ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Optimalizace geometrie dílců pro potřeby aditivních technologií

AUTOR: František Truhlář
STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Pelikán

PRAHA 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Truhlář** Jméno: **František** Osobní číslo: **483345**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**

Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace geometrie dílců pro potřeby aditivních technologií

Název bakalářské práce anglicky:

Part geometry optimization for the purpose of additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1) Powder bed technologie a jejich technologické možnosti
2) Vnitřní struktury - jejich původ, využití a vlastnosti
3) Aditivní technologie v průmyslu, příklady aplikace optimalizovaných dílů

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pelikán, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lukáš Pelikán	Ing. Libor Beránek, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

. _____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne: …….. ……..

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Pelikánovi za cenné připomínky a rady v průběhu vypracovávání bakalářské práce. Obzvláště za trpělivost a čas, který byl ochoten věnovat práci. Dále pak velké díky patří rodině za podporu a pomoc při studiu.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na technologii 3D tisku, konkrétně na nejpoužívanější technologie na výrobu mřížkových struktur (SLM, EBM a FDM). V teoretické části je popsán základní princip topologické optimalizace, konkrétní příklady návrhových technologií, rozdělení struktur v přírodě a generování struktur v technice.

V práci je uveden postup optimalizace dílů v programu Materialise Magics. Výsledné díly jsou porovnávány z pohledu hmotnosti a času tisku. V poslední části se věnuji přehledu výsledků destruktivních zkoušek (tah, tlak, ohyb, únava) vzorků s mřížkovou strukturou a samotnému využití aditivních technologií v průmyslu.

Klíčová slova: 3D tisk, aditivní výroba, mřížková struktura, topologická optimalizace, mechanické vlastnosti odlehčených struktur

Annotation

The bachelor thesis is focused on 3D printing technology, specifically on the most used technologies for the production of lattice structure (SLM, EBM and FDM). The theoretical part describes the basic principle of topological optimization, specific examples of design technologies, distribution of structures in nature and generation of structures in technology.

The work presents the procedure of part optimization in the Materialize Magics program. The resulting parts are compared in terms of weight and printing time. In the last part I present an overview of the results of destructive tests (tension, pressure, bending, fatigue) of samples with a lattice structure a lattice structure and the use of additive technologies in industry.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, lattice structure, topological optimization, mechanical properties of lattice structures

Obsah

1 Úvod ... 8
2 Historie 3D tisku ... 9
3 Technologie 3D tisku ... 10
3.1 Spékání kovového prášku (Powder Bed Fusion) ... 11
3.1.1 Selektivní laserové tavení (SLM) ... 11
3.1.2 Tavení elektronovým paprskem (EBM) ... 12
3.2 Fused Deposition Modeling (FDM) ... 13
4 Topologická optimalizace ... 15
4.1 Metody topologické optimalizace ... 16
4.1.1 Optimalizace skin-frame ... 16
4.1.2 Optimalizace Hollowing ... 17
4.1.3 Optimalizace mediální osy ... 18
4.1.4 Optimalizace podle hustoty a tvaru proměnných ... 21
4.2 Co přináší topologická optimalizace ... 21
4.2.1 Redukce materiálu ... 21
4.2.2 Zkrácený proces návrhu ... 22
4.2.3 Maximální výkon ... 22
4.2.4 Optimalizace pro daná zatížení ... 22
5 Odlehčená struktura (lattice structure) ... 23
5.1 Struktury inspirované přírodou ... 23
5.1.1 Technologie replikace přírodních struktur a její využití ... 29
5.2 Odlehčené struktury ve strojírenství ... 30
5.2.1 Vytváření buněk na základě jednotkových buněk (unit cell) ... 30
5.2.2 Návrhové vzory (Pattern design) ... 32
6 Software pro odlehčené struktury ... 35
6.1 Import a generování struktury ... 35
7 Mechanické vlastnosti mřížkových struktur ... 40
7.1 Geometrie buněk ... 40

7.2 Zkouška tlakem 42
7.3 Zkouška Tahem 46
7.4 Zkouška ohybem 49
7.5 Únavový test 50
7.6 Shrnutí výsledků zkoušek 53
8 Použití odlehčených struktur v praxi 54
8.1 Aditivní technologie v medicíně 54
8.1.1 Zubní lékařství 54
8.1.2 Anatomické modely 54
8.1.3 Obecné nástroje 55
8.1.4 Protetika a ortotika 56
8.1.5 Monitorování zdraví a dodávání léků 57
8.2 Aditivní technologie v leteckém průmyslu 57
8.3 Aditivní výroba v automobilovém průmyslu 58
9 Závěr 60
10 Zdroje 61
11 Seznam obrázků 66
12 Seznam tabulek 68

1 Úvod

Strojírenství se neustále vyvíjí, pomocí výzkumů se posouvají vpřed jednotlivé technologie a nalézají se nové možnosti. V posledních letech se aditivní technologie stala populární pro svoji schopnost rychle vyrobit požadovanou součást. Otevřela možnosti ve výrobě složitých vnitřních struktur, a díky tomu začal vývoj vytváření pravidelných mřížkových struktur. Největší inspirací pro člověka v oblasti mřížkových struktur se tak stala příroda, kde se struktury vyvíjeli po několik miliard let, aby splňovaly konkrétní funkce. Díky takto odlehčeným strukturám je k vytvoření tělesa menší objem materiálu a má logicky nižší hmotnost oproti tělesu, které je vyplněno celé.

V této bakalářské práci se budu zabývat technologiemi 3D tisku, které se nejčastěji používají na výrobu mřížkové struktury, seznámíme se s metodami současných návrhových technologií pro složité topologické struktury. Díky technologickým možnostem aditivní technologie je poprvé člověk schopen vyrobit složité struktury inspirované přírodou, a proto se posléze zaměřím na druhy struktur v přírodě a technice. Dále se v práci zaměřím na praktické využití odlehčených struktur v medicíně, leteckém a automobilovém průmyslu.

Cílem této práce je seznámení s programem Materialise Magics a jeho možnostech generování odlehčených struktur. Dále poskytnout přehled výsledků studií, které se zabývaly destruktivními zkouškami vzorků s mřížkovou strukturou.

2 Historie 3D tisku

V roce 1981 Hideo Kodama z Nagojského městského průmyslového výzkumného ústavu zveřejnil svůj popis funkčního systému rychlých prototypů využívající fotopolymery. Kde pevný, tištěný model byl vytvořen ve vrstvách. [1]

O tři roky později, v roce 1984, se Charles Hull zapsal do historie 3D tisku vynalezením stereolitografie, kterou si v roce 1986 nechal patentovat. Tato technologie umožňovala designerům vytvářet 3D modely pomocí digitálních dat, které lze poté využít k vytvoření fyzického objektu. Tato technologie byla velkou novinkou pro průmysl, protože podniky si mohli prototypovat a testovat své designy, aniž by museli vynakládat velké počáteční investice do výroby. [1]

V roce 1992 společnost 3D Systems vytvořila první stroj stereolitografického aparátu na světě (SLA), který umožňoval vyrábět složité součásti za zlomek času, který by byl potřeba při konvenční výrobě. Ve stejném roce spustila společnost DTM první stroj na selektivní laserové slinování (SLS) na světě, který spékal prášek laserem. [1]

Tyto technologie byly teprve ve svém zrodu a nebyly dokonalé, avšak jejich potenciál byl nepopiratelný. [1]

Nástup do nového tisíciletí byl vzrušující, protože v roce 1999 byl první vytištěný orgán implantován člověku. Vědci z Wake Forest Institute pro regenerativní medicínu vytiskli syntetickou konstrukci lidského močového měchýře a poté ji pokryli buňkami pacientů. Nově vytvořená tkáň byla poté implantována do pacientů s téměř nulovou šancí, že by ji imunitní systém odmítl, protože byly vytvořeny z jejich vlastních buněk. [1]

Z lékařského hlediska to bylo pro 3D tisk velké desetiletí. Za pouhých deset krátkých let vyrobili vědci z různých institucí a startupů funkční miniaturní ledvinu, postavili protézu nohy se složitými součástmi a dále vytiskli první krevní cévy pouze pomocí lidských buněk. [1]

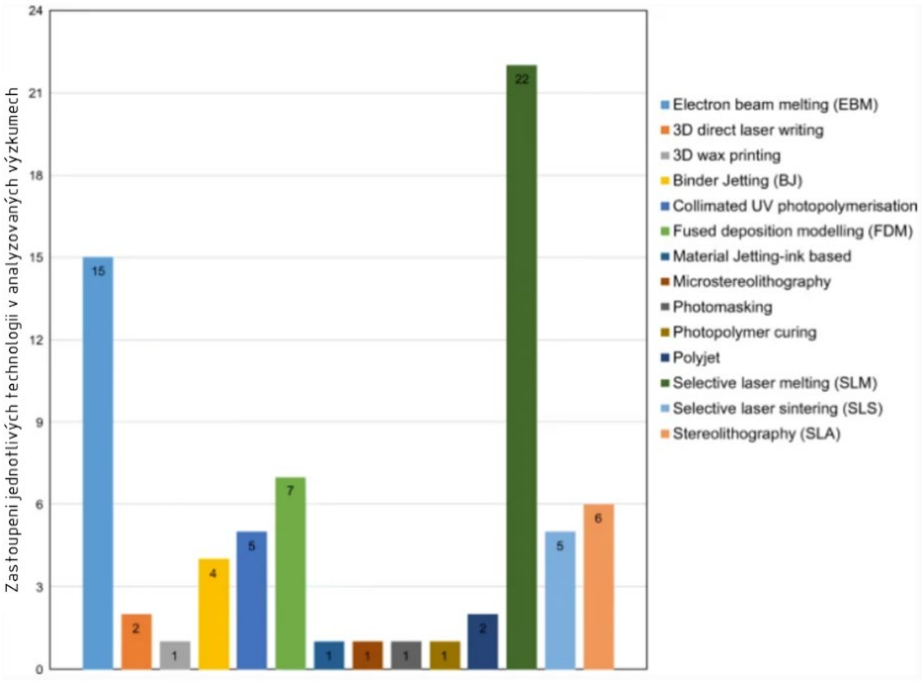
V tom samém desetiletí se 3D tisk setkal s trendem open-source. V roce 2005 zahájil projektem RepRap Project Dr. Adriana Bowyera iniciativu open-source na vytvoření 3D tiskárny, která by se v zásadě dokázala postavit sama, nebo alespoň vytisknout většinu svých součástí. Roku 2008 byla uvedena samoreplikující tiskárna Darwin, která toho byla schopna. [1]

První stroj SLS se stal komerčně životaschopným v roce 2006, což otevřelo dveře průmyslové výrobě dílů na zakázku. Startup 3D tisku Objet (nyní spojený se společností Stratasys) postavil stroj, který dokázal tisknout více druhů materiálů, což umožnilo výrobu jedné součásti v různých verzích s různými vlastnostmi materiálu. [1]

Kreativní inovace byly završeny v roce 2008 spuštěním společných služeb pro tvorbu, jako je společnost Shapeways, která začala nabízet služby tisku pro širokou veřejnost. Zákazníci mohli přicházet s vlastními návrhy, které tato společnost pak vytiskla. [2]

3 Technologie 3D tisku

Jak je znázorněno na obrázku 1, téměř všechny metody aditivní technologie jsou schopné vyrobit mřížkovou strukturu. Tři nejčastěji používané technologie při studiích struktur jsou Selective laser melting, Electron beam manufacturing a Fused deposition modeling. V další části práce se zaměřím konkrétně na tyto nejpoužívanější technologie 3D tisku, kterými se zabývali v práci A. Nazira a kolegů. [3]



Obrázek 1: Přehled použitých technologií v analyzovaných studií [3]

3.1 Spékání kovového prášku (Powder Bed Fusion)

Metoda spékání kovového prášku funguje na principu lokálního spékání prášku na pracovní podložce k vytvoření součásti po vrstvách. Tiskárny používají pro tisk kovový prášek, nejčastěji ocel, slitiny hliníku, titanu a jeho slitiny, superslitiny na bázi niklu a různé další kovové materiály. Hlavní rozdíly mezi typy kovových tiskáren se týkají způsobu, jakým se taví prášek na kovové části. Mezi nejpoužívanější zdroje tepla pro spékání prášku patří laserový nebo elektronový paprsek. [4]

Všechny zařízení, které jsou součástí rodiny Powder Bed Fusion (PBF) se skládají ze stavební komory, zdroje tepla, skladovacího a filtračního systému. Tato metoda kovového 3D tisku je v současnosti nejběžnějším typem a do této kategorie spadají následující technologie:

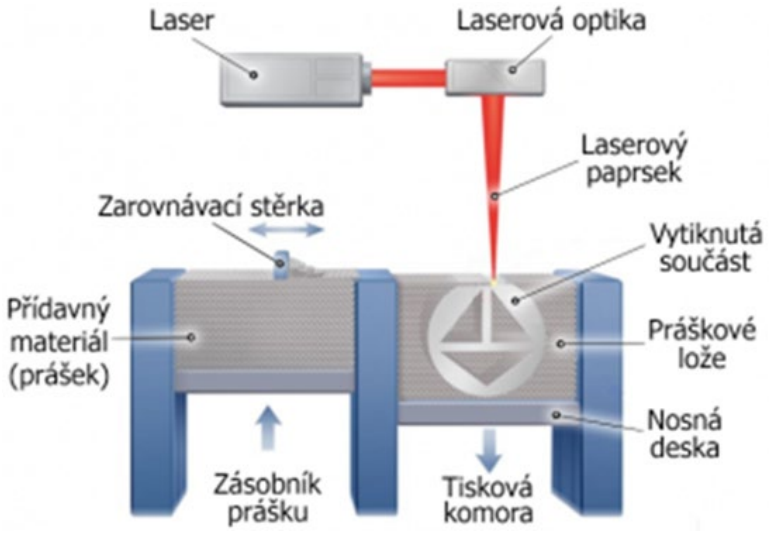
- Selective laser melting – SLM
- Direct laser metal sintering – DLMS
- Electron beam manufacturing – EBM

Uvedené technologie jsou principiálně stejné, nicméně se mírně liší například ve zdroji tepla, anebo nutnosti vakua v pracovním prostředí. [4] Dále se podrobněji podíváme na jednotlivé technologie.

3.1.1 Selektivní laserové tavení (SLM)

Technologie Selektivní laserové slinování je technologie založená na spékání prášku pomocí laseru. Laser jako zdroj energie se používá ke slinování prášku vrstvu po vrstvě do pevné části. Stejným principem funguje i technologie laserového spékání kovového prášku (DLMS). Jediný rozdíl je v teplotě, která se používá v těchto technologiích. [5]

Schéma této technologie je zobrazeno na obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma technologie SLM [6]

Tato technologie začíná nanesením tenké vrstvy prášku válcem na tiskovou komoru a následně se laserem speče v místech, kde mají být součásti konečného výtisku. Poté je nosná deska spuštěna o tloušťku jedné vrstvy a zásobní kontejnment se posune nahoru. Následně dojde opět k nanesení další tenké vrstvy. Tento proces se opakuje, dokud se nevyrobí požadovaná součást. Poté se nevyužitý prášek odsaje z pracovního prostoru zpět do zásobníku a můžeme ho znovu použít. [5]

Mezi výhody SLM patří fakt, že samotný kovový prášek se používá jako nosná struktura pro vyráběný díl. Není tedy nutná žádná další nosná struktura. Dále mají součásti vyrobené touto technologií vysokou pevnost, tuhost a je nám zde umožněno tisknout plně funkční součásti. Naopak mezi nevýhody patří poréznost a křehkost, náchylnost ke smršťování, deformaci a v neposlední řadě vysoká cena zařízení a materiálů. [5]

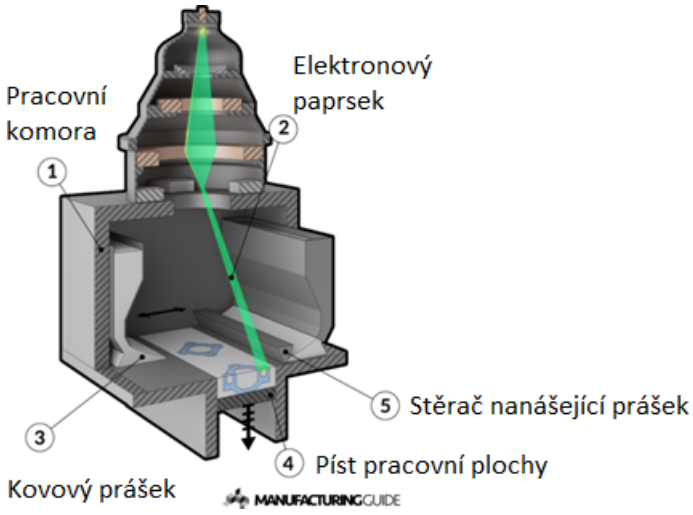
3.1.2 Tavení elektronovým paprskem (EBM)

Tavení elektronovým paprskem je další technologie aditivní výroby, která byla vyvinuta a patentována švédskou společností Arcam (nyní součástí společnosti GE Additive). Tato technologie používá jako zdroj energie elektronový paprsek místo laseru. Elektronový paprsek roztaví kovový prášek vrstvu po vrstvě ve vysokém vakuu a může dosáhnout úplného roztavení. [7]

Proces tavení elektronovým paprskem může vyrábět kovové díly se 100% hustotou a jeho materiálové vlastnosti jsou mnohem lepší než lité kovy. Proces EBM probíhá ve vakuu, díky čemuž jsou eliminovány nečistoty ve vyrobené součásti. Tento proces funguje také při vyšších teplotách (do 1 000 °C). Tato technologie používá nejčastěji kovový prášek slitin titanu, nebo slitiny chrom-kobalt, díky čemuž je vynikající volbou pro trh s lékařskými implantáty. [7]

Výhoda technologie EBM je možnost rozdělení paprsku, aby současně spékal a ohříval kovový prášek na různých místech, což výrazně urychluje potřebnou dobu výroby. Předehřátí prášku před jeho roztavením snižuje možné deformace a tím snižuje i potřebu výztuh a podpěr během výroby. Mezi nevýhody této technologie patří přesnost. To je zapříčiněno tím, že je elektronový paprsek trochu širší v porovnání s laserovým paprskem. [7]

Na následujícím obrázku 3 je ukázáno, jak vypadá pracovní komora technologie EBM.

