

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A**  
**METROLOGIE**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE JAKO NÁSTROJ DESIGNU PRO ADITIVNÍ  
TECHNOLOGIE**

**TOPOLOGY OPTIMIZATION AS A TOOL IN DESIGN FOR ADDITIVE**

**AUTOR:** Tomáš Růžička  
**STUDIJNÍ PROGRAM:** Výrobní inženýrství  
**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Libor Beránek, Ph.D.

**PRAHA 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Růžička Jméno: Tomáš Osobní číslo: 473514  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávací katedra/ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie  
Studijní program: Výrobní inženýrství  
Specializace: Bez specializace

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Topologická optimalizace jako nástroj designu pro aditivní technologie

Název diplomové práce anglicky:

Topology optimization as a tool in design for additive

Pokyny pro vypracování:

1. Problematika odlehčování dílů ve fázi návrhu
2. Proces topologické optimalizace a lattice optimalizace
3. Návrh demonstrátoru a jeho realizace
4. Výroba a ověření návrhu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: 15.03.2022

Termín odevzdání diplomové práce: 29.07.2022

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne

.....

Tomáš Růžička

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou aditivních technologií a strukturální optimalizace. Popisuje jednotlivé dílčí technologie dle normy ISO/ASTM 52900, jejich princip, popřípadě výhody a nevýhody. Dále jsou zde uvedeny základní omezení a pravidla, kterými je potřeba se řídit při využívání těchto technologií. Strukturální optimalizace je zaměřena na topologickou, topografickou a lattice optimalizaci. Důraz je kladen především na topologickou optimalizaci, její metody, proces, omezení a využití. Optimalizační proces je dále prakticky představen na zvoleném objektu. Práce je zakončena výrobou vybrané zmenšené varianty a následným experimentálním ověřením a porovnáním s hodnotami získanými simulační analýzou.

## **Klíčová slova**

Aditivní technologie, topologická optimalizace, aplikace topologické optimalizace

## **Abstract**

The diploma thesis deals with the issue of additive technologies and structural optimization. It describes the individual sub-technologies according to the ISO/ASTM 52900 standard, their principle, and possibly advantages and disadvantages. In addition, the basic restrictions and rules that need to be followed when using these technologies are listed here. Structural optimization is focused on topology, topography and lattice optimization. Emphasis is placed primarily on topological optimization, its methods, process, limitations and use. The optimization process is further practically presented on the selected object. The work is finished with the production of the selected variant, experimental verification and comparison with the values obtained by simulation analysis.

## **Key words**

Additive manufacturing, topology optimization, application of topology optimization

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu této práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za obětovaný čas, a především za odborné rady a tipy poskytnuté při tvorbě práce.

