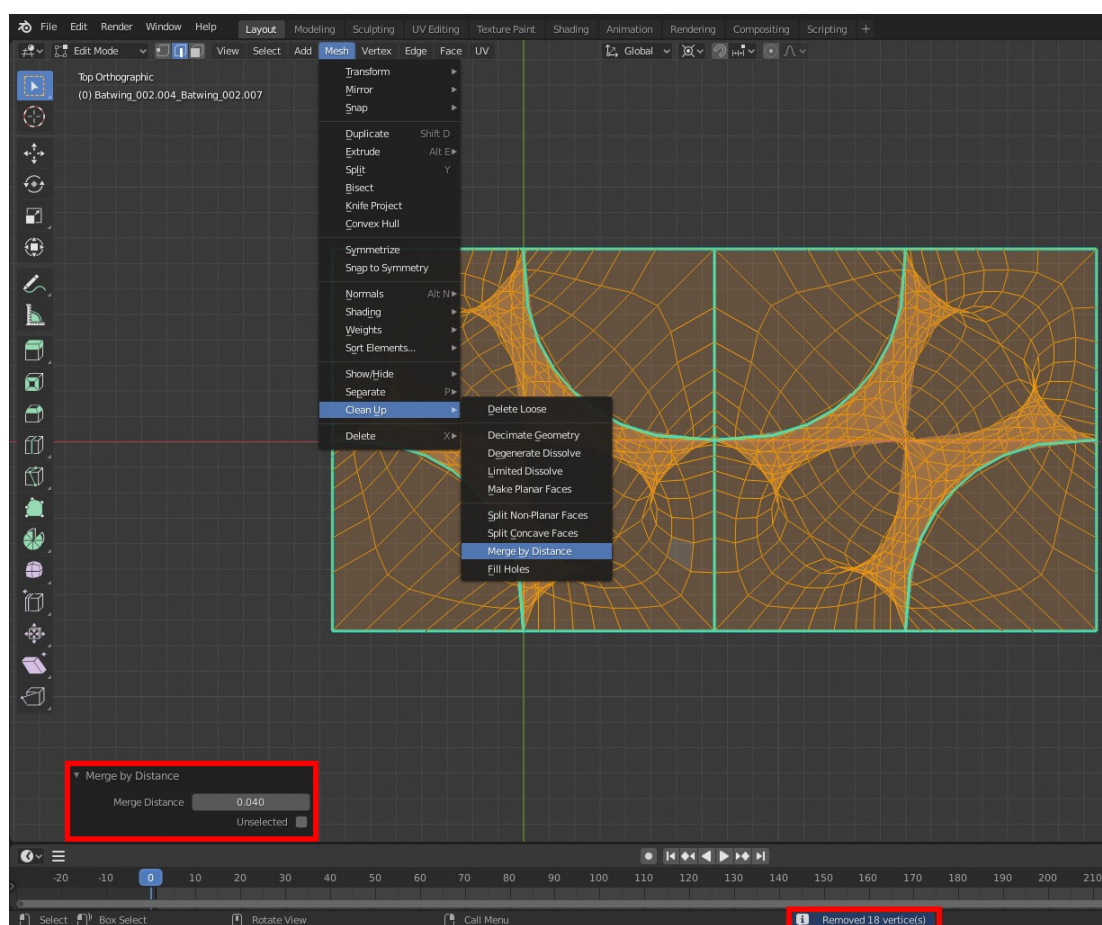
Kontury zkušebních těles jsou již připraveny, stejně tak formy pro ořez výsledných struktur. Postup pro přípravu výřezu z nekonečné mříže TPMP Batwing je následující. Otevře se nové okno Blenderu, kam se naimportuje .obj soubor ze Sketchfab. Označí se elementární buňka a překopíruje se do souboru s formami (Ctrl + C; Ctrl + V). Elementární buňka se zkopíruje na stejné místo jako v původním souboru. Aby se umístila do středu souřadnicového systému, je potřeba umístit střed objektu (Origin) do skutečného středu. Vpravo nahoře v seznamu objektů (Scene Selection) se označí vložená elementární buňka a vlevo na horní liště náhledu se vybere Object a zvolí se Set Origin a Origin to Center of Mass (Surface). Poté se stiskne klávesová zkratka Shift + S a zvolí se Cursor to World Origin a poté Selection to Cursor. Tím je elementární buňka ve středu souřadnicového systému a může se pokračovat.

Prvně se změní rozměry buňky na 15 mm ve všech směrech. Přepíše se hodnota rozměru X na 15, čímž se změní i poměr v tabulce Scale X. Tento poměr se překopíruje do zbylých Scale Y a Z. Tím se vytvoří elementární buňka (15 × 15 × 15) mm v poměru vůči výchozímu rozměru. (Rozměr v ose Y je zanedbatelně odlišný.) Dalším krokem je odstranit rotaci. V panelu vlastností na pravé straně je nastavena rotace podle osy X na 90°, přepíše se na 0°. Nyní lze přejít k vytvoření opakující se jednotky. Elementární buňka se označí a zduplikuje klávesovou zkratkou Shift + D (potvrdí se Entrem). Zrcadlení se provádí klávesovou zkratkou Ctrl + M následovanou stiskem kláves X, Y a Z, podle toho, dle jaké roviny je zamýšleno zrcadlení. Prvně se zvolí zrcadlení podle roviny X (opět následuje potvrzení Entrem). Tím došlo k překryvu těchto dvou buněk, a lze přejít k translaci. Stiskem klávesy G následovanou stiskem X lze zrcadlenou buňkou pohybovat v ose X, napsáním rozměru 15 se buňka posune o 15 mm ve směru X. Potvrdí se Entrem. Klávesou Z se zapne Wireframe a stiskem klávesy 7 na numerickém bloku klávesnice se zobrazí půdorys a stiskem klávesy 5 se přepne orthografické zobrazení. Přiblížením si lze všimnout nespojitosti mezi těmito buňkami, je potřeba označit zrcadlenou buňku a manuálně ji posunout tak, aby se krajní vektory překrývaly, to se provede klávesou G, následovanou klávesou X a tahem myši. (klávesou Shift lze zpomalit rychlost tahu myši.)

Když se krajní vektory překrývají, označí se obě buňky (Shift + levé tlačítko) a klávesou zkratkou Ctrl + J se seskupí oba objekty do jednoho. Nyní je nutné odstranit duplicity vzniklé překryvem. Přepnutím klávesou Tab do Edit mode (měli

Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

by být všechny vektory označeny, pokud ne, klávesou A se přepíná označení) a kliknutím na Mesh v horním liště náhledu a následným výběrem Clean Up a Merge by Distance se sjednotí duplikované vrcholy. Vlevo dole se nachází sbalený panel ovládání tohoto nástroje, kde lze zvolit vzdálenost, v jejíchž mezích se mají vrcholy sjednotit (nastaví se alespoň dvě setiny). Dole v popiscích je ukazatel počtu sjednocených vrcholů. Mělo by jich být 18, viz obrázek 48 (dole). Klávesou Tab se přepne zpět do Object mode.

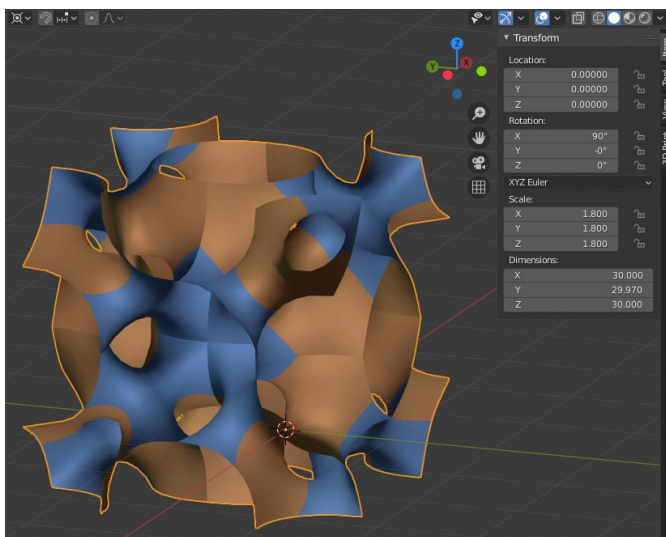


Obr. 48: Sjednocení duplicitních vektorů

Nyní se tyto sjednocené buňky dají zrcadlit podle roviny Y. Opět se nejprve objekt označí, poté se přes klávesovou zkratku Shift + D zduplikuje a klávesovou zkratkou Ctrl + M následovanou klávesou Y se zrcadlí podle roviny Y. Opět je nutné zrcadlené buňky posunout do překryvu krajních vektorů (G; Y) a seskupit. Poté opět sjednotit duplicity přes Merge by Distance v Edit mode a přejít k poslednímu

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

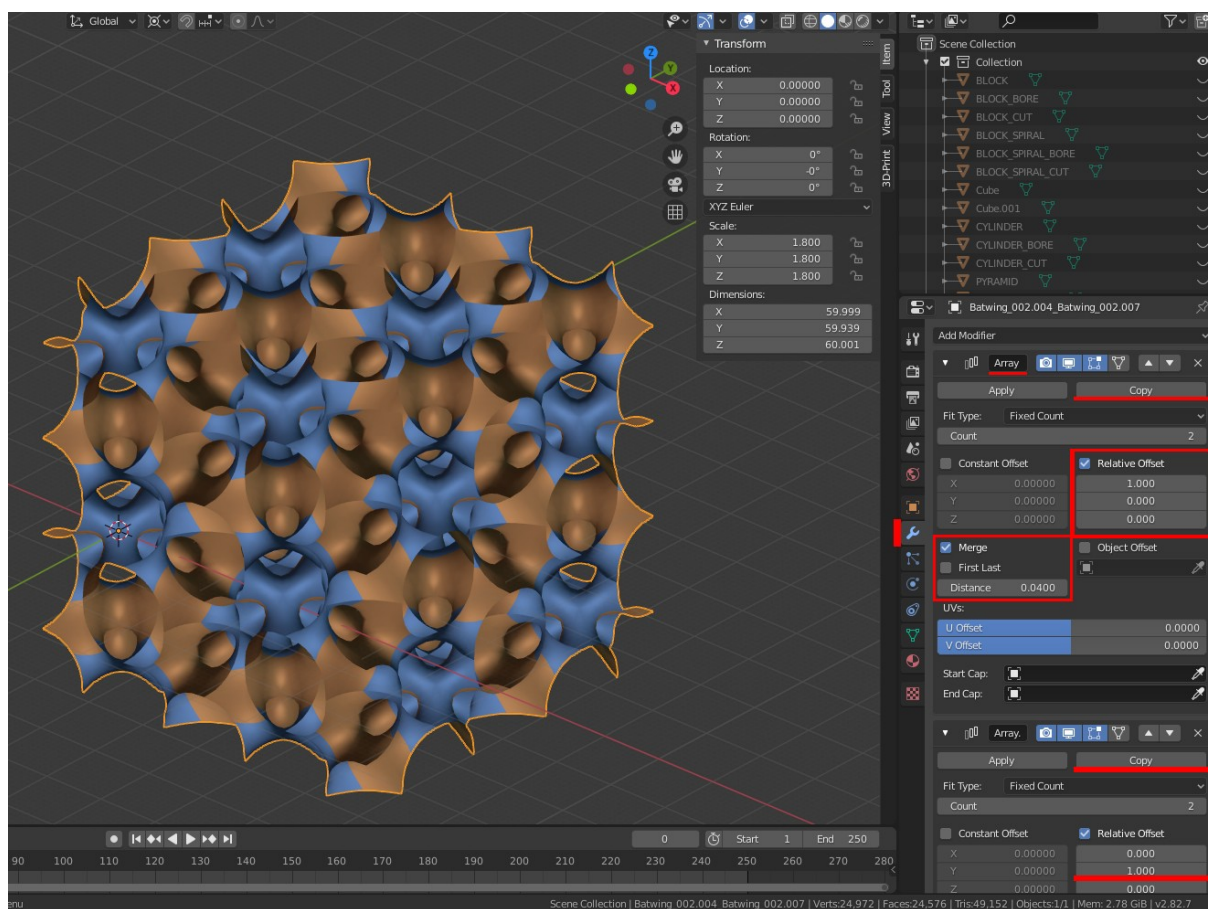
zrcadlení dle osy Z. Opět nezapomenout na seskupení a sjednocení duplicit. Nárys se přepíná klávesou 1 na numerickém bloku klávesnice. Výsledkem je opakující se buňka s rozměry (30 × 30 × 30) mm (Obr. 49).



Obr. 49: Batwing, opakující se buňka

Nyní lze přejít k poslednímu kroku, kterým je seřazení této buňky za sebe. K tomu slouží modifikátor Array. V tomto modifikátoru se nastaví počet (Count) opakování na hodnotu 2 a v poli Relative Offset by měla být hodnota 1 v ose X a 0 u os Y a Z. Zaškrtně se pole Merge s hodnotou alespoň 0,02, tím se sjednotí duplicitní vektory. Nyní se rozkopíruje tento modifikátor tlačítkem Copy a změní se Relative Offset na 1 u osy Y a 0 u osy X a Z. Takto se zkopíruje ještě jednou, s hodnotou 1 u osy Z a 0 u osy X i Y, viz obrázek 50.

Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



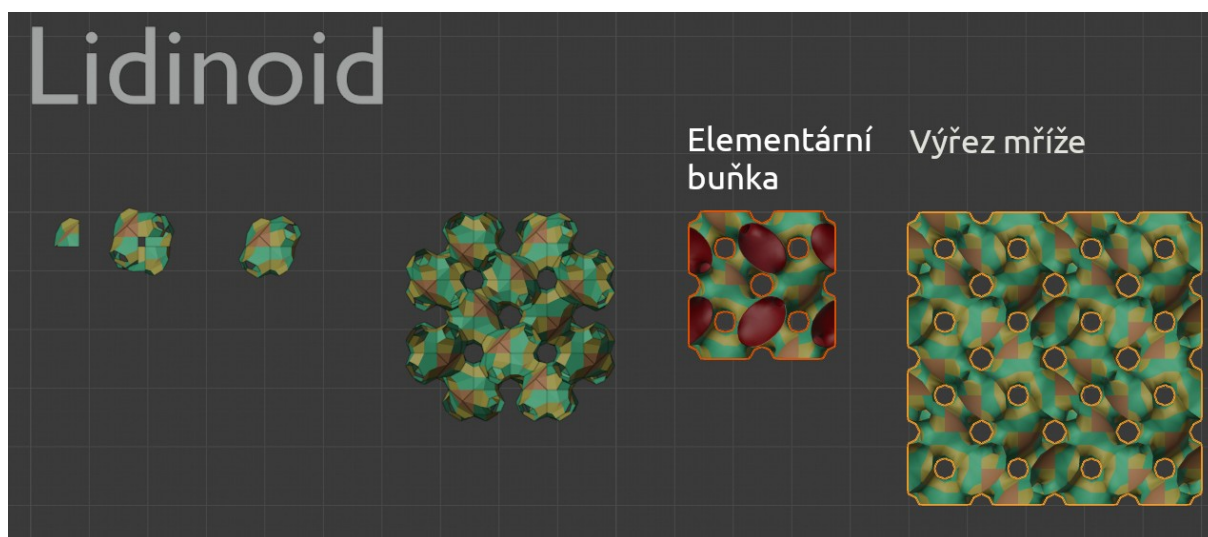
Obr. 50: Batwing, výřez z nekonečné mříže

Nyní lze aplikovat všechny tři modifikátory a výsledkem je dvojrozměrný výřez z nekonečné mříže trojitě periodické minimální plochy Batwing. Srovnání výšky objektu lze opět modifikátorem Boolean, vytvořením kvádrů o rozměrech přesahujících rozměry Batwing mříže a aplikováním operace Difference ve výšce 45 mm od spodní hrany se mříž ořízne do dané výšky. Exportováním a následným opravením tohoto dvojrozměrného modelu v 3D Builderu, či některém z online nástrojů, se dosáhne síťové struktury Batwing o velikosti (60 × 60 × 45) mm.

Pro vytvoření zkušebních těles daného tvaru se aplikuje stejný postup jako u výplní Gyroid, Diamond a Schwarz P, tedy přes Boolean modifikátor s konturou a plnou výplní jakožto formou pro ořez dané struktury.

Zkušební tělesa s výplní tvořenou síťovým tělesem Lidinoid

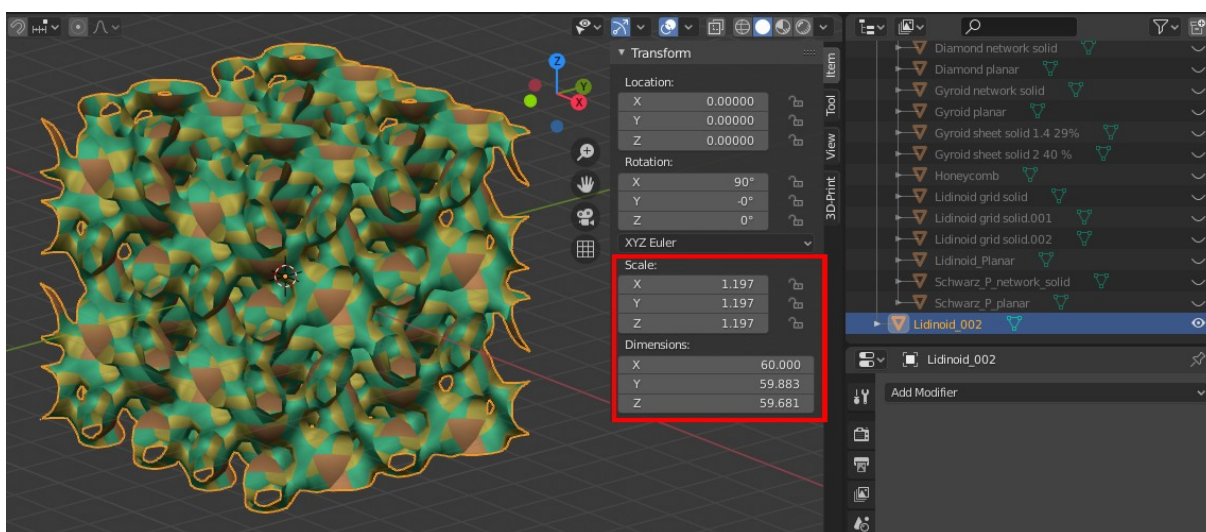
Vychází se opět z kolekce dostupné na Stetchfabb, přítomen je výřez nekonečné mříže a elementární buňky trojitě periodické minimální plochy Lidinoid, viz obrázek 52.



Obr. 52: Lidinoid

Elementární buňka má v tomto případě rozměry $(25 \times 25 \times 25)$ mm, tudíž ji je nutné zvětšit na rozměry $(30 \times 30 \times 30)$ mm. Opět je nutné nejprve naimportovat .obj soubor kolekce do nového okna Blenderu. Označí se výřez z nekonečné mříže a zkopíruje se do souboru, kde jsou uloženy formy. Opět je nutné srovnat středy objektů se středem souřadnicového systému (Object, Set Origin, Origin to Center of Mass (Surface), Shift + S, Cursor to World Origin, Selected to Cursor). Nyní se do pole poměru rozměrů X, Y i Z (Scale) vloží hodnota 1.19682. Tím se rozměry zastaví na hodnotách $(60 \times 60 \times 60)$ mm. Tím je zároveň změněn i rozměr elementární buňky na $(30 \times 30 \times 30)$ mm (Obr. 51).

Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

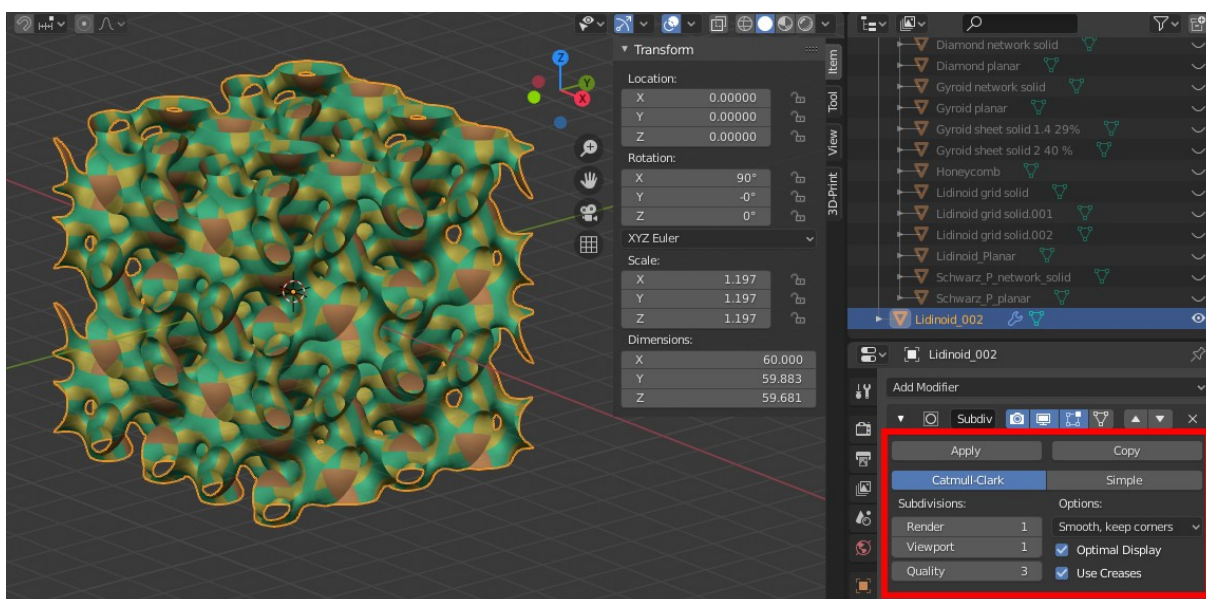


Obr. 51: Zvětšení na rozměr (60 × 60 × 60) mm

Posledním krokem před exportem do .stl souboru je zvětšení rozlišení polygonů tvořící Lidinoid. Toho se dosáhne aplikací dalšího modifikátoru s označením Subdivision Surface. Tento modifikátor exponenciálně zvedá počet polygonů které tvoří objekt a tím dosahuje jemnějšího rozlišení. V nastavení modifikátoru se zachová Catmull-Clark nastavení a subdivision nastavení se změní u položky Render na hodnotu 1 a u položky Viewport se ponechá hodnota 1. Posledním nastavením je zaškrtnutí volby Optimal Display (Obr. 53). (Opět může nastat časová prodleva ve výpočtu v závislosti na výkonu počítače. Subdivision Surface ve vyšších řádech může způsobit pád systému vlivem nedostatečného výkonu.)

Nyní následuje export této dvojrozměrné struktury do souboru .stl a převedení na síťové tělelo v jednom z dříve uvedených nástrojů. Poté se tento síťový objekt importuje zpět do Blenderu a provede se ořez na výšku 45 mm modifikátorem Boolean, např. podle dvou kvádrů vzdálených od sebe 45 mm na výšku. Kvádry musí přesahovat rozměry (60 × 60) mm. Nyní lze aplikovat postup pro ořez výplní pro zkušební tělesa.

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



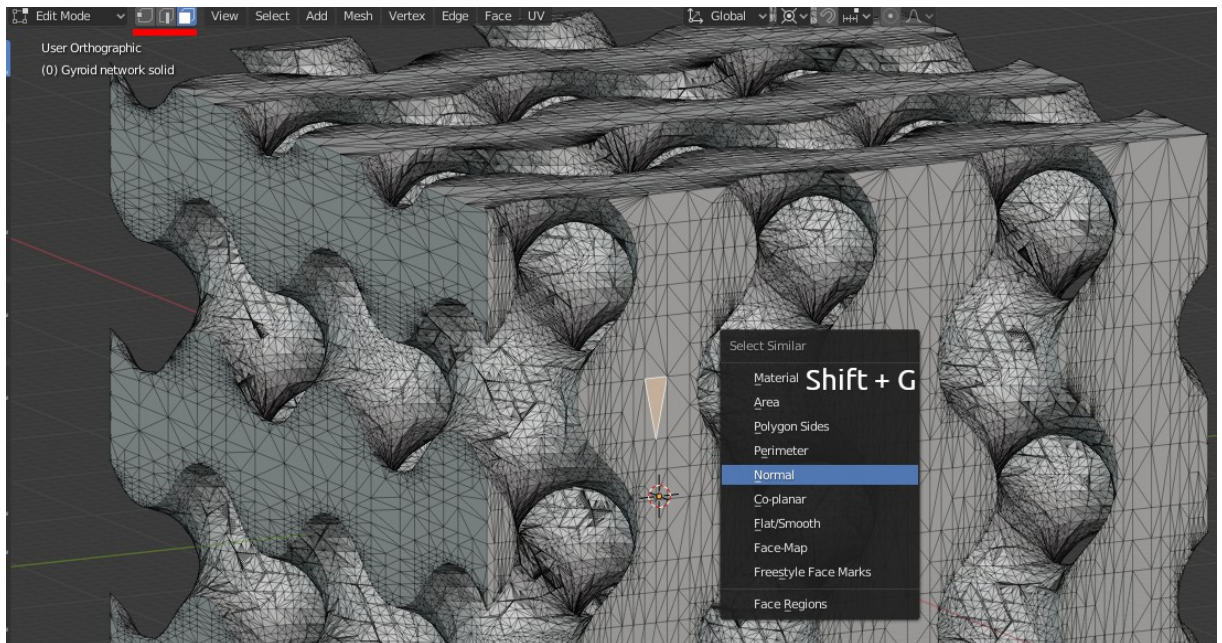
Obr. 53: Nastavení modifikátoru Subdivision Surface

Zkušební tělesa s výplní tvořenou blánovými strukturami Gyroid, Diamond a Batwing

Výchozími daty pro výplně s blánovou strukturou jsou pro Gyroid a Diamond soubory síťových struktur z kolekce na Thingiverse a pro Batwing je to dvojrozměrný model vytvořený na základě předchozího textu.