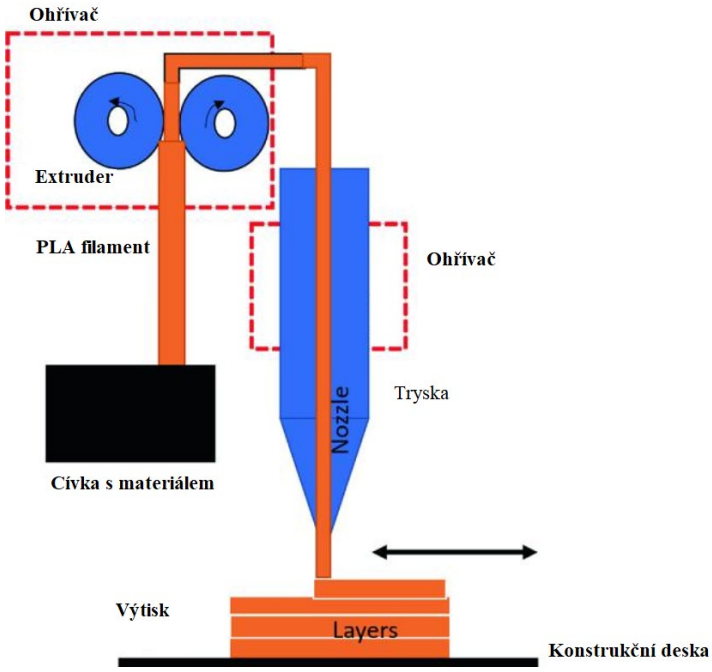


Obrázek 3: Schéma technologie EBM [8]

3.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Technologie FDM patří do skupiny tzv. Material extrusion (vytlačování materiálu) a jako materiál jsou zde používané polymery (filament). Ten se obvykle zahřeje do roztaveného stavu a poté je vytlačován tryskou 3D tiskárny. Hlava trysky se může pohybovat ve třech stupních volnosti a nanášet vytlačený polymer na konstrukční desku podle pokynů G-kódu. [9]

Princip technologie FDM je znázorněn na obrázku 4. Filament je plynule přiváděn přes extrudér a trysku stroje prostřednictvím dvou válečků otáčejících se v opačných směrech. Materiál je nanášen na konstrukční desku vrstvu po vrstvě, dokud není dosaženo požadovaného tvaru. V některých systémech FDM lze k nanášení polymerních složek použít více vytlačovacích trysek. [9]



Obrázek 4: Schéma technologie FDM [9]

Obvykle roztavení a účinnost vytlačování do značné míry závisí na vlastnostech termoplastického vlákna, a proto jsou různé 3D tiskárny navrženy pro konkrétní materiály. Ve skutečnosti většina levných 3D tiskáren FDM dokáže zpracovávat pouze jeden typ termoplastu a nejběžnějším materiálem je kyselina polymléčná (PLA). Mezi další materiály patří polykaprolakton (PCL), polypropylen (PP), polyethylen (PE), polybutylen tereftalát (PBT) a další. [9]

Fused deposition modeling je velice efektivní metoda, při které vzniká minimum odpadu. Také díky svým nízkým nákladům je to nejdostupnější a nejrozšířenější technologie. Na druhou stranu mezi její nevýhody patří nízká rozměrová přesnost výtisku, míra detailu a také vytištěná součást nemá stejné mechanické vlastnosti v různých směrech. [10]

4 Topologická optimalizace

Topologická optimalizace je algoritmický proces optimalizace mechanické součásti prováděný za účelem redukce váhy. Matematicky řeší jeden z nejběžnějších technických problémů, který existuje: jak vyrobit dostatečně silnou součást při použití co nejmenšího množství materiálu, čímž se sníží náklady. Z tohoto důvodu se topologická optimalizace používá v mnoha průmyslových odvětvích, zejména v leteckém a kosmickém průmyslu, kde je redukce hmotnosti zásadní. [11]

I když existuje mnoho různých metod topologické optimalizace, mezi nejpraktičtější patří metoda konečných prvků (Finite element method – FEM), což je další silná numerická metoda často používaná pro matematické a technické problémy. Tato metoda je základem pro počítačový simulační software Computer-Aided Engineering (CAE). [11]

V praxi topologická optimalizace využívá simulace analýzy konečných prvků k posouzení, které části objektu nejsou strukturálně zásadní. Počáteční analýza simuluje rozložení napětí objektu vystaveného vnějším silám. S těmito výsledky mohou algoritmy ověřit, které části objektu jsou méně vystaveny vnitřnímu napětí a lze je odstranit. (15)

Algoritmus neustále vyhodnocuje rozložení strukturálního napětí při odstraňování materiálu, aby mohl posoudit výsledné účinky. To se děje v mnoha individuálních krocích, dokud nezískáme stabilní geometrii podle nastaveného zatížení a okrajových podmínek. [11]

Základem topologické optimalizace je dosažení vnějšího tvaru, který bude optimalizovaný pro konkrétní stavy zatížení. Následně se kombinuje s fází, kde je díl proložen trámčitou strukturou, ve které jsou optimalizovány průměry jednotlivých trámků podle toho, jak je dané místo zatěžováno. [11] [12]

Síťové modely nebo parametrické modely jsou dvě nejčastěji používané metody k reprezentaci 3D geometrií. Přesto nejsou ideální pro návrh všech složitých topologických struktur. Aby bylo možné získat přesné výsledky modelování, bude k přiblížení navrženého modelu využíváno mnoho sítí. Ke sloučení celé geometrie jsou také zapotřebí desítky parametrických povrchů, což může přinést nevýhody v metodě konečných prvků. Pokud jde o konstrukční úkol, je třeba vzít v úvahu různé konstrukční požadavky, včetně mechanických vlastností, tisknutelnosti a dalších specifických požadavků. [13]

V současné době se mnoho vědců zabývá navrhováním složitých topologických struktur pro 3D tisk podle různých požadavků. [13]

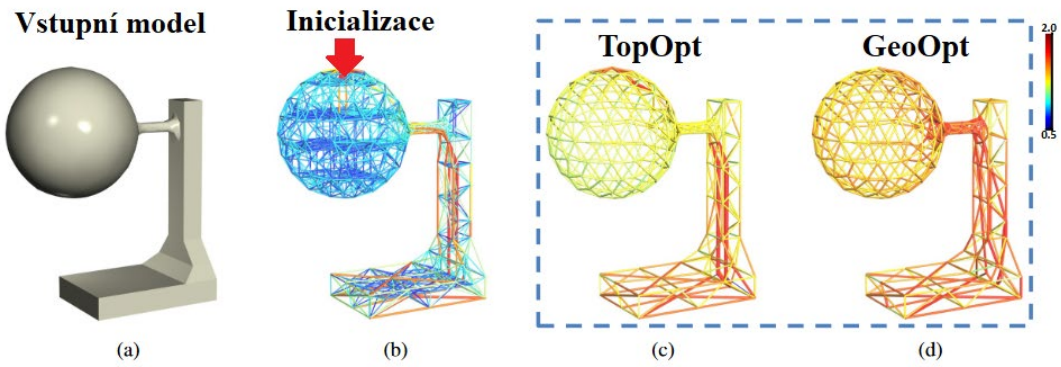
Nyní se podíváme na stručný přehled typických metod současných návrhových technologií pro složité topologické struktury.

4.1 Metody topologické optimalizace

4.1.1 Optimalizace skin-frame

Wang a kol. se inspirovali rámovými strukturami široce používanými v oblasti architektury a navrhli nákladově efektivní metodu se strukturami skin-frame. Princip algoritmu spočívá ve vygenerování počátečního snímku, poté algoritmus střídavě provádí topologickou optimalizaci a optimalizaci geometrie, dokud se objem konstrukce nezmenší. Topologická optimalizace eliminuje nadbytečné vzpěry konstrukce, kdežto optimalizace geometrie upřesňuje polohy vnitřních uzlů a poloměry vzpěr. Nakonec je jako konečný výsledek získána optimalizovaná rámová konstrukce s minimálním objemem. [13] [14]

Jak je vidět na obrázku 5, vzhledem ke vstupnímu modelu (a) je vygenerována počáteční rámcová struktura (b). Algoritmus střídavě provádí topologickou optimalizací (c) a optimalizací geometrie (d). Vzpěry v (b), (c) a (d) jsou zobrazeny včetně barevné vizualizace jejich poloměrů. Všimněte si, že konstrukce v (c) je mnohem řidší než u (b). Poměr úspory objemu konstrukce je přibližně 24 %. V tomto příkladu působí vnější síla 5 N svisle dolů na horní část modelu. [14]



Obrázek 5: Přehled algoritmu skin-frame [14]

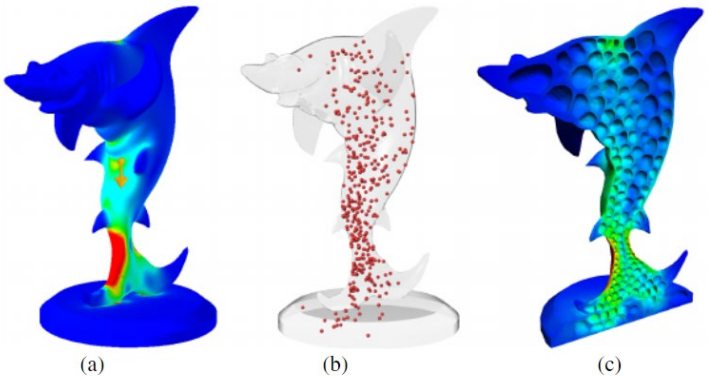
4.1.2 Optimalizace Hollowing

Tento optimalizační algoritmus pro dutiny je založený na konceptu struktury voštinových buněk. Využívají zde Voroného diagram k výpočtu nepravidelných objemových mozaik, které definují vnitřní strukturu. Voroného diagram (též znám jako Voroného teselace) je nepravidelný biomimetický vzorec, který pochází z přímého pozorování přírodních struktur. [15]

Metoda řídí rovnováhu hmotnosti a pevnosti tištěného modelu tak, aby tištěný tvar obsahoval minimální množství materiálu, který odolá předepsané vnější síle a uloženému vnitřnímu zatížení. [16]

Ze vstupního 3D modelu, vnějších sil a tíhy nejprve vypočítáme mapu napětí, která představuje napětí v každém vnitřním bodě (obrázek 6 (a)). Mapu napětí považujeme za spojitou objemovou mapu hustoty, pro kterou generujeme lokálně proměnlivé bodové rozložení, které reflektuje základní mapu hustoty (obrázek 6 (b)). [16]

Počáteční struktura je pak definována konstrukcí adaptivní Voroného mozaikou, která rozdělí vnitřek objektu na sadu uzavřených buněk. Uvnitř každé Voroného buňky zkonstruujeme harmonické pole a definujeme funkci póru jako izoplochu. Pór se vypočítá explicitním vyjmutím jeho povrchu (obrázek 6 (c)). [16]



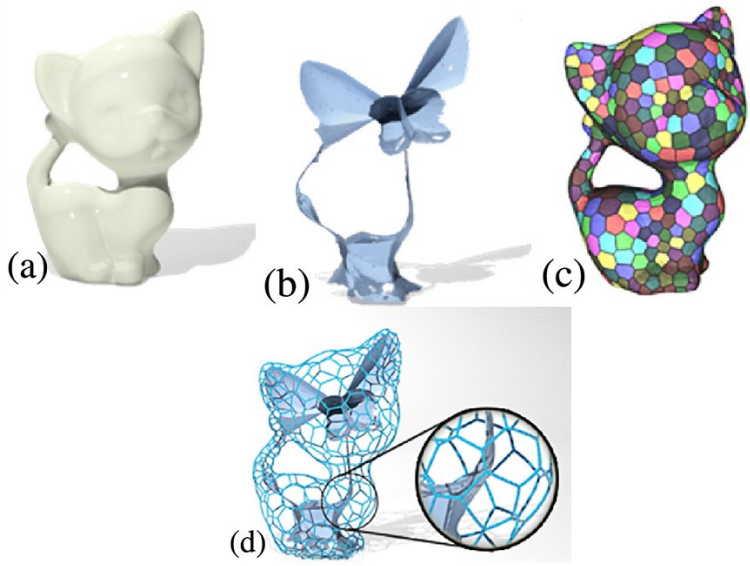
Obrázek 6: Přehled algoritmu hollowing [16]

Konstrukce vnitřní struktury založené na pórech je v podstatě řízena dvěma parametry: α, definující celkový počet vnitřních buněk a β definující množství dutin uvnitř každé buňky. Zvyšování hodnoty α tedy vede k hustší struktuře, zatímco zvyšování β zvyšuje dutost (velikost pórů). Intuitivně menší póry znamenají více vnitřního materiálu, a tedy větší váhu. Obvykle vnitřní struktura, které je méně dutá, znamená větší pevnost. [16]

4.1.3 Optimalizace mediální osy

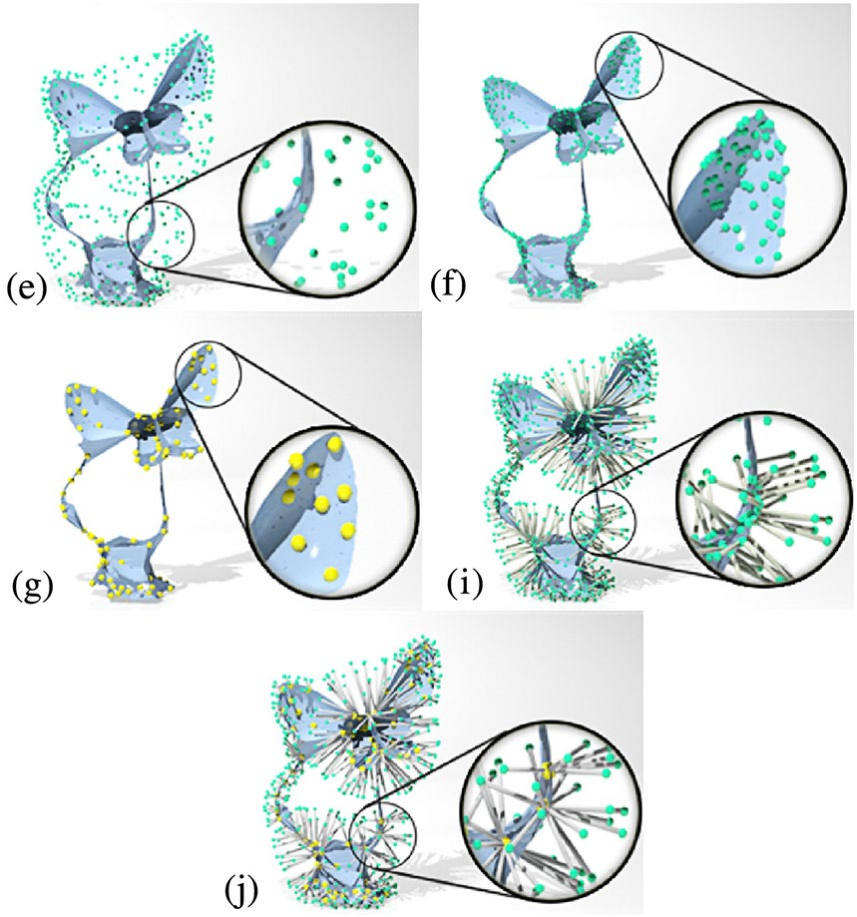
Tato metoda je inspirována pozorováním, že mediální osa, která je kostrou objektu, slouží jako přirozená páteřní struktura a zvyšuje jeho odolnost vůči vnějšímu zatížení. Pod povrchem je zkonstruována kostra s převahou šestiúhelníků a k propojení této kostry s mediální osou je navržena sada větvících se tyčí ve tvaru stromu. Vnitřní nosná struktura je dále optimalizována tak, aby se minimalizovaly náklady na materiál při dodržení pevnostních omezení. [17]

Při daném vstupním modelu (obrázek 7 (a)) se nejprve vypočítá mediální osa objektu pomocí transformace osy měřítka, která je znázorněna na obrázku 7 (b). Poté se vypočítá omezená Voroného mozaika (obrázek 7 (c)), čímž získáme šestiúhelníkovou rámovou strukturu (obrázek 7 (d)). Nazývá se šestiúhelníkovou kostrou, protože většina polygonálních buněk jsou šestiúhelníky, s několika výjimečnými pětiúhelníky, které zohledňují topologii povrchu a variabilitu zakřivení.



Obrázek 7: Přehled algoritmu Mediální osy a) – d) [17]

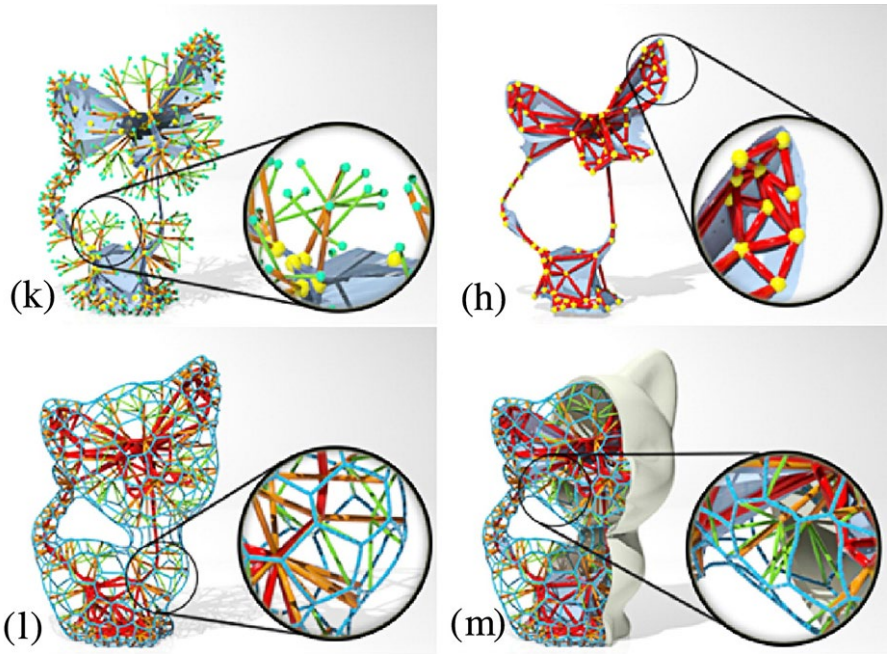
Poté se vezmou všechny vrcholy šestiúhelníkového rámu (obrázek 8 (e)) a promítnou se do odpovídajících bodů na střední ose (obrázek 8 (f)). Projekce se provede tak, že pro každý bod na obrázku 8 (e) najdeme jeho střed koule na mediální ose. Tyto odpovídající body spojíme, jak je znázorněno na obrázku 8 (i), aby se síly z opačných směrů vzájemně vyrovnaly, seskupíme blízké body na mediální ose (obrázek 8 (g)) a získáme seskupené stromy mediální osy (obrázek 8 (j)).



Obrázek 8: Přehled algoritmu Mediální osy e) – j) [17]

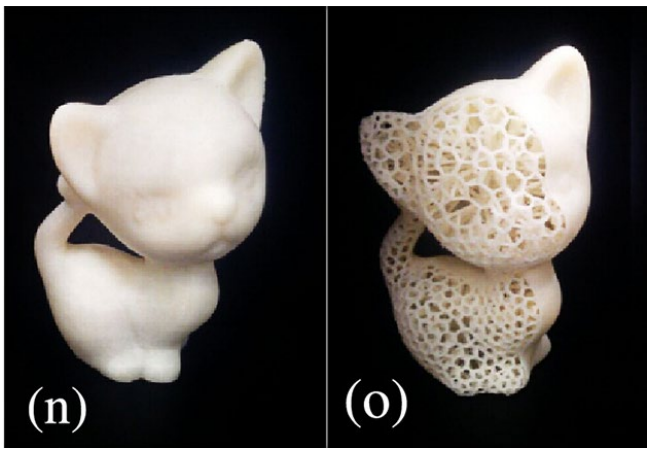
Dalším problémem je také nepřijatelný poměr štíhlosti (délka nad poloměrem), pokud má model dílčí části podobné kouli. Vzpěry s vysokým poměrem štíhlosti se pod tlakem ohýbají a nemohou tak přenášet vnější zatížení na mediální osu. Místo zvětšení poloměrů všem vzpěrám provedeme opět shlukování na vrcholech povrchu šestiúhelníku s vysokým poměrem štíhlosti a vybereme vzpěry spojující střed shluku jako hlavní vzpěry, jejichž poloměry zvětšíme a ostatní vzpěry podél těchto hlavních vzpěr zvedneme, abychom zkrátili jejich délku (čímž se vyhneme vysokému poměru štíhlosti). Tento postup je znázorněn na obrázku 9 (k). K aproximaci střední osy vstupního objektu

používáme rámovou strukturu. Výsledná rámová struktura je znázorněna na obrázku 9 (h). Nakonec všechny tři složky naší nosné struktury zkombinujeme a zobrazíme na obrázku 9 (l) a (m).