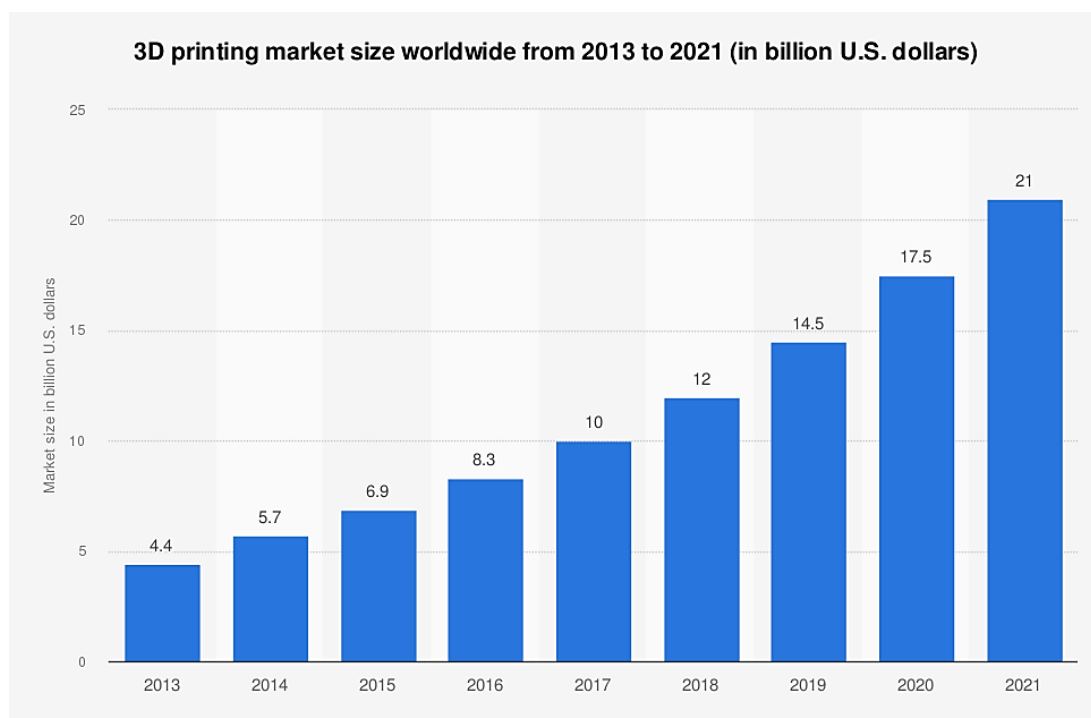
# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Aditivní technologie výroby .....	10
2.1	Rozdělení aditivních technologií.....	11
2.2	Omezení a pravidla aditivních technologií .....	19
3	Strukturální optimalizace.....	24
3.1	Topologická optimalizace.....	25
3.2	Optimalizace lattice.....	40
3.3	Topografická optimalizace.....	44
4	Aplikace topologické optimalizace .....	47
4.1	Návrh modelu.....	47
4.2	Příprava topologické optimalizace .....	49
4.3	Provedení topologické optimalizace.....	52
4.4	Přemodelování demonstrátoru .....	59
4.5	Shrnutí výsledků topologické optimalizace .....	67
5	Výroba demonstrátoru.....	72
5.1	Příprava tisku .....	73
5.2	Průběh tisku .....	74
5.3	Ověření.....	79
6	Závěr.....	81
	Bibliografie .....	84
	Seznam použitých obrázků.....	93
	Seznam uvedených tabulek.....	97
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	98

# 1 Úvod

Aditivní technologie výroby zaznamenaly od svého vzniku v roce 1986 prudký rozvoj. Na Obrázek 1 je zobrazen rozvoj trhu v oblasti 3D tisku v letech 2013-2021. Oproti roku 2013 byl v roce 2021 trh téměř pětinásobný. S aditivními technologiemi se lze setkat v oblasti tvorby prototypů, ale i v sériové výrobě pro díly, které nelze vyrobit konvenčními technologiemi (např. v případě držáku střechy pro automobil BMW i8 Roadster [1]).

Ruku v ruce s rozvojem moderních technologií jde rozvoj v oblasti strukturální optimalizace, kde lze díky pokroku výpočetní techniky provádět náročné simulace a optimalizace v různých podmínkách a konfiguracích. Strukturální optimalizace hraje ve fázi návrhu produktu velmi důležitou roli.



Obrázek 1 Velikost trhu s 3D tiskem celosvětově 2013-2021 (v miliardách amerických dolarů) [2], upraveno

V rámci diplomové práce byla vytvořena rešerše na problematiku aditivních technologií. Je zde uvedeno rozdělení technologií podle normy ISO/ASTM 52900, princip jejich fungování, přesnost a omezení. Snaha byla také o představení několika nových, ne příliš známých technologií. Druhým