Postup pro dosažení dvojrozměrného modelu ze síťových těles Gyroid a Diamond je následující. Po importu souboru a po změně rozměru na (45 × 45 × 45) mm se klávesou Tab přepne do Edit mode a klávesou A se odznačí vše. Nyní se přepne na označování stěn (klávesa š) a označí se libovolný polygon, který tvoří vnější stěnu mezi hranami původní minimální plochy. Klávesovou zkratkou Shift + G lze označovat podobné polygony či vektory. Z uvedených možností se zvolí Normal, tedy vybrání všech polygonů se stejně směřujícím normálovým vektorem. Tím se označí celé stěny tělesa (Obr. 54).

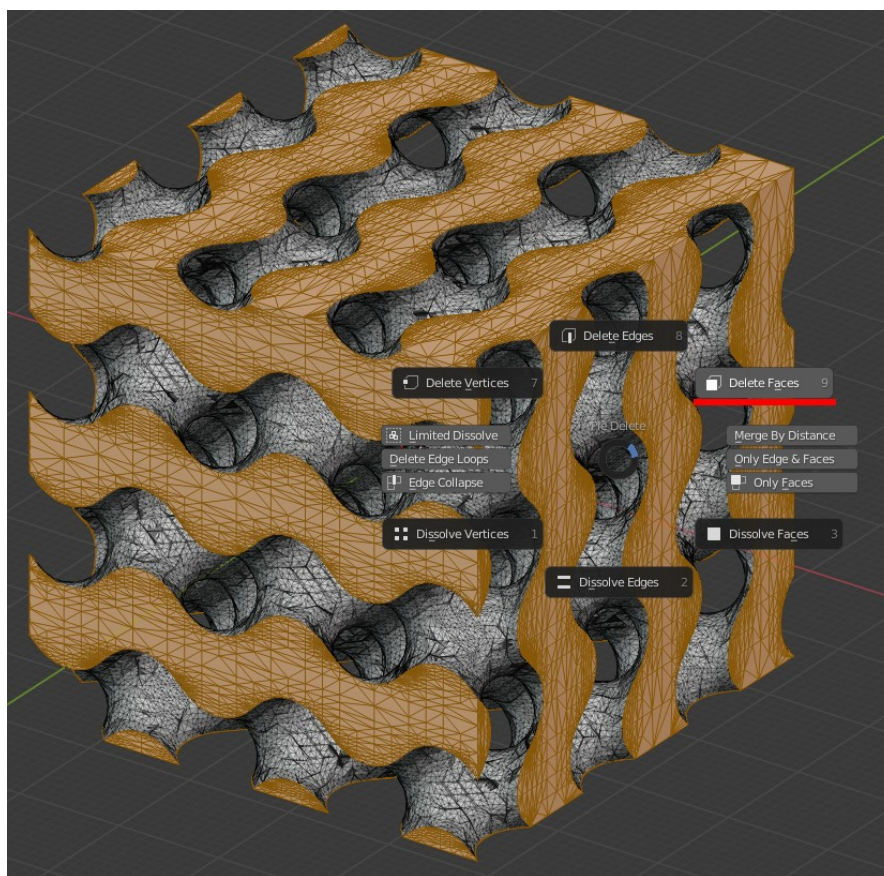
Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 54: Výběr dle podobnosti

Poté se vybere libovolný polygon v sousední straně objektu, avšak za současného stisknutí klávesy Shift. Tím se nezruší předchozí označení. Opět se použije klávesová zkratka Shift + G pro označení dle podobnosti normálových vektorů. Takto se postup zopakuje pro všechny strany objektu. Následně se klávesou X a výběrem Delete Faces odstraní označené polygony, viz obrázek 55. Výsledkem je struktura dané trojitě periodické minimální plochy s nekonečně tenkou tloušťkou stěny.

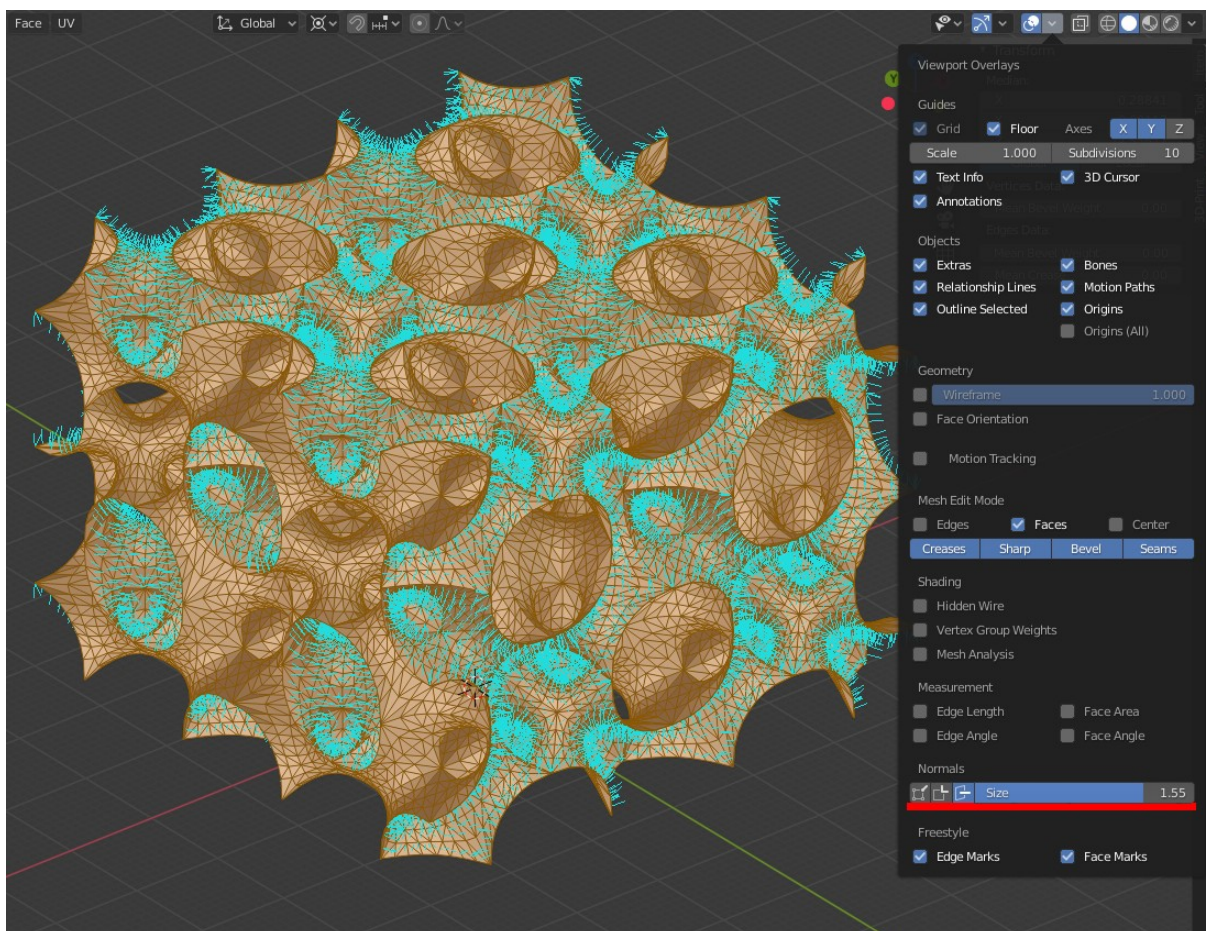
Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 55: Odstranění stěn síťového tělesa

Nyní je dobré zkontrolovat směry normálových vektorů. V Edit mode se označí celá dvojrozměrná struktura (klávesa A) a opět se zobrazí normálové vektory kliknutím na menu Overlays v pravém horním rohu náhledu. Pro jistotu se klávesovou zkratkou Alt + N přepočítají normálové vektory tak, aby směřovaly ven (Recalculate Outside). Tento postup je nutností v případě vymodelované dvojrozměrné struktury Batwing, viz obrázek 56.

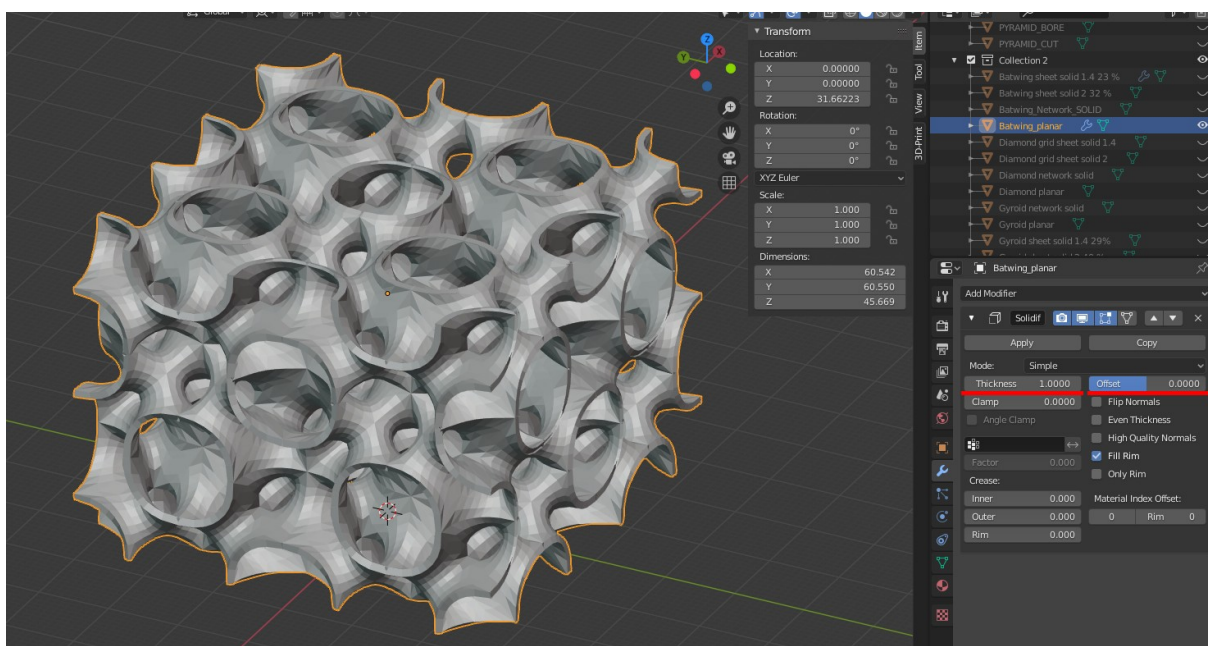
Diplomová práce EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 56: Zobrazení normálových vektorů a přepočítání jejich směru (Alt + N)

Nyní jsou všechny dvojrozměrné struktury připravené k aplikaci modifikátoru zvaného Solidify. Tento modifikátor zesiluje dvojrozměrnou stěnu právě podle směru normálového vektoru. V Object mode se zvolí modifikátor a v nastavení se zachová Mode Simple a změní se hodnota Offset na 0 a hodnota Thickness na 1, dle obrázku 57. Hodnota 1 odpovídá 1 BU tedy 1 mm. U TPMP Gyroid však hodnota Thickness neodpovídá skutečnému rozměru, neboť sinusové křivky tvořící Gyroid jsou tvořeny polygony o nízkém rozlišení. Je nutné najít hodnotu Thickness takovou, aby odpovídala skutečnému rozměru. Rozměr lze měřit nástrojem Measure na levém panelu nástrojů (ikona pravítka). Takto byla připravena blánová tělesa z trojitě periodické minimální plochy Gyroid, Diamond a Batwing o síle stěn 1,4 a 2 mm.

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



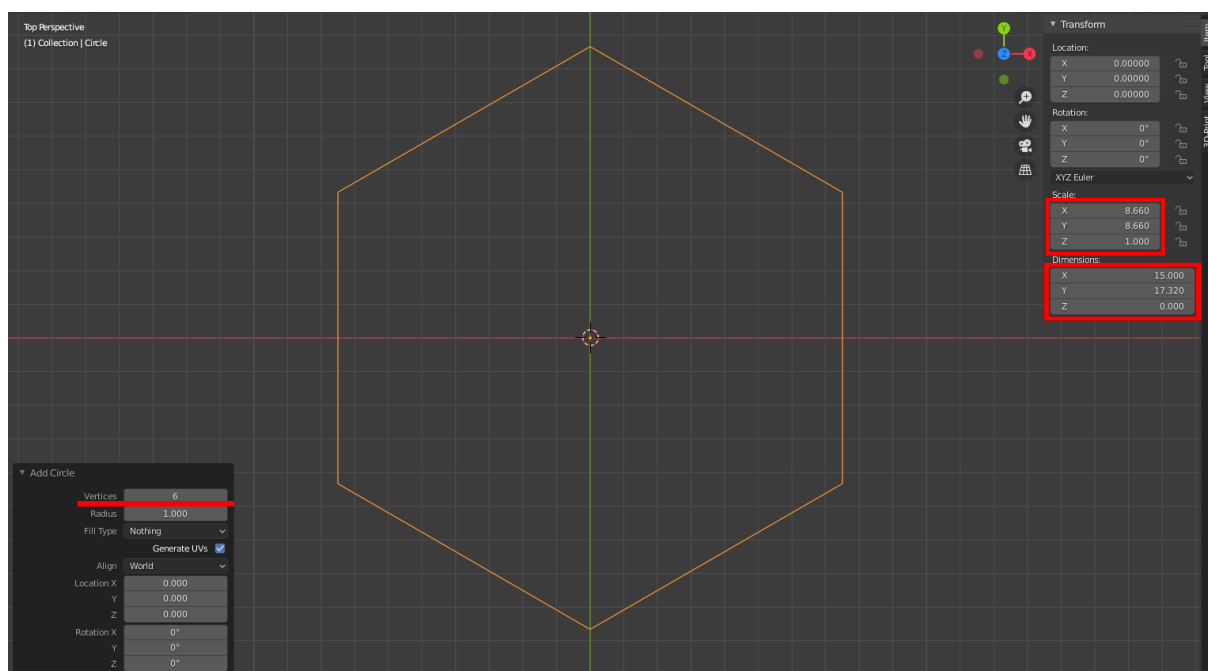
Obr. 57: Modifikátor Solidify pro zesílení stěn

Po nastavení rozměrů zesílení lze modifikátor aplikovat a výsledný model lze zduplikovat pro ořez dle forem pro výplně zkušebních těles.

Zkušební tělesa s výplní tvořenou voštinou

Voština je jednodušší tvar, lze vymodelovat v Blenderu od základu se zvolenými parametry. Začíná přepnutím do Vireframe (klávesa Z) se vložením kruhu (Shift + A; Circle) a změnou počtu vrcholů tvořící kruh, v základu je 32 vrcholů, elementární buňka voštiny je pravidelný šestiúhelník. Počet vrcholů se mění v nabídce v levém dolním rohu, okamžitě po vložení tvaru. Následuje změna velikosti šestiúhelníku. Elementární buňka má být 15 mm. Do rozměrů osy X po pravé straně náhledu se vepíše 15, tím se změní poměr strany X (Scale) v nabídce nad rozměry. Tento poměr se překopíruje do pole poměru osy Y, tím se změní i velikost osy Y právě tak, že se vytvoří pravidelný šestiúhelník, viz obrázek 58.

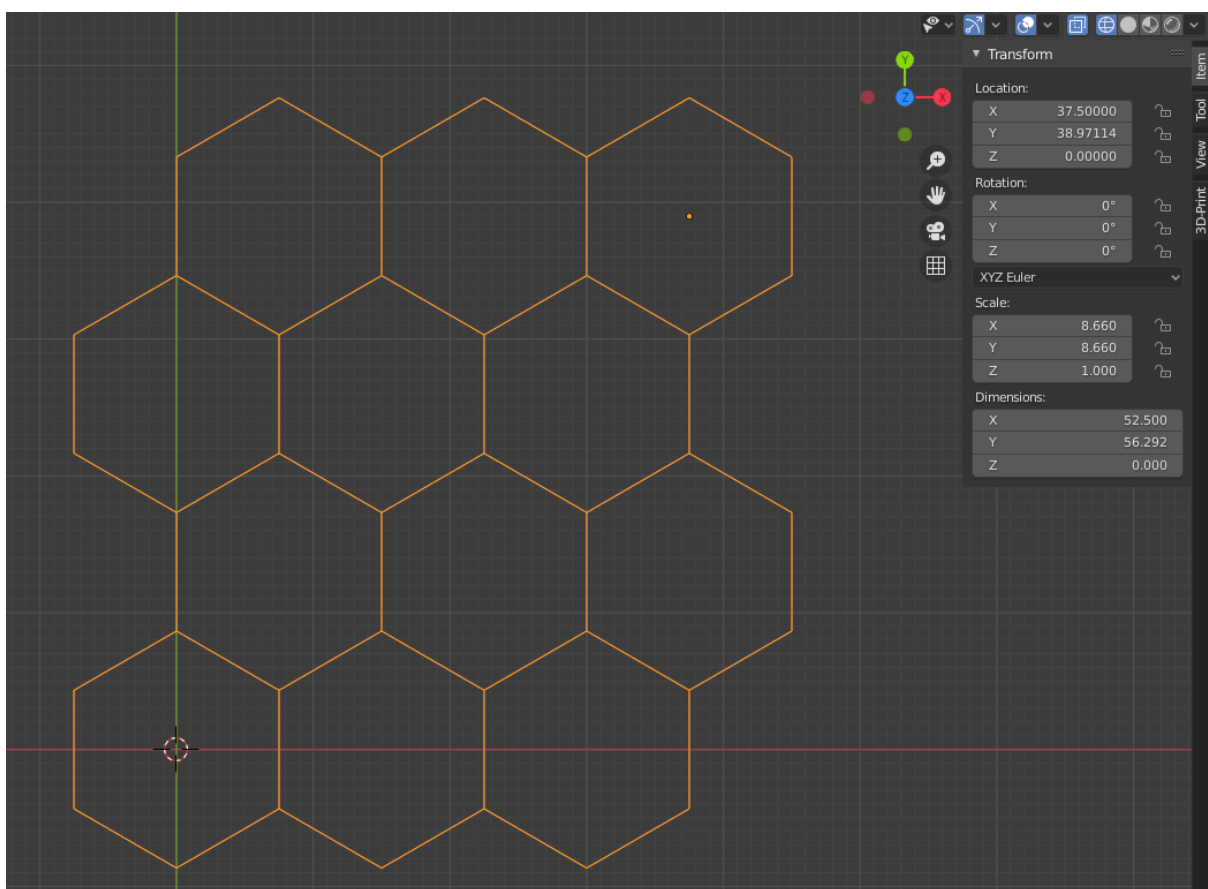
Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 58: Vytvoření pravidelného šestiúhelníku

Nyní se tento šestiúhelník duplikuje po ose X o 15 mm dvakrát po sobě tak, aby byly tři buňky v řadě (Shift + D; X; 15; Enter). Poté se označí všechny tři a sjednotí se (Ctrl + J). Následuje duplikace těchto tří buněk po ose Y. Nejdříve se však musí duplikované buňky posunout po ose X o půl délky buňky, tedy o 7,5 mm. (Shift + D; X; 7,5; Enter) Následuje posunutí po ose Y na překryv vrcholů (G; Y) tahem myši tak, aby se co nejvíce překrývaly (kolečkem myši lze přiblížit). Toto se provede ještě dvakrát, u třetí řady v ose X do opačného směru, a opět posunutí na překryv vrcholů v ose Y. Tak aby vznikly čtyři řady po třech buňkách. Nyní se všechny duplikované objekty sjednotí (Ctrl + J) a vznikne tak voština s nekonečně tenkou stěnou o rozměrech (52,5 × 56,292) mm (Obr. 59).

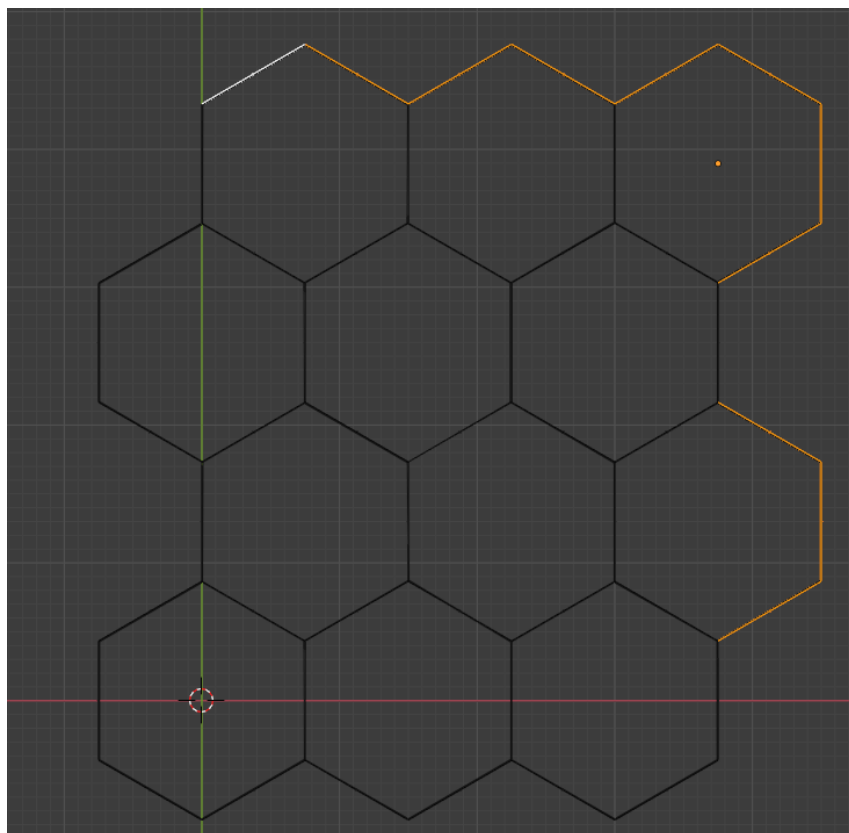
Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 59: Voština s nekonečně tenkou stěnou

Nyní se musí odstranit duplicitní vrcholy. Přepne se do Edit mode klávesou Tab a označí se vše (klávesa A). poté se z horní hlavní lišty náhledu vybere Mesh, zvolí se Clean Up a Merge by Distance. Dole v popisících operace by se mělo objevit číslo 34. Nyní je voština připravená na vytvoření výšky. Označené vrcholy se vyextrudují po ose Z do výšky 45 mm (E; Z; 45). Nyní se opět označí vše a přepočítají se normálové vektory tak, aby všechny směřovaly ven (Alt + N; Recalculate outside).

Následuje upravení rozměrů na (45 × 45 × 45) mm. V Edit mode se přepne na označování stěn (klávesa š) a označí se stěny dle obrázku 60.



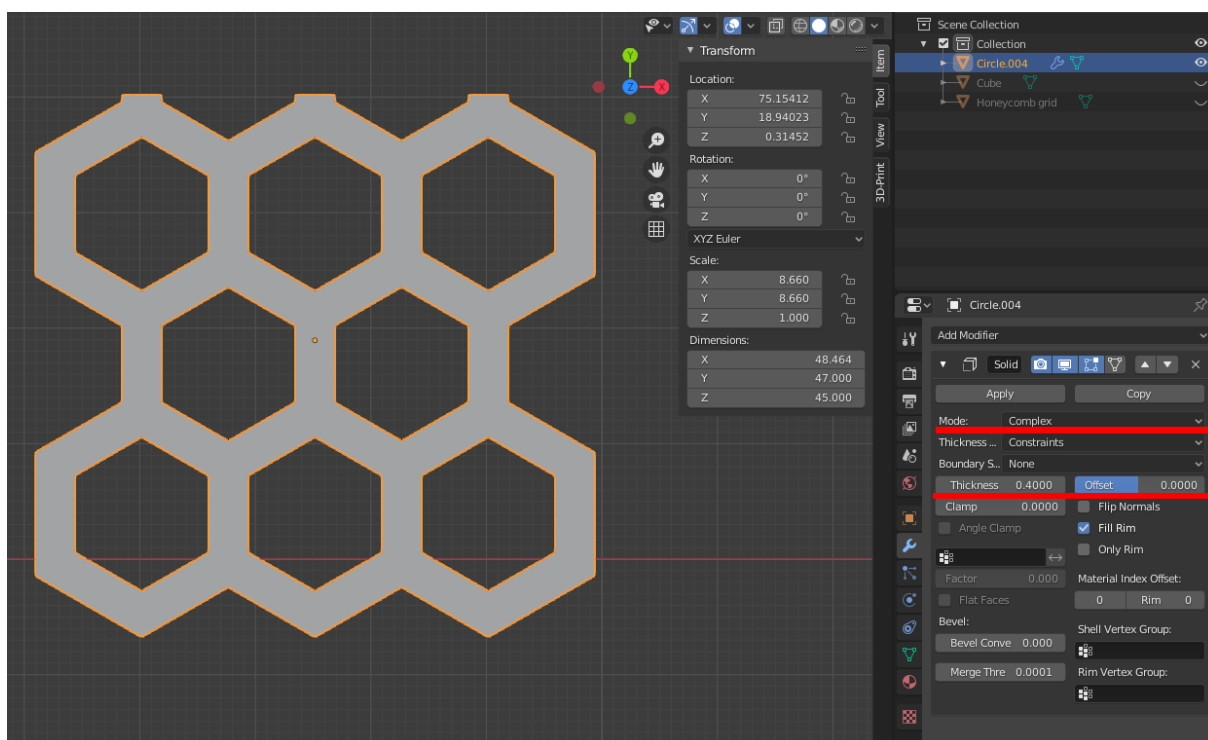
Obr. 60: Označení stěn voštiny pro upravení rozměrů

Označené stěny se odstraní (X; Delete Faces) a stěny které směřují ven z voštiny ve směru osy Y se zkrátí. V Edit mode se vybere označení hran (klávesa ě) a tyto hrany se označí a posunou v ose Y o hodnotu -6.9615 (G; Y; -6.9615).