Obrázek 9: Přehled algoritmu Mediální osy k) – m) [17]

Na obrázku 10 (n) je zobrazen vytištěný model a odpovídající stromová struktura mediální osy je vidět na obrázku 10 (o). [17]

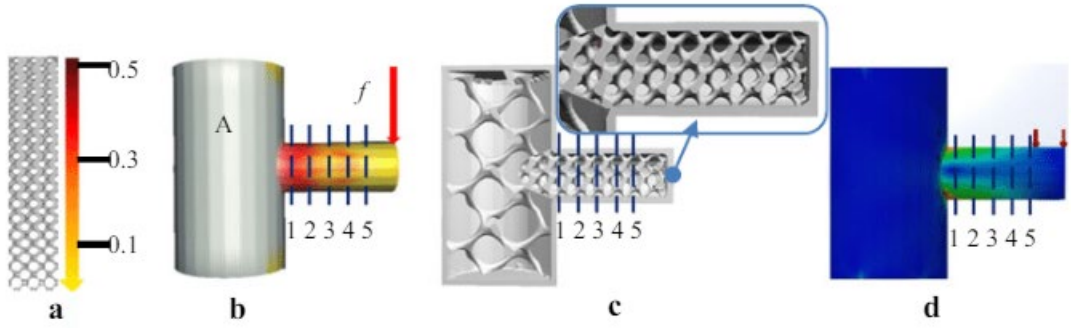


Obrázek 10: Přehled algoritmu Mediální osy n) – o) [17]

4.1.4 Optimalizace podle hustoty a tvaru proměnných

V této metodě je nejprve třeba provést analýzu napětí v příčném řezu, abychom určili oblasti náchylné k porušení. Poté se vytvoří dutá skořepinová konstrukce. Následně se objekt rozdělí na několik částí pomocí interaktivního členění sítě s ohledem na zjištěnou oblast. Dalším krokem je vygenerování rozložení hustoty z analyzovaného stavu napětí. Posledním krokem je vytvoření vnitřní porézní struktury s implicitní funkcí, která reprezentuje odhadnuté rozložení hustoty. [18]

Na obrázku 11 je návrh modelu typické konzolové konstrukce zatížené silou. Tloušťka modelu skořepiny je stanovena na $d = 1{,}5$ mm, síla je $F = 10$ N a součinitel bezpečnosti materiálu je $\lambda = 0{,}8$. Nejprve můžeme odvodit lokální rozložení napětí (obrázek 11 (b)), které určuje lokální stupňovité rozložení výplně (obrázek 11 (c)). Poté se model s výplní analyzuje pomocí metody konečných prvků (obrázek 11 (d)) z hlediska maximálního napětí. [18]



Obrázek 11: Přehled optimalizace podle hustoty a tvaru proměnných [18]

4.2 Co přináší topologická optimalizace

4.2.1 Redukce materiálu

Každá mechanická součást váží potenciálně více, než je zapotřebí, pokud nebyla topologicky optimalizována. Lehké konstrukce nejen snižují náklady na materiál, ale také omezují spotřebu výrobních zdrojů. Obecně řečeno, lehčí pohyblivé části generují menší tření a vyžadují méně energie k uvedení do pohybu. Výhodou je také dodavatelský řetězec, protože lehčí díly se přepravují snadněji a levněji. [11]

4.2.2 Zkrácený proces návrhu

Metody optimalizace dramaticky snižují technické náklady spojené s vývojem nových dílů a produktů. Automatizovaný proces je schopen vyrábět podstatně výkonněji součástky za zlomek času, který by potřeboval zkušený konstrukční tým. [11]

4.2.3 Maximální výkon

Optimální design dané součásti často není intuitivní a obvykle zahrnuje složité a organické tvary. Algoritmy optimalizace nezohledňují aspekty, jako je estetika a porušují běžná pravidla návrhu (například jednotnou tloušťku) ve prospěch výkonu. [11]

4.2.4 Optimalizace pro daná zatížení

Vždy provádíme optimalizaci na předem určené zatížení v daném směru, ale při aplikaci dílu v provozu se může vyskytnout zatížení ve směru, pro který dílec nebyl optimalizován a nemá v daném místě tak dobré mechanické vlastnosti. V takovém případě dojde k poškození. V tomto mají výhodu díly neoptimalizované, které těmto neočekávaným zátěžím odolávají lépe.

Topologická optimalizace jde skutečně ruku v ruce s 3D tiskem. Složité geometrie, které jsou výsledkem metod optimalizace lze vyrobit pouze pomocí aditivních výrobních procesů, zatímco tradiční konstrukční postupy nejsou schopny co nejlépe využít svobodu designu poskytovanou těmito novými procesy. Z toho vyplývá, že s pokrokem v průmyslových aditivních výrobních procesech se stále více pozornosti soustředí na topologickou optimalizaci. [11]

Pojďme se ale nyní podívat podrobně na odlehčené struktury. V následující části jsou rozebrány struktury v přírodě, které jsou stále větší inspirací pro inženýry i díky rozmachu aditivní výroby a svobody v designu.

5 Odlehčená struktura (lattice structure)

5.1 Struktury inspirované přírodou

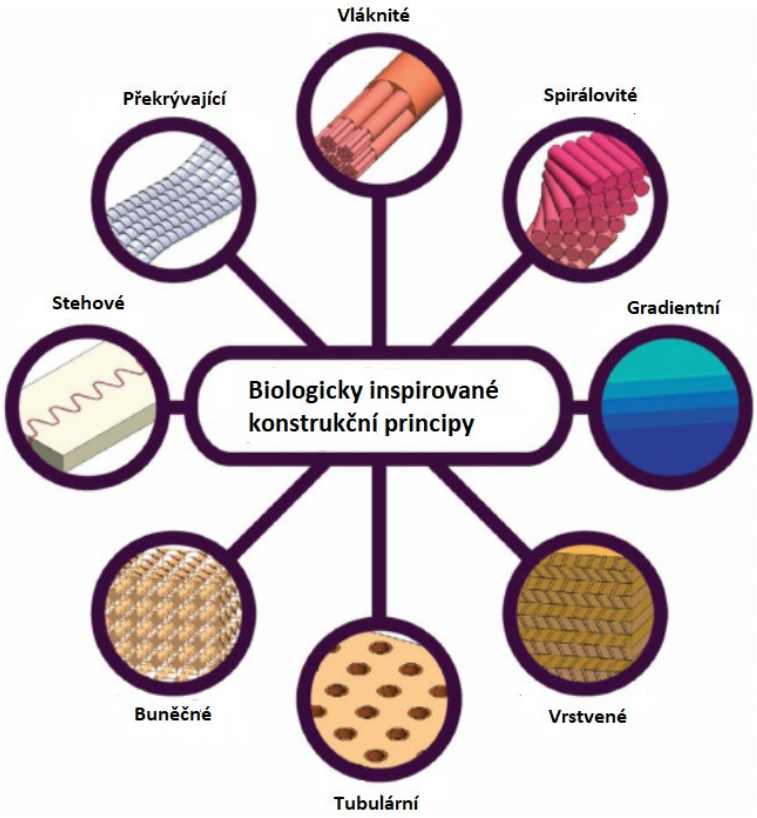
Krása nalezená v přírodě je často inspirativní, a právě tato inspirace si našla cestu do funkčního strojírenství prostřednictvím nejnovějšího vývoje v aditivní výrobě. Tato krása, zejména pokud jde o přírodní struktury, je často nejen vizuálně přitažlivá kvůli zaobleným křivkám a organickým tvarům, ale také krásná ve smyslu své technické funkčnosti nebo dokonce multifunkčnosti. Již více než 3,8 miliardy let příroda optimalizovala složité struktury tak, aby splňovaly konkrétní funkce v rámci omezení, která jsou dána buď samotným organismem, nebo vnějším prostředím. Učení se z těchto biologických struktur může podpořit naše využívání efektivních struktur ve strojírenských aplikacích a může dokonce přispět k udržitelnému poskytování nových řešení technických problémů, abychom žili v souladu s Matkou Zemí a nepokračovali ve vytváření globálních problémů. [19]

Právě touto problematikou se zabývá vědní obor známý jako biomimetika nebo též biomimikry. Biomimetika ve strojírenství zahrnuje studie biologických systémů – konkrétně s cílem využít informace získané z přírody při řešení technických problémů nebo pro využití ve strojírenských aplikacích. Moderní inženýrský design má možnost změnit konstrukční prvky a vlastnosti objektů při zachování funkčnosti, nebo použít simulaci k nalezení optimálního designu pro konkrétní požadované vlastnosti. V současné době byly popsány téměř dva miliony žijících druhů, i když se odhaduje, že existuje nejméně deset milionů. Rozmanitost přírodních a živých druhů představuje obrovský potenciální zdroj inspirace a informací pro inženýry a designery. Velká část tohoto potenciálu má při použití aditivní technologie obzvláště realistické vyhlídky díky svobodě v designu, kterou tato technologie umožňuje. [19]

Struktury s křivkami a zaoblenými hranami jakýmkoli způsobem připomínající něco v přírodě jsou často označovány jako „biomimetické“, „bionické“ nebo „organické“. Toto tvrzení není chybné, ale je třeba mít na paměti, že není přítomen žádný biologický vstup, a jako takový není skutečně biomimeticky ani biologicky inspirovaný. Když je však struktura navržena pro biologickou aplikaci, lze jí nazvat biomimetickou nebo bionickou kvůli její zamýšlené biologické roli, kde je požadavek na design převzat z biologického tvaru, které se často podobají přirozeným strukturám (např. protetické pomůcky).

Skutečný biologický vstup do procesu navrhování designu v aditivní technologii je ve strojírenství stále vzácný kvůli nedostatku biologů podílejících se na inženýrském designu obecně. Věda o biologických materiálech je nicméně vyspělou oblastí, která se zaměřuje na studium biologických systémů, aby porozuměla jejich vlastnostem a potenciálně využila tyto návrhy v technických systémech. Biologické materiály mají často vynikající mechanické vlastnosti díky jedinečným kombinacím tvrdých a měkkých materiálů a gradientům mezi nimi. Biologicky inspirované konstrukční principy byly rozděleny na vláknité, spirálovité, gradientní, vrstvené, tubulární, buněčné, stehové a překrývající se struktury (viz obrázek 12). [19]

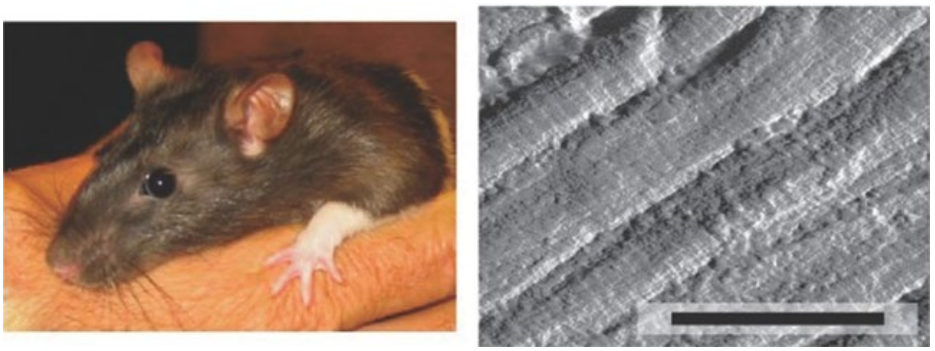
Biomimetickému designu se také říká „ekologický design“, protože se předpokládá, že tento přístup může vést k minimalizaci požadovaného materiálu, což je z hlediska životního prostředí udržitelnější. [19]



Obrázek 12: Biologicky inspirované konstrukční principy [20]

Nyní se podíváme na jednotlivé konstrukční principy a stručně se s nimi seznámíme.

- **Vláknité struktury** jsou využívány biologickými materiály, které vyžadují vysokou pevnost v tahu nebo tuhost v jednom směru. Obvykle se vyskytují v nemineralizovaných měkkých biologických materiálech, jakou jsou svaly a šlachy. (obrázek 13) [20]

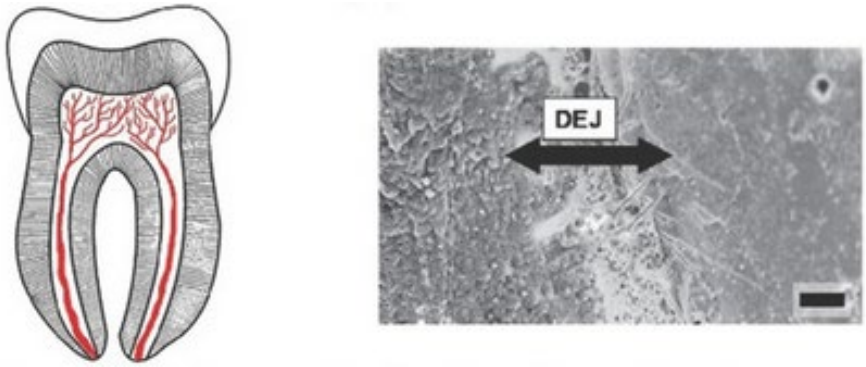


Obrázek 13: Šlacha krysy [20]

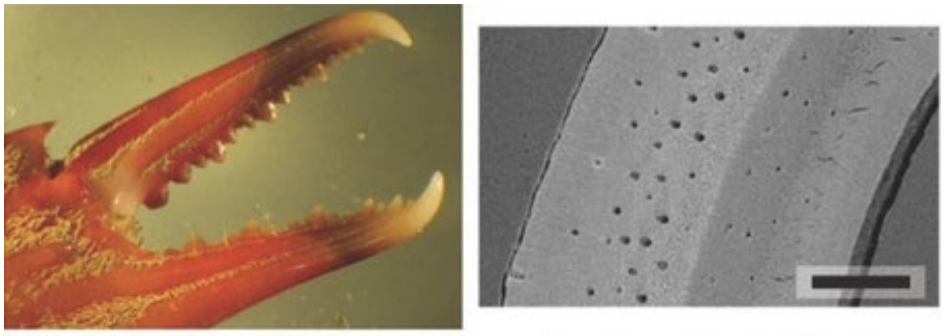
- **Spirálovité struktury** obecně poskytují zvýšenou pevnost a houževnatost ve více směrech. Tyto struktury se často používají v nemineralizovaných nebo relativně málo mineralizovaných konstrukčních materiálech. V makrostruktuře je nejčastěji použitá na vnějších plochách ke zlepšení torzní tuhosti. Konkrétní příklady najdeme na exoskeletonu korýšů (obrázek 14) a kostním kolagenu savců. [19]

Obrázek 14: Exoskeleton krevety [20]

- **Gradientní struktury** jsou kompozity, které kombinují materiály s různými mechanickými vlastnostmi nebo složením, což vede k postupnému přechodu vlastností nebo struktury skrze jejich průřez. Tyto konstrukční prvky se přizpůsobují nerovnoměrným vlastnostem mezi materiály a poskytují houževnatost, odolávají opotřebení nebo zastavují šíření trhlin. Nejčastější využití těchto struktur můžeme najít v zubech (obrázek 15), kde jsou tuhé povrchy kombinovány s tvárnými základy, nebo také v krabích klepetech. (obrázek 16) [20]



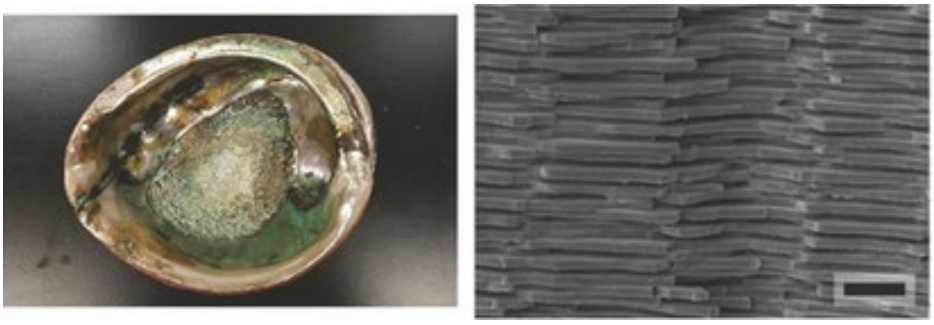
Obrázek 15: Přechod mezi sklovinou a zubovinou [20]



Obrázek 16: Struktura krabího klepeta [20]

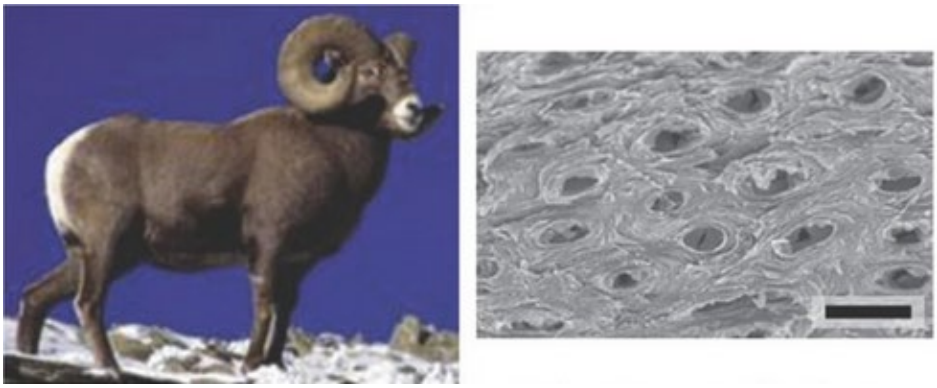
- **Vrstvené / kompozitní materiály** se skládají z více vrstev nebo rozhraní a často se používají ke zlepšení houževnatosti jinak křehkých materiálů. Mezi konkrétní příklady patří struktura exoskeletonu hmyzu a plášť mušlí. (obrázek 17 a 18) [20]

Obrázek 17: Struktura exoskeletonu hmyzu [20]



Obrázek 18: Struktura mušlí [20]

- **Tubulární (trubkovité) struktury** se skládají z řady dlouhých uspořádaných pórů a tyto konstrukční prvky se vyskytují v materiálech odolných proti nárazu a propíchnutí, jako jsou zuby, beraní rohy a koňská kopyta. (obrázek 19 a 20) [20]



Obrázek 19: Struktura rohu ovce tlustorohé [20]

Obrázek 20: Struktura kopyta koně [20]

- **Buněčné struktury** zahrnuje vysoce porézní materiály, jako například voštiny, jejichž výsledkem jsou struktury s vysokou pevností a nízkou hmotností, schopné odolat deformaci a ohybu. Vzhledem k jejich nízké hmotnosti jsou buněčné struktury běžně k nalezení zejména u ptáků a jiných létajících organismů. Jako konkrétní příklady lze uvést ostny dikobrazů, ptačí kosti (obrázek 21), zobáky tukanů (obrázek 22) a také trabekulární kosti savců. [20]

Obrázek 21: Struktura kosti ptáka [20]

Obrázek 22: Struktura zobáku tukana [20]

- **Stehové struktury** se často objevují v oblastech jako mikrostrukturální mezifázové prvky v biologických materiálech, kde je potřeba kontrolovat vnitřní sílu a flexibilitu materiálového rozhraní. Konkrétní příklad této struktury je například lebka savců tedy konkrétně na obrázku lebka jelence běloocasého. [20]

Obrázek 23: Struktura lebky jelence běloocasého [20]

5.1.1 Technologie replikace přírodních struktur a její využití

Stěžejním nástrojem k charakterizaci struktur pro biomimetiku je rentgenová mikropočítačová tomografie (dále jen micro-CT). Mickro-CT je ideální pro získání podrobných mikrostrukturálních informací o přírodních strukturách ve 3D, které lze použít k přímé replikaci přírodních struktur, měření 3D návrhových hodnot a jejich implementaci ve strojírenství jako bioinspirace. [19]