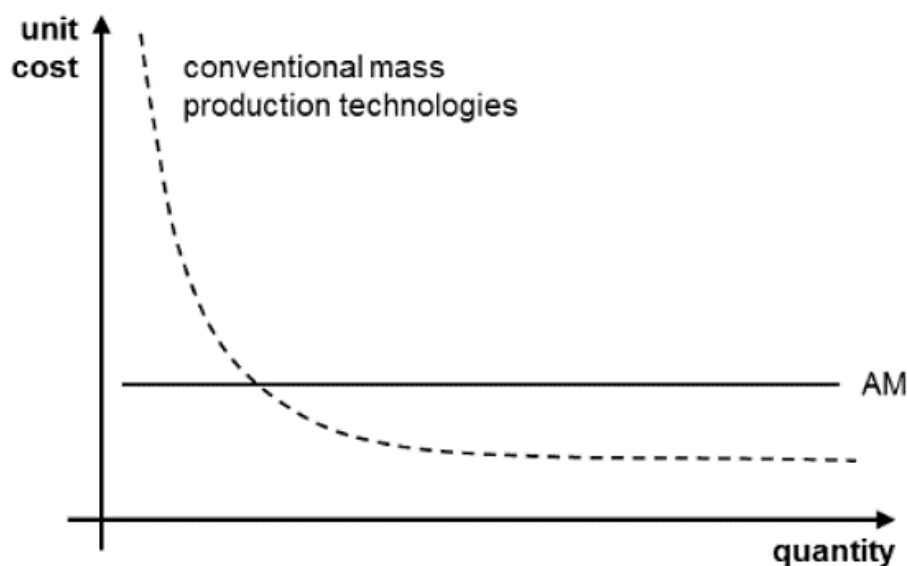


hlavním tématem diplomové práce je problematika strukturální optimalizace. Důraz je kladen především na topologickou optimalizaci. Je zde uveden stručný popis optimalizačního procesu, základní princip vybraných optimalizačních metod, omezení topologické optimalizace nebo její využití například různými průmyslovými odvětvími. Dále je popsán princip a využití topografické a lattice optimalizace, které se také řadí mezi strukturální optimalizace. Cílem diplomové práce je pochopení optimalizačního procesu jak z hlediska principu, tak z hlediska přípravy. Tyto znalosti jsou následně aplikovány na běžně využívaný objekt. Při finální tvorbě modelu je kladen důraz jak na funkční, tak na designovou stránku objektu.

## 2 Aditivní technologie výroby

Aditivní výroba je specifický proces, během kterého dochází k vytváření dílů vrstvu po vrstvě na základě digitálního 3D modelu. Počátek aditivní výroby lze datovat do roku 1986, kdy Chuck Hull se svou společností vytvořily první 3D tiskový stroj založený na metodě SLA (stereolitografie). Od té doby vznikla celá řada metod aditivní výroby zabývajících se především kovovými materiály, jejich slitinami a polymerními materiály. V posledních letech se tyto technologie rozvíjí i v oblastech jiných materiálů, jako například kompozity, beton, keramika či sklo. [3]

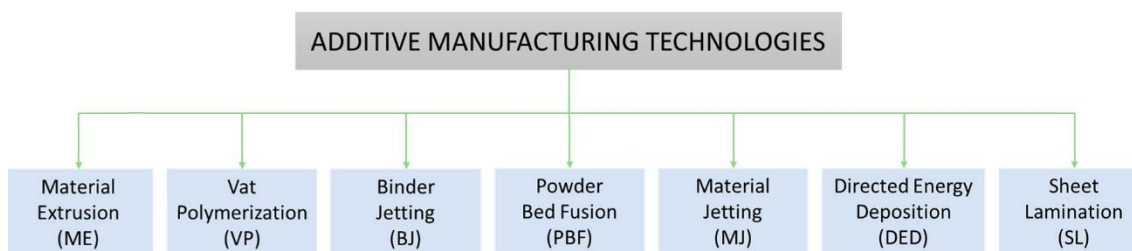
Hlavními výhodami aditivních technologií jsou rychlost výroby, možnost výroby produktů se složitou geometrií, snížení nákladů na další stroje a nástroje či úspora energie. Na rozdíl od konvenčních technologií výroby, v případě aditivní výroby jsou náklady na kus nezávislé na objemu produkce, jak je patrné z Obrázek 2. Z tohoto důvodu se hodí převážně pro méně kusovou výrobu. [4] V některých případech se lze s aditivními technologiemi setkat i v sériové výrobě, kdy součást nelze vyrobit konvenčními technologiemi. Kromě automobilového průmyslu se aditivní technologie výroby využívají také v leteckém a kosmickém průmyslu, stavebnictví nebo v lékařském průmyslu. [3]