Vzniklá struktura je připravena na zesílení stěn. K tomu se použije opět modifikátor Solidify. Klávesou Tab se přepne zpět do Object mode a zvolí se modifikátor Solidify. Zde se upraví výstupní hodnoty. Mode – Complex, Offset = 0 a thickness = 0,4. Potvrdí se tlačítkem Apply (Obr. 61). Na závěr lze přemístit Origin do středu objektu. Na hlavní liště náhledu se zvolí Object, vybere se Set Origin a Origin to Center of Mass (Surface). Tím je vytvořen výřez z nekonečné mříže voštiny. Výsledný model lze zduplikovat pro ořez dle forem pro výplně zkušebních těles. Tím jsou navržena všechna data pro následující 3D tisk.

Diplomová práce

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 61: Vytvoření konečné tloušťky stěny voštiny

2.7 Parametry 3D tisku

Pro nastavení 3D tisku sloužil software Simplify3D, který umí měnit pokročilé nastavení parametrů pro správný průběh tiskového procesu. V tabulce 3 je souhrn všech důležitých parametrů a jejich nastavení pro tisk zkušebních těles, jejichž výplň je tvořena trojitě periodickými minimálními plochami. Nastavení pro síťové a blánové struktury se liší pouze v nastavení jednoho parametru.

Tabulka 3: Parametry 3D tisku

Parametr	Nastavení
Průměr trysky [mm]	0,4
Průtok materiálu tryskou	1
Šířka extruze [mm] (automatické vyhodnocení)	0,48
Retrakce [mm]	1
Nadzvednutí při retrakci	Vypnuto
Výška vrstvy [mm]	0,15
Výška první vrstvy [%]	100

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Šířka extruze první vrstvy [%]	100
Rychlost první vrstvy [%]	100
Počet pevných vrchních vrstev	6
Počet pevných spodních vrstev	3
Počet kontur	2
Směr kontur	zevnitř ven (první vnitřní)
Dodatečná nastavení	Režim Skirt (1 vrstva, 4 kontury)
Vnitřní výplň	Linky
Vnější výplň	Linky
Procentuální zastoupení výplně [%]	100
Překryv výplně [%]	30
Šířka extruze pro výplň [%]	150
Podpory	Vypnuto
Teplota trysky [°C]	235
Teplota podložky [°C]	90
Chlazení	Vypnuto
Rychlost tisku [mm/s]	75
Rychlost tisku vnější kontury [%]	80
Rychlost tisku vnější výplně [%]	80
Průběh tisku tenkých stěn	
Síťové struktury TPMP	Vnější jednotná extruze stěn – pouze kontury
	Vnitřní jednotná extruze stěn – pouze kontury
Blánové struktury TPMP	Vnější jednotná extruze stěn – pouze kontury
	Vnitřní jednotná extruze stěn – jednotná extruze stěn (Single extrusion fill)

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Nastavení první vrstvy obsahuje své vlastní nastavení, které může být odlišné od primárního. To z toho důvodu, že první vrstva je základ pro celý tištěný objekt, zpravidla se první vrstva tiskne pomaleji než zbytek objektu, právě pro jistotu dobré přilnavosti k podložce. Podobně je tomu u snížení rychlosti vnějších stěn objektu, které má vliv na estetiku. Adheze k tiskové podložce byla zlepšena použitím kancelářského lepidla na papír. Rozdílné nastavení tisku tenkých stěn pro jednotlivá zesílení TPMP je důsledkem toho, že se blánová tělesa blíží k původní dvourozměrné struktuře, tudíž je vyžadováno zhotovení stěn o dvou až čtyřech konturách. Díky změně tohoto nastavení je tisk takto tenkých stěn bezpečnější.

K předplnění trysky před zahájením tisku objektu slouží režim Skirt. V tomto případě se jedná o jednu vrstvu čtyřech kontur vzdálenou 1 cm od objektu. Dojde tak zároveň i k vytyčení tiskové plochy, kde se bude tisknout daný objekt. Přilne-li Skirt, s největší pravděpodobností přilne i první vrstva objektu. Tím se však utvoří odpad. Následující tabulka 4 ukazuje množství odpadu na jeden proces tisku v závislosti na počtu zároveň tisknutých zkušebních těles. Procesy tisku byly vybrány náhodně.

Tabulka 4: Odpad z 3D tisku

ks	hmotnost těles [g]	hmotnost odpadu [g]	podíl hmotnosti odpadu/objektu [%]
3	23,59	0,0623	0,264
3	29,15	0,0720	0,247
1	12,97	0,0430	0,332
3	57,19	0,1145	0,200
2	38,02	0,0796	0,209
3	14,05	0,0784	0,558
2	27,32	0,0599	0,219
3	50,90	0,1062	0,209
4	115,67	0,1121	0,097
1	28,76	0,0432	0,150
3	35,72	0,0816	0,228
1	12,09	0,0401	0,332
∅		0,0744	0,254

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Z tabulky lze vidět, že hmotnost odpadu je vůči tělesu zanedbatelná a nezávislá na zaplnění tiskového prostoru a navíc se vzrůstající hmotností objektu klesá procentuální poměr odpadu ku objektu. Průměrně se odpad pohybuje okolo 0,07 g na tiskový proces.

Důležitou roli hraje i čas tisku. Přesné časy tisku jsou vyobrazeny v tabulce 5. Jedná se o časy tisku jednoho tělesa.

Tabulka 5: Časy 3D tisku jednotlivých zkušebních těles

Zkušební těleso	čas [min]
Gyroid ST válec	121
Gyroid ST kvádr	147
Gyroid ST spirála	144
Diamond ST válec	136
Diamond ST kvádr	149
Diamond ST spirála	157
Schwarz P ST válec	93
Schwarz P ST kvádr	121
Schwarz P ST spirála	122
Batwing ST válec	109
Batwing ST kvádr	135
Batwing ST spirála	151
Lidinooid ST válec	126
Lidinooid ST kvádr	126
Lidinooid ST spirála	156
Voština válec	124
Voština kvádr	147
Voština spirála	155
Gyroid BT válec 1,4 mm	130
Gyroid BT válec 2 mm	142
Diamond BT válec 1,4 mm	159
Diamond BT válec 2 mm	201
Batwing BT válec 1,4 mm	93

Diplomová práce
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Batwing BT válec 2 mm	126
Plný válec	98
Plný Kvádr	126
Plná spirála	123
Gyroid ST mříž	270
Diamond ST mříž	354
Schwarz P ST mříž	231
Batwing ST mříž	461
Lidinoïd ST mříž	465
Voština mříž	277
Gyroid BT 1,4 mm mříž	302
Gyroid BT 2 mm mříž	379
Diamond BT 1,4 mříž	376
Diamond BT 2 mříž	561
Batwing BT 1,4 mříž	338
Batwing BT 2 mříž	451
Celkový čas	23094

BT: Blánová tělesa odvozená od TPMP

ST: Síťová tělesa odvozená od TPMP

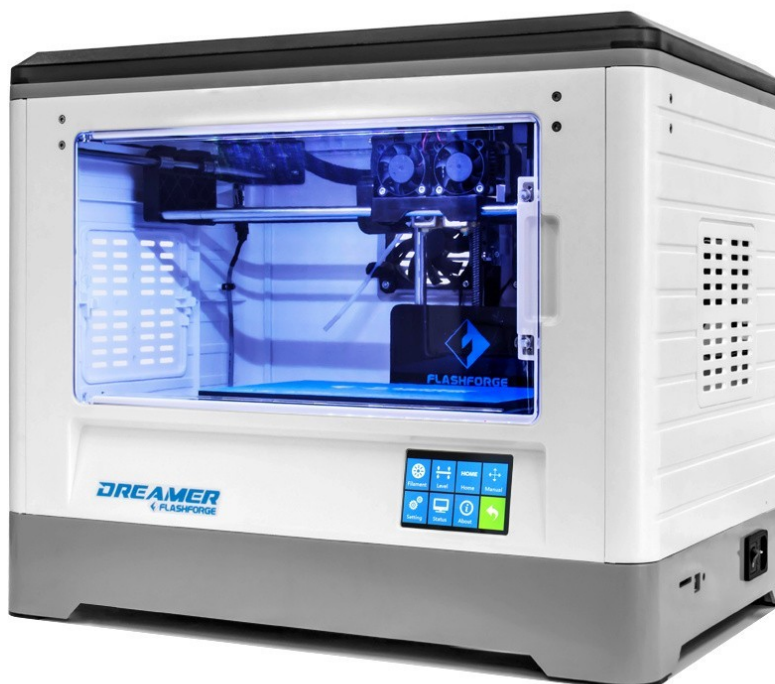
Pro urychlení průběhu tisku byl zvolen vyšší průtok materiálu tryskou při tisku výplně (150 % primární šířky extruze) a zároveň byla zvolena výška vrstvy na 0,15 mm a rychlost na 75 mm/s. Od každého času bylo odečteno 8 min pro nahřívání tiskové podložky a trysky. Každé zkušební těleso bylo vytištěno pětkrát s výjimkou mříží. Celkový čas tisku činí 23094 min, tedy 384,9 h.

Čas a rozlišení 3D tisku hrálo stěžejní roli v rozhodování o velikosti tištěných těles. Zkušební tělesa o rozměrech (30 × 30 × 45) mm a buňka o rozměrech (15 × 15 × 15) mm, respektive (30 × 30 × 30) mm představuje bezpečně tisknutelný a zároveň časově přijatelný proces 3D tisku. Z tohoto důvodu vznikla zkušební tělesa s výplněmi Batwing a Lidinoïd pod mezí periodičnosti.

2.8 3D tiskárna Flashforge Dreamer

Flashforge Dreamer (Obr. 62) představuje zástupce poloprovozních 3D tiskáren pracujících na technologii FDM/FFF. Disponuje zakrytým tiskovým prostorem, tiskovou hlavou se dvěma extrudery a vyhřívanou podložkou. Konstrukce je postavena na standardním kartézském souřadnicovém systému s podložkou jako osou Z. Tiskový prostor měří (230 × 150 × 140) mm. Trysky mají standardní rozměr 0,4 mm, minimální pohyb motorů na ose X a Y činí 0,011 mm a v ose Z je tomu 0,0025 mm. Nicméně i přes tuto přesnost pohybu je přesnost tisku $\pm 0,2$ mm oproti rozměrům modelu vzhledem k tavení materiálu. Flashforge Dreamer používá hotend typu MK10 s teflonovým vedením a je schopen vyhřívát do teploty 240 °C. Tisková podložka se dokáže vyhřát na teplotu 120 °C. Chlazení je řešeno dvěma přímými ventilátory extruderu a jedním radiálním ventilátorem, který zajišťuje chlazení vytékajícího materiálu. Dále jsou přítomny dva ventilátory na zadní straně šasi, které mají za úkol držet stabilní teplotu uvnitř boxu.

Tisk může probíhat přímo z SD karty nebo lze prostřednictvím USB či WiFi rozhraní připojit tiskárnu k počítači a spouštět tisk ze softwaru. K tisku je třeba materiál s teplotou tisku pod 240 °C ve formě struny s průměrem 1,75 mm.



Obr. 62: Flashforge Dreamer [68]

2.9 Stanovení pevnosti v tlaku

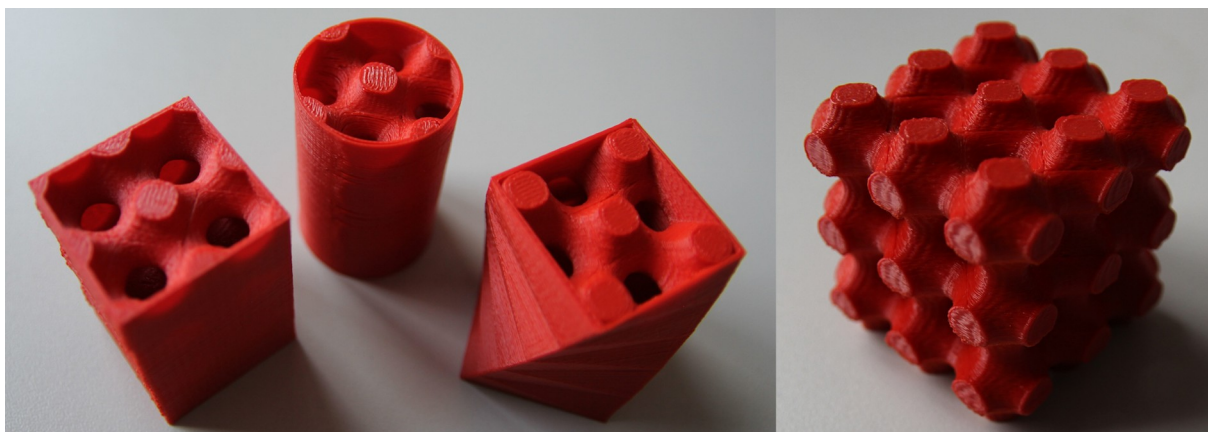
Stanovení probíhalo v prostorách Dopravní fakulty Jana Pernera, na katedře mechaniky, materiálů a částí strojů. Byl použit trhací stroj ZD 10/90 se záznamem pro PC. Maximální zatížení trhačky činí 50 kN. Upínací délka odpovídala výšce zkušebního tělesa, tedy 45 mm. Rychlost měření byla nastavena na 10 mm/min.

Od každého tělesa bylo zhotoveno pět vzorků, s výjimkou jednotlivých mříží, které byly zhotoveny po jednom vzorku. Byla zjištěna deformační křivka, ze které byly stanoveny hodnoty modulu pružnosti MPa a meze pevnosti v N. Meze pevnosti byly přepočítány na MPa a vztaženy na procentuální objemové zastoupení jednotlivých výplní. Dále byly určeny měrné meze pevnosti, které reprezentují meze pevnosti jako plný materiál. Na základě měrných mezí pevnosti lze stanovit poměr pevnosti vůči plnému tělesu.

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

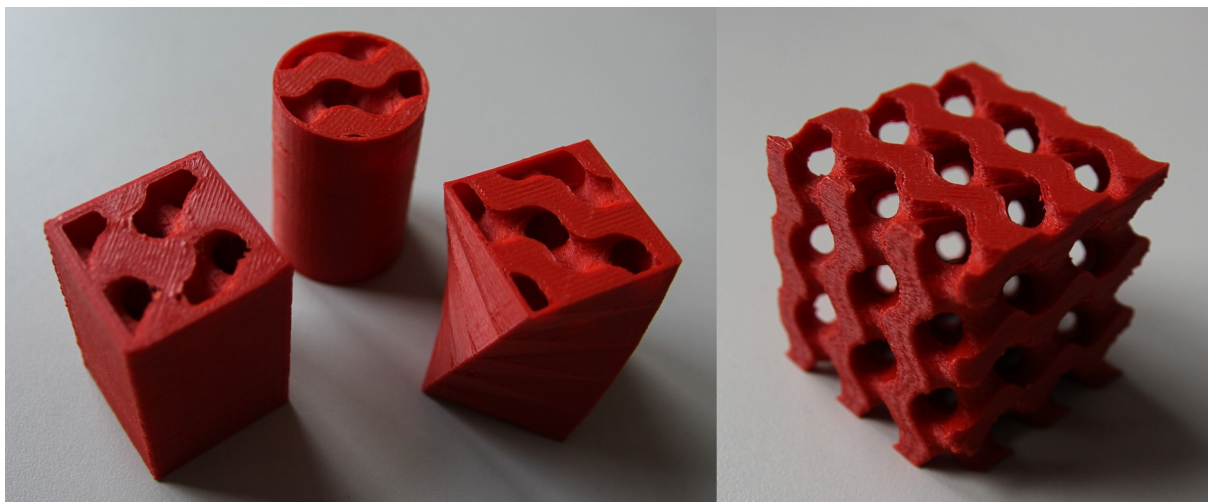
3.1 Pevnost v tlaku síťových výplní, průběhy deformací

3D tiskem byla zhotovena zkušební tělesa pro zkoušku v tlaku ve tvaru kvádrů, válce a kvádrů stočeného do spirály. Tělesa byla vyplněna síťovými strukturami odvozenými od minimálních ploch Schwarz P, Gyroid, Diamond, Batwing a Lidinoid. Jako referenční výplň sloužila voština a všechny typy výplní byly poměrově srovnávány s plnou výplní. Všechny zkušební vzorky byly zhotoveny v sadě po pěti kusech. Kolem výplně každého tělesa byla obálka s šířkou stěny 0,8 mm, tedy dvě tištěné kontury. Rozměry těles jsou (30 × 30 × 45) mm a rozměry mříží činí (45 × 45 × 45) mm v případě Schwarz P, Gyroid a Diamond a (60 × 60 × 45) mm v případě Batwing a Lidinoid. Na obrázcích 63–69 jsou fotografie všech 3D tištěných těles vyplněných síťovými strukturami a výřezů z nekonečné mříže včetně voštiny a plného tvaru před deformací.

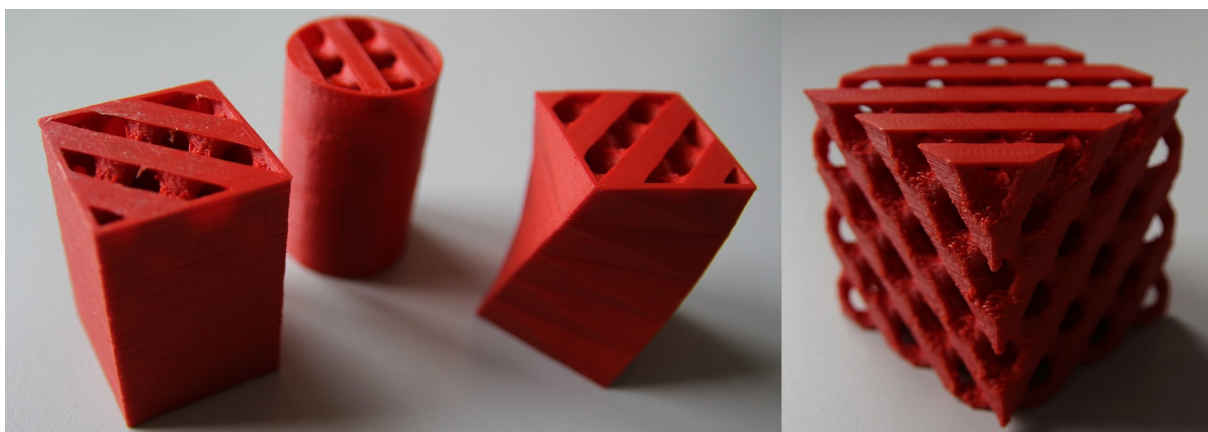


Obr. 63: Schwarz P síťové těleso

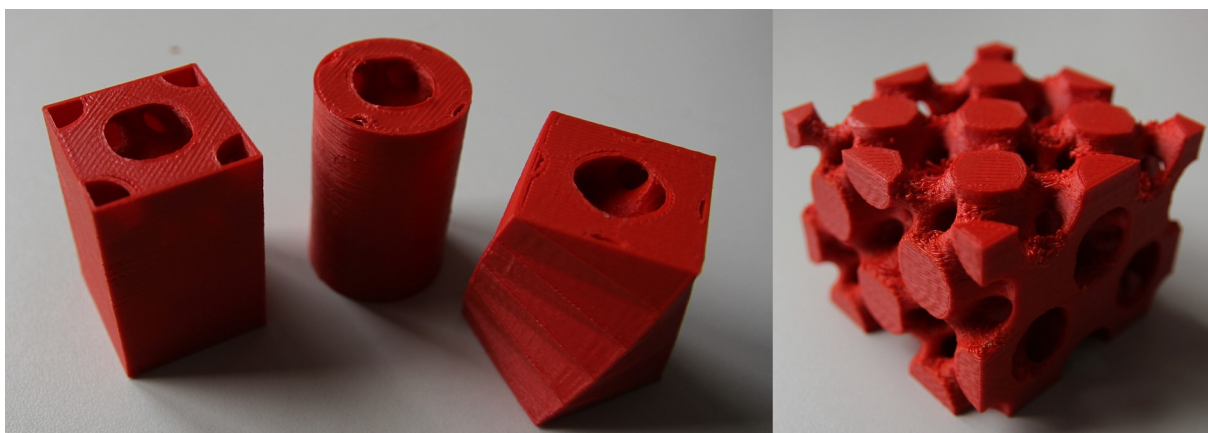
Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr. 64: Gyroid síťové těleso

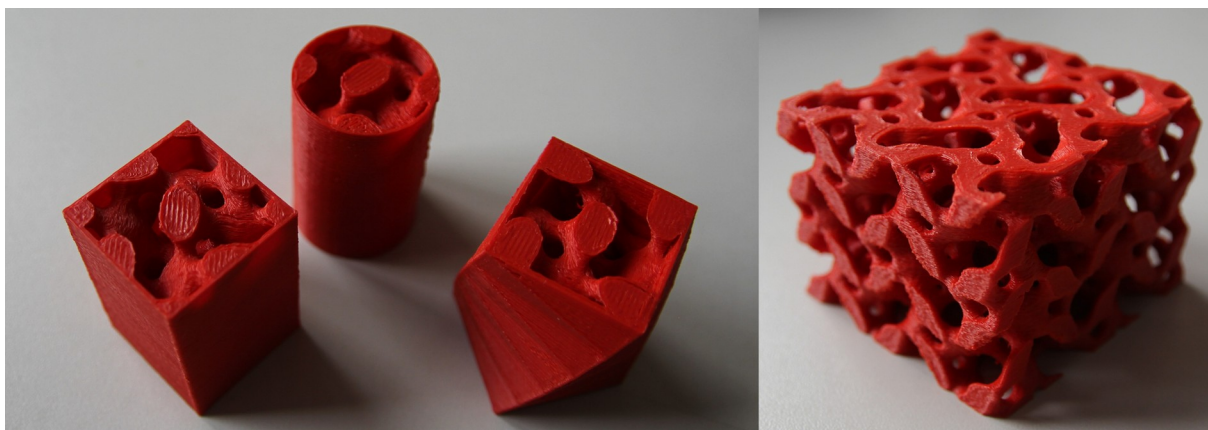


Obr. 65: Diamond síťové těleso

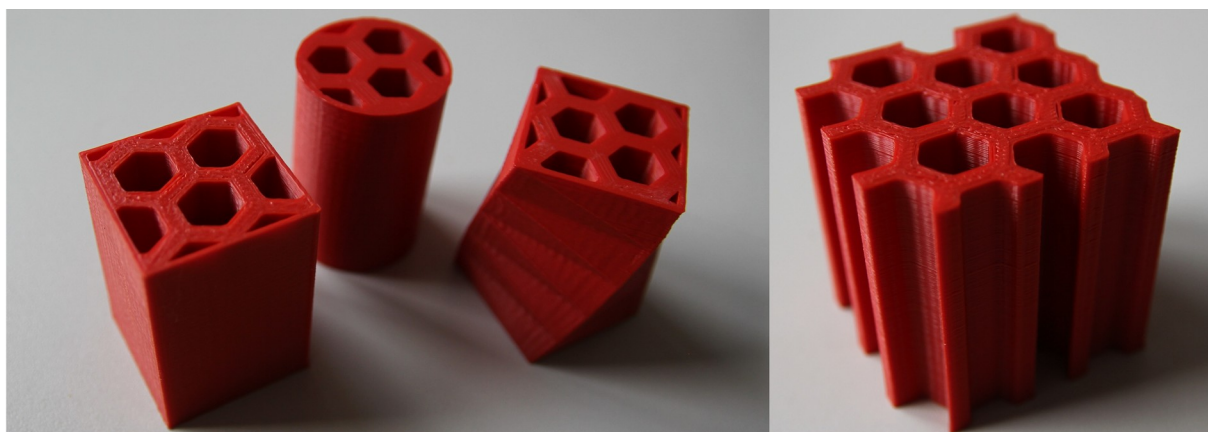


Obr. 66: Batwing síťové těleso

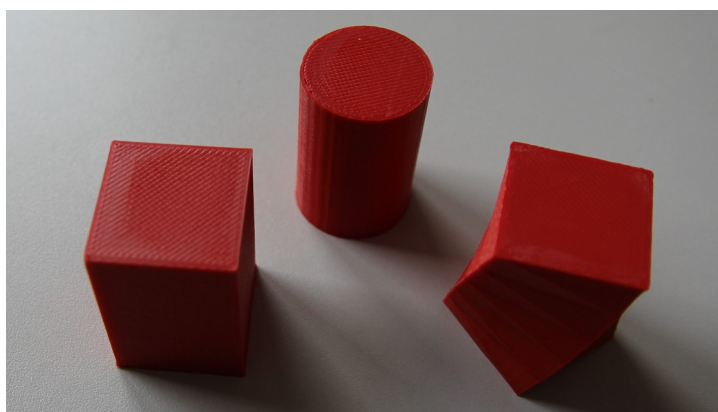
Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr. 67: Lidinoid síťové těleso



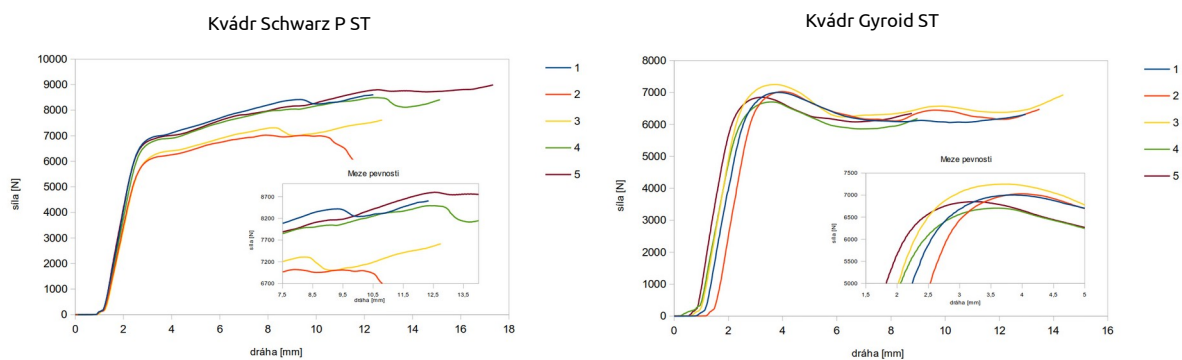
Obr. 68: Voština



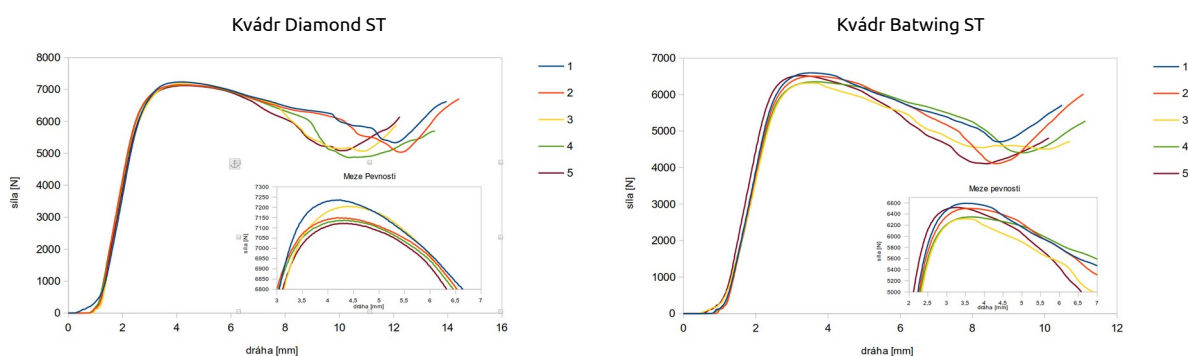
Obr. 69: Plné tvary

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

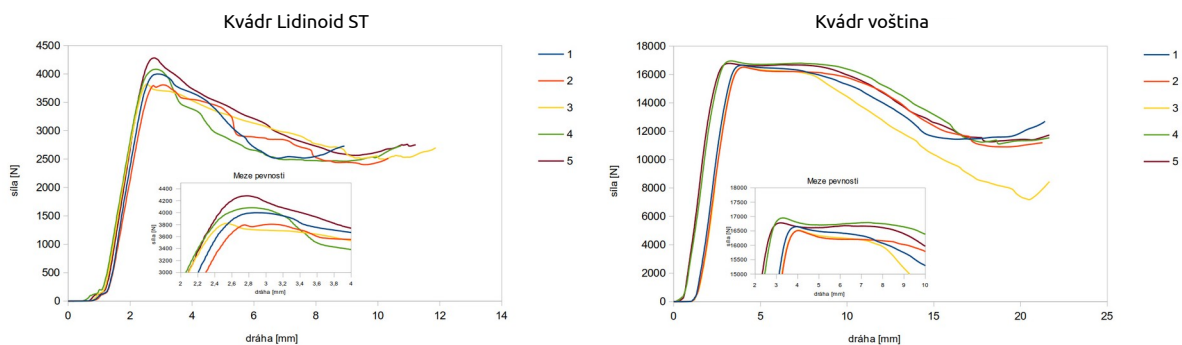
Na obrázcích 70–73 následují grafy deformačních křivek zkoušky v tlaku kvádrových těles vyplněných síťovými tělesy z TPMP, voštinou a plné tvary.