Jednou biologickou strukturou, která je zvláště zajímavá pro biomimetické studie a která byla rozsáhle studována pomocí mikro-CT, je lehká struktura ptačího peří a kostí. V praxi využívající techniky topologické optimalizace byla pomocí simulace a optimalizace předvedena optimalizovaná lehká konstrukce pro křídlo letadla, přičemž získaná konstrukce má silnou podobnost se strukturou kostí ptačího křídla, tzn. pevnou skořápku a spojovací úhly uvnitř duté konstrukce (viz obrázek 24). Díky rychlému pokroku ve výpočetním výkonu v posledních letech máme možnost získat podrobné detaily struktury pomocí simulací, což znamená, že se poprvé můžeme přiblížit ke složitosti přírodních struktur. [19]

Obrázek 24: Konstrukce pro křídlo letadla [21]

5.2 Odlehčené struktury ve strojírenství

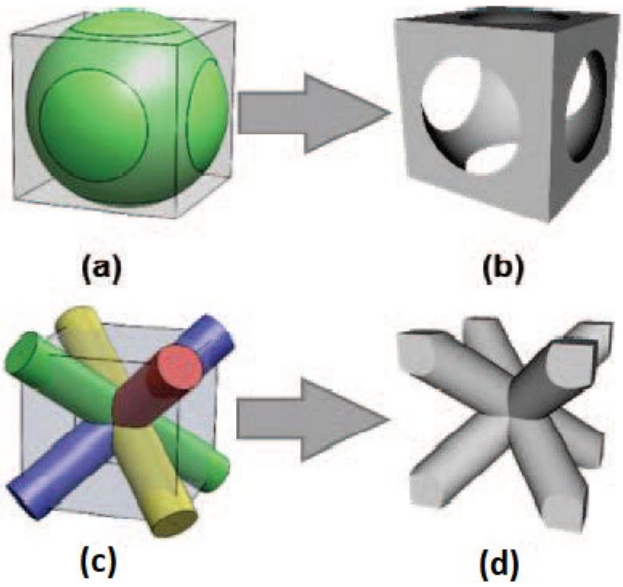
Nejvýznamnější pokrok aditivní technologie v porovnání s konvenční výrobou, jak již bylo zmíněno, je jeho schopnost vyrobit extrémně komplikované geometrie součásti. Zejména je schopen budovat odlehčenou strukturu, aby produkt byl lehčí a měl požadované mechanické vlastnosti. [22]

Z pohledu konstrukčního návrhu může být odlehčená struktura generována opakováním jednotkové buňky podle určitého prostorového vzoru. [22]

5.2.1 Vytváření buněk na základě jednotkových buněk (unit cell)

Jednotková buňka je nejmenší prvek, který tvoří a charakterizuje celou strukturu mřížky. Může být navržen pomocí primitivní metody, ve které se jednotková buňka skládá z některých jednoduchých geometrických útvarů, implicitní povrchové metody, ve které je povrch jednotkové buňky definován matematickými rovnicemi a topologickou optimalizací, při které je struktura získána pomocí optimalizačních výpočtů. [23]

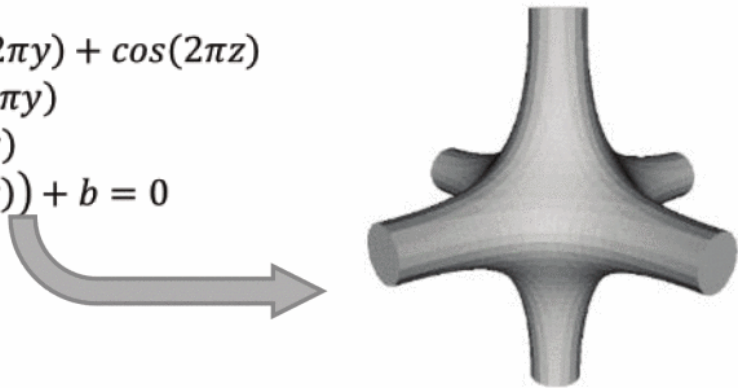
Primitivní metoda je přímý přístup, který se opírá o Booleovské operace jednoduchých geometrických tvarů. Na obrázku 25 (b) je znázorněna krychlová jednotková buňka vytvořená Booleovským odečtením s použitím krychle jako základního objektu a soustředné koule jako odečítaný objekt. Příhradová struktura (obrázek 25 (d)) je vytvořena nejprve převzetím Booleovského spojení čtyř diagonálně orientovaných válců a poté Booleovským průsečíkem s krychlí. [23]



Obrázek 25: Schéma primitivní metody [23]

Implicitní povrchová metoda používá implicitní rovnice k reprezentaci povrchu jednotkové buňky v 3D prostoru. Rovnice F (x, y, z) = 0 definuje počátek funkce tří souřadnic, která určují pole bodů, umístěné na povrchu. Obrázek 26 ilustruje architekturu jednotkové buňky a její odpovídající rovnici. [23]

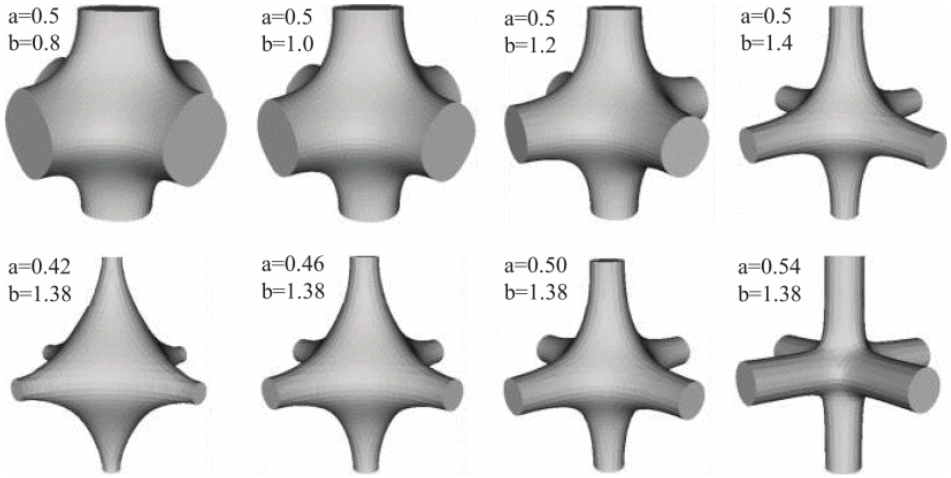
$$\begin{aligned} &\mathrm{F}(x,y,z) \\ &= cos(2\pi x) + cos(2\pi y) + cos(2\pi z) \\ &+ a\big(cos(2\pi x)cos(2\pi y) \\ &+ cos(2\pi y)cos(2\pi z) \\ &+ cos(2\pi z)cos(2\pi x)\big) + b = 0 \end{aligned}$$



Obrázek 26: Vygenerovaná struktura pomocí implicitní metody [23]

Pórovitost jednotkové buňky se vztahuje k objemovému podílu póru v jednotkové buňce, což ovlivňuje výrazně celkové mechanické vlastnosti. Při použití primitivní metody je pórovitost korelována s rozměry geometrického tvaru, což je nevhodné na úpravu. Naproti tomu flexibilita, kterou umožňuje implicitní metoda spočívá v tom, že pórovitost lze parametricky řídit upřesněním souřadnic v rovnici. Například, jak je

znázorněno na obrázku 27, pórovitost a tvar jednotkové buňky lze snadno upravit změnou koeficientu ***a***, nebo konstantního členu ***b*** rovnice. Tato flexibilita je atraktivní pro numerický design a algoritmickou integraci pro jednotkovou buňku. [23]

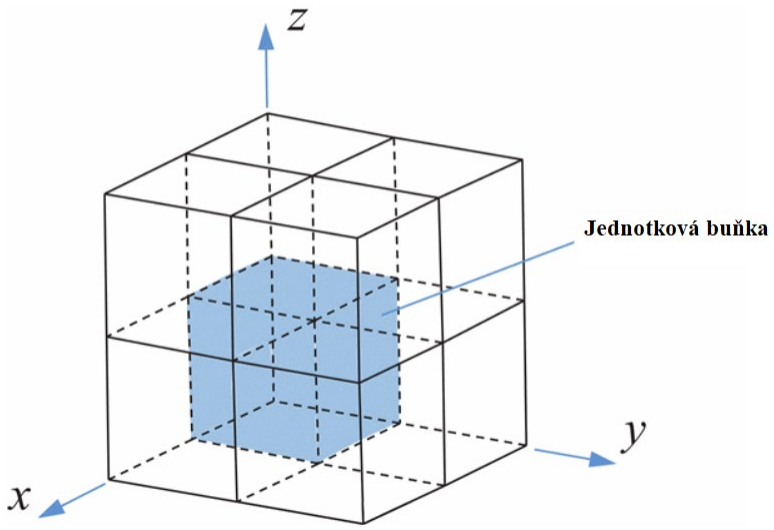


Obrázek 27: Změny při úpravě členů v rovnici [23]

5.2.2 Návrhové vzory (Pattern design)

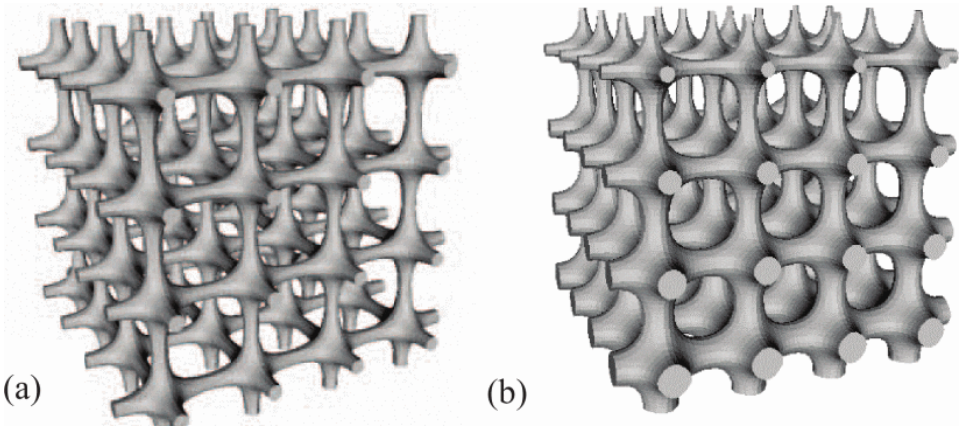
Návrh vzoru odkazuje na způsob, jakým se jednotkové buňky opakují v 3D prostoru. Odlehčenou strukturu lze vytvořit z řady jednotkových buněk pomocí přímého vzorování, ve kterém se jednotkové buňky postupně opakují. Dalším způsobem je konformní vzorování, ve kterém se opakující se jednotkové buňky přizpůsobují geometrii povrchu. Posledním způsobem je topologická optimalizace, kterou lze použít nejen k optimálnímu rozložení materiálu v jednotkové buňce, ale také k uspořádání prostorové replikace jednotkové buňky v celém konstrukčním prostoru. [23]

V převážné většině případů jsou jednotkové buňky navrhovány jako krychlové prvky. Potom lze odlehčenou strukturu generovat přímo opakováním jednotkových buněk ve třech rozměrech (podél os x, y, z). Tato metoda je znázorněna na obrázku 28, ukazující strukturu mřížky, která se skládá z 2 × 2 × 2 jednotkových buněk vytvořených pomocí přímého vzorování, kde každá ze souřadnicových os obsahuje dvě buňky. [23]



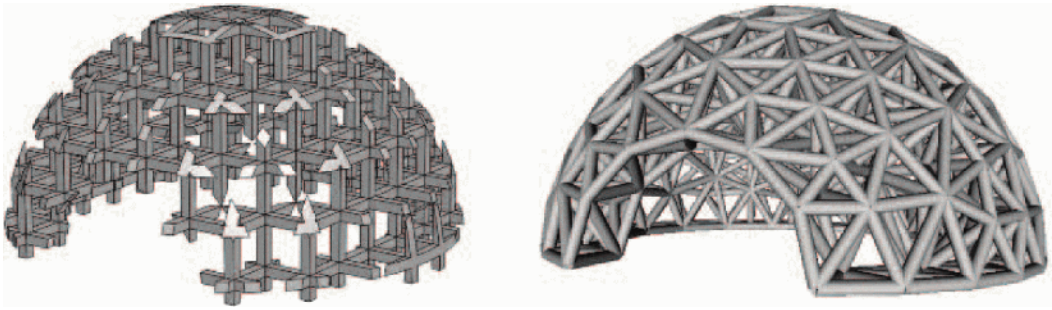
Obrázek 28: Ukázka přímého vzorování [23]

U jednotkových buněk navržených implicitní metodou je generování odlehčené struktury snazší. Změnou rozsahu proměnných implicitní funkce se pozmění vzorování celé jednotkové buňky. Například pokud jednotková buňka definována v rozsahu [0, 1], změnou rozsahu na [0, 4], bude získána odlehčená struktura 4 × 4 × 4 (obrázek 29 (a)). Další flexibilita implicitní metody spočívá v tom, že gradient pórovitosti lze snadno zavést do odlehčené struktury přidáním lineárního členu do rovnice. Například přidáním členu ***kz*** do rovnice bude odlehčená struktura vykazovat gradient pórovitosti ve směru osy z (obrázek 29 (b)). Díky schopnostem a flexibilitě v porézní kontrole lze dosáhnout složitějšího rozdělení pórovitosti v implicitních strukturách. [23]



Obrázek 29: Vliv aplikace implicitní metody (a) odlehčená struktura bez gradientu a (b) s gradientem pórovitosti [23]

Konformní vzorování je schopno vést jednotkové buňky tak, aby odpovídaly tvaru designového prostoru. Obrázek 30 ukazuje kopulovitou odlehčenou strukturu, na které můžeme vidět porovnání přímého vzorování s Booleovskými operacemi a konformní vzorování. Právě u konformního vzorování je patrné zachovávání integrity odlehčené struktury, což zajišťuje lepší rozložení zatížení na celou strukturu. [23]



Obrázek 30: Porovnání přímého vzorování (vlevo) a konformního vzorování (vpravo) [23]

6 Software pro odlehčené struktury

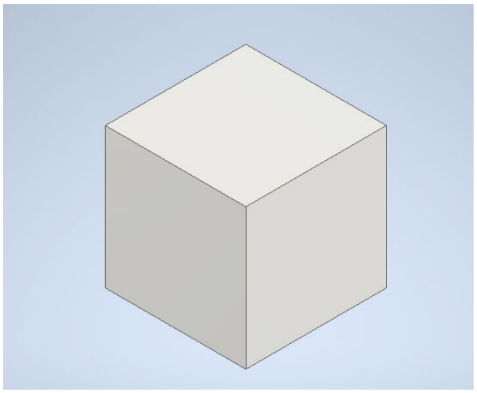
Nyní se v praktické části práce podíváme blíže na software, který generuje odlehčené struktury a jaké mají vliv parametry těchto struktur na vlastnosti výtisku a proces tisku.

Cílem praktické části bakalářské práce je seznámit se s programem Materialise Magics a aplikovat předešlé informace v teoretické části o odlehčených strukturách na součásti a pozorovat, jak jednotlivé parametry odlehčené struktury ovlivňují dobu tisku. Práce probíhala v softwaru Materialise Magics, který poskytuje řadu funkcí jako například editor STL dat, opravy chyb, analýzy a automatické generování podpor.

6.1 Import a generování struktury

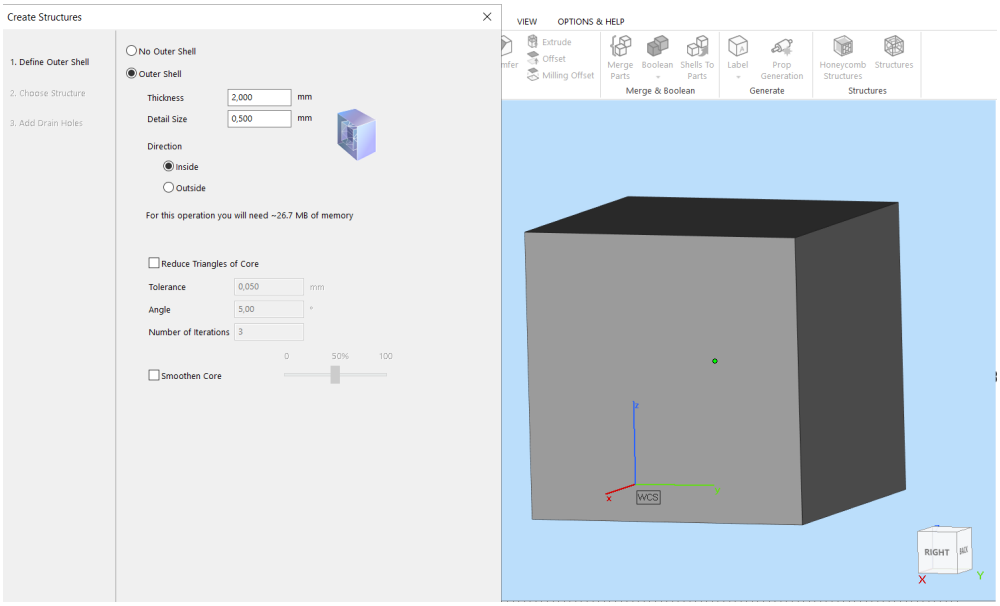
Jak již bylo zmíněno, praktická část bakalářské práce probíhala v programu Materialise Magics, kam jsem nejprve nahrál model, ve kterém byly struktury následně generovány.

Rozhodl jsem se pro základní 3D geometrický tvar krychle jako jednoduchý objekt pro zkoušku výpočtu, který jsem vymodeloval pomocí programu Autodesk Inventor (obrázek 31) a následně převedl do formátu STL. Délka hran krychle je 100 mm.



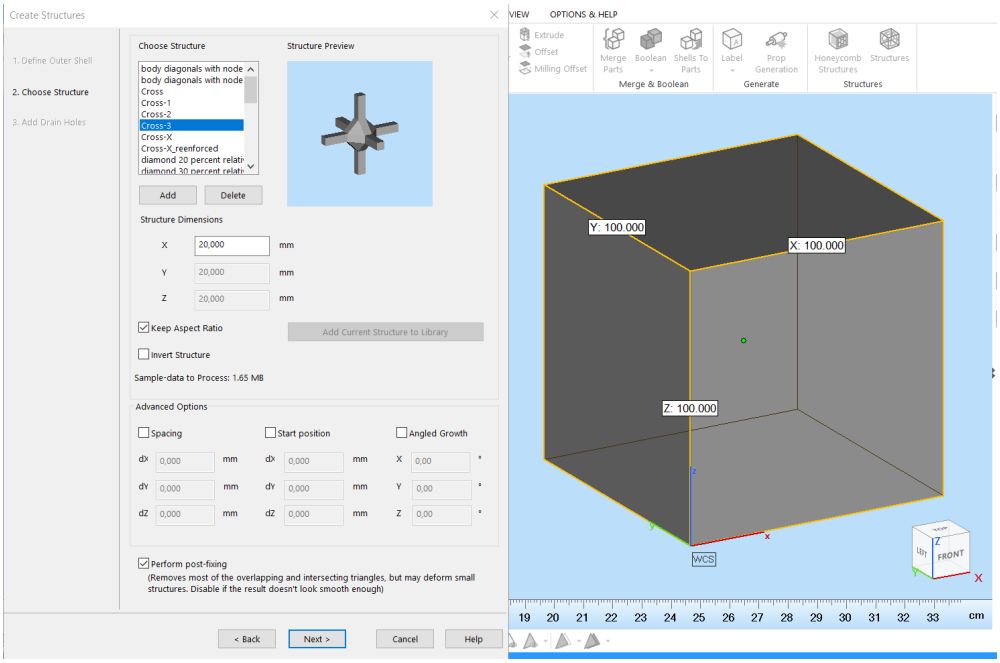
Obrázek 31: Vymodelovaná součást v Autodesk Inventor

Po nahrání modelu krychle do programu Materialise Magics jsem přešel do záložky *Structures*. Zde si v prvním kroku můžeme zvolit tloušťku vnější skořápky (volím tloušťku *2 mm)*. Lze zvolit i možnost bez vnější skořápky, která by se využila například při zkoumání kvality tisku, kde by vnější skořápka byla na obtíž.