Obrázek 2 Závislost nákladů na výrobním množství [4]

## 2.1 Rozdělení aditivních technologií

Jak již bylo zmíněno, polymerní materiály jsou jednou ze dvou hlavních kategorií materiálů pro aditivní technologie. Nejčastěji používanými materiály pro 3D tisk polymerních materiálů jsou ABS (akrylonitril butadien styren), PA (polyamidy), PC (polykarbonát), PLA (kyselina polyléčná), PS (polystyren) PET (polyethylentereftalát), popřípadě PETG (polyethylentereftalát-glykol) nebo fotopolymerní pryskyřice. [3] [5] Druhou nejrozšířenější oblastí materiálů pro aditivní technologie jsou kovy a jejich slitiny. Mezi nejčastěji využívané materiály patří některé typy ocelí, titan a jeho slitiny, dále slitiny hliníku, niklu nebo kobaltu. Při využití aditivní výroby je potřeba uvažovat horší mechanické vlastnosti v porovnání s konvenční výrobou, častější výskyt defektů nebo anizotropní chování. Z těchto důvodů je po dokončení výroby běžně požadováno další zpracování, případně tepelné zpracování. [5]

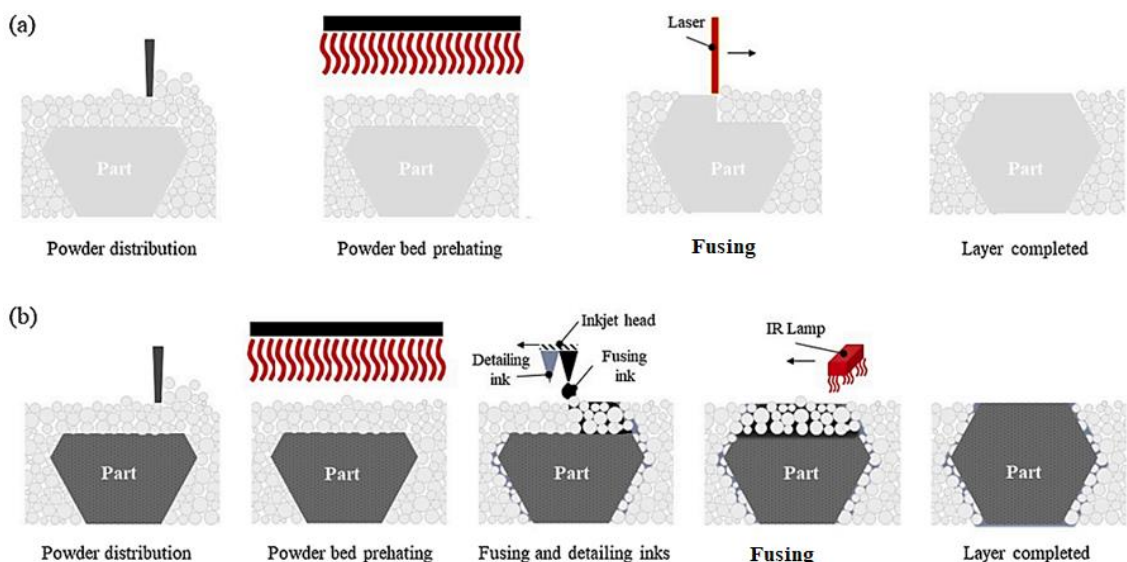


Obrázek 3 Základní rozdělení aditivních technologií [4], upraveno

Podle normy ISO/ASTM 52900 [6] lze aditivní technologie výroby rozdělit na sedm základních metod (viz Obrázek 3). Patří se metody Powder Bed Fusion (PBF), Material Extrusion (ME), Material Jetting (MJ), Binder Jetting (BJ), Direct Energy Deposition (DED), Vat Polymerization (VP) a Sheet Lamination (SL). Každá metoda je navržena pro konkrétní účel a pro konkrétní materiály a je založena na jiném principu. [7]

## 2.1.1 Powder Bed Fusion

Metoda Powder Bed Fusion, dále