Obr. 70: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků kvádr Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo)

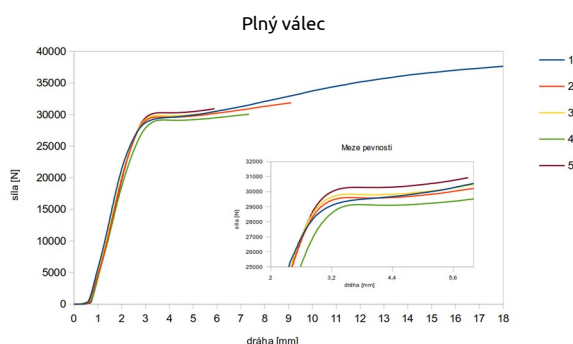


Obr. 71: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků kvádr Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo)



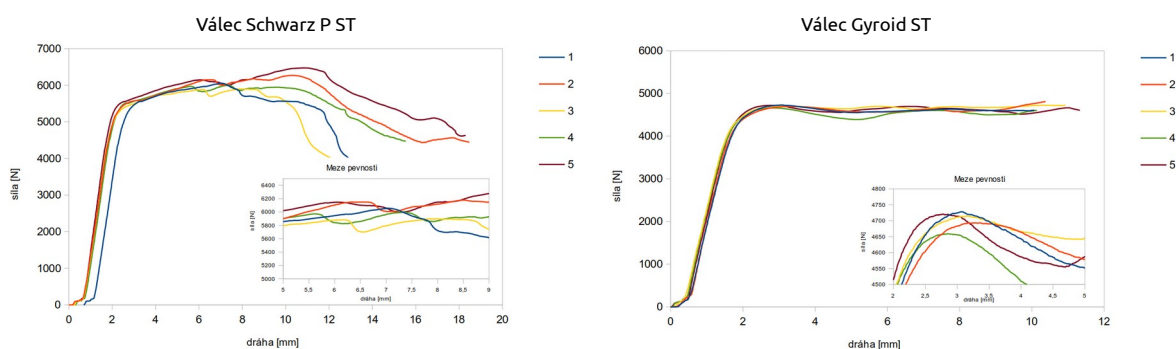
Obr. 72: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků kvádr Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo)

Diplomová práce VÝSLEDKY A DISKUZE

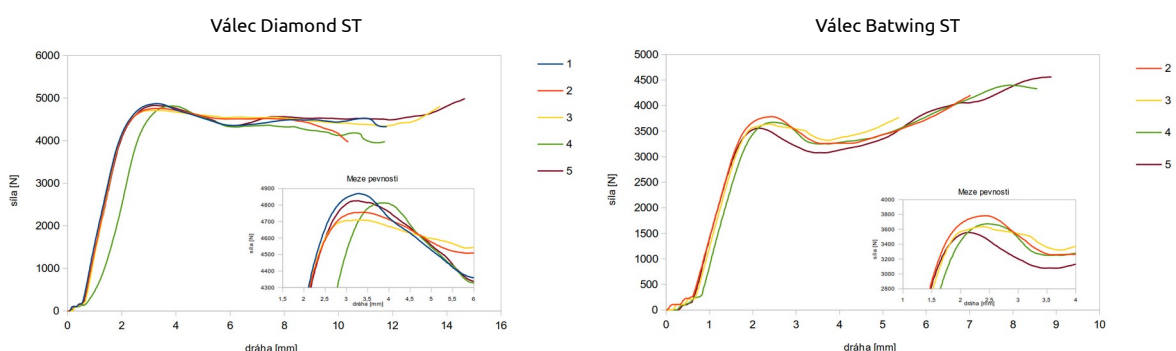


Obr. 73: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušební vzorku plný kvádr

Další v pořadí jsou zkušební vzorky válcového tvaru vyplněné síťovými tělesy, voštinou a plné tvary. Tahové křivky jsou na obrázcích 74–77.

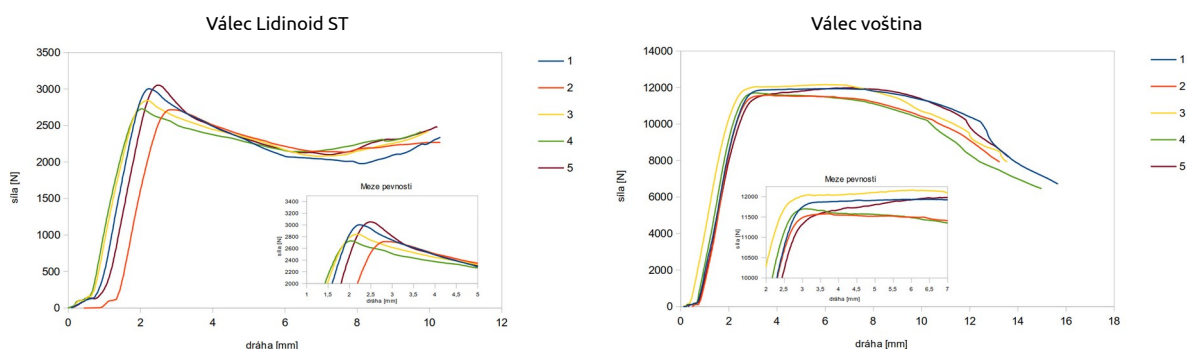


Obr. 74: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo)

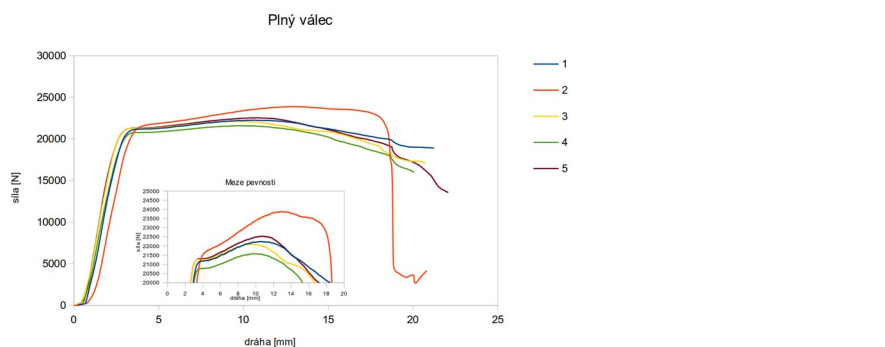


Obr. 75: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo)

Diplomová práce VÝSLEDKY A DISKUZE

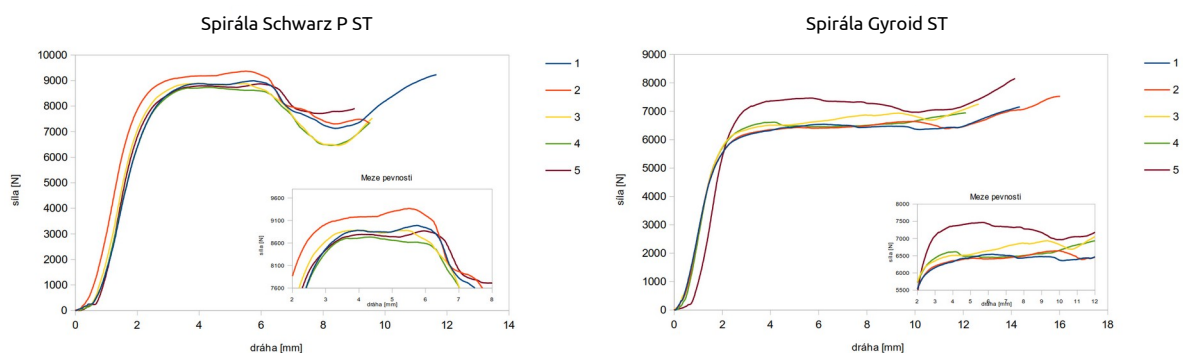


Obr. 76: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo)



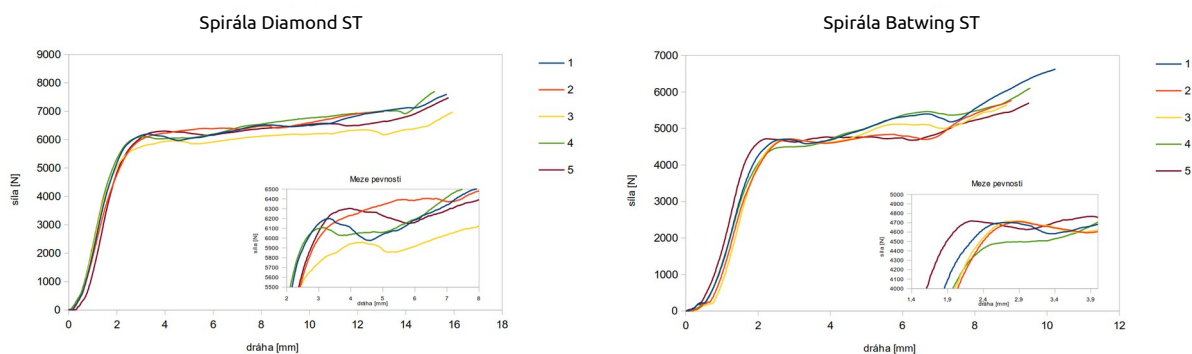
Obr. 77: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebního vzorku plný válec

Posledním tělesem vyplněným síťovými tělesy odvozenými z TPMP je kvádr stočený do spirály. Následující obrázky 78–81 ukazují deformační křivky jednotlivých vzorků s různými výplněmi.

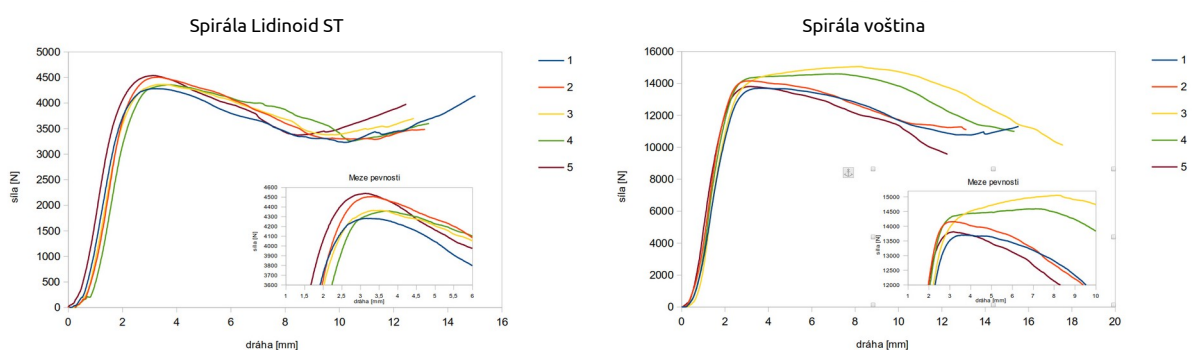


Obr. 78: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků spirála Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo)

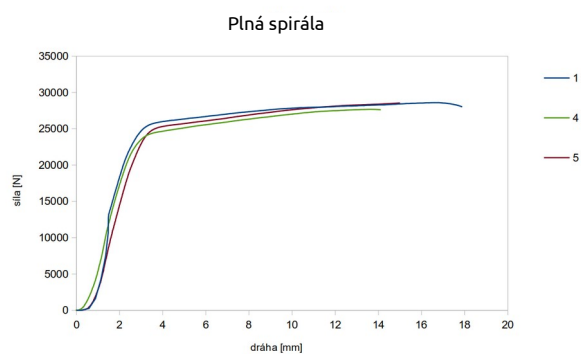
Diplomová práce VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr. 79: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků spirála Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo)



Obr. 80: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků spirála Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo)

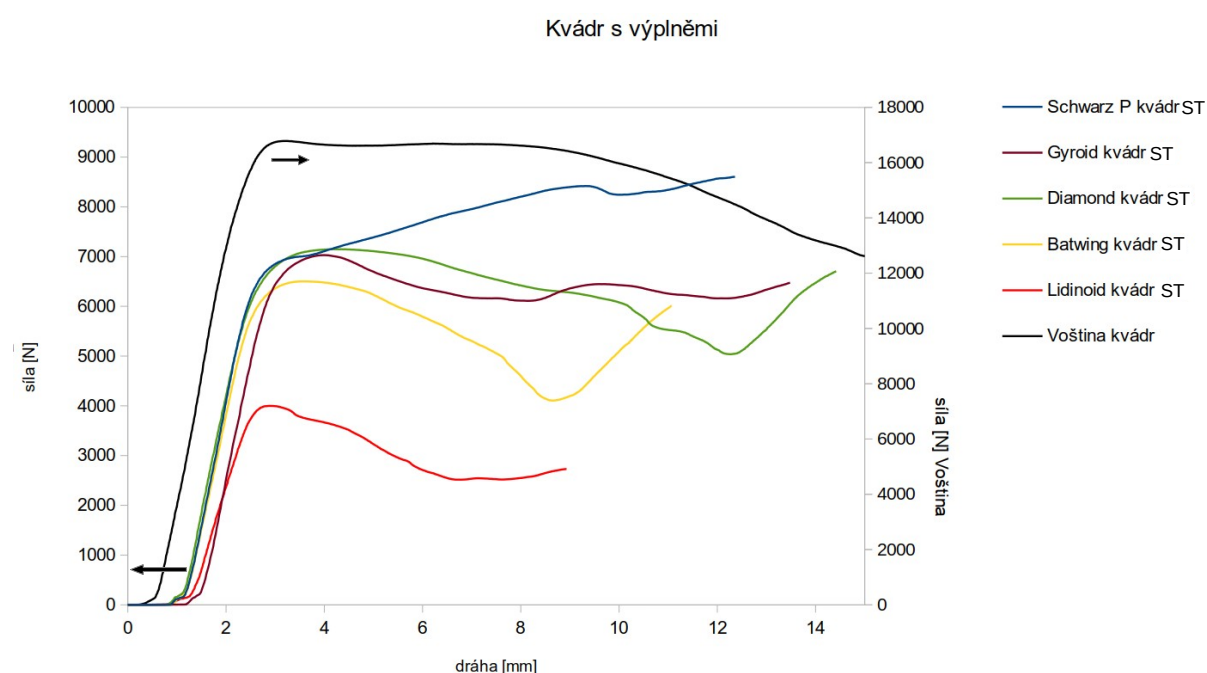


Obr. 81: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebního vzorku plná spirála*

*Technická chyba při měření (vzorek 2 a 3)

Všechny výše uvedené grafy znázorňují měření sady pěti zkušebních vzorků. Z každého grafu byla vybrána reprezentativní křivka a sestrojen hromadný graf pro každý tvar zkušebního tělesa (Obr. 82). V grafu je voština přiřazena k sekundární ose a plný tvar je vzhledem k měřítku úplně vynechán.

3.1.1 Zkušební tělesa tvaru kvádru



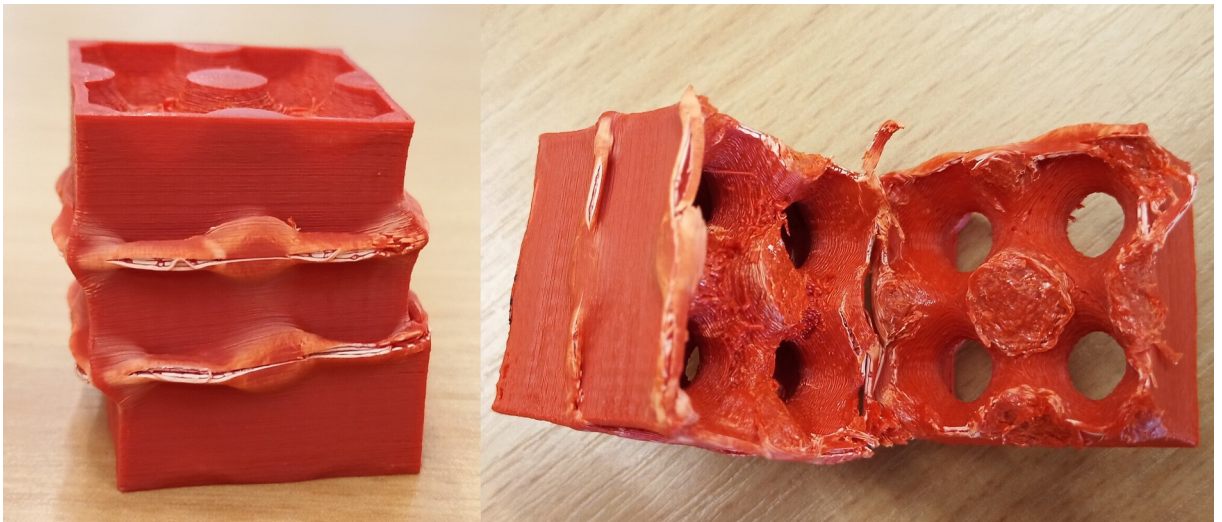
Obr. 82: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru kvádru, jednotlivé křivky odpovídají síťovým tělesům tvořících výplň

Z grafu lze vyčíst meze pevnosti jednotlivých výplní a lze si povšimnout dvou extrémů a to výplně Lidinoid, jako výplně s nejmenší silou potřebnou k porušení vzorku a výplně voština jako výplně s největší silou potřebnou k porušení vzorku. Zbylé výplně mají poté podobnou mez pevnosti.

Důležitější závěr z grafu než samotné meze pevnosti jsou průběhy jednotlivých křivek. Jedná se o reakci struktur na zatížení. Například křivka výplně Schwarz P jeví při své deformaci rostoucí průběh. Síťové těleso Schwarz P tvoří pilíře spojené do mříže v uzlových bodech, jednotlivé příčné, podélné a svislé spojnice tvoří vlivem minimalizace plochy krčky. Můžeme si povšimnout meze kluzu po překonání meze pevnosti v důsledku prvního prasknutí krčků. Poté se struktura deformuje v krčcích ve vzpěru smykem (Obr. 83 – vlevo), kde se jednotlivé uzlové body posouvají do

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

spodních sousedních meziuzlových volných míst, což vede ke zpevnění celé struktury, tudíž k nárůstu potřebné síly k další deformaci. U jednoho vzorku bylo pozorováno i úplné porušení vzorku smykem (Obr.83 – vpravo). Tento průběh byl pozorován i v případě deformace výřezu z prostorové mříže (Obr.84), jejíž průběh byl natočen a záznam je přiložen na médiu.

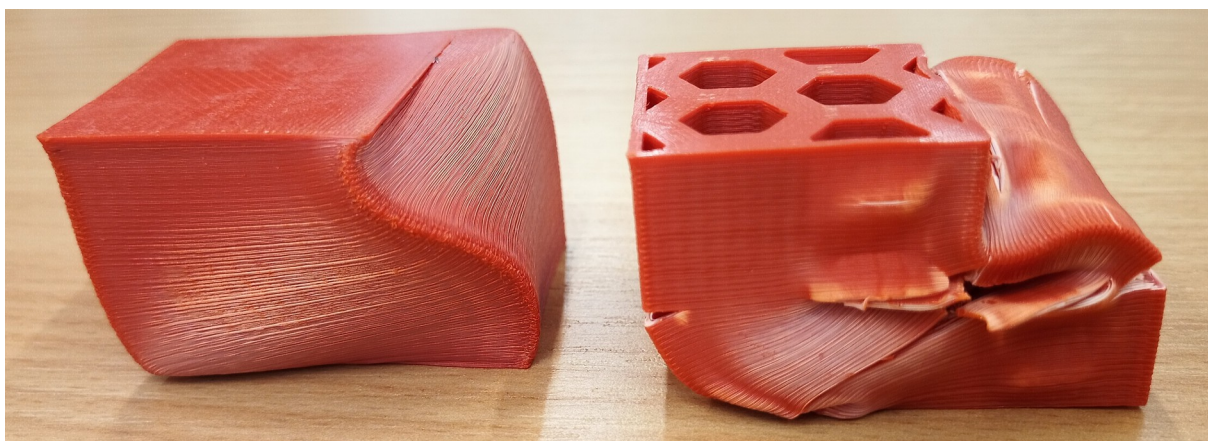


Obr. 83: Deformace ve vzpěru smykem zkušebního tělesa Schwarz P ST kvádr



Obr. 84: Deformace ve vzpěru smykem výřezu z mříže Schwarz P ST

Voština představuje ideální výplň pro namáhání v tlaku. Nejpevnější podpora pro namáhání tlakem je pilíř, v případě voštiny jsou tyto pilíře propojené do navazujících šestiúhelníků. Jedná se o nejlepší a nejjednodušší výplň z hlediska podpěry vůči silovému namáhání v tlaku. V tomto případě lze sledovat konstantní působící sílu do 8 mm deformace. Poté se začne zkušební těleso deformovat opět ve vzpěru, tentokrát však zřetelně do tvaru písmene „S“, velmi podobně jako plný kvádr (Obr. 85).

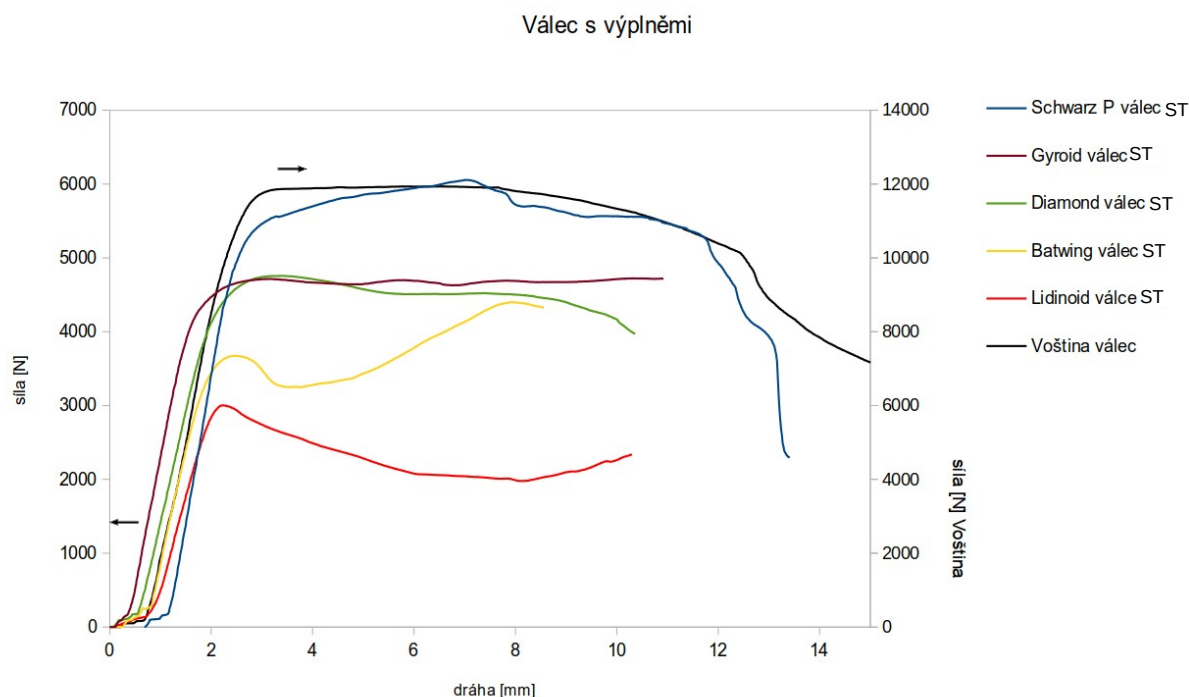


Obr. 85: Deformace zkušebních těles plný kvádr (vlevo) a voština kvádr (vpravo)

Zajímavé chování vykazuje výplň Gyroid, kdy po překonání meze pevnosti dochází jen k mírnému poklesu síly potřebné k další deformaci. Avšak i po přerušení krčků vzniklých odvozením síťového tělesa se působící síla dále rovnoměrně roznáší na zbylé krčky, tudíž lze pozorovat opět nárůst síly potřebné k deformaci.