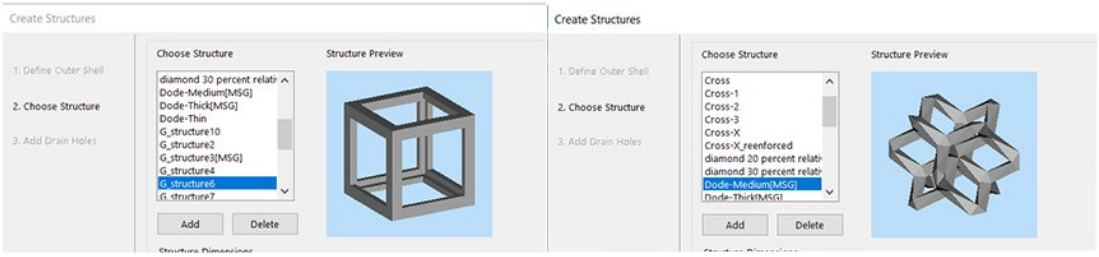


Obrázek 32: Struktura – krok 1

Ve druhém kroku si zvolíme jednu z nabízených struktur. Zvolil jsem zde strukturu s názvem *Cross-3*. Pro srovnání jsem vygeneroval další struktury Dode-Medium (MSG) a kubickou (G_structure6).



Obrázek 33: Struktura – krok 2



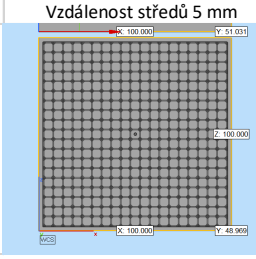
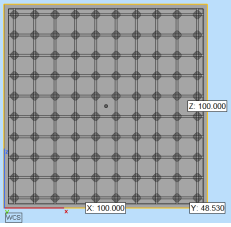
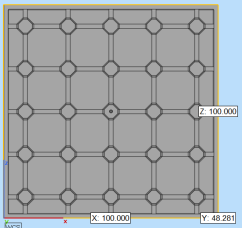
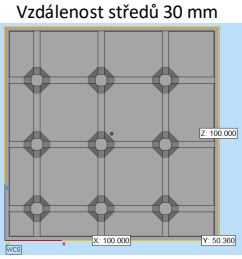
Obrázek 34: Vybrané struktury

V následující tabulce jsou uvedeny zvolené vzdálenosti středů.

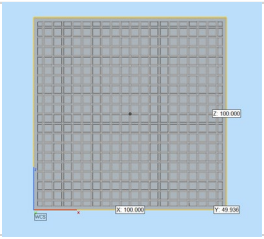
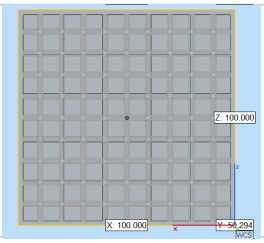
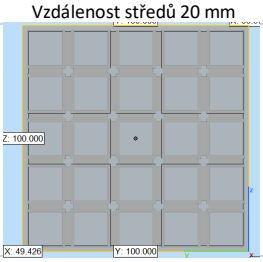
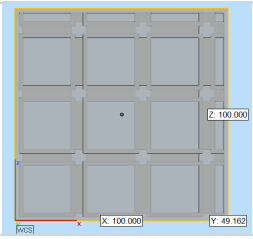
Tabulka 1: Přehled navolených charakteristik struktur

Název struktury	Vzdálenost středů [mm]			
Cross-3	5	10	20	30
Kubická (G_structure6)	5	10	20	30
Dode-Medium(MSG)	5	10	20	30

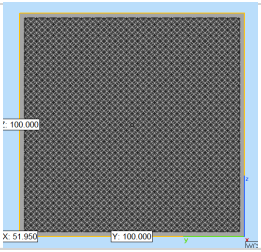
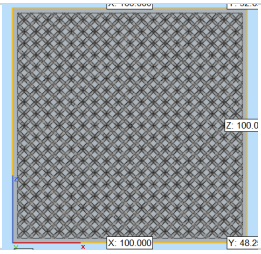
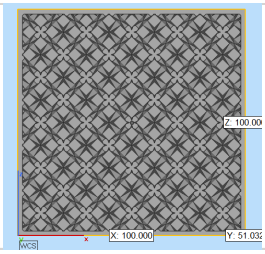
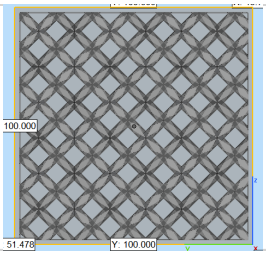
Tabulka 2: Vzdálenost středů struktury Cross-3

Struktura	Vzdálenost středů 5 mm	Vzdálenost středů 10 mm	Vzdálenost středů 20 mm	Vzdálenost středů 30 mm
Cross-3				

Tabulka 3: Vzdálenost středů struktury G_structure6

Struktura	Vzdálenost středů 5 mm	Vzdálenost středů 10 mm	Vzdálenost středů 20 mm	Vzdálenost středů 30 mm
Kubická (G_structure6)				

Tabulka 4: Vzdálenost středů struktury Dode-Medium (MSG)

Struktura	Vzdálenost středů 5 mm	Vzdálenost středů 10 mm	Vzdálenost středů 20 mm	Vzdálenost středů 30 mm
Dode-Medium(MSG)				

Volba charakteristik struktur probíhalo po jedné krychli, kde jsem navolil typ struktury a následně požadovanou vzdálenost středů. Poté program vypočítal objem součástky, který se lišil u jednotlivých součástí. Zde záleželo na množství výplně a obecně platí, že čím menší je vzdálenost středů, tím je čas výpočtu delší.

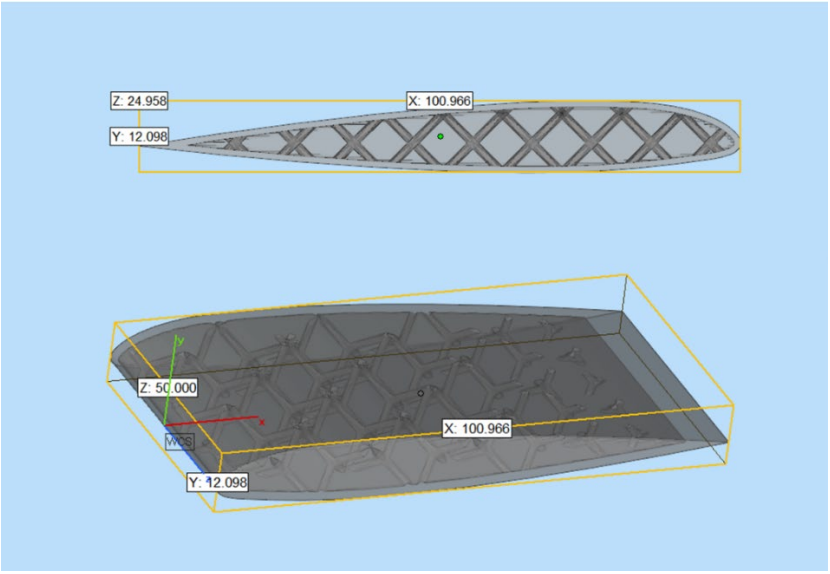
Po navolení a výpočtu jsem přešel do záložky *Build preparation*, kde jsem umístil součást na virtuální podložku tiskárny a následně program vypočítal odhadovanou dobu tisku. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5: Odhadovaný čas tisku

Struktura	Vzdálenost středů [mm]	Odhadovaný čas tisku [h]	Objem dílu [mm^3]	Výška vrstvy [mm]
Cross-3	5	6 hod 5 min	159 309	0,125
	10	6 hod 6 min	160 121	
	20	6 hod 6 min	160 119	
	30	5 hod 44 min	150 314	
Kubická (G_structure6)	5	8 hod 21 min	218 739	0,125
	10	7 hod 58 min	209 011	
	20	7 hod 27 min	195 245	
	30	8 hod 18 min	217 583	
Dode-Medium (MSG)	5	8 hod 38 min	226 311	0,125
	10	8 hod 38 min	226 115	
	20	8 hod 44 min	228 781	
	30	8 hod 42 min	228 130	

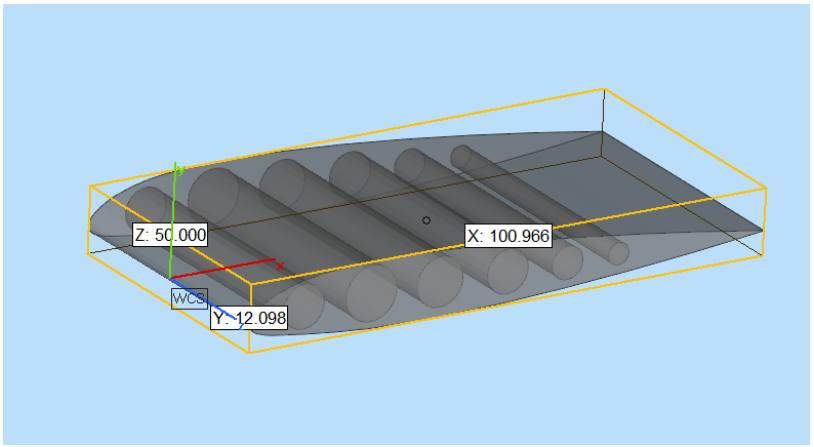
Z uvedených hodnot je patrné, že se jedná o několikahodinové výrobní operace. V případě struktury Cross-3 má nejkratší dobu tisku struktura se vzdáleností středů 30 mm. Je to nejspíše zapříčiněno tím, že se jedná o poměrně jednoduchou strukturu s malými příčkami, tudíž čím je větší jednotková buňka, tím je menší objem dílu. Tento trend však neplatí u dalších dvou struktur, které mají složitější jednotkové buňky. Konkrétně u kubické struktury má nejkratší dobu tisku díl se vzdáleností středů 20 mm a u struktury Dode-Medium to jsou dílce se vzdáleností 5 a 10 mm.

Jako ilustrativní příklad využitelný v běžné praxi jsem si vybral model ve tvaru křídla letadla, kde jsem postupoval obdobně jako u předchozího modelu. V praxi při topologické optimalizaci by na tento model měli být definovány vnější síly, které budou v provozu na součást působit. Posléze by byla vygenerována příslušná struktura, která by odpovídala daným okrajovým podmínkám.



Obrázek 35: Příklad odlehčené struktury křídla

U tohoto modelu jsem zvolil strukturu se spojovacími úhly, která byla nejpodobnější struktuře zobrazené na obrázku 24. Pro porovnání jsem vytvořil neoptimalizovaný díl křídla s vnitřními dutinami, abychom se mohli podívat na rozdíl v objemu a váze.



Obrázek 36: Neoptimalizované křídlo

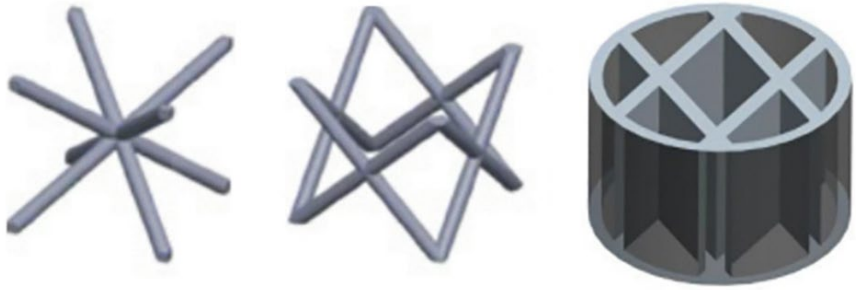
Neoptimalizovaný díl má objem 27 292 mm^3 a váhu 0,21834 kg. V případě optimalizovaného dílu se snížil objem na 11 972 mm^3 a váhu 0,095777 kg, což znamená redukce váhy a objemu o 56 %. Takto rapidní redukce váhy je v leteckém průmyslu vítaná, protože se sníží celková váha letadla a tím pádem i spotřeba paliva.

7 Mechanické vlastnosti mřížkových struktur

Mřížkové struktury byly hluboce testovány, aby bylo možné charakterizovat a ověřit jejich mechanické vlastnosti. Nejčastější prováděnou zkouškou byla zkouška tlakem, ale v posledních několika letech byly provedeny zkoušky tahem, únavou a ohybem, aby se rozšířili znalosti o mechanických vlastnostech odlehčených struktur. Zkouška tlakem se obvykle provádí podle normy ISO 13314 (týkající se zkoušek tlakem pro porézní a pěnové kovy), která, i když není specifická pro aditivně vyráběné vzorky, poskytuje dobré indikace, které parametry se mají během testu použít. Pro jiné charakterizační testy neexistuje norma pro porézní nebo buněčné vzorky. Vzhledem k tomu, že neexistuje specifická mezinárodní norma týkající se mechanické charakterizace těchto struktur, tento přehled může poukázat na to, které metodiky, vybavení a parametry jsou nejvíce používány vědci z celého světa, aby poskytli možné užitečné vodítko pro další vývoj v oblasti designu, hodnocení a aplikace kovových mřížkových struktur. [24]

7.1 Geometrie buněk

Jak již bylo zmíněno, mřížkové struktury se skládají z jednotkové buňky s definovanou geometrií periodicky opakovanou v prostoru. Mřížky lze kategorizovat různými způsoby: 2D nebo 3D, náhodné nebo periodické, otevřené nebo uzavřené, homogenní nebo heterogenní, ale nejkonkrétnější jsou vzpěry nebo trojnásobně periodické minimální plochy (triply periodic minimal surfaces, zkráceně TPMS). V mřížce založené na vzpěře je jednotková buňka složena ze skupiny příčníků propojených navzájem v bodech zvaných uzly (n). Nejvýznamnější mřížkové struktury jsou znázorněny na obrázku 37, kde nejpoužívanějšími mřížkovými strukturami jsou kubická prostorově centrovaná (BCC), kubická plošně centrovaná (FCC) a diamantová mřížka. [24]



*Obrázek 37: Příklady jednotkových buněk mřížkové struktury vyčteno **zleva:** BCC, FCC, Diamant [3]*

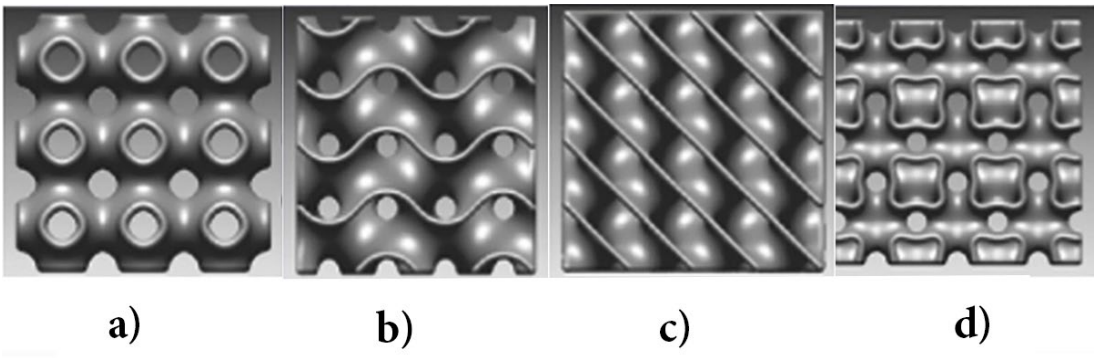
Počet vzpěr a uzlů (n) jednotkové buňky je zásadní pro předpovědi jejího deformačního mechanismu. Ve skutečnosti mohou ovlivnit stupeň konektivity a volnosti jednotkové buňky, které lze kvantifikovat pomocí Maxwellova čísla (1). [24]

$$M = s - 3n + 6 \tag{1}$$

Kde *M* je Maxwellovo číslo, *s* je počet podpěr a *n* je počet uzlů uvnitř jednotkové buňky. Pokud je M < 0, konstrukce je nedostatečně tuhá, vzpěry nejsou schopny vyrovnat vnější síly, momenty se přenesou do uzlů a tyto struktury označujeme jako struktury s převládajícím ohybem (z angl. Bending-dominated). Je-li M ≥ 0, struktura je přílіž tuhá, momenty se nepřenášejí do uzlů a označujeme jí jako strukturu s převládajícím tahem (z angl. Stretch-dominated). Takovéto struktury se vyznačují vysokou tuhostí a pevností. Čím vyšší je počet vzpěr a uzlů, tím vyšší je Maxwellovo číslo a tím vyšší je mechanická pevnost a tuhost buňky. Ačkoli je Maxwellovo číslo dobrou metodou pro předpovědi deformačního chování konstrukce, není vždy spolehlivým koeficientem, protože konfigurace a uspořádání vzpěry nemohou zlepšit tuhost buňky, ale může zvýšit Maxwellovo číslo. [24]

Jak je uvedeno výše, dalším typem mřížkových struktur jsou trojnásobně periodické minimální plochy (obrázek 38). Tato geometrie popisuje periodicky nekonečnou strukturu ve třech nezávislých směrech s nulovým středním zakřivením plochy (konkávní a konvexní zakřivení jsou ve všech bodech symetrické). [25]

Nejčastěji používanou strukturou TPMS je gyroid bez přímek s kulovým jádrem a hladkými vzpěrami, které jsou samonosné. Na rozdíl od struktur založených na vzpěrách mají struktury TPMS nižší limit velikosti jednotkových buněk, aby umožňovaly odstranění prášku z dutin. [24]



*Obrázek 38: Struktury TPMS **a)** TPMS typu P **b)** TPMS gyroid **c)** TPMS typu D **d)** TPMS typu I-WP [3]*

Mechanické chování mřížkových struktur je ovlivňováno mnoha faktory včetně procesu tisku a mikrostruktury, ale materiál, topologie a relativní hustota vzorku jsou hlavními aspekty, které řídí konstrukční vlastnosti. Obecně platí, že pokud relativní hustota klesá, snižuje se také tuhost a pevnost. Relativní hustota se typicky zvyšuje s poklesem velikosti jednotkové buňky, zatímco tuhost a pevnost se snižují, když se velikost jednotkové buňky zvětšuje. Z těchto důvodů může mít nadměrné zmenšení velikosti vzpěry neočekávaný účinek na mechanické vlastnosti. [24]

7.2 Zkouška tlakem

Jak již bylo řečeno, zkouška tlakem je nejpoužívanější zkouškou pro charakterizaci mřížkových konstrukcí vzhledem k většině jejich aplikací, kde jsou konstrukce vystaveny tomuto typu zatížení. Referenční normou, i když není specifická pro vzorky z aditivní výroby, je ISO 13314. Tato norma je specifická pro vzorek s pórovitostí vyšší než 50 %. Průřez vzorku může být buď válcový, nebo obdélníkový, i když se doporučuje válcový. Rozměry vzorku: průměr a výška v případě válcového vzorku a délka, šířka a výška v případě obdélníkového vzorku, by měly být stanoveny alespoň jako desetinásobek průměrné velikosti pórů a na délku nad 10 mm. Poměr mezi výškou a průměrem nebo délkou okraje by měl být mezi 1 a 2. Vzorek při zkoušce je zatěžován konstantní rychlosti 10^{-3} až 10^{-2} s^{-1}. [24]

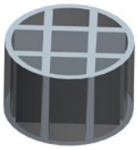
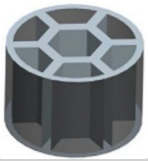
Zkoušky mají různé účely a každé ukazují jiné výsledky. Několik výzkumů porovnává mechanické vlastnosti a deformační chování různých geometrií buněk vystavených stejnému zatížení. Například Kohnen a kol. zjistili, že kubická geometrie FCCZ má vyšší pevnost a modul pružnosti, než dutá kulová geometrie, takže je vhodná pro konstrukční součásti. [24]

Tabulka 6: Kohnen – Naměřené hodnoty zkoušky tlakem [26]

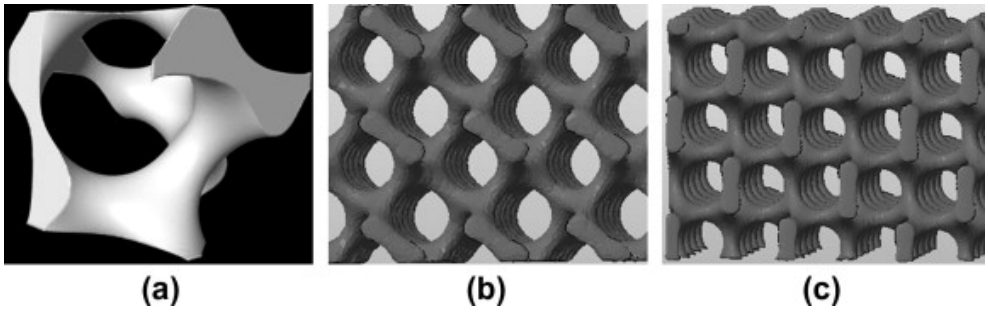
Materiál	Jednotková buňka	Vzor mřížky	Měrná absorpce energie (SEA) při stlačení po 40% zatížení [J/g]	Modul pružnosti [GPa]
Kovový prášek 14404	FCCZ		26.0 ± 0.5	11.0 ± 0.3
Kovový prášek 14404	Dutá kulová		12.1 ± 0.15	6.8 ± 0.2

Na druhou stranu Choy zjistil, že voštinové buňky mají lepší mechanické vlastnosti než kubické buňky díky více jednotkových buněk ve stejném objemu. [24]

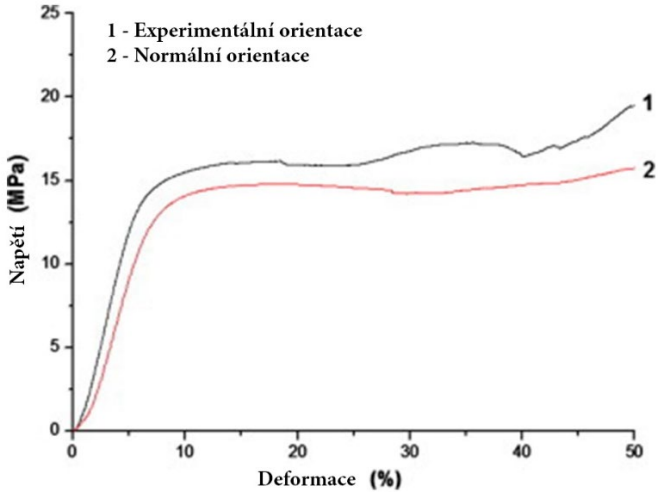
Tabulka 7: Choy – Naměřené hodnoty zkoušky tlakem [27]

Materiál	Jednotková buňka	Vzor mřížky	První maximální pevnost v tlaku [MPa]	Absorpce energie až do 50% napětí [MJ/m3]
Ti-6Al-4V	Gradientní kubická		71 ± 3	55 ± 1
Ti-6Al-4V	Gradientní voštinová		213 ± 7	203 ± 2

Byly studovány některé neizotropní geometrie, charakterizované vzpěrami umístěnými pouze v určitých směrech s cílem vyhodnotit vliv různých orientací tisku celého vzorku i buňky. Yan a kol. zjistili, že gyroidní konstrukce se vzpěrami orientovanými pod úhlem 0° a 90° vzhledem ke směru stavby nabízejí lepší mechanické vlastnosti než tradiční konstrukce se vzpěrami orientovanými pod úhlem 45° (obrázek 39). Naměřené hodnoty jsou znázorněny v grafu napětí-deformace na obrázku 40. [24]



*Obrázek 39: CAD modely **a)** Gyroidní jednotková buňka **b)** normální orientace gyroidu **c)** experimentální orientace gyroidu [28]*



Obrázek 40: Křivky napětí-deformace získané z tlakové zkoušky [28]

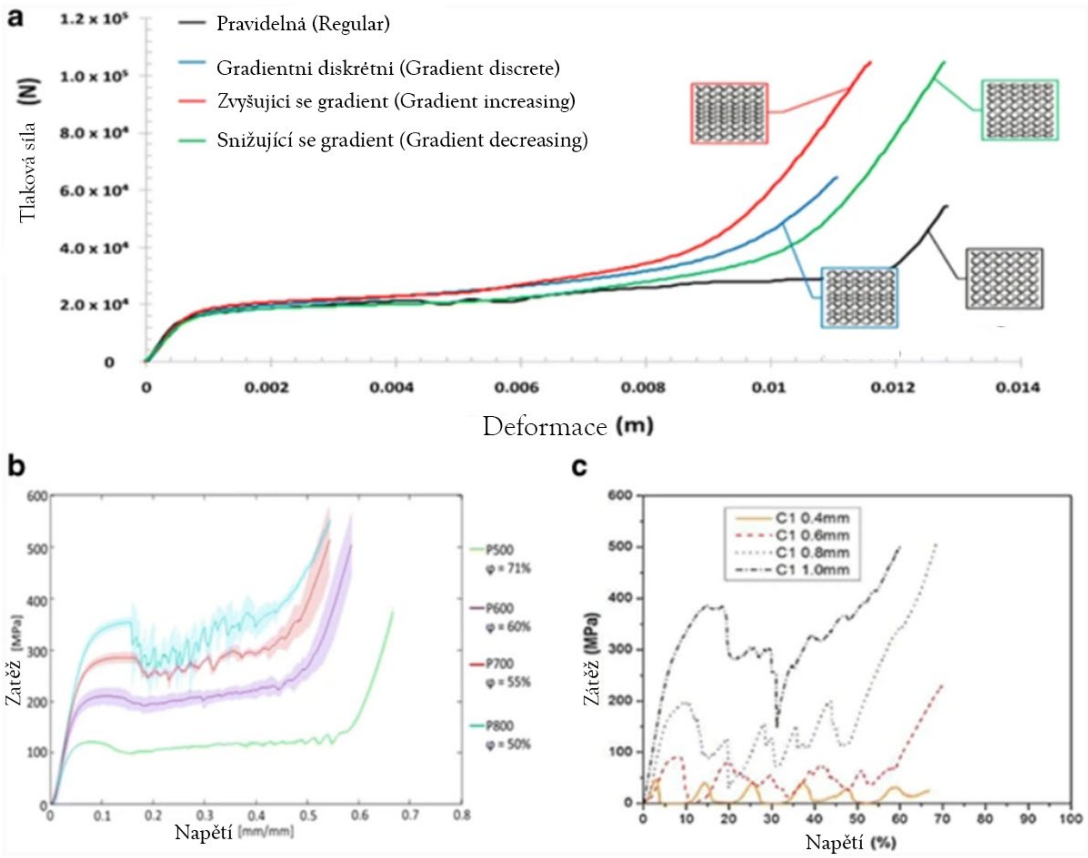
Spíše, než na geometrii se někteří výzkumníci zaměřují na vliv změny pórovitosti a objemového podílu buňky pomocí změny rozměrů vzpěr a velikosti buněk. Campanelli a kol. a Amani a kol. zjistili, že zvýšení objemového podílu neboli relativní hustoty vede ke zvýšení mechanických vlastností. [24]

Proces PBF může vést ke komplikacím, jako jsou nežádoucí pórovitost, tvorba defektů a zbytková napětí. Pro snížení těchto problémů bylo studováno tepelné zpracování a chemické leptání. Mnoho vědců zjistilo, že tepelné zpracování snižuje pevnost vzorků a zvyšuje tažnost. [24]

Bylo také zjištěno, že odstupňované mřížkové struktury mají lepší schopnost absorpce energie a vyšší míru zhutnění. [24]

Příklady výsledných kompresních křivek jsou uvedeny na obrázku 41. Křivky mají různé tvary v závislosti na mechanismu deformace, kterým se buňka řídí. Struktury s převládajícím ohybem vykazují pružnou oblast dosahující lineárního průběhu, po kterém následuje náhlý nárůst hodnot napětí a síly v důsledku zhuštění (obrázek 41 (a)). Struktury s převládajícím tahem představují elastickou oblast vrcholu, následovanou zvlněnou částí před zhuštěním (obrázek 41 (b), (c)).

Na obrázku 41 (a) jsou znázorněny kompresní křivky vzorků 316L BBC s různými gradientními strukturami. Obecný trend je u všech křivek stejný s malými rozdíly. Zejména přidání gradientu do struktury zvyšuje relativní hustotu, což vede ke zkrácení lineární části v grafu a ke zvýšení kompresní síly. Gradientní vzorek má ve skutečnosti za následek vyšší deformační sílu a energii. Na obrázku 41(b) jsou znázorněny kompresní křivky TPMS vzorků typu P Ti-6Al-4V s různou pórovitostí (φ). Jak je patrné, s klesající pórovitostí roste jak mez kluzu, tak plošné napětí. Také se snižováním pórovitosti se rovinná část zkracuje a zvlňuje. Toto zvlnění vzniká v důsledku rozvoje smykových čar a nahromaděných napětí. Nakonec jsou na obrázku 41(c) znázorněny křivky tlaku vertikálně orientovaných krychlových buněk Ti-6Al-4V s různými velikostmi vzpěr. Menší rozměry vzpěr vedou k vyšší pórovitosti, což má za následek nižší mez kluzu a plošné napětí. Snížením pórovitosti se vzorky stávají křehčími, což vede k prohloubení vrcholů a dolíků křivek a následnému zhuštění. [24]



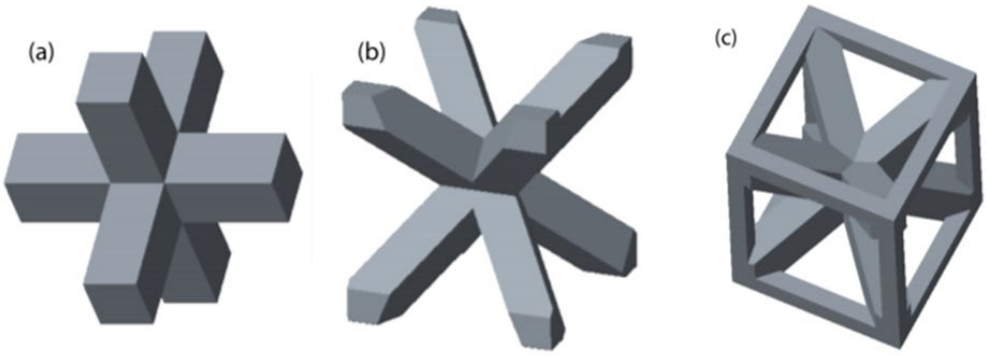
Obrázek 41: a) Křivka komprese vzorků 316L BCC s gradientními buňkami; b) TPMS buňky typu P Ti-6Al-4V s různými úrovněmi pórovitosti ϕ (barevné odstíny představují směrodatnou odchylku); c) Vzorky Ti-6Al-4V s vertikálně orientovanými kubickými buňkami různých velikostí vzpěr [24]

Ve studiích došli k závěru, že mechanické vlastnosti se liší v závislosti na materiálu, geometrii, velikosti a hustotě buněk. Rychlost pohybu příčky je obecně udržována ve velmi nízkých hodnotách (mm/min), což vede k nízké deformační rychlosti, jak navrhuje norma ISO 13314. Nízká rychlost deformace se navrhuje také proto, aby bylo možné při pořizování snímků účinně zachytit mechanismy deformace. [24]

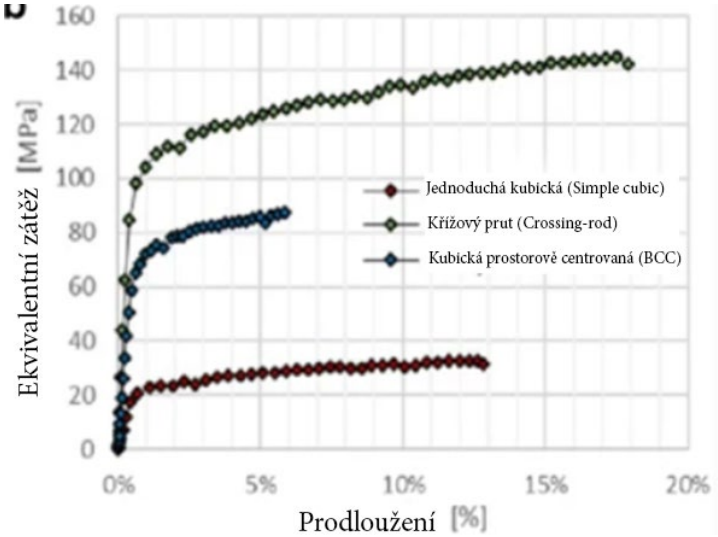
7.3 Zkouška Tahem

Mezinárodní normy pro tahové zkoušky porézních nebo buněčných struktur dosud nebyly vypracovány. Ačkoli některé parametry zkoušky, jako je nízká rychlost příčného táhla, lze stanovit na základě příkladu zkoušky tlakem, jiné parametry stále nejsou definovány. Například velikost, geometrie a minimální počet jednotkových buněk na jedné straně vzorku jsou voleny libovolně bez spolehlivých kritérií. Navíc není definován přechod mezi mřížkovým řezem a krajními částmi vzorků, které slouží jako úchopové body. Z těchto důvodů může mezinárodní norma týkající se tahové zkoušky porézních a buněčných struktur vést k jednotnějším a spolehlivějším informacím. Nejčastěji uváděným výstupem tahové zkoušky je Youngův modul pružnosti v tahu spolu s mezí kluzu a mezí pevnosti v tahu. [24]

Jedním z hlavních cílů těchto prací je porovnání vlastností různých geometrií podrobených tahové zkoušce. Kohen a kol, stejně jako v případě tlaku, zjistili vyšší maximální pevnost v tahu u geometrie FCCZ než u duté kulové geometrie. Liverani a kol. porovnávali jednoduchou krychlovou geometrii křížového prutu (z ang. crossing-rod) a BCC, viz obrázek 42. Právě geometrie křížového prutu vykazovala nejvyšší měrnou pevnost a tuhost v tlaku, jak je možné vidět na obrázku 43. [24]

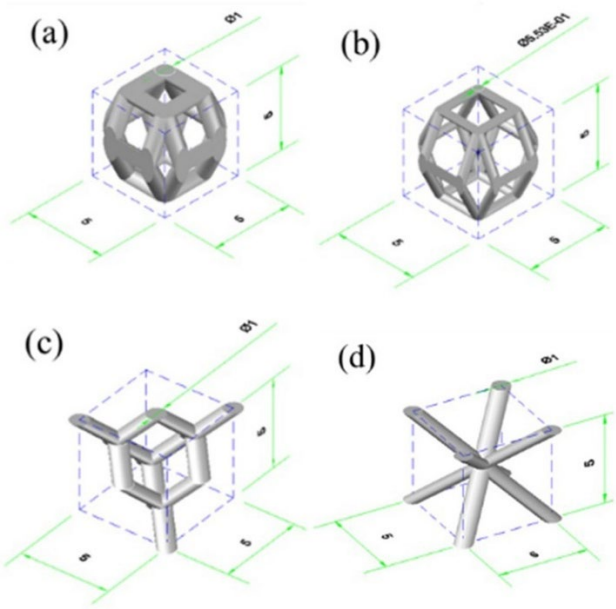


*Obrázek 42: Struktury ze studie E. Liverani **a)** Jednoduchá krychlová **b)** Křížový prut **c)** BCC [29]*

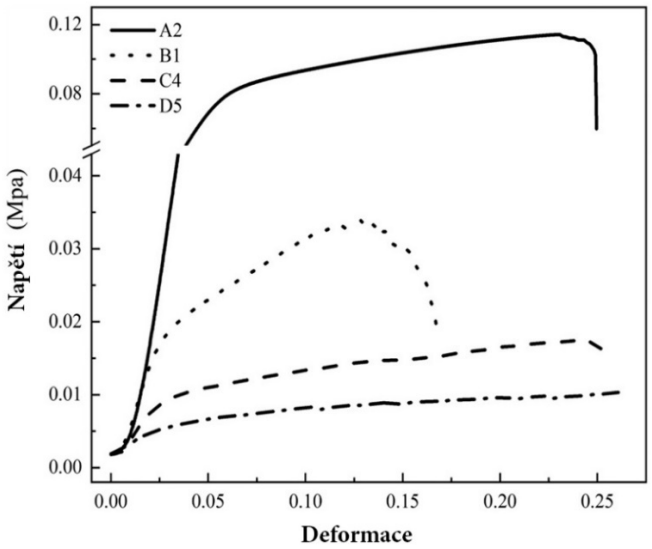


Obrázek 43: Tahové křivky [29]

Zhong a kol. studovali tahové vlastnosti vzorků s různými geometriemi a stejným objemovým podílem (obrázek 44). Geometrie tetrakaidecahedron vykazovala vyšší mez pevnosti v tahu než diamantová a BCC geometrie (viz obrázek 45). [24]



Obrázek 44: Struktury ze studie Zhong a kol a) Tetrakaidecahedron průměr vzpěr 1 mm b) Tetrakaidecahedron průměr vzpěr 0,5 mm c) Diamant průměr vzpěr 1 mm d) BCC průměr vzpěr 1 mm [30]



*Obrázek 45: Křivky napětí-deformace **A2** Tetrakaidecahedron (vzpěra 1 mm); **B1** Tetrakaidecahedron (vzpšra 0,5 mm); **C4** Diamant (vzpěra 1 mm); **D5** BCC (vzpěra 1 mm) [30]*

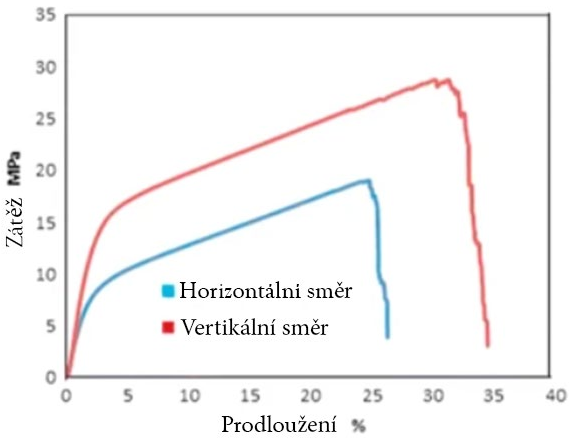
Vliv parametrů buňky

Vlivem parametrů buňky se zabývá také několik autorů. Například Maskery a kol. v práci testovali vzorky BCC se dvěma různými rozměry buněk a uvedli, že menší velikost buněk může maximalizovat tuhost vzorku. Kelly a kol. místo toho zkoumali gyroidní vzorky s různými rozměry stěn a buněk a zaznamenali, že tyto dvě proměnné mají přímý a vzájemně závislý vliv na mechanické vlastnosti a určují celkovou pórovitost vzorku. [24]

Dále se několik prací zabývalo vlivem tepelného zpracování na mechanické vlastnosti mřížek v tahu. Brenne a kol. poznamenali, že tepelně upravené vzorky snášejí vyšší maximální napětí a jsou schopné vydržet vyšší zatížení, zatímco Kelly a kol. zjistili, že povrchová úprava, jako je čištění SILC, může mírně zlepšit Youngův modul diamantové mřížky Ti-6Al-4V. [24]