Diamond vykazuje pozvolné klesání síly potřebné k další deformaci vzhledem k pravidelnému porušování krčků, podobně jako u výplní Batwing a Lidinoid. Po dosažení určité deformace se jeví opět nárůst, způsobený porušením všech krčků a dalším přibližováním čelistí se jen materiál lisuje na sebe. Fotografie ostatních kvádrových zkušebních těles a průběhy deformací samostatných mříží jsou přiloženy na médiu.

3.1.2 Zkušební tělesa tvaru válce



Obr. 86: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru válce, jednotlivé křivky odpovídají síťovým tělesům tvořících výplň

Z grafu na obrázku 86 je opět parná nejnižší mez pevnosti u výplně Lidinoid a nejvyšší u výplně voština. Schwarz P zde vykazuje nejvyšší pevnost ze struktur vycházejících z minimálních ploch. Jsou tu vidět zajímavé průběhy deformace u výplní Gyroid a Diamond a lze si povšimnout podobnosti tlakových křivek u výplně Schwarz P a voština.

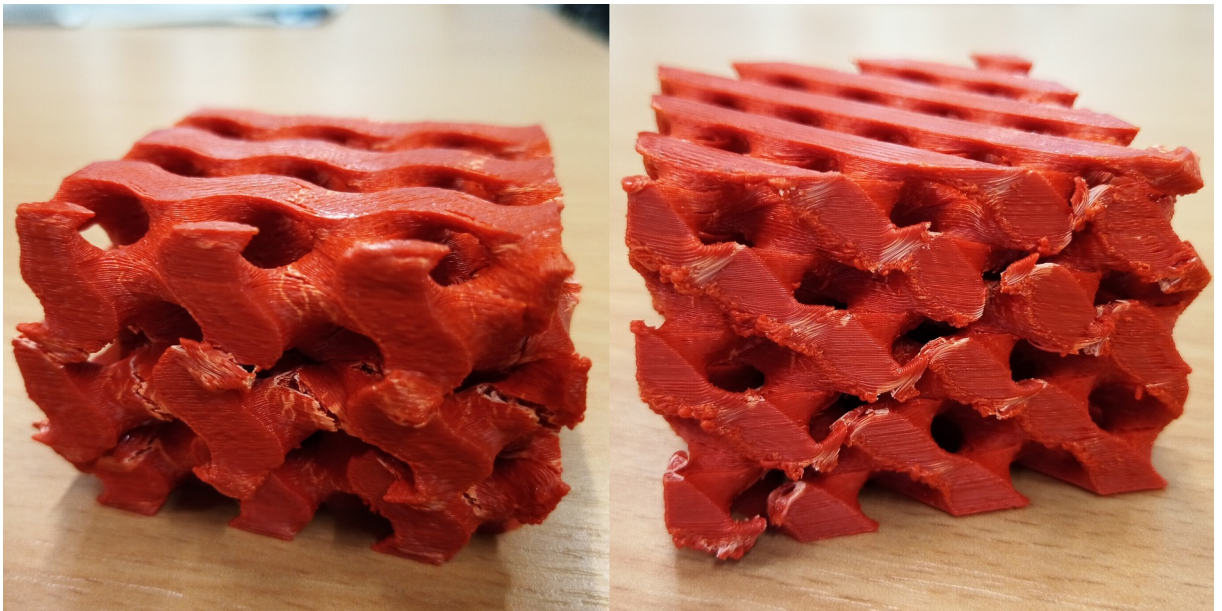
Pozoruhodné chování jeví výplně Gyroid a Diamond, kde je průběh křivky prakticky neměnný se vzrůstající deformací. Deformační síla je konstantní při přibližování kleští. Působící síla je ještě lépe rovnoměrně roznášena na zbývající krčky než v předchozím případě. Na obrázku 87 jsou fotografie ukazující deformaci v tlaku válcových těles vyplněných strukturami Gyroid (vlevo) a Diamond (vpravo). Další obrázek 88 ukazuje deformaci smykem jednotlivých výřezů z nekonečné mříže. Vyplněné svíslé sinusovky v případě výplně Gyroid se smykem posouvají do sousedních dutin. V uzlových místech, kde se stýkají sinusovky náležící do všech os, se tvoří krčky, které praskají přednostněji a oslabují tak celou strukturu.

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

V případě výplně Diamond je situace velmi podobná. Z obrázku 88 vpravo lze vidět diagonální sesuv způsobený deformací ve smyku. Na styku diagonálních příček se opět tvoří krčky, které se porušují přednostně.



Obr. 87: Deformace zkušebních těles Gyroid ST válec (vlevo) a Diamond ST válec (vpravo)

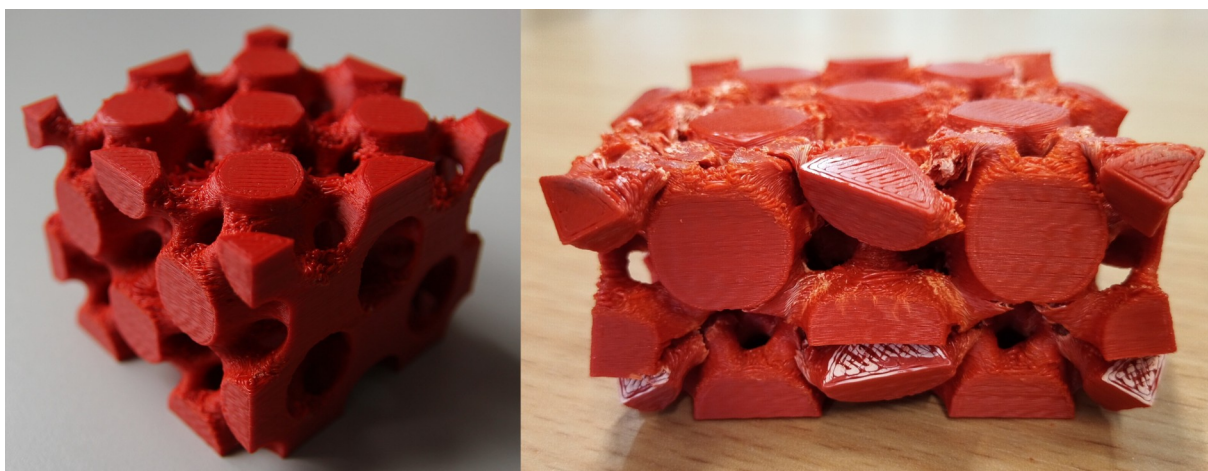


Obr. 88: Deformace výřezů mříží Gyroid ST (vlevo) a Diamond ST (vpravo)

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

U voštiny je průběh po překonání elastické deformace nejprve konstantní, poté mírně klesající, u Schwarz P lze vyčíst opět nárůst síly potřebné k další deformaci. Situace je podobná předchozímu případu deformací kvádrových těles, uzlové body struktury Schwarz P se deformují smykem a podsouvají se do meziuzlových vakancí. Voština se opět deformuje ve vzpěru do tvaru „S“ velmi podobně jak je tomu u plného tělesa.

Deformační průběh výplně Batwing zde vykazuje tendenci ke dvěma maximům, což se dá vysvětlit právě jeho tvarem. Při návaznosti opakujících se buněk v ose Z se utvoří slabé místo, které praskne přednostněji než krčky uprostřed opakující se buňky, jak je vidět na obrázku před deformací (Obr. 89 – vlevo). První maximum tedy odpovídá prasknutí krčků v místě návaznosti, druhé maximum bylo prasknutí krčků uvnitř opakující se buňky, jak je vidět z obrázku 90, – dvě zřejmá místa deformace. Z obrázku 89 – vpravo je i patrná delaminace tištěných vrstev na krajích objektu. Vlivem deformace krčků v ohybu se natahují vyplněné plochy, které se delaminují. Všechny fotografie deformací válcových těles a průběhy deformací výřezů mříží jsou k dispozici na přiloženém médiu.



Obr. 89: Batwing ST mříž před deformací (vlevo) a po deformaci (vpravo)

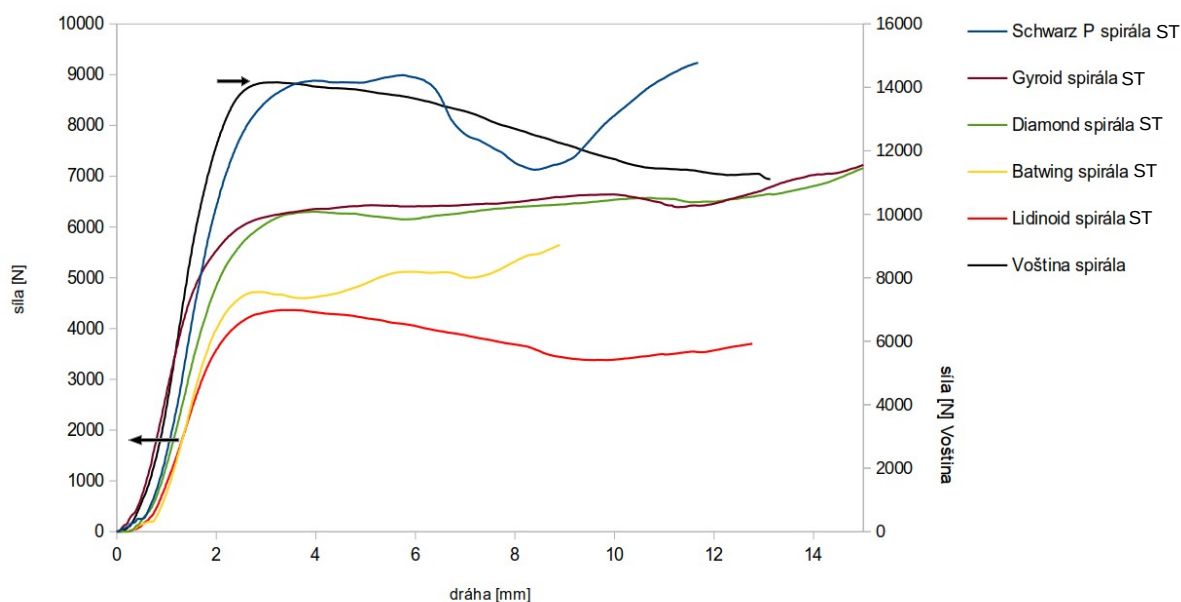
Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr. 90: Deformace zkušební tělesa Batwing ST válec

3.1.3 Zkušební tělesa tvaru spirály

Spirála s výplněmi



Obr. 91: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru spirály, jednotlivé křivky odpovídají síťovým tělesům tvořících výplň

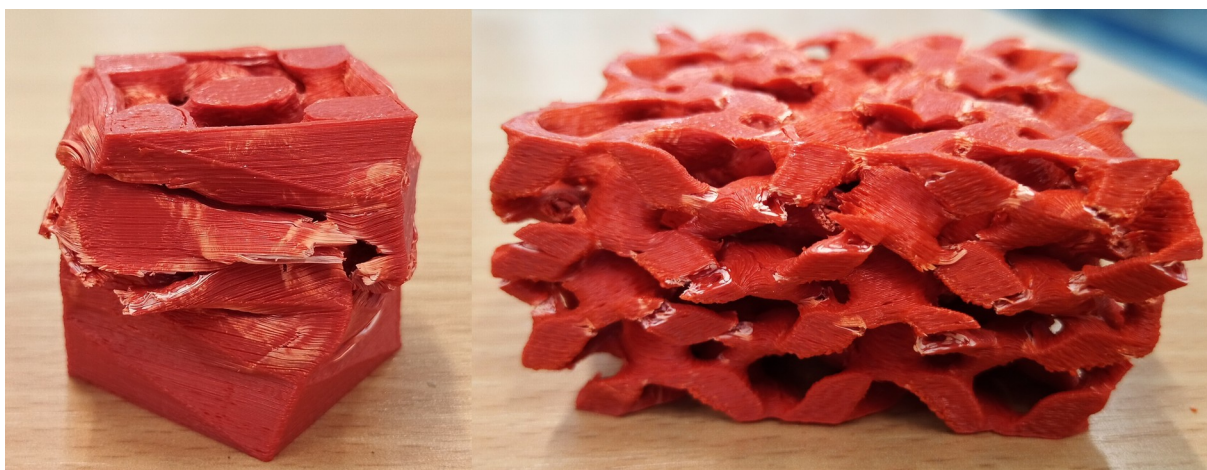
Z tohoto grafu (Obr. 91) opět vychází stejné extrémy v podobě voštiny a výplně Lidinoid a Schwarz P opět vykazuje nejvyšší mez pevnosti ze všech struktur odvozených od TPMP. Gyroid a Diamond vykazují opět konstantní sílu při zvětšování

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

deformace. Náhlý propad síly u výplně Schwarz P při cca 7 mm deformace je způsoben opět smykem deformací ve vzpěru. S výškou spirály se mění rotace segmentů spirály a výplň se přizpůsobuje podle nich. Mění se tedy periodičnost s výškou. Tím jsou pilíře, které Schwarz P tvoří, neúplné.

Tento fakt se však u výplní Gyroid a Diamond neprojevil a situace je téměř shodná s předchozím případem, kdy je deformační síla s rostoucí deformací konstantní, zde dokonce mírně stoupající.

Důležité je zmínit výplně Batwing a Lidinoid, které obsahují pouze jednu opakující se buňku, tudíž se nachází pod periodičností a nemají tak sousední buňky, které by pomáhaly roznášet působící sílu. Tím je struktura daleko více náchylná na nepřesnosti 3D tisku. Tuto skutečnost lze považovat za chybu, která se opakuje v průběhu celého měření. Je však příkladem toho, jak se liší pevnost periodických struktur pod mezí periodičnosti a nad ní. Zatímco se zbylé struktury deformují ve vzpěru, výplň Lidinoid i Batwing měli tendenci se deformovat do stran skrz stěnu tělesa, viz obrázky 92 a 93. Ještě zřetelnější je případ válcového tělesa s výplní Batwing (Obr. 90).

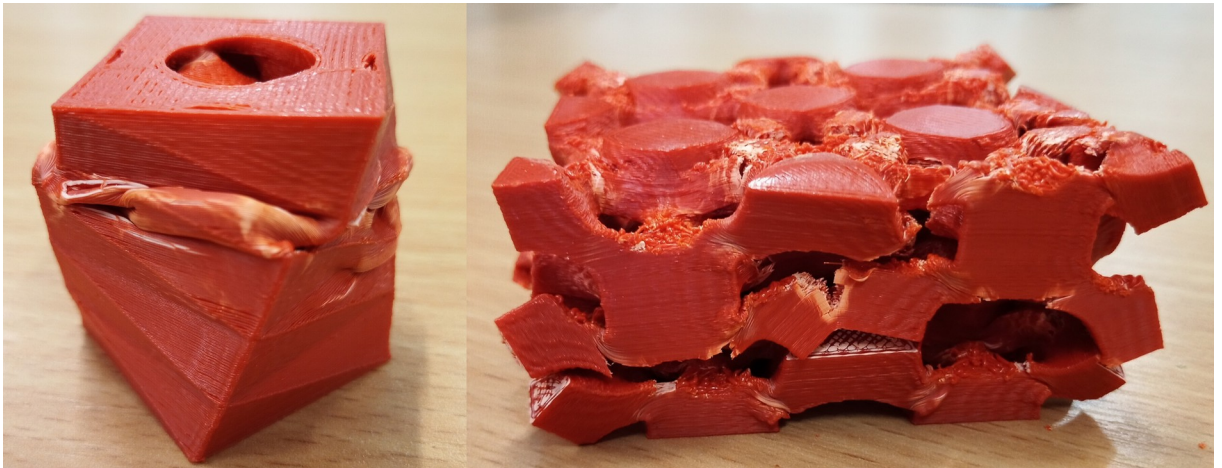


Obr. 92: Deformace zkušebního tělesa Lidinoid ST spirála (vlevo) a Lidinoid ST mříže (vpravo)

V případě spirálovitého tvaru je buňka těchto výplní v některých místech neúplná. Výplň Lidinoid stále vykazuje pokles síly s deformací. Jeho nevýhodou je utvoření mnoha slabých krčků vlivem odvození síťového tělesa, které snadno praskají. Výplň Batwing jeví dvě maxima, podobně jako v předešlém případě.

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

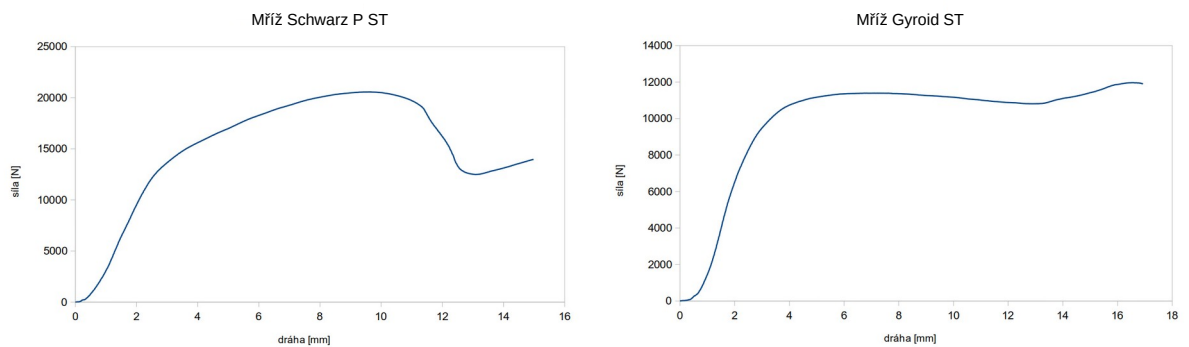
Kompletní fotodokumentace včetně videozáznamů z průběhů deformací jednotlivých mříží je přiložena na médiu. Voština se opět deformuje do tvaru písmene „S“, stejně jako plné těleso.



Obr. 93: Deformace zkušebního tělesa Batwing ST spirála (vlevo) a Batwing ST mříže (vpravo)

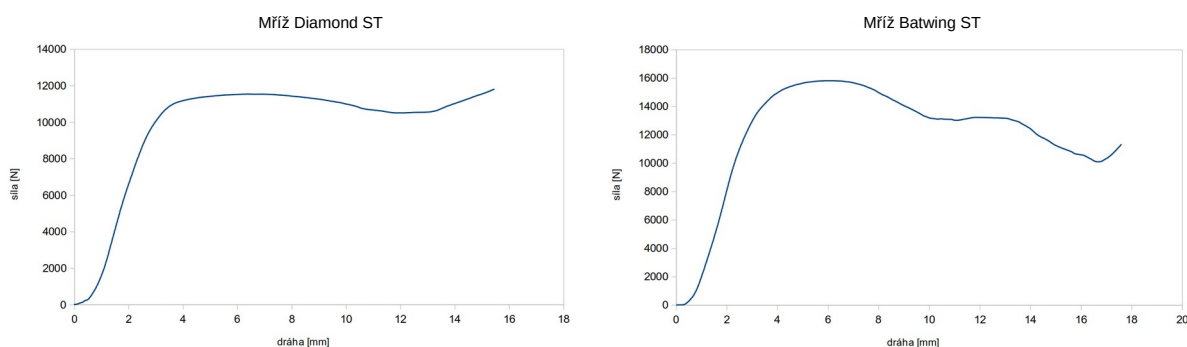
3.1.4 Zkouška v tlaku výřezů z nekonečných mříží síťových těles a voštiny

Na následujících obrázcích 94–96 jsou znázorněné deformační křivky jednotlivých síťových struktur a voštiny.

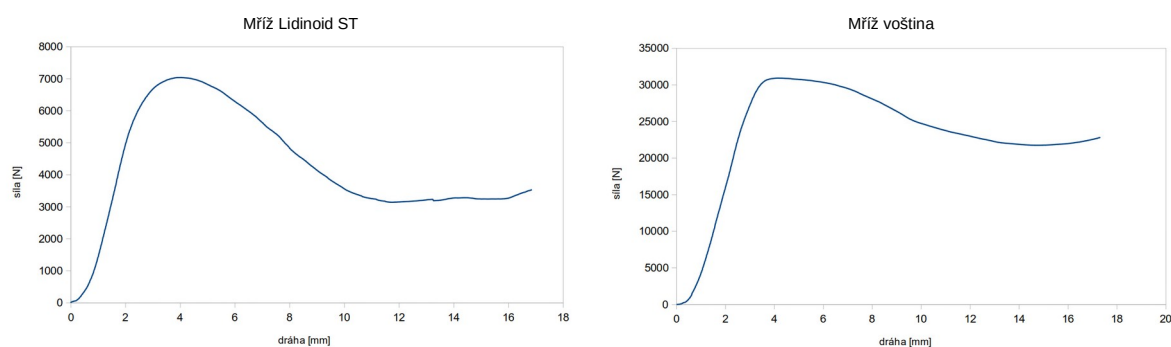


Obr. 94: Deformační křivky výřezů mříží Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo)

Diplomová práce VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr. 95: Deformační křivky výřezů mříží Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo)



Obr. 96: Deformační křivky výřezů mříží Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo)

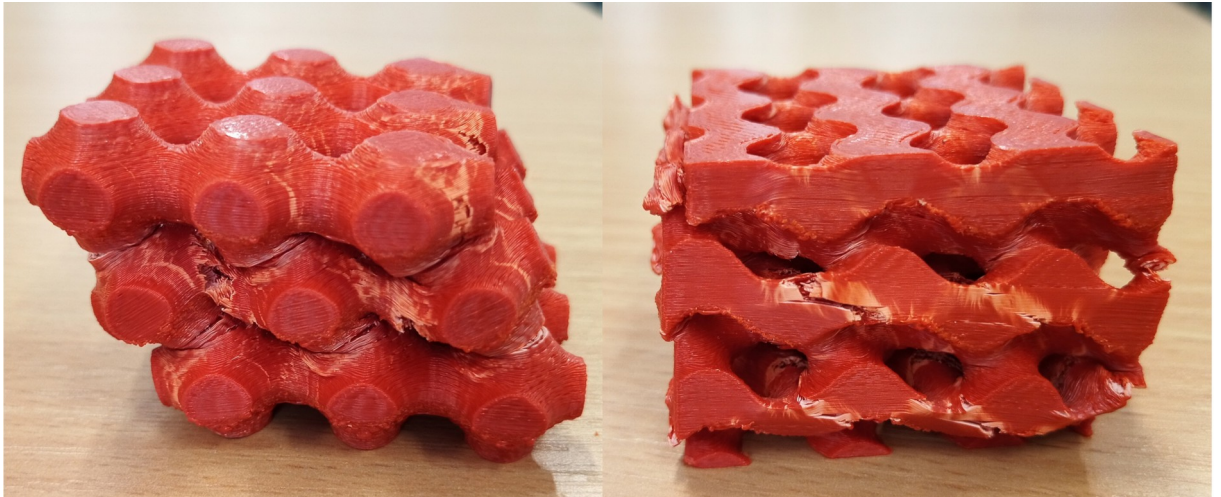
Z grafů si lze povšimnout opět voštiny jako výplně s nejvyšší hodnotou meze pevnosti, která se deformuje ve vzpěru nejzřetelněji, do tvaru písmene „S“ a výplně Lidinoid jako zástupce s nejnižší hodnotou meze pevnosti. Nejvyšší hodnotu ze síťových těles odvozených od TPMP vykazuje Schwarz P.

Zajímavý výsledek vyšel u výplně Batwing. Mez pevnosti této výplně převyšuje mez pevnosti výplní Gyroid i Diamond. V případě mříže zde narostla periodičnost, a i když byla v případě zkušebních tělísek výplň Batwing pod výplněmi Gyroid i Diamond, zde je tomu naopak. Velký vliv na tuto změnu má průřez, který výřez mříže Batwing zaujímá. Vlivem dvojnásobně velké opakující se buňky jsou rozměry mříže větší. Vidět lze i druhé lokální maximum.