Další výzkumy se zaměřili na stavební orientaci vzorku. Například Alsalla a Barbas ve svých prací zjistili, že vertikálně postavené vzorky mají lepší mechanické tahové vlastnosti než vzorky postavené horizontálně. [24]

Na obrázku 46 je uveden příklad tahových křivek napětí a deformace, kde jsou znázorněny křivky gyroidních vzorků 316L se dvěma orientacemi stavby vzhledem ke stavební ploše. Osa vzorku s horizontální orientací je rovnoběžná se stavební plochou, zatímco osa vzorku se svislou orientací je kolmá ke stavební ploše. Obě křivky představují stejný trend bez známek křehkého porušení. Vzorek se svislou orientací má však lepší mechanické vlastnosti s vyšší mezí kluzu, mezí pevnosti v tahu a prodloužením. [24]

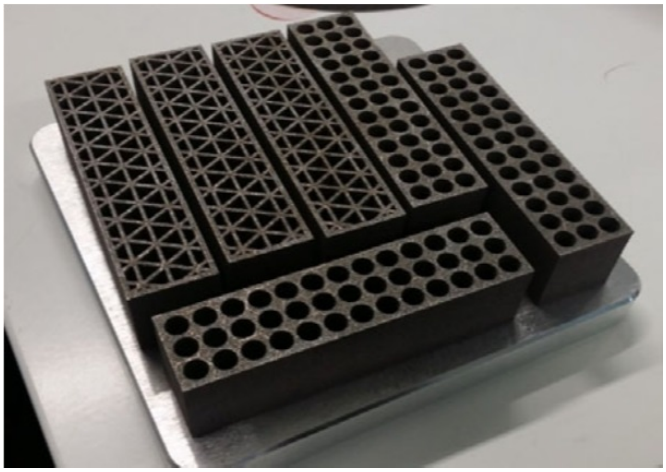


Obrázek 46: Tahové křivky vzorků 316L [24]

7.4 Zkouška ohybem

Přestože pevnost v ohybu není nejstudovanější vlastností, je důležitá, protože v mnoha aplikacích jsou součásti vystaveny tomuto typu zatížení. Například součásti pro automobilový průmysl, inteligentní materiály a tkáňové inženýrství. Zkoušky ohybem se obvykle provádějí ve tříbodovém uspořádání s dolní délkou rozpětí mezi 60 a 80 mm a válcovými podpěrami. Geometrie vzorku je obvykle obdélníková, ale s širším rozsahem zvolených parametrů. Podobně jako u ostatních zkoušek je rychlost posunu udržována na nízké úrovni. Nejčastěji uváděnými výstupy jsou Youngův modul pružnosti v ohybu, špičkové zatížení a pevnost v ohybu. [24]

Rashid a kol. zjistili, že trojúhelníková geometrie (na obrázku 47) má vyšší pevnost v ohybu i modul pružnosti ve srovnání s kruhovou a šestiúhelníkovou geometrií (viz tabulku 8). [24]



Obrázek 47: Vytištěné vzorky ke studii Rashida a kol. [31]

Tabulka 8: Naměřené hodnoty při ohybové zkoušce [31]

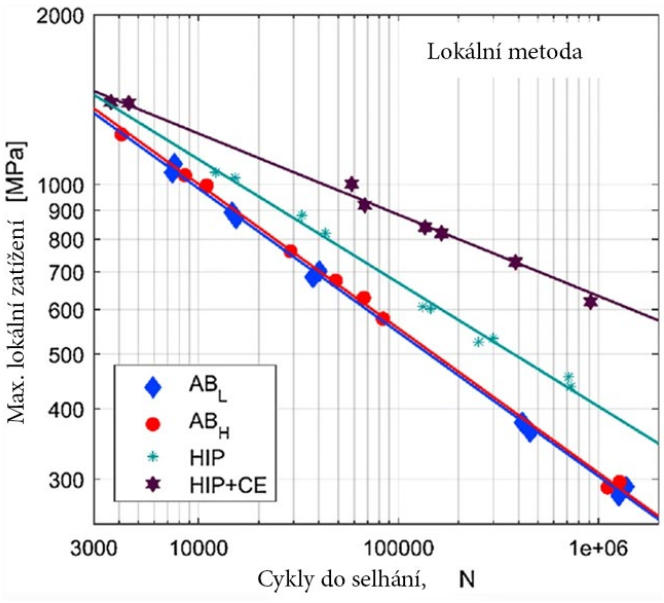
Materiál	Jednotková buňka	Zatížení v bodě zlomu [kN]	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul pružnosti v ohybu[GPa]
AlSi12	Kruhová	16,42	151,36	4,38
AlSi12	Trojúhelníková	19,07	175,762	5,03
AlSi12	Šestiúhelníková	15,53	143,17	4,34

Tepelné zpracování navíc může vést k vyšší tažnosti u vzorku BCC z Ti-6Al-4V se skořepinou o tloušťce 0,5 mm, jak uvádí Brenne a kolegové. Ibrahim a kol. provedli ohybovou zkoušku na strukturách s dvojitou voštinovou mřížkou a zjistili efektivní modul pružnosti podobný modulu získanému z tlakové zkoušky, což naznačuje izotropní chování struktury. [24]

7.5 Únavový test

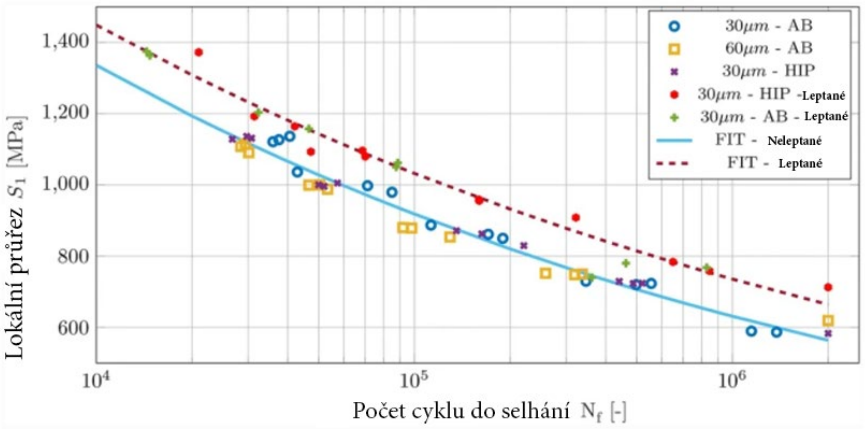
Únavové zkoušky lze provádět za jakéhokoli namáhání: v tahu, tlaku a ohybu. Nejčastěji se používá únavová zkouška v tlaku, protože, jak již bylo zmíněno výše, tomuto typu zatížení je vystaveno mnoho aplikací. Únavové výkony jsou velmi důležité v biomedicínské a letecké oblasti, kde jsou limity spojené s cyklickým zatížením velmi přísné. Obvykle se tvar a velikost vzorku řídí stejnými pravidly jako u statických zkoušek. Parametry procesu jsou v rámci uvažovaných prací dosti podobné; například zatížení je sinusové, R (napěťový součinitel) je 0,1 a počet cyklů dosahuje 106. Frekvence se pohybují v rozmezí 5 až 32 Hz, přičemž nejčastěji se vyskytují frekvence 10 a 15 Hz. [24]

Van Hooreweder a kol. v pracích studovali únavové vlastnosti (lokální metodou) vzorků s diamantovou jednotkovou buňkou Ti-6Al-4V, které byly podrobeny izostatickému lisování za tepla (HIP) s následným chemickým leptáním. Studie ukazuje, že únavová životnost se úpravou HIP zlepšuje, ale ještě lepšího výsledku je dosaženo po přidání chemického leptání (obrázek 48). [24]



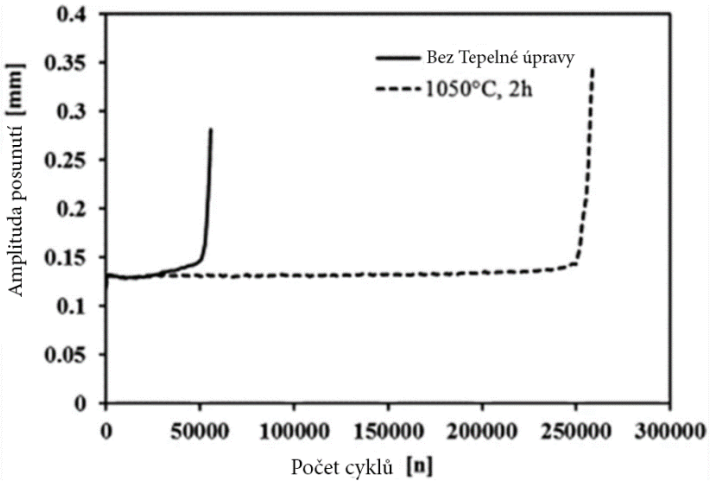
Obrázek 48: Vliv tepelné a povrchové úpravy na únavové vlastnosti vzorků Ti-6Al-4V; AB jsou vzorky v základním stavu s nízkou (L) a vysokou (H) relativní hustotou; HIP jsou vzorky lisované za tepla izostaticky; CE jsou vzorky chemicky leptané [24]

Na druhou stranu Cutolo a kol. zaznamenali zvýšení únavových parametrů chemicky leptaných vzorků CoCr v lokálním měřítku (obrázek 49), zatímco úprava HIP se zdála být neúčinná. [24]



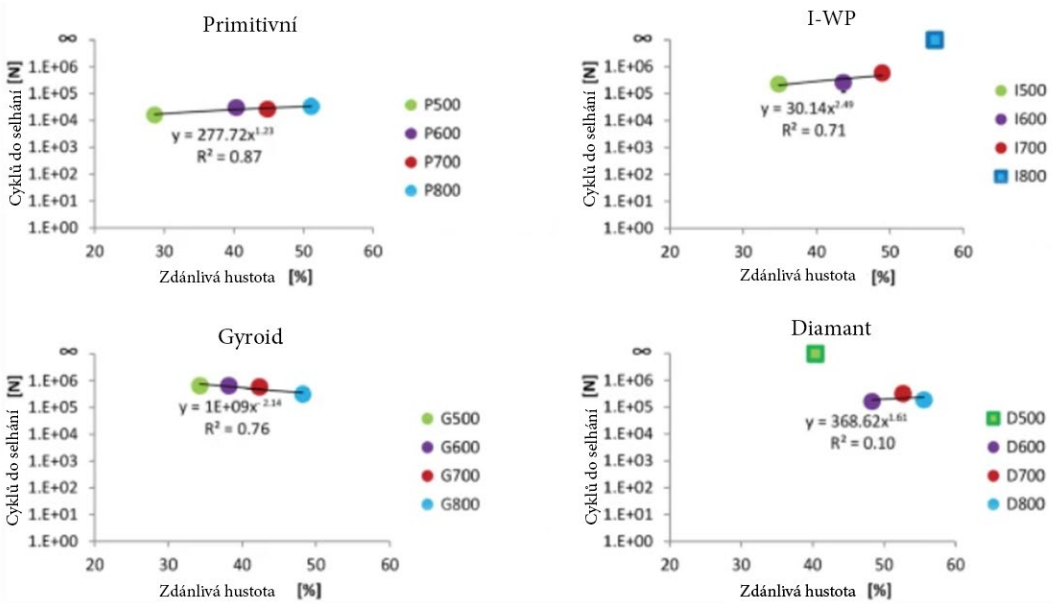
Obrázek 49: Vliv tepelné a povrchové úpravy na únavové vlastnosti vzorků CoCr; AB jsou vzorky ve stavu, v jakém byly vyrobeny, HIP jsou vzorky lisované za tepla izostaticky. Hodnoty 30 a 60 µm jsou tloušťky vrstev [24]

Brennen a kol. uvedli zlepšenou únavovou životnost ve vzorcích Ti-6Al-4V po tepelném zpracování s významným zvýšením počtu cyklů do selhání při stejné amplitudě posunutí (obrázek 50). [24]



Obrázek 50: Vliv tepelného zpracování na únavový výkon vzorku Ti-6Al-4V [24]

Bobbert a kol. studovali vliv zdánlivé hustoty různých TPMS geometrií na únavové vlastnosti vzorků. Jak se zdánlivá hustota zvyšuje, existují různé trendy (obrázek 51). Výkon primitivní geometrie (typu P) se zvyšuje se zvyšující se zdánlivou hustotou, i když tento návrh vede k nejkratší únavové životnosti. Geometrie gyroidu ukazuje pokles výkonu, jak se zvyšuje zdánlivá hustota, pravděpodobně kvůli geometrii jednotkové buňky. Únavová životnost geometrie I-WP se významně zvyšuje se zvyšováním zdánlivé hustoty a dosahuje vysokých výkonů. Nakonec geometrie diamantu dosahuje nejvyšší únavové životnosti s nejnižší zdánlivou hustotou, zatímco u ostatních hodnot byly výsledky srovnatelné. [24]



Obrázek 51: Vliv různých zdánlivých hustot na únavový výkon trojnásobně periodických vzorků minimálního povrchu Ti-6Al-4V; čtverce v grafech znamenají, že vzorky dosáhly 10 na šestou cyklů bez selhání [24]

7.6 Shrnutí výsledků zkoušek

Při zkoušce tlakem se ukázaly gradientní struktury jako nejlepší geometrie pro absorpci energie. Konkrétně gradientní voštinová geometrie měla nejlepší mechanické vlastnosti z pozorovaných struktur. Co se týče neodstupňovaných struktur, v porovnání mezi kubickou FCCZ a dutou kulovou geometrií ukázala lepší mechanické vlastnosti FCCZ.

Ve zkoušce tahem se nejprve zabývali porovnání mechanických vlastností nejpoužívanějších struktur (jednoduchá krychlová, křížový prut, BCC), kde nejvyšší hodnoty měrné pevnosti a tuhosti v tlaku vykazovala geometrie křížového prutu. V další studii se zaměřili na složitější geometrie (tetrakaidecahedron, diamantová a BCC). Zde prokázala nejlepší mechanické vlastnosti geometrie tetrakaidecahedron s průměrem vzpěr 1 mm.

Zkouška ohybem nebyla tak často studována, jako předešlé dvě zkoušky. Nicméně Rashid a kol. ve své studii zjistili, že v porovnání mezi vzorky s trojúhelníkovou, kruhovou a šestiúhelníkovou jednotkovou buňkou má nejlepší mechanické vlastnosti právě trojúhelníková.

Únavové zkoušky prokázali, že tepelná úprava vzorků zvyšuje počet cyklů do selhání při stejné amplitudě posunutí. Dále zkoumaný vliv relativní hustoty geometrie TPMS při únavové zkoušce nepřinesl jednoznačné výsledky a existují zde různé trendy v závislosti na konkrétní geometrii.

8 Použití odlehčených struktur v praxi

8.1 Aditivní technologie v medicíně

Vzhledem k tomu, že aditivní výroba (AM) zdravotnických prostředků stále nabírá na obrátkách, existuje pět hlavních oblastí, kde by mohlo dojít k největšímu růstu využití této technologii. [32]

8.1.1 Zubní lékařství

Největším trhem pro AM v medicíně je nyní stomatologie a související ortodoncie, kde se používá na výrobu můstků, korunek, rovnátek a zubních náhrad (obrázek 52). Digitální stomatologie je proces, který obvykle začíná skenovatelným modelem nebo otiskem, který je následně převeden na 3D digitální data. Mnoho 3D tištěných zubních pomůcek lze snadno přizpůsobit, aby přesně padly a zároveň je lze tisknout z různých materiálů od pružných polymerů až po titan. [32]

Obrázek 52: Zubní protéza od společnosti EnvisonTEC [32]

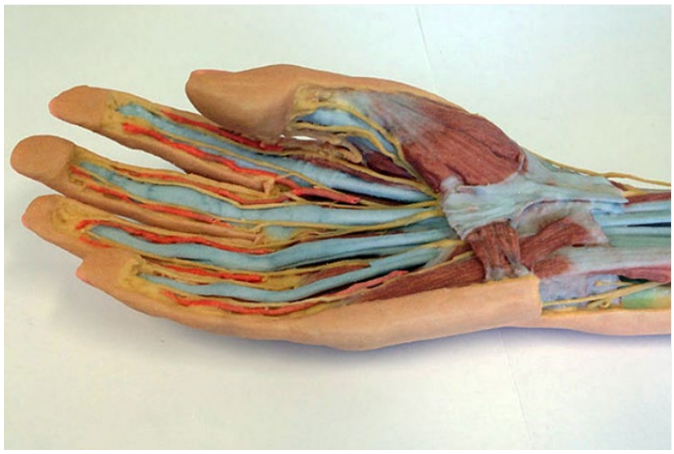
Existují také specializované tiskárny konfigurované na použití softwaru pro zubní skenování spolu s biokompatibilními pryskyřicemi. Tyto tiskárny se vejdou do malých ordinací a umožňují okamžité řešení na místě během jediného dne. [32]

8.1.2 Anatomické modely

Lidské tělo je složité a každé je jedinečné. Proto když lékaři a kliničtí pracovníci potřebují zvážit individuální léčbu, velmi jim pomůže, když si prohlédnou přesný model daného subjektu – ať už se jedná o kost, orgán, nádor nebo končetinu. [32]

To je nyní naštěstí realitou. V technologii lékařského zobrazování byl učiněn velký pokrok, včetně vysoce přesného plnobarevného 3D skenování až na úroveň cév. Na základě těchto dat a sofistikovaného softwaru pro topologické mapování, jako je například Mimics® od společnosti Materialise, mohou biomedicínští inženýři pomocí 3D tiskáren vytvářet realistické modely pro analýzu (obrázek 53). [32]

Na základě těchto modelů pak mohou lékaři navrhovat chirurgické strategie, například kde provádět řezy. Modely sestavené z více kusů lze také rozložit a odhalit tak struktury uvnitř, které by jinak byly pro chirurga skryté. [32]



Obrázek 53: 3D naskenovaný a vytištěný anatomický model [32]

8.1.3 Obecné nástroje

Jedná se o širokou kategorii pomocných zařízení, jejichž vývoj v menších objemech by byl nákladný a časově náročný. Patří sem svorky nebo úchytky určené pro individuální anatomii pacienta, případně na pomoc při vyšetřeních, léčbě nebo chirurgických zákrocích. [32]

Aplikace AM se používá také v mnoha rozvojových zemích k navrhování nespecifických svorek, katétrů a dalšího příslušenství, které je možné rychle a hospodárně vyrobit na místě podle potřeby (obrázek 54). [32]

Obrázek 54: 3D tištěné díly z iLab / Haiti [32]

8.1.4 Protetika a ortotika

Aditivní technologie pomohla rozšířit možnosti pacientů v oblasti protetiky a ortotiky z hlediska přizpůsobení funkce a estetiky. Protéza může být náhradou části těla, a to buď vnitřní (např. kyčelní kloub), nebo vnější (např. chybějící končetina) viz obrázek 55. [32]

Tradičně byly protézy končetin nedostatečně přizpůsobitelné. Byly buď omezené ve své funkčnosti, nebo neuvěřitelně drahé. Vyžadovaly mnoho měření, zkušebních montáží a ručních prací, které jsou pro mnoho lidí nedostupné. To platí zejména v odlehlých oblastech nebo v oblastech, kde probíhají válečné konflikty a kde je po takových protézách velká poptávka. [32]

Obrázek 55: 3D tištěná protéza [33]

Ortopedické vložky jsou také výrobky na zakázku, které mají pomoci kostní struktuře nositele dodatečnou podporou nebo odstraněním problémů s posunem. Díky použití moderních polymerů jsou plastové ortézy vytištěné 3D tiskem pevné, lehké, odolné a zároveň poddajné pro větší pohodlí. [32]

8.1.5 Monitorování zdraví a dodávání léků

Další výhodou AM pro lékařské přístroje je možnost vyrábět složité mikrosoučástky, které fungují uvnitř těla a dodávají léky nebo monitorují zdravotní stav pacienta. [32]

MIT ve spolupráci s Harvardskou nemocnicí Brigham and Women's vyvinul polykatelné zařízení, které může zůstat v žaludku po dobu jednoho měsíce. Zařízení, které se samo napájí, dodává léky pro pacienty vyžadující dlouhodobou péči, včetně těch, kteří potřebují léčbu rakoviny nebo HIV. Tento projekt je v současné době ve fázi testování, ale představuje velice slibné a přínosné zařízení. [32]

8.2 Aditivní technologie v leteckém průmyslu

Většina aplikací v letectví a kosmonautice odpovídá možnostem AM. Letecké a kosmické výrobky jsou jedinečně složité. Mnoho dílů musí splňovat extrémní požadavky, které mnohdy vedou ke složitým geometriím a strukturám. S rostoucí složitostí prudce rostou výrobní náklady. Složité díly vyžadují množství jednotlivých dílů, které musí být spojeny maticemi, šrouby, svary nebo pájkami. Každý z těchto spojů snižuje spolehlivost součásti, což vede ke zvýšeným požadavkům na kontrolu. [34]

Zatím se AM vyhýbá tzv. kritickým dílům letadla, a proto jsou tisknuty hlavně podpůrné prvky, výbava kabiny, nenosné části motoru a hydraulické díly. Důvodem toho je relativně nízká životnost dílů. To se ale časem může změnit. Dopomoci tomu může zájem předních leteckých společností, které vyvíjejí například experimentální letadla Thor Airbus, titanové díly Boeingů nebo nově vyvíjený motor ATP firmy GE Aviation. [35]

Příkladem může být například palivová tryska na obrázku 56, kterou navrhla firma GE Aviation pomocí funkcí aditivní technologie pro nejvyšší úroveň účinnosti při minimalizaci hmotnosti. Výsledky zvýšení funkčnosti a snížení hmotnosti snižují spotřebu paliva a tím snižují dlouhodobé náklady. Spolehlivost a trvanlivost se zvyšuje, protože dokázali sloučit 20 dílů do jednoho. [34]

Obrázek 56: Palivová tryska proudového motoru GE [34]

8.3 Aditivní výroba v automobilovém průmyslu

Na rozdíl od leteckého průmyslu je v automobilovém průmyslu nutná větší sériovost dílů, proto se nejčastěji aditivní výroba využívá k výrobě prototypů, nástrojů a přípravků. Poslední dvě desetiletí však přinesla velký pokrok této technologie a postupně se rozšiřuje nad rámec těchto aplikací. [36]

BMW je jedním z prvních, kteří si osvojili AM a experimentuje s technologií již několik let. Od roku 2010 již překročilo hranici jednoho milionu 3D tištěných dílů. Co se týče sériové výroby, BMW usiluje o výrobu 50 000 komponentů ročně a 10 000 jednotlivých náhradních dílů. [36]

BMW již ukázalo několik implementací tištěných kovových dílů do svých vozidel. Konkrétně v modelu i8 Roadster byla použita AM pro výrobu dvou dílů. Jedním z nich je střešní držák kabrioletu, který má unikátní složitý tvar, jenž se tradičními metodami vyrábí velmi obtížně. Druhým je jeho vodící lišta oken, která se vyrábí v kapacitě přibližně 100 kusů denně. [36]

Další uplatnění AM najdeme na v brzdách BMW M850i Coupe Night Sky Edition. BMW použilo kovovou 3D tiskárnu k vytištění celého brzdového třmenu, přičemž se drží elegantního designového pojetí. [36]

Volkswagen používá vlastní 3D tisk již několik let a doposud ve svých závodech instaloval téměř stovku tiskáren. Hlavní využití AM ve společnosti je pro aplikace jako jsou nástroje, přípravky a výroba prototypů. Výroba některých nástrojů přešla na 3D tisk, což společnosti od té doby každoročně ušetří statisíce dolarů. [36]

Začátkem roku 2019 představila skupina Volkswagen největší titanovou funkční součástku auta Bugatti vyrobenou AM (obrázek 57). Osmipístkový monoblokový brzdový třmen byl vytištěn na tehdy největší titanové 3D tiskárně na světě ve spolupráci s německým specialistou na aditivní výrobu Laser Zentrum Nord. Pro automobilku to byl velký milník a dokázal tím, že je lídrem v oblasti 3D tisku a inovací v automobilovém průmyslu. [36]

Obrázek 57: Brzdový třmen Bugatti [37]

9 Závěr

Teoretická část slouží k seznámení s aditivní technologií. V první kapitole je krátký historický vývoj technologie a následně jsou podrobně popsány nejpoužívanější technologie pro výrobu mřížkových struktur (SLM, EBM a FDM). U každé technologie je popsán princip spolu s grafickým znázorněním stroje a pracovní plochy. Další kapitola je zaměřena na topologickou optimalizaci a metody současných návrhových technologií pro složité topologické struktury. Dále jsem se zabýval strukturami v přírodě, kde jsem uvedl základní rozdělení a konkrétní příklady kde se můžeme se strukturami setkat. V poslední kapitole teoretické části jsem se zabýval metodami generování mřížkových struktur v technice.

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s programem Materialise Magics a jeho možnostmi generování mřížkových struktur. Zde jsem porovnával součástky pomocí vypočítaných hodnot objemu a udávaného času tisku. Podle hodnot lze konstatovat, že nezáleží jen na hustotě jednotkových buněk, ale také i na tvarové složitosti jednotkové buňky.

Dále jsem ve své práci pomocí několika studií uvedl přehled mechanických vlastností nejpoužívanějších mřížkových struktur. Nejčastěji prováděná zkouška tlakem se řídí podle normy ISO 13314, avšak u zkoušky tahem, ohybem a únavovou zkouškou ještě nebyla vypracována mezinárodní norma, kterou by se výzkumy řídily a jednotlivé výsledky by bylo možné srovnávat. Usnadnila by se tím i certifikace možných aplikací a tím by mohla být aditivní technologie ještě používanější v praxi.

V poslední kapitole své práce se věnuji použití aditivní technologie v průmyslu, konkrétně jsem zde zmínil použití v medicíně, leteckém a automobilovém průmyslu.

10 Zdroje

[1] GOLDBERG, DANA. History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30). Redshift [online]. 2018 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/

[2] Historie 3D tisku. 3D-tiskni.cz [online]. 2019 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://3d-tiskni.cz/zkusebni-prispevek-lorem-ipsum-dolor-amet-sit/

[3] NAZIR, Aamer, Kalayu Mekonen ABATE, Ajeet KUMAR a Jeng-Ywan JENG. A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures [online]. 2019 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-019-04085-3

[4] Types of 3D Printing in Metal. Markforged [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal

[5] GADAGI, Basavraj a Ramesh LEKURWALE. A review on advances in 3D metal printing [online]. 2020 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320380573

[6] 3D tisk kovových materiálů [online]. 2020 [cit. 2021-03-5]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/3d-tisk-kovovych-materialu_50018.html

[7] Electron Beam Melting Fabrication Process for Metal 3D Prints. Sculpteo [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: https://www.sculpteo.com/en/glossary/ebm-definition/

[8] Electron Beam Melting, EBM. Manufacturing Guide [online]. [cit. 2021-03-1]. Dostupné z: https://www.manufacturingguide.com/en/electron-beam-melting-ebm

[9] MWEMA, Fredrick Madaraka a Esther Titilayo AKINLABI. Basics of Fused Deposition Modelling (FDM) [online]. 2020 [cit. 2021-07-11]. Dostupné z: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7257444/

[10] PROCHÁZKA, Bc. Lukáš. FDM – Fused Deposition Modeling [online]. In: . [cit. 2021-07-11]. Dostupné z: http://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/FDM.pdf

[11] CAROLO, Lucas. What Is Topology Optimization? – Simply Explained. All3dp [online]. 2020 [cit. 2021-03-2]. Dostupné z: https://all3dp.com/2/topology-optimization-simply-explained/

[12] Strukturální optimalizace. Engineering [online]. [cit. 2021-03-5]. Dostupné z: https://www.engineering.sk/clanky2/informacne-technologie/9231-strukturalni-optimalizace

[13] FENG, Jiawei, Jianzhong FU, Zhiwei LIN, Ce SHANG a Bin LI. A review of the design methods of complex topology structures for 3D printing [online]. 2018 [cit. 2021-07-4]. Dostupné z: https://vciba.springeropen.com/articles/10.1186/s42492-018-0004-3

[14] WANG, Weiming, Tuanfeng Y. WANG, Zhouwang YANG et al. Cost-effective Printing of 3D Objects with Skin-Frame Structures [online]. [cit. 2021-07-5]. Dostupné z: http://staff.ustc.edu.cn/~dengjs/files/papers/3Dprinting.pdf

[15] LYNCH, Peter. How Voronoi diagrams help us understand our world [online]. 2017 [cit. 2021-07-20]. Dostupné z: https://www.irishtimes.com/news/science/how-voronoi-diagrams-help-us-understand-our-world-1.2947681

[16] LU, Lin, Andrei SHARF, Haisen ZHAO et al. Build-to-last: strength to weight 3D printed objects [online]. 2014 [cit. 2021-07-6]. Dostupné z: https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/2601097.2601168

[17] ZHANG, Xiaolong, Yang XIA, Jiaye WANG, Zhouwang YANG, Changhe TU a Wenping WANG. Medial axis tree—an internal supporting structure for 3D printing [online]. 2015 [cit. 2021-07-7]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167839615000357

[18] LI, Dawei, Ning DAI, Xiaotong JIANG a Xiaosheng CHEN. Interior structural optimization based on the density-variable shape modeling of 3D printed objects [online]. 2015 [cit. 2021-07-7]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283006123_Interior_structural_optimization_based_on_the_density-variable_shape_modeling_of_3D_printed_objects

[19] PLESSIS, Antondu, Chris BROECKHOVEN, Ina YADROITSAVA, Igor YADROITSEV, Clive H. HANDS, Ravi KUNJUE a Dhruv Bhatef BHATEF. Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing [online]. 2019 [cit. 2021-03-5]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419302611

[20] E. NALEWAY, Steven, Michael M. PORTER, Joanna MCKITTRICK a Marc A. MEYERS. Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration [online]. 2015 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.201502403?saml_referrer

[21] AAGE, Niels, Erik ANDREASSEN, Boyan S. LAZAROV a Ole SIGMUND. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design [online]. 2017 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: https://www.nature.com/articles/nature23911

[22] NGUYEN, Dinh Son a Frédéric VIGNAT. A method to generate lattice structure for Additive Manufacturing [online]. 2016 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/7798021/similar#similar

[23] TAO, Wenjin a Ming C. LEU. Design of lattice structure for additive manufacturing [online]. 2016 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7790182/figures#figures

[24] RIVA, Leonardo, Paola Serena GINESTRA a Elisabetta CERETTI. Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed–fused lattice structures: a review [online]. 2021 [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-06631-4

[25] YUAN, Li, Songlin DING a Cuie WEN. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review [online]. 2019 [cit. 2021-07-1]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452199X18300768?via%3Dihub

[26] KÖHNEN, Patrick. Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured lattice structures of stainless steel [online]. 2018 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518301539?via%3Dihub

[27] CHOY, Sing Ying. Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting [online]. 2017 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517305890?via%3Dihub

[28] YAN, Chunze. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting [online]. 2014 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913009540?via%3Dihub

[29] LIVERANI, Erica. Characterization of Lattice Structures for Additive Manufacturing of Lightweight Mechanical Components [online]. 2017 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://asmedigitalcollection.asme.org/MSEC/proceedings/MSEC2017/50732/Los%20Angeles,%20California,%20USA/269512

[30] ZHONG, Tianlin. Mechanical properties of lightweight 316L stainless steel lattice structures fabricated by selective laser melting [online]. 2019 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519305143?via%3Dihub

[31] RASHID, R.A.Rahman. A comparative study of flexural properties of additively manufactured aluminium lattice structures [online]. 2017 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317315043

[32] WILLIAMS, Chris. Additive Manufacturing for Medical Applications. Star rapid [online]. [cit. 2021-07-11]. Dostupné z: https://www.starrapid.com/blog/additive-manufacturing-for-medical-applications/

[33] A Sleek, Lightweight ‘Exo-Prosthetic’ Artificial Leg 3D Printed With Titanium. Laughing squid [online]. 2014 [cit. 2021-07-20]. Dostupné z: https://laughingsquid.com/a-sleek-lightweight-exo-prosthetic-artificial-leg-3d-printed-with-titanium/

[34] SCHILLER, G.J. Additive manufacturing for Aerospace [online]. 2015 [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7118958

[35] Aditivní technologie (nejen) v leteckém průmyslu [online]. 2018 [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-nejen-v-leteckem-prumyslu

[36] The Best Applications of 3D printing in the Automotive Industry. Castor [online]. 2020 [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: https://www.3dcastor.com/post/the-best-applications-of-3d-printing-in-the-automotive-industry

[37] Bugatti má největší titanové brzdové třmeny vyrobené 3D tiskem. Auto.cz [online]. 2018 [cit. 2021-07-20]. Dostupné z: https://www.auto.cz/bugatti-ma-nejvetsi-titanove-brzdove-trmeny-vyrobene-3d-tiskem-112860

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Přehled použitých technologií v analyzovaných studií [3] 10
Obrázek 2: Schéma technologie SLM [6] 12
Obrázek 3: Schéma technologie EBM [8] 13
Obrázek 4: Schéma technologie FDM [9] 14
Obrázek 5: Přehled algoritmu skin-frame [14] 16
Obrázek 6: Přehled algoritmu hollowing [16] 17
Obrázek 7: Přehled algoritmu Mediální osy a) – d) [17] 18
Obrázek 8: Přehled algoritmu Mediální osy e) – j) [17] 19
Obrázek 9: Přehled algoritmu Mediální osy k) – m) [17] 20
Obrázek 10: Přehled algoritmu Mediální osy n) – o) [17] 20
Obrázek 11: Přehled optimalizace podle hustoty a tvaru proměnných [18] 21
Obrázek 12: Biologicky inspirované konstrukční principy [20] 24
Obrázek 13: Šlacha krysy [20] 25
Obrázek 14: Exoskeleton krevety [20] 25
Obrázek 15: Přechod mezi sklovinou a zubovinou [20] 26
Obrázek 16: Struktura krabího klepeta [20] 26
Obrázek 17: Struktura exoskeletonu hmyzu [20] 27
Obrázek 18: Struktura mušlí [20] 27
Obrázek 19: Struktura rohu ovce tlustorohé [20] 27
Obrázek 20: Struktura kopyta koně [20] 28
Obrázek 21: Struktura kosti ptáka [20] 28
Obrázek 22: Struktura zobáku tukana [20] 28
Obrázek 23: Struktura lebky jelence běloocasého [20] 29
Obrázek 24: Konstrukce pro křídlo letadla [21] 30
Obrázek 25: Schéma primitivní metody [23] 31
Obrázek 26: Vygenerovaná struktura pomocí implicitní metody [23] 31
Obrázek 27: Změny při úpravě členů v rovnici [23] 32
Obrázek 28: Ukázka přímého vzorování [23] 33
Obrázek 29: Vliv aplikace implicitní metody (a) odlehčená struktura bez gradientu a (b) s gradientem pórovitosti [23] 33
Obrázek 30: Porovnání přímého vzorování (vlevo) a konformního vzorování (vpravo) [23] 34
Obrázek 31: Vymodelovaná součást v Autodesk Inventor 35
Obrázek 32: Struktura – krok 1 36
Obrázek 33: Struktura – krok 2 36
Obrázek 34: Vybrané struktury 36
Obrázek 35: Příklad odlehčené struktury křídla 39
Obrázek 36: Neoptimalizované křídlo 39
Obrázek 37: Příklady jednotkových buněk mřížkové struktury vyčteno **zleva:** BCC, FCC, Diamant [3] 41
Obrázek 38: Struktury TPMS **a)** TPMS typu P **b)** TPMS gyroid **c)** TPMS typu D **d)** TPMS typu I-WP [3] 42
Obrázek 39: CAD modely **a)** Gyroidní jednotková buňka **b)** normální orientace gyroidu **c)** experimentální orientace gyroidu [28] 44
Obrázek 40: Křivky napětí-deformace získané z tlakové zkoušky [28] 44

Obrázek 41: a) Křivka komprese vzorků 316L BCC s gradientními buňkami; b) TPMS buňky typu P Ti-6Al-4V s různými úrovněmi pórovitosti φ (barevné odstíny představují směrodatnou odchylku); c) Vzorky Ti-6Al-4V s vertikálně orientovanými kubickými buňkami různých velikostí vzpěr [24] 45
Obrázek 42: Struktury ze studie E. Liverani **a)** Jednoduchá krychlová **b)** Křížový prut **c)** BCC [29] 46
Obrázek 43: Tahové křivky [29] 47
Obrázek 44: Struktury ze studie Zhong a kol a) Tetrakaidecahedron průměr vzpěr 1 mm b) Tetrakaidecahedron průměr vzpěr 0,5 mm c) Diamant průměr vzpěr 1 mm d) BCC průměr vzpěr 1 mm [30] 47
Obrázek 45: Křivky napětí-deformace **A2** Tetrakaidecahedron (vzpěra 1 mm); **B1** Tetrakaidecahedron (vzpšra 0,5 mm); **C4** Diamant (vzpěra 1 mm); **D5** BCC (vzpěra 1 mm) [30] 48
Obrázek 46: Tahové křivky vzorků 316L [24] 49
Obrázek 47: Vytištěné vzorky ke studii Rashida a kol. [31] 49
Obrázek 48: Vliv tepelné a povrchové úpravy na únavové vlastnosti vzorků Ti-6Al-4V; AB jsou vzorky v základním stavu s nízkou (L) a vysokou (H) relativní hustotou; HIP jsou vzorky lisované za tepla izostaticky; CE jsou vzorky chemicky leptané [24] 51
Obrázek 49: Vliv tepelné a povrchové úpravy na únavové vlastnosti vzorků CoCr; AB jsou vzorky ve stavu, v jakém byly vyrobeny, HIP jsou vzorky lisované za tepla izostaticky. Hodnoty 30 a 60 µm jsou tloušťky vrstev [24] 51
Obrázek 50: Vliv tepelného zpracování na únavový výkon vzorku Ti-6Al-4V [24] 52
Obrázek 51: Vliv různých zdánlivých hustot na únavový výkon trojnásobně periodických vzorků minimálního povrchu Ti-6Al-4V; čtverce v grafech znamenají, že vzorky dosáhly 10 na šestou cyklů bez selhání [24] 52
Obrázek 52: Zubní protéza od společnosti EnvisonTEC [32] 54
Obrázek 53: 3D naskenovaný a vytištěný anatomický model [32] 55
Obrázek 54: 3D tištěné díly z iLab / Haiti [32] 56
Obrázek 55: 3D tištěná protéza [33] 56
Obrázek 56: Palivová tryska proudového motoru GE [34] 58
Obrázek 57: Brzdový třmen Bugatti [37] 59

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled navolených charakteristik struktur 37
Tabulka 2: Vzdálenost středů struktury Cross-3 37
Tabulka 3: Vzdálenost středů struktury G_structure6 37
Tabulka 4: Vzdálenost středů struktury Dode-Medium (MSG) 37
Tabulka 5: Odhadovaný čas tisku 38
Tabulka 6: Kohnen – Naměřené hodnoty zkoušky tlakem [26] 43
Tabulka 7: Choy – Naměřené hodnoty zkoušky tlakem [27] 43
Tabulka 8: Naměřené hodnoty při ohybové zkoušce [31] 50