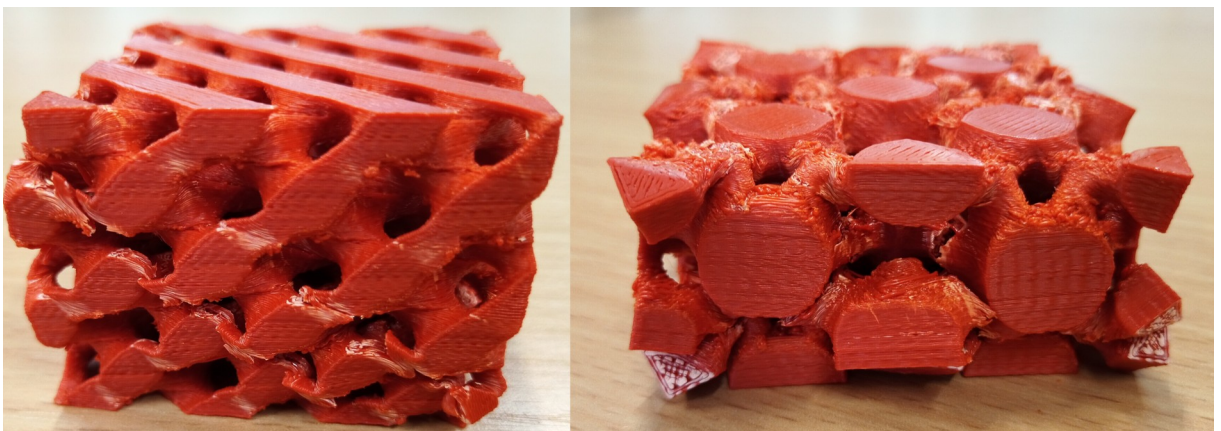
V případě výplní Gyroid a Diamond byl opět pozorován konstantní průběh deformace tak jako v případě válcových a spirálových těles avšak s vyšší hodnotou

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

meze pevnosti zapříčiněnou zvýšením periodičnosti. Na následujících obrázcích 97–99 jsou snímky jednotlivých výřezů mříží po deformaci. Kompletní fotografie z měření včetně videozáznamů jsou na přiloženém médiu.

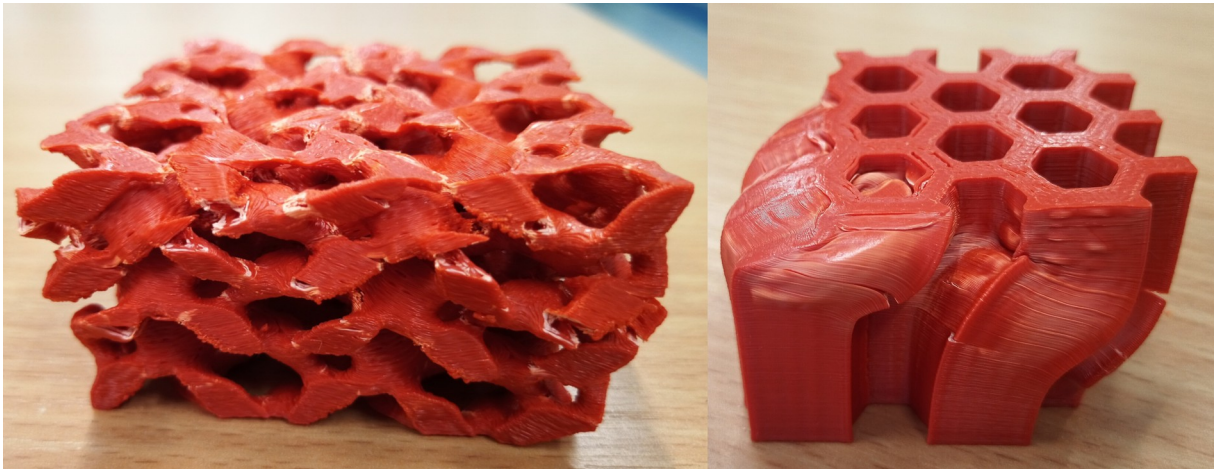


Obr. 97: Deformace výřezů mříží síťových struktur Schwarz P (vlevo) a Gyroid (vpravo)



Obr. 98: Deformace výřezů mříží síťových struktur Diamond (vlevo) a Batwing (vpravo)

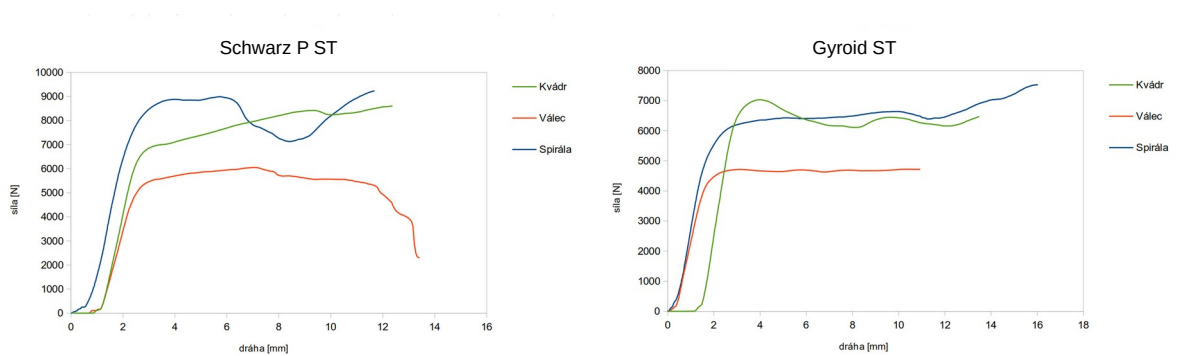
Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE



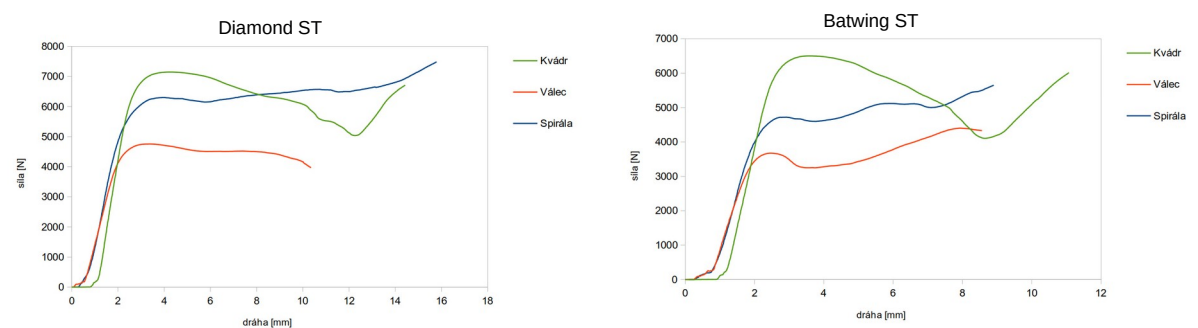
Obr. 99: Deformace výřezů mříží struktur Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo)

3.1.5 Zkušební tělesa s jednotlivými výplněmi

Dále byly sestrojeny grafy pro každou výplň a srovnáván vliv tvaru tělesa (Obr. 100–103).

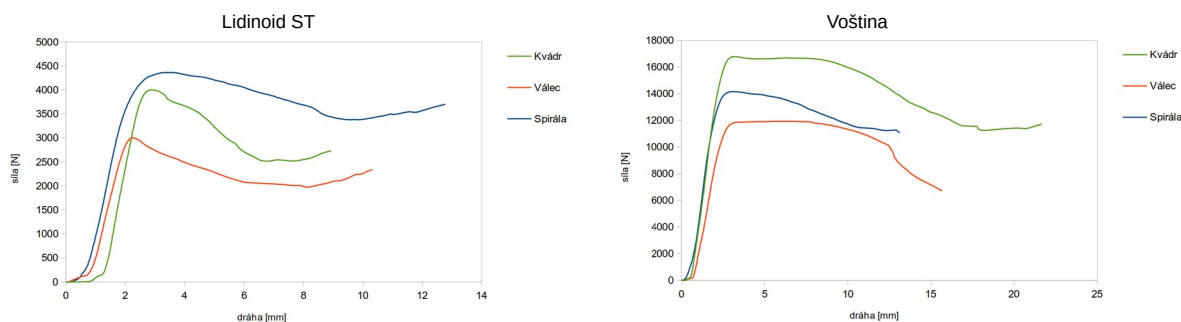


Obr. 100: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků Schwarz P ST (vlevo) a Gyroid ST (vpravo)

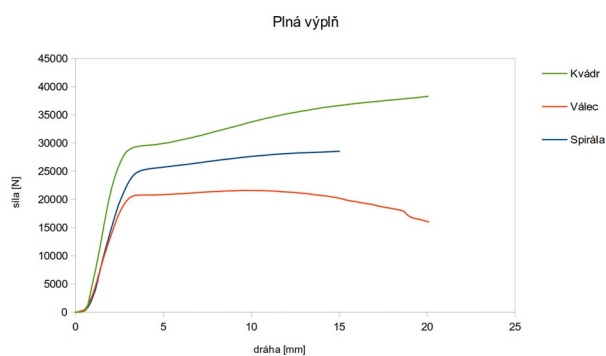


Obr. 101: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků Diamond ST (vlevo) a Batwing ST (vpravo)

Diplomová práce VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr. 102: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků Lidinoid ST (vlevo) a voština (vpravo)



Obr. 103: Deformační křivky zkoušky v tlaku plných zkušebních vzorků

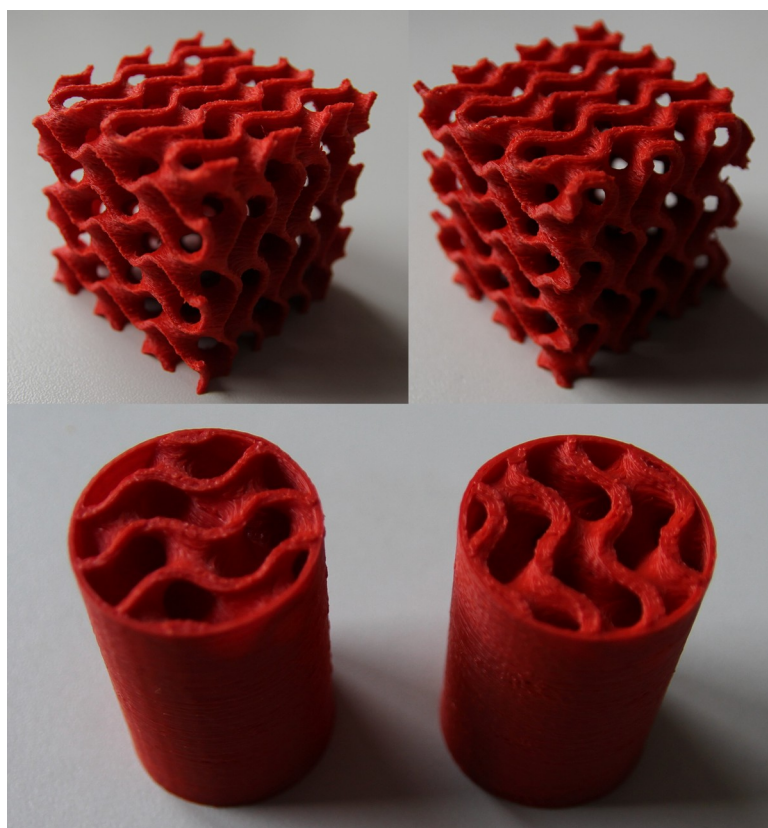
Ze srovnání vlivů tvarů tělesa na pevnost jednotlivých vzorků jasně vyplývá, že nejnižší mez pevnosti představuje válec. Ve většině případů převyšuje mez pevnosti kvádru spirálu. Tyto skutečnosti lze vysvětlit průřezem těles. Válec představuje nejnižší hodnotu meze pevnosti právě proto, že kruh zaujímá nejmenší obsah ze všech tvarů, tudíž se na výstavbu válce spotřebovalo nejméně materiálu.

Kvadr a kvadr stočený do spirály mají stejný čtvercový průřez, v případě spirály jsou jednotlivé čtverce vůči sobě otočené podle osy Z. Pokles meze pevnosti u většiny těles ve tvaru spirály lze přisoudit právě zaujímané výplni. Protože se rotace průřezů z výškou mění, mění se i zastoupení výplně v těchto průřezích. Zastoupení výplně se liší v periodičnosti v osách X a Y v různé výšce tělesa. Nárůst meze pevnosti u spirály vůči kvádru lze pozorovat u výplní Schwarz P a Lidinoid. Tento nárůst je nejspíše způsoben nárůstem periodičnosti v horní části spirály.

U výplní Gyroid a Diamond si lze povšimnout různých směrnic tečen křivek po překonání elastické deformace. Válec s výplní Gyroid jeví konstantní hodnoty síly při deformaci, výplň Diamond mírně klesající, kvádr má v obou případech klesající trend, spirála rostoucí, u výplně Diamond až po překonání meze pevnosti.

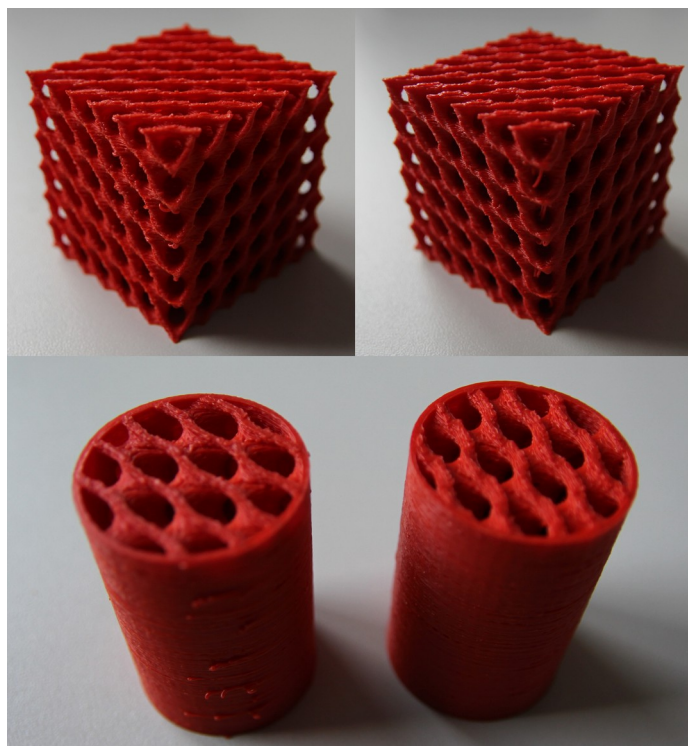
3.2 Pevnost v tlaku blánových výplní, průběhy deformací.

Po síťových výplních následují blánové výplně. Ty byly zhotoveny ve dvou šířkách stěn; 1,4 a 2 mm, a týkají se pouze válcových zkušebních těles s výplněmi Gyroid, Diamond a Batwing. Na obrázcích 104–106 jsou fotografie 3D tištěných blánových výplní a těles s těmito výplněmi před deformací.

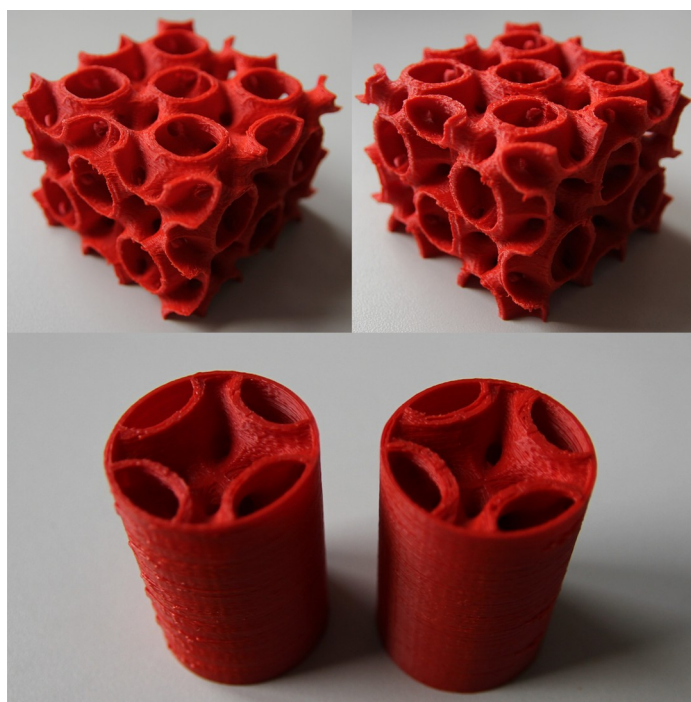


Obr. 104: Gyroid blánové těleso; 1,4 mm (vlevo), 2 mm (vpravo)

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE



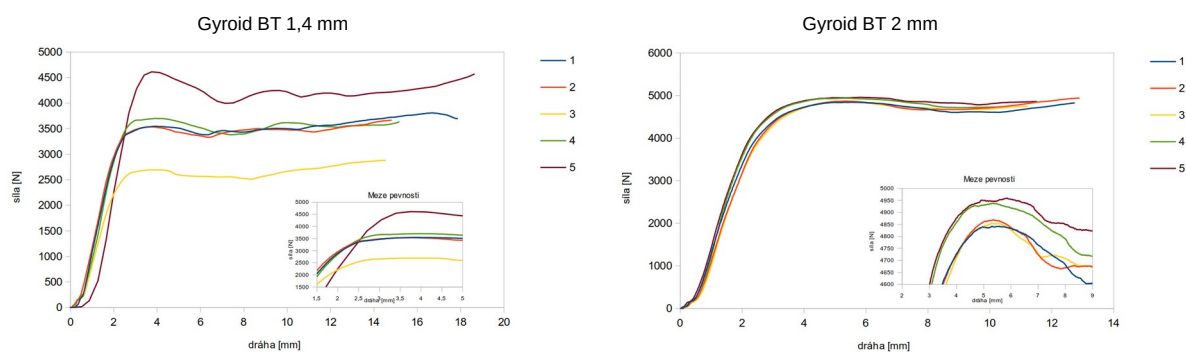
Obr. 105: Diamond blánové těleso; 1,4 mm (vlevo), 2 mm (vpravo)



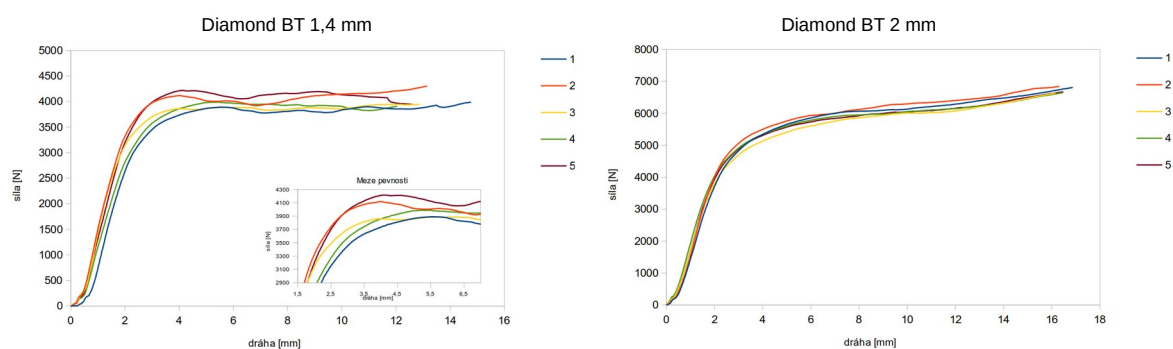
Obr. 106: Batwing blánové těleso; 1,4 mm (vlevo), 2 mm (vpravo)

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

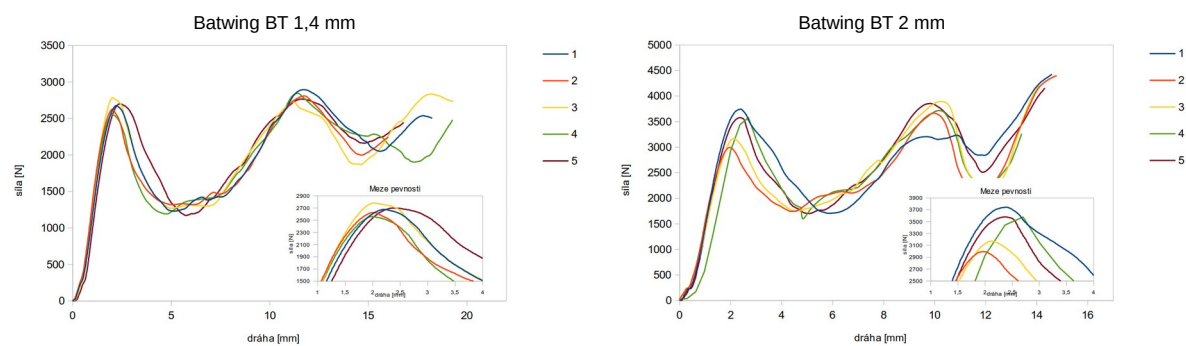
Obrázky 107–109 znázorňují deformační křivky válcových zkušebních těles vyplněných blánovými tělesy Gyroid, Diamond a Batwing.



Obr. 107: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Gyroid BT 1,4 mm (vlevo) a Gyroid BT 2 mm (vpravo)



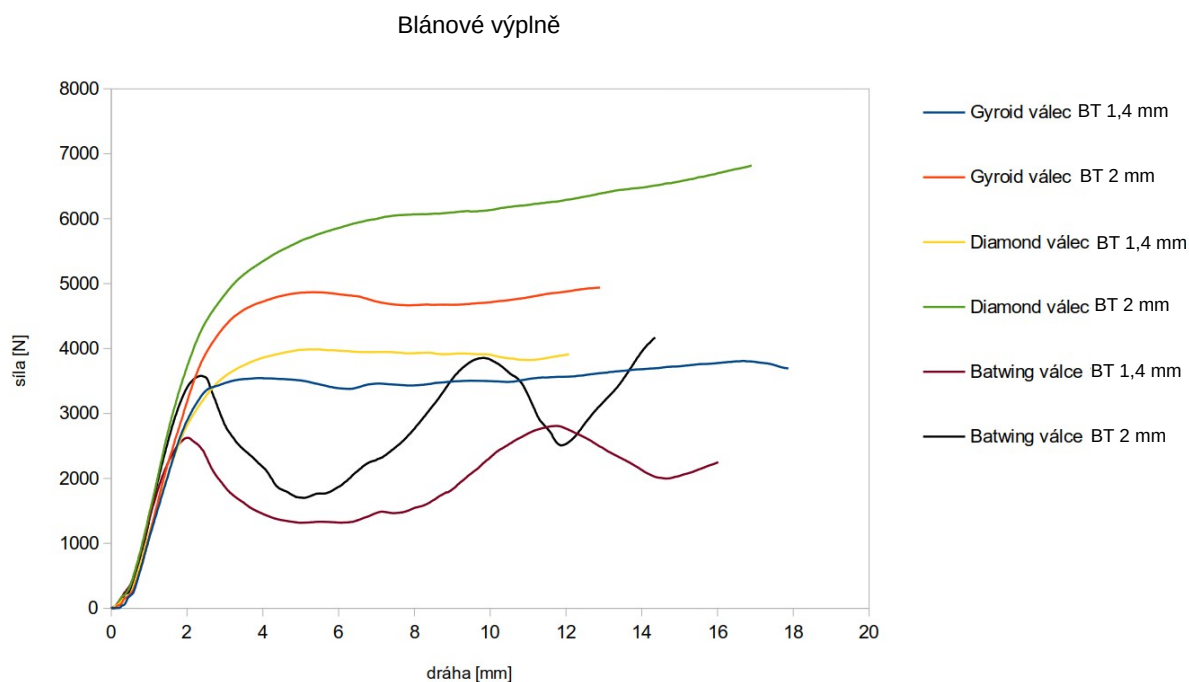
Obr. 108: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Diamond BT 1,4 mm (vlevo) a Diamond BT 2 mm (vpravo)



Obr. 109: Deformační křivky zkoušky v tlaku zkušebních vzorků válec Batwing BT 1,4 mm (vlevo) a Batwing BT 2 mm (vpravo)

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

Z každého grafu byla vybrána reprezentativní křivka a sestrojen hromadný graf (Obr. 110) pro všechny blánové výplně.

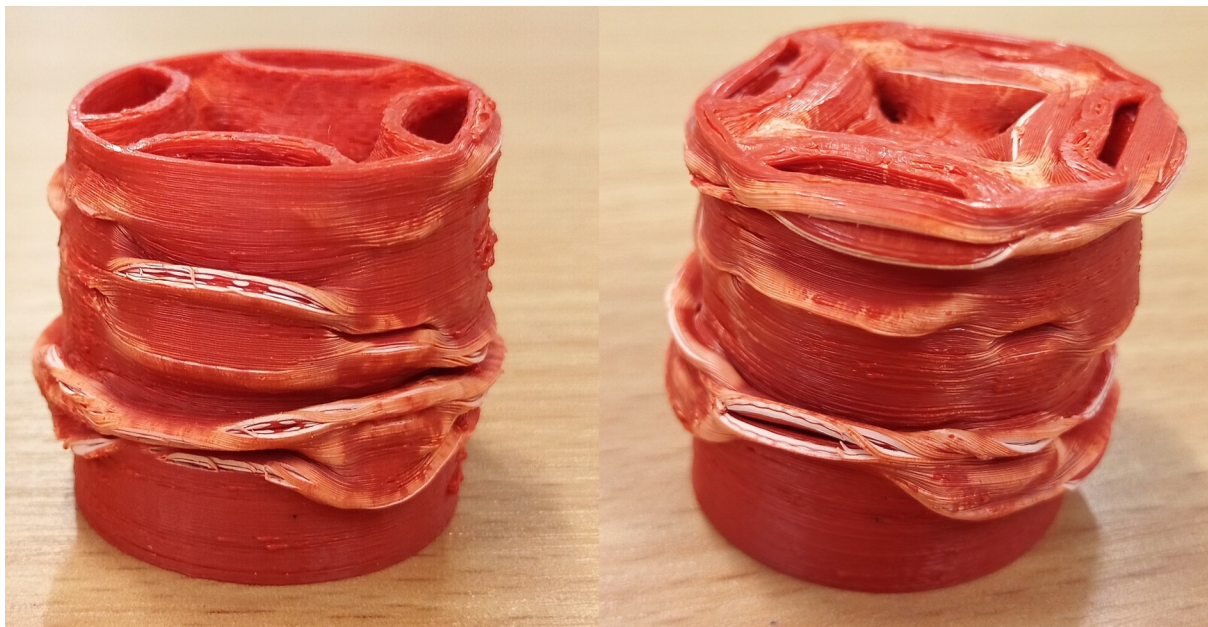


Obr. 110: Deformační křivky zkoušky v tlaku tělesa tvaru válce, jednotlivé křivky odpovídají blánovým tělesům tvořících výplň

Blánové výplně svým tvarem zachovávají původní strukturu minimálních ploch, netvoří tak krčky, tudíž lze očekávat odlišné průběhy deformace od síťových struktur. Z výše uvedeného grafu je zřejmé, že největší hodnoty síly náleží blánovému tělesu Diamond o šířce 2 mm. Naopak nejmenší hodnoty představuje výplň Batwing. Ve všech případech hodnoty síly 2 mm šíře stěny převyšují hodnoty 1,4 mm šíře.

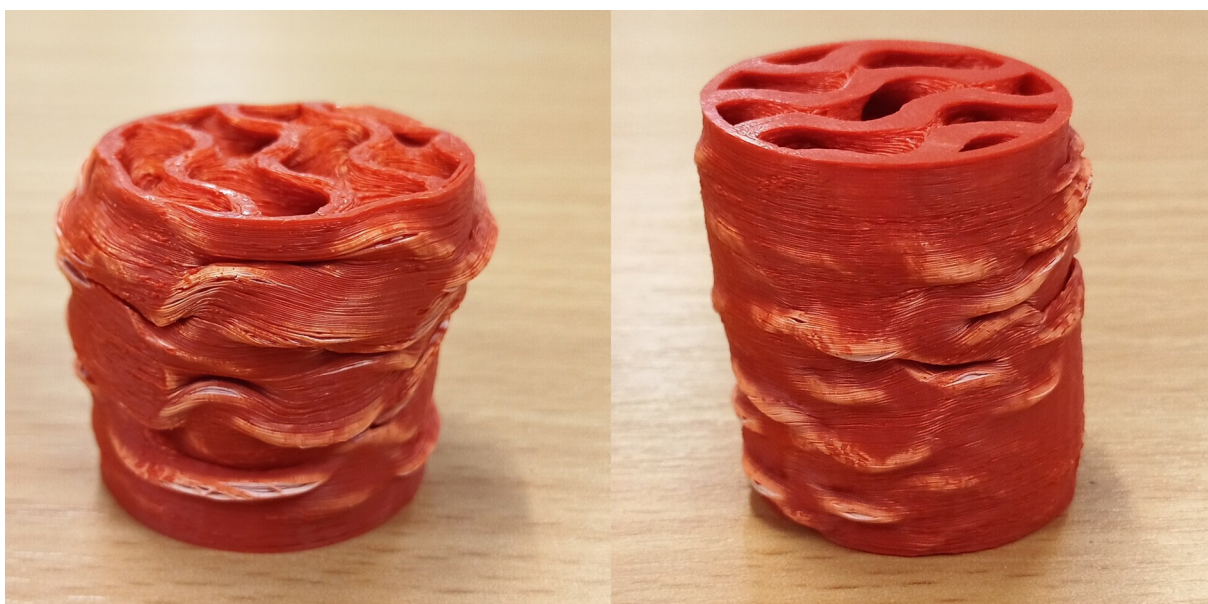
Batwing je zde opět pod mezí periodičnosti, u obou šíří stěn výplní jsou zřejmá dvě maxima, podobně jako v případě síťových struktur. Zde se však místo krčků vytvořili kanálové podpěry, jak na místě spoje buněk v ose Z, tak uvnitř buňky. Lze si povšimnout, že mez pevnosti výplně Batwing 2 mm má podobnou hodnotu jako Gyroid 1,4 mm a Diamond 1,4 mm. Výplň Batwing pod mezí periodičnosti se u blánového tělesa projevila deformací kanálové struktury do stran skrz stěnu

tělesa, viz obrázek 111. Z deformačních křivek jednotlivých měření je vidět zmenšení hodnot prvních maxim u vzorků 2 a 3. Ten je způsoben lokálními nepřesnostmi 3D tisku, které se pod mezí periodičnosti snadněji projeví.



Obr. 111: Deformace zkušebního tělesa tvaru válce vyplněného blánovou strukturou Batwing BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo)

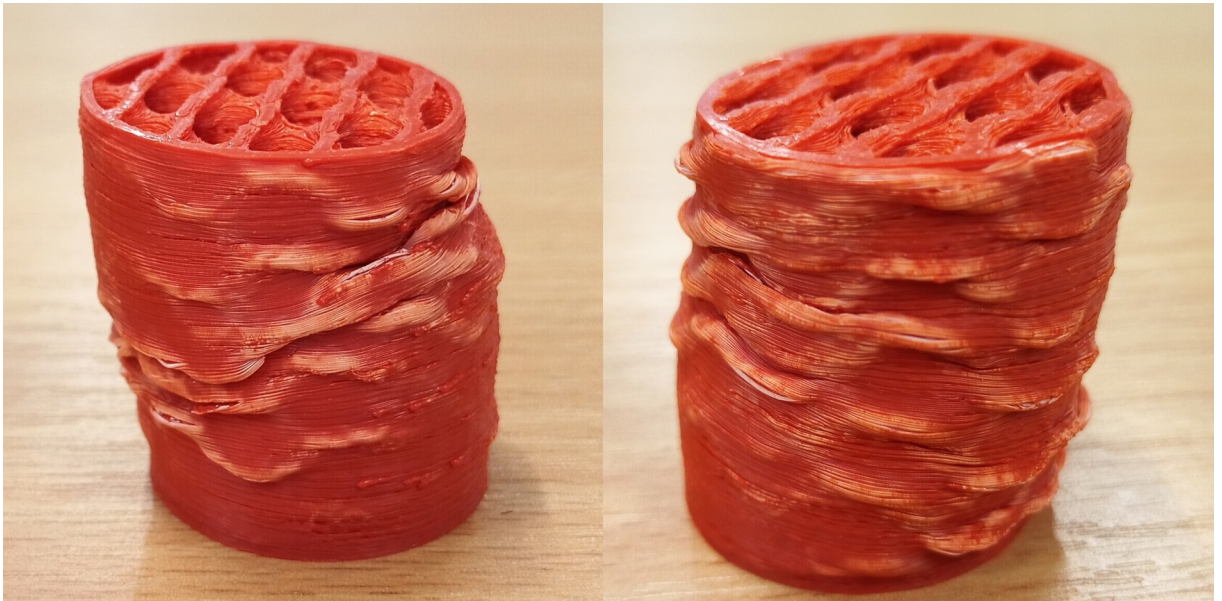
Výplň Gyroid v případě 1,4 mm šíře stěny vykazuje opět téměř konstantní deformační sílu. Šíře stěny 2 mm vykazuje zřetelnější maximum, v průběhu deformace se však křivka zase narovnává. Z obrázku 112 si lze všimnout mírné deformace ve vzpěru do esovitého tvaru, podobně jako v případě voštiny nebo plného válce. Z deformačních výřezů mříží, které následují v dalším textu jsou poté patrné deformace jednotlivých sinusových křivek, které staví celou strukturu. Drží se navzájem tak, že se svislé sinusoidy deformují pouze výškově, nikoliv do šířky.



Obr. 112: Deformace zkušebního tělesa tvaru válce vyplněného blánovou strukturou Gyroid BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo)

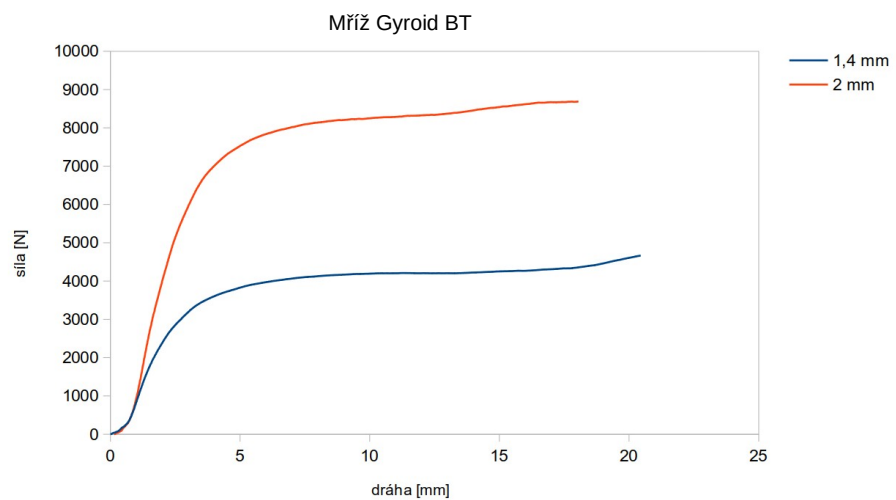
Velmi pozoruhodná situace nastala v případě deformace blánové výplně Diamond. U zkušební vzorku s 1,4 mm šíří stěny se stále tvoří maximum avšak při deformaci vzorku 2 mm se neutvoří. Hodnoty jsou stále rostoucí. Celá struktura se v průběhu deformace neustále zpevňuje. Na následujícím obrázku 113 je fotografie po deformaci tělesa s výplní Diamond 1,4 a 2 mm. Je zde poměrně dobře znázorněna deformace ve vzpěru. Síla je opět velmi dobře roznášena diagonálními příčkami a deformací se vyplňují jednotlivé vakance, což vede k průběžnému zpevňování v průběhu deformace. Tento jev je více patrný ze záznamu deformací jednotlivých výřezů z mříží.

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE



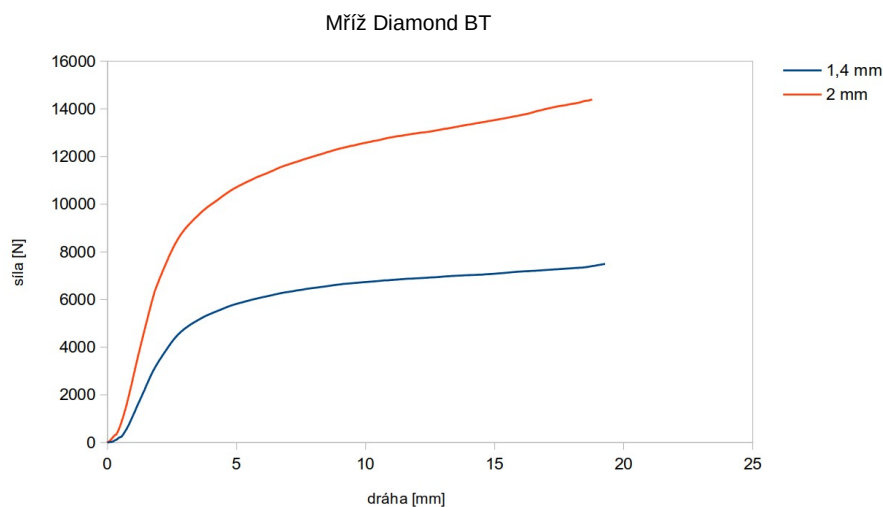
Obr. 113: Deformace zkušebního tělesa tvaru válce vyplněného blánovou strukturou Diamond BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo)

Toto zpevnování se opakuje i v případě deformací obou výřezů z mříží Diamond, kde je dosaženo vyšší periodičnosti. Výřez mříže Gyroid 2 mm toto chování vykazuje také. Gyroid 1,4 mm tvoří velmi nezřetelné maximum. Následující obrázky 114–116 znázorňují deformační křivky jednotlivých výřezů z mříží blánových těles Gyroid, Diamond a Batwing.

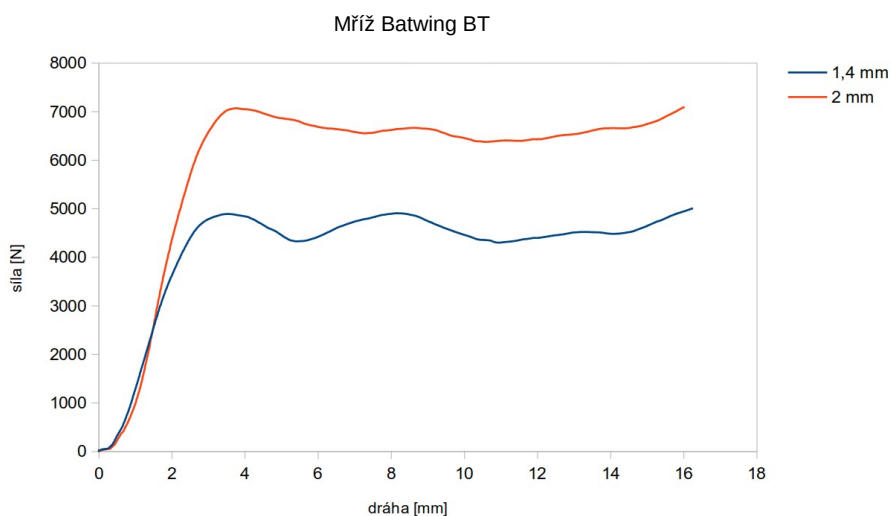


Obr. 114: Deformační křivky zkoušky v tlaku výřezů z mříží Gyroid BT

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE



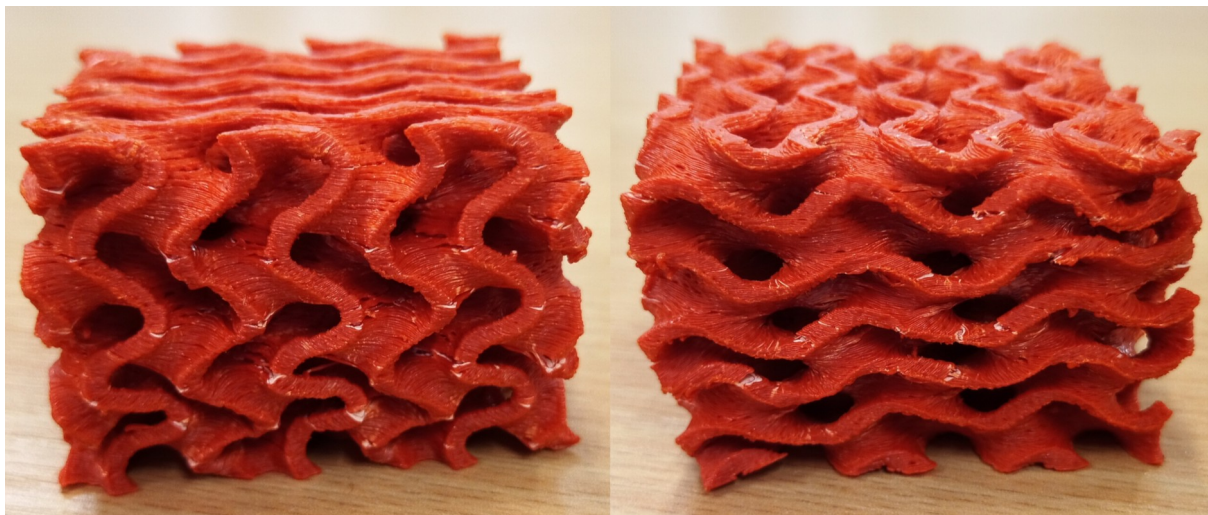
Obr. 115: Deformační křivky zkoušky v tlaku výřezů z mříží Diamond BT



Obr. 116: Deformační křivky zkoušky v tlaku výřezů z mříží Batwing BT

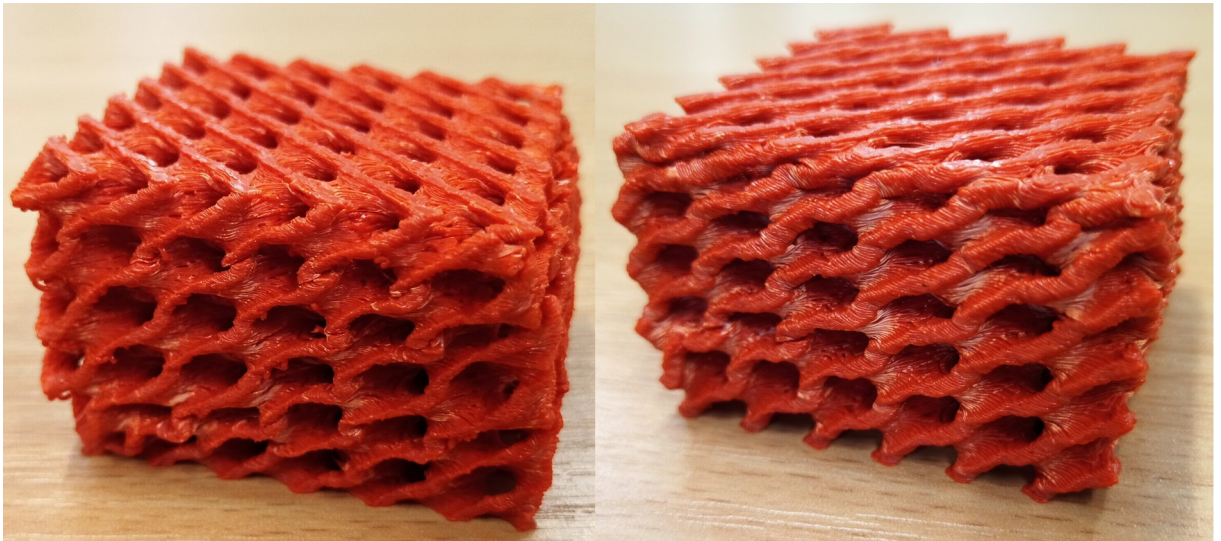
Ze záznamu deformace struktury Gyroid přiloženém na médii jsou zřetelné deformace svislých a podélných sinusovek. Svislé mají tendenci krátit svou délku, avšak bez významného zvětšování své amplitudy, ta je držena příčnými sinusovkami, jak ukazuje obrázek výřezu z mříže Gyroid 2 mm (Obr. 117 – vlevo). Podélné sinusovky se deformují prodlužováním své délky za současného zmenšování

amplitudy (Obr. 117 – vpravo). Výřez mříže Gyroid 1,4 mm se deformuje zcela obdobně. Rovněž je znatelná delaminace tištěných vrstev v místě amplitudy na krajích objektu. K závěru deformace se projeví zpětný kríp při uvolnění napětí.



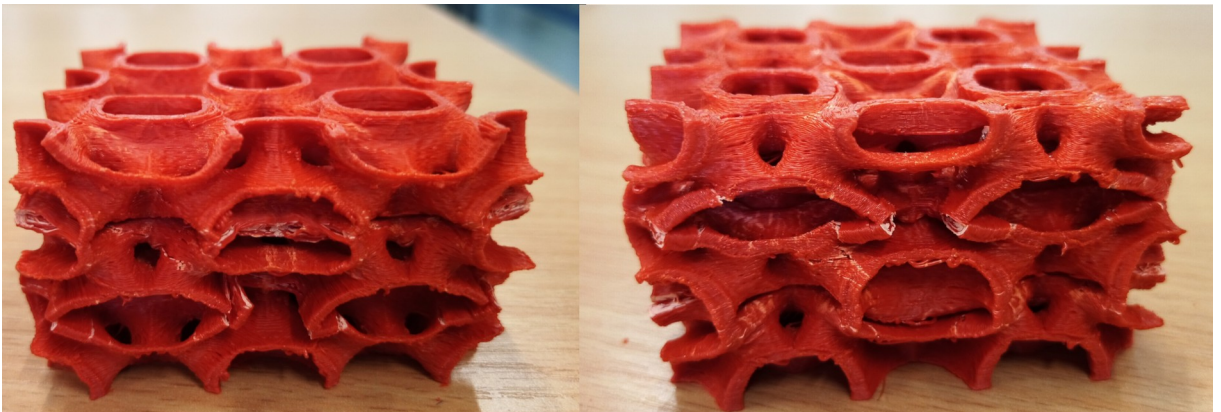
Obr. 117: Deformace výřezu z nekonečné mříže Gyroid 2 mm; svíslé sinusovky (vlevo), podélné sinusovky (vpravo)

Jak již bylo zmíněno, výřez z nekonečné mříže blánové struktury zesílené trojitě periodické plochy Diamond nevykazuje mez pevnosti. V obou případech je deformační křivka neustále rostoucí. Celá struktura se deformací zpevňuje, diagonální příčky se lisují na sebe bez znatelného porušení ploch na spojích těchto příček. Ze záznamu je také vidět relaxace vzorku po uvolnění napětí, která se projevila částečným návratem výšky vzorku. Toto chování je zřejmé u obou šíří stěn. Obrázek 118 zobrazuje oba výřezy po deformaci. Z fotografií je zřejmá plastická deformace uzlových bodů, avšak bez jejich porušení. Diagonální příčky směřující dolů porušení vykazují.



Obr. 118: Deformace výřezu z nekonečné mříže Diamond BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo)

Výplň Batwing vykazuje opět dvě maxima, avšak s mírnějším poklesem než je tomu v případě válcových těles, které se nacházejí pod mezí periodičnosti. Z níže uvedeného obrázku 119 lze vidět místa deformace odpovídající oběma maximům. První je odrazem kanálů v horní části struktury na styku buněk, druhé je prasknutí kanálů v dolní části struktury uvnitř buňky. Ze záznamu je opět viditelná relaxace.



Obr. 119: Deformace výřezu z nekonečné mříže Batwing BT 1,4 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo)

3.3 Výsledky ze zkoušky v tlaku zkušebních těles vyplněných strukturami odvozenými od TPMP

V následující části jsou tabulky 6 a 7, ve kterých jsou seřazeny výsledky zkoušky v tlaku všech tvarů těles se všemi výplněmi včetně výřezů z mříží.

Tabulka 6: Tabulka výsledků zkoušky v tlaku všech vzorků

Tvar	Výplň	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Kvádr	Schwarz P ST	8009 ± 789	19,16 ± 1,89	228 ± 12
	Gyroid ST	6967 ± 204	15,48 ± 0,45	213 ± 10
	Diamond ST	7170 ± 48	15,93 ± 0,11	229 ± 5
	Batwing ST	6455 ± 118	13,91 ± 0,26	237 ± 13
	Lidinoïd ST	3999 ± 197	11,35 ± 0,56	157 ± 8
	Voština	16685 ± 185	37,73 ± 0,42	512 ± 31
	plný	29689 ± 420	32,99 ± 0,47	793 ± 40
Válec	Schwarz P ST	6041 ± 115	19,53 ± 0,37	188 ± 14
	Gyroid ST	4703 ± 28	13,23 ± 0,08	211 ± 9
	Gyroid BT 1,4	3594 ± 93	12,88 ± 0,33	117 ± 13
	Gyroid BT 2	4893 ± 52	12,98 ± 0,14	137 ± 6
	Diamond ST	4795 ± 63	13,49 ± 0,18	165 ± 7
	Diamond BT 1,4	4015 ± 151	14,49 ± 0,54	123 ± 10
	Diamond BT 2	-	-	104 ± 18
	Batwing ST	3746 ± 204	10,68 ± 0,58	142 ± 20
	Batwing BT 1,4	2670 ± 83	15,20 ± 0,47	113 ± 7
	Batwing BT 2	3744 ± 315	13,47 ± 1,24	142 ± 10
	Lidinoïd ST	2868 ± 155	9,68 ± 0,52	142 ± 14
	Voština	11662 ± 262	34,31 ± 0,77	435 ± 24
	plný	22472 ± 856	31,79 ± 1,21	647 ± 46
	Spirála	Schwarz P ST	8970 ± 241	20,54 ± 0,55
Gyroid ST		6841 ± 380	15,38 ± 0,86	196 ± 11
Diamond ST		6194 ± 173	13,76 ± 0,39	170 ± 10
Batwing ST		4713 ± 8	10,84 ± 0,02	130 ± 5
Lidinoïd ST		4410 ± 108	12,51 ± 0,31	114 ± 17
Voština		14265 ± 563	34,98 ± 1,38	455 ± 74
Plný		28275 ± 856	31,42 ± 0,58	810 ± 39

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

Tvar	Výplň	Mez pevnosti [N]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Mříž	Schwarz P ST	20566	21,86	126
	Gyroid ST	11395	11,25	89
	Diamond ST	11546	11,40	88
	Batwing ST	15821	8,52	67
	Lidinoïd ST	7041	4,99	32
	Voština ST	30924	17,48	212
	Gyroid BT 1,4	4210	5,27	41
	Gyroid BT 2	-	-	69
	Diamond BT 1,4	-	-	52
	Diamond BT 2	-	-	96
	Batwing BT 1,4	4893	2,64	25
	Batwing BT 2	7071	3,81	29

U každého zkušebního vzorku byla změřena mez pevnosti v tlaku [N], která byla přepočítána na základě průřezů vzorku poděleného procentuální výplní na mez pevnosti v tlaku [MPa]. Poslední měřenou veličinou byl modul pružnosti v tlaku [MPa]. Hodnoty v tabulkách jsou průměry z měření sady vzorků od každého tvaru každé výplně.

Ze srovnání výsledků meze pevnosti [N] na první pohled převyšuje ve všech případech plný tvar. Nejvíce zátěže ze všech výplní snese voština a ze struktur odvozených od minimálních ploch je na tom nejlépe Schwarz P ST. Avšak v případě blánové výplně Diamond BT 2 mm mez pevnosti nebyla vykázána. Deformační křivka je stále rostoucí, tudíž lze tvrdit, že se deformací celá struktura zpevňuje.

Po přepočtu na mez pevnosti [MPa], převyšuje voština a to dokonce nad plným tvarem. Jelikož jsou hodnoty vztaženy jak na průřez, tak na procentuální hodnotu výplně, je tento poměr u voštiny vyšší. Ze struktur odvozených od TPMP má nejvyšší hodnotu opět Schwarz P ST. Jeho struktura tvoří odvozením síťového tělesa pilíře svázané do mříže, které celkem obstojně odolávají deformaci v tlaku. Lidinoïd ST vykazuje ve všech případech nejnižší hodnoty, vlivem utvoření mnoha slabých krčků.

Při srovnání jednotlivých tvarů dané výplně, zjistíme, že kvádrová tělesa vykazují největší hodnoty s výjimkou Schwarz P ST, který má nejvyšší hodnotu u tvaru spirála. Válec vykazuje nejnižší hodnoty. Tyto rozdíly lze vysvětlit periodičností výplně. Elementární buňky jednotlivých výplní odvozených od TPMP lze kompletně vepsat jen do krychle. Tudíž v kvádrovém tělesu je periodičita

nejcelejší. Ve válcovém tělese je počet celých buněk nejmenší. V případě spirály se periodičita mění s výškou tělesa. To má za následek kolísání hodnot pevnosti. Při vyšší periodicitě, které lze dosáhnout buď zmenšením elementární buňky, nebo zvětšením průřezů těles, lze předpokládat nezávislost na tvaru tělesa. V případě této studie jsou pouze 4 buňky na průřez kvádrů a spirály a 3,14 buňky na průřez válce. Mříže obsahují 9 buněk v případě struktur Schwarz P, Gyroid a Diamond a 4 buňky v případě struktur Batwing a Lidinoid.

Zajímavé výsledky byly naměřeny u výplní Gyroid v případě válcového tělesa. Síťová výplň vykazuje jen o málo vyšší hodnotu meze pevnosti [MPa] než je tomu v případě blánových výplní. Blánové výplně se liší svou tloušťkou stěny, tudíž i objemovou výplní (1,4 mm ~ 39 %; 2 mm ~ 53 %). Nicméně tyto změny tloušťek stěn neměly na pevnost vliv. Dá se předpokládat, že blánová tělesa odvozená od minimální plochy Diamond budou vykazovat podobný jev. V případě blánových výplní Batwing se toto chování nepotvrdilo. Důvod je nejspíš opět neperiodičnost a díky tomu výrazný vliv lokálních defektů způsobených při 3D tisku. Dokonce pevnost tělesa se slabší stěnou převyšuje pevnost tělesa se silnější stěnou. To je způsobeno poměrem procentuálního objemového zastoupení výplně ku průřezu válcového tělesa.

Další měřenou veličinou je modul pružnosti v tlaku. Ten poskytuje údaj o elastické deformaci. Představuje podíl napětí ku jím vyvolané deformaci a říká, že čím vyšší je hodnota modulu pružnosti, tím větší napětí je potřeba pro dosažení dané deformace. Naopak však čím snáze je dosaženo vratné deformace, tím je daný materiál pružnější. Posoudit nejlepší hodnotu modulu pružnosti je otázka aplikace. Nabízí se však zajímavá myšlenka, a to vliv výplní na pružnost různých materiálů. Zajímavý dopad by mohli mít zejména blánové výztuže pro křehké materiály, které by tak svou strukturou mohli zvýšit pružnost daného materiálu. Rovněž by šlo měření rozšířit i o dynamické nedestruktivní testování těchto struktur.

Co se týče hodnot naměřených u mříží, velký význam mají blánové struktury, které nevykazují mez pevnosti. Mříže struktur mají větší periodicitu než je tomu u zkušebních těles, tím mají zajímavější průběh. Celá struktura se svou deformací jen dále zpevňuje. U mříží Gyroid 2 mm a Diamond 1,4 i 2 mm byl dodatečně změřen opakovaný test a nebyl zaznamenán pokles pevnosti až do maximálního zatížení trhacího stroje (20 kN). Zde se nabízí myšlenka zjistit mez periodičnosti, kdy se pevnost ustálí na konstantní hodnotě s přibývajícím počtem buněk těchto struktur.

Diplomová práce
VÝSLEDKY A DISKUZE

Tabulka 7: Tabulka hodnot měrných mezí pevnosti a poměrů ku pevnému tělesu

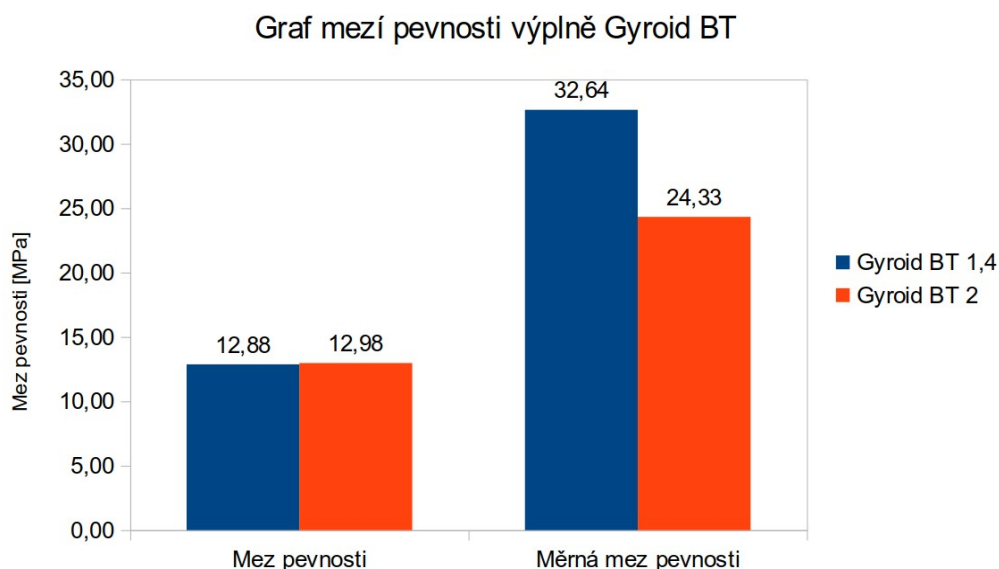
Tvar	Výplň	Měrná mez pevnosti [MPa]	Poměr ku plnému tělesu
Kvádr	Schwarz P ST	41,24	1,25
	Gyroid ST	30,96	0,94
	Diamond ST	31,86	0,97
	Batwing ST	26,98	0,82
	Lidinoïd ST	28,97	0,88
	Voština	76,77	2,33
	plný	32,99	1,00
Válec	Schwarz P ST	44,63	1,40
	Gyroid ST	26,30	0,83
	Gyroid BT 1,4	32,85	1,03
	Gyroid BT 2	24,33	0,77
	Diamond ST	26,81	0,84
	Diamond BT 1,4	36,96	1,16
	Diamond BT 2	-	-
	Batwing ST	21,52	0,68
	Batwing BT 1,4	61,21	1,93
	Batwing BT 2	37,60	1,18
	Lidinoïd ST	23,08	0,73
	Voština	71,37	2,24
	plný	31,79	1,00
Spirála	Schwarz P ST	42,32	1,35
	Gyroid ST	31,12	0,99
	Diamond ST	27,53	0,88
	Batwing ST	22,44	0,71
	Lidinoïd ST	31,92	1,02
	Voština	77,20	2,46
	Plný	31,42	1,00

Měrná mez pevnosti [MPa] v tlaku je hodnota odrážející pevnost v tlaku těles se 100% výplní. Je to hodnota meze pevnosti pokrácená procentuální výplní jednotlivých těles. Z této hodnoty byl spočítán poměr pevnosti ku pevnému tělesu, tedy kolikrát, resp. kolika procentní nárůst či pokles pevnosti byl zaznamenán oproti plnému tvaru.

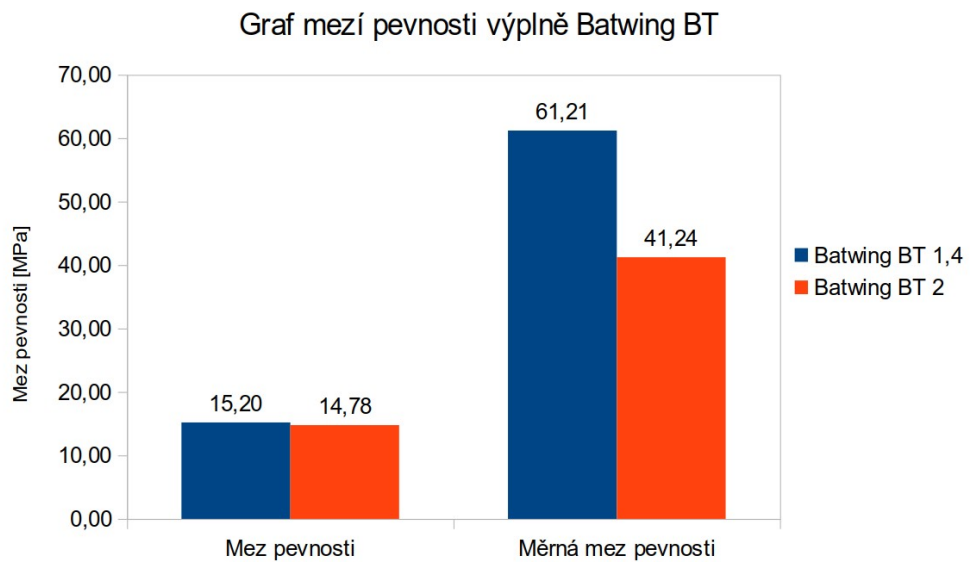
Z hodnot vyplývá opět jasné převýšení poměrové pevnosti voštiny nad ostatními výplněmi. V poměru ku plnému tělesu je více než dvakrát pevnější. Ze síťových struktur je nejpevnější Schwarz P ST. Výplně Schwarz P ST a Lidinoïd ST v případě spirály jsou jediní zástupci síťových výplní, které v poměru převyšují plné těleso. U výplně Lidinoïd je toto zjištění velmi překvapující, jeho pevnost je nejnižší

ze všech výplní. Tento nárůst je zapříčiněn jeho nízkým procentuálním zastoupením. Toto se hezky projevilo právě u blánových struktur. Čím tenčí je stěna blán, tím nižší je procentuální zastoupení objemové výplně, a tím je měrná mez pevnosti vyšší. Většina blánových výplní mírně převyšují plné těleso, čím tenčí je stěna blánového tělesa, tím je použito méně materiálu, a tím poměrová pevnost roste. Výplň Batwing BT v případě tenčí stěny dosahuje téměř dvojnásobku poměrové pevnosti. Nejzajímavější je však výplň Diamond BT 2 mm, která nevykazuje pokles pevnosti v průběhu měření.

Zajímavé srovnání je vidět na sloupcovém grafu výplně Gyroid BT 1,4 a 2 mm a Batwing BT 1,4 a 2 mm (Obr. 120 a 121). Zde je porovnání meze pevnosti [MPa] s měrnou mezí pevnosti [MPa]. Ačkoliv se pevnost téměř nezměnila se změnou tloušťky stěn blánového tělesa, měrná pevnost je velmi rozdílná.



Obr. 120: Graf srovnání mezí pevnosti výplně Batwing BT



Obr. 121: Graf srovnání mezí pevnosti výplně Batwing BT

Zajímavé by bylo dostat se na nejmenší možné rozměry elementární buňky, aby byla zajištěna dostatečná periodičita a zhotovit jinou vhodnější technologii 3D tisku tenké stěny blánových těles, tak aby mohl být zkušební vzorek co nejprázdnější. Poté by se měrná pevnost posunula ještě k pozoruhodnějším hodnotám.

4 ZÁVĚR

Závěry z diplomové práce jsou neúplně jednoznačné. Z trojitě periodických minimálních ploch lze odvodit struktury, které mají potenciál uplatnění, zároveň však ne vždy komplexnější struktura je krokem ke zlepšení. Z trojitě periodických minimálních ploch byla odvozena síťová a blánová tělesa, která byla použita jako výplně těles a podrobena zkoušce v tlaku. Cílem bylo dokázat, zda jsou tyto výplně vhodné jako výztuhy, které dokáží roznášet působící silové namáhání. Tato tělesa byla porovnávána jak mezi sebou, tak s běžně používanou výplní, voštinou, a poměrově přirovnána k pevnosti plného tělesa.

Primárně byla určena pro testování síťová tělesa, z kterých se nejpevnější zdá být pilířová struktura Schwarz P ST, která je v průměru o 33 % poměrově pevnější než plné těleso. Zajímavé výsledky jeví i výplně Gyroid ST a Diamond ST, které sice nevykazují nijak zvlášť velkou pevnost, ale jejich průběh deformace je velmi neobvyklý. Při rostoucí deformaci se síla drží konstantní, dochází k celkem dobrému roznášení působící síly mezi jednotlivými krčky, které se tvoří při odvození síťových těles. Nicméně voština převyšuje velmi výrazně všechny síťové výplně.

Co se týče blánových těles, ta byla připravena jen ze tří exemplářů minimálních ploch. Tyto struktury netvoří krčky a slibují tak lepší výsledky. Tento předpoklad byl splněn, když struktury Gyroid BT a Diamond BT zejména jako výřezy z nekonečných mříží nevykazovaly maximum na deformační křivce. Deformační křivka vykazuje stále rostoucí trend, z čehož lze odvodit neustálé zpevňování struktury v průběhu deformace. Tento fakt byl velice překvapivý. Z videozáznamů deformační zkoušky lze pozorovat částečnou vratnou deformaci blánových struktur, jako důkaz, že nedochází k úplnému porušení stěn tvořících danou strukturu.

V průběhu vyhodnocování výsledků se nabízely další možnosti testování struktur odvozených od minimálních povrchů. Fakt, že byly připraveny struktury pod mezí periodičnosti vede k myšlence zjistit mez periodičnosti, kdy se meze pevnosti ustálí na konstantní hodnotě s přibývajícím počtem buněk. Dále je možnost zaměřit se na vyhodnocení nedestruktivních dynamických zkoušek, stanovit vliv struktur na pružnost různých materiálů, respektive na křehkost. S použitím technologie 3D tisku s vyšším rozlišením lze dosáhnout miniaturních buněk, zvětšit tak výrazně periodicitu a zjistit tak vliv na měrnou pevnost.

V neposlední řadě tvoří síťová i blánová tělesa odvozená od trojitě periodických minimálních ploch struktury se značným měrným povrchem. Jejich aplikace se může hodit i pro nosiče katalyzátorů či adsorbentů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] What is 3D Printing? *3D PRINTING.COM* [online]. 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [2] What is 3D printing? *The Complete Engineering Guide. 3DHUBS* [online]. 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [3] How was Arthur C Clarke able to see into the future? In: *BBC* [online]. 2018 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/ideas/videos/how-was-arthur-c-clarke-able-to-see-into-the-future/p05tdpm6?playlist=visionary-humans>
- [4] Most used 3D printing technologies 2017-2018. *Statista* [online]. 2018 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>
- [5] RESL, Petr. Studium vlivů parametrů 3D tisku na fyzikálně-mechanické vlastnosti polymerů [online]. Pardubice, 2017 [citováno 10. 5. 2018]. 77 s. <http://hdl.handle.net/10195/69045>. dostupné z: <http://dk.upce.cz/handle/10195/69045>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta Chemicko-technologická. Vedoucí práce Ing Luboš Prokůpek Dr.
- [6] FDM – Fused Deposition Modeling (or FFF, PJP, LPD). *3D Printing and design* [online]. 2017 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/fdm-fused-deposition-modeling-fff-pjp-lpd/>
- [7] HALF MILLION 3D PRINTERS SOLD IN 2017 – ON TRACK FOR 100M SOLD IN 2030. *3D Printing Industry* [online]. 2018 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/half-million-3d-printers-sold-2017-track-100m-sold-2030-131642/>
- [8] Introduction to FDM 3D printing. *3DHUBS* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#pros-cons>
- [9] 3D Printer Resolution: Facts and Figures. *ALL3DP* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/3d-printer-resolution/>
- [10] FlashForge Dreamer 3D Printer User Guide: Flashforge. 2014.
- [11] How Much Power do 3D Printers Use and What Does that Cost? *3D printing mentor* [online]. 2018 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://3dprintingmentor.com/how-much-power-do-3d-printers-use-and-what-does-that-cost/>
- [12] Introduction to SLS 3D Printing. *3DHUBS* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>
- [13] 3D Printing Tips and Tech: Get to Know Those Acronyms. *MachineDesign* [online]. 2015 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/manufacturing-equipment/3d-printing-tips-and-tech-get-know-those-acronyms>
- [14] Introduction to SLA 3D Printing. *3DHUBS* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>

Diplomová práce
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [15] STL File Format (3D Printing) – Simply Explained. *ALL3DP* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- [16] SLA vs DLP: The Differences – Simply Explained. *ALL3DP* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/>
- [17] Our Technology. *Carbon3D* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/our-technology/>
- [18] *Envisiontec* [online]. 2017 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/3d-printers/cdlm-printer-family/>
- [19] Illuminate DLP 3D printer hits Kickstarter running with affordable 2K resolution. *3ders.org* [online]. 2016 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.3ders.org/articles/20161117-illuminate-dlp-3d-printer-hits-kickstarter-running-with-affordable-2k-resolution.html>
- [20] Introduction to Material Jetting 3D Printing. *3DHUBS* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [21] What is Binder Jetting? *ExONE* [online]. 2019 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>
- [22] 8 dobrých důvodů, proč investovat do 3D tisku. *3D Wiser* [online]. 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/clanky/vyuziti-3d-tisku/8-dobrych-duvodu-proc-investovat-do-3d-tisku/>
- [23] 3D Printing and Looming Changes in the Construction Industry. *VIATECHNIK* [online]. 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.viatechnik.com/3d-printing-and-looming-changes-in-the-construction-industry/>
- [24] Introducing Contour Crafting Technology. *Contour Crafting Corporation* [online]. 2017 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://contourcrafting.com/>
- [25] Concrete 3D Printing: How it Works & Applications. *All3DP* [online]. 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/concrete-3d-printing-how-to-do-it-and-application/>
- [26] 2019 Greatest 3D Printed Houses, Buildings & Structures. *All3DP* [online]. 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printed-house-homes-buildings-3d-printing-construction/>
- [27] Triply Periodic Minimal Surfaces. *WeWantToLearn.net* [online]. 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://wewanttolearn.wordpress.com/2019/02/03/triply-periodic-minimal-surfaces/>
- [28] *3DXM Virtual Math Museum* [online]. 2018 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: http://virtualmathmuseum.org/Surface/gallery_m.html
- [29] *Pixabay* [online]. 2010 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://pixabay.com/photos/holly-leaf-plant-green-sting-3121/>
- [30] Travel Shooting Across Indonesia: 10 Top Underwater Photography Sites. *DPG* [online]. 2018 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.divephotoguide.com/underwater-photography-travel/article/shooting-across-indonesia-10-top-underwater-photography-sites/>
- [31] Minimal Surface. *Wolfram MathWorld* [online]. 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/MinimalSurface.html>

Diplomová práce
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [32] File:Minimal surface curvature planes-fr.svg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minimal_surface_curvature_planes-fr.svg
- [33] Plateau's Problem. *WolframMathWorld* [online]. 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/PlateausProblem.html>
- [34] Catenoid. *3DXM Minimal Surfaces* [online]. 2018 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://virtualmathmuseum.org/Surface/catenoid/catenoid.html>
- [35] Instructional Resources and Lecture Demonstrations. *The University of Iowa* [online]. 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://instructional-resources.physics.uiowa.edu/demos/2a1521-catenoidcatenary>
- [36] Helicoid-Catenoid. *3DXM Minimal Surfaces* [online]. 2018 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://virtualmathmuseum.org/Surface/helicoid-catenoid/helicoid-catenoid.html>
- [37] PÉREZ, Joaquín. *A New Golden Age of Minimal Surfaces*. 2017, , 347-358. DOI: <http://dx.doi.org/10.1090/noti1500>.
- [38] Materials Geometry. *UMass Amherst* [online]. 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://blogs.umass.edu/csantang/>
- [39] *Triply Periodic Minimal Surfaces* [online]. 2019 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://facstaff.susqu.edu/brakke/evolver/examples/periodic/periodic.html>
- [40] KAPFER, Sebastian C., Stephen T. HYDE, Klaus MECKE, Christoph H. ARNS a Gerd E. SCHRÖDER-TURK. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering. *Biomaterials* [online]. 2011, 32(29), 6875-6882 [cit. 2019-12-02]. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.06.012. ISSN 01429612. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961211006776>
- [41] AL-KETAN, Oraib, Mhd ADEL ASSAD a Rashid K. ABU AL-RUB. Mechanical properties of periodic interpenetrating phase composites with novel architected microstructures. *Composite Structures* [online]. 2017, 176, 9-19 [cit. 2019-12-02]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.026. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822316323157>
- [42] *Olympic Stadium Munich (Germany) Image* [online]. 2019 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://s3.amazonaws.com/gs-waymarking-images/5c460c6e-6bbd-4128-9867-dc4af6217794.jpg>
- [43] Marc Fornes equates a minimal structure to maximum fun. *Frame* [online]. 2017 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.frameweb.com/news/marc-fornes-equates-a-minimal-structure-to-maximum-fun>
- [44] JIANG, Shimei, Astrid GÖPFERT a Volker ABETZ. Novel Morphologies of Block Copolymer Blends via Hydrogen Bonding. *Macromolecules* [online]. 2003, 36(16), 6171-6177 [cit. 2019-12-07]. DOI: 10.1021/ma0342933. ISSN 0024-9297. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ma0342933>
- [45] *Adjoint Minimal Surfaces*. [online]. 2019 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://facstaff.susqu.edu/brakke/evolver/examples/periodic/adjoint.html>

Diplomová práce
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [46] The Gyroid *Triply Periodic Minimal Surface* [online]. 2019 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <http://facstaff.susqu.edu/brakke/evolver/examples/periodic/gyroid/gyroid.html>
- [47] *Kaleidoscopic Cells*. [online]. 2019 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://facstaff.susqu.edu/brakke/evolver/examples/periodic/kaleido/kaleido.html>
- [48] *Triply Periodic Minimal Surfaces - Batwing Family*. [online]. 2019 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://facstaff.susqu.edu/brakke/evolver/examples/periodic/batwing.html>
- [49] Lidinoid. *3DXM Minimal Surfaces*. [online]. 2018 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://virtualmathmuseum.org/Surface/lidinoid/lidinoid.html>
- [50] Lidinoid in a unit cell. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012 [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lidinoid#/media/File:Lidinoid_surface.jpg
- [51] SCHEIRS, John a Duane PRIDDY. *Modern styrenic polymers: polystyrenes and styrenic copolymers*. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2003. ISBN 0471497525.
- [52] FINK, J. K., SABU T., VISAKH P. M., *Handbook of engineering and specialty thermoplastics*. Salem, Mass.: Scrivener, 2012. ISBN 978-0-470-62583-5.
- [53] Data Sheets. *Fillamentum* [online]. 2019 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/pages/data-sheets>
- [54] Coefficient of Linear Thermal Expansion. *Omnexus* [online]. 2019 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/coefficient-of-linear-thermal-expansion>
- [55] Shrinkage. *Omnexus* [online]. 2019 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/shrinkage>
- [56] KABASCI, Stephan. *Bio-based plastics: materials and applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-1-119-99400-8.
- [57] Simplify3D, PROPERTIES TABLE, Filament Properties Table [online]. [2019] [citováno 16. 12. 2019]. dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
- [58] RABINOVITCH, Elvira B.; SUMMERS James W.; *Weather resistant plastic composites capped with polyethylene terephthalate glycol (PETG) for outdoor exposures* [online]. PolyOne Corp, 2002, US10140606. dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US6855402B2/en>
- [59] Thermoplastic Polyurethane. *American Chemistry Council* [online]. 2019 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://polyurethane.americanchemistry.com/polyurethanes/Introduction-to-Polyurethanes/Applications/Thermoplastic-Polyurethane/>
- [60] Complete Guide on Thermoplastic Polyurethanes (TPU). *Omnexus* [online]. 2019 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/thermoplastic-polyurethanes-tpu>
- [61] MLEZIVA, Josef., Šňupárek, Jaromír. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.

Diplomová práce
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [62] RESL, Petr, PROKŮPEK Luboš, ROUDNÝ Petr a HEJDUK Jiří. Modifikace 3D tiskové hlavy pro zhotovení razicích nástrojů. In: ADAM, Martin. *Studentská vědecká odborná činnost 2018/2019*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2019, s. 181-188. ISBN 978-80-7560-260-2.
- [63] ROUDNÝ, Petr, HEJDUK Jiří, RESL Petr a PROKŮPEK Luboš. Příprava razicích nástrojů pomocí 3D tisku. In: ADAM, Martin. *Studentská vědecká odborná činnost 2018/2019*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2019, s. 189-196. ISBN 978-80-7560-260-2.
- [64] MINIMAL SURFACES COLLECTION. *SKETCHFAB* [online]. 2017 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://sketchfab.com/3d-models/minimal-surfaces-collection-4cc9e3dbc1a5430cadd372ba854662b7>
- [65] *Microsoft 3D Printing* [online]. 2016 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://tools3d.azurewebsites.net/>
- [66] *Netfabb* [online]. 2013 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://service.netfabb.com/service.php>
- [67] Minimal surface crappy mesh catalogue. *Thingiverse* [online]. 2019 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/LionSwansky/collections/minimal-surface-crappy-mesh-catalogue>
- [68] FlashForge Dreamer. *NA3D* [online]. 2020 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://www.na3d.cz/p/3648/flashforge-dreamer?gclid=Cj0KCQiAqY3zBRDQARIsAJeCVxNMIK0CksX-efH3M5cXtb7ixvD9KFPwzEKPO7qpXh6Ccl7oZMfvqUsaAidNEALw_wcB

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-butadien-styren
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
BT	Blánové těleso
CDLM	Continuous Digital Light Manufacturing
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
DLP	Digital Light Projecting
DMA	Dynamická termomechanická analýza
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
H12MDI	4,4'-Diisokyanatodicyklohexylmethan
IPDI	Isophorondiisokyanát
LCD	Liquid Crystal Display
MDI	4,4'-Diisokyanatodifenylmethan
PC	Polykarbonát
PETG	Glykolem modifikovaný polyethylentereftalát
PLA	Kyselina polymléčná
SAN	Styrenakrylonitril
SBR	Styrenbutadienový kaučuk
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
ST	Síťové těleso
TMA	Termomechanická analýza
TPMP	Trojité periodická minimální plocha
TPU	Termoplastický polyurethan
UV	Ultrafialové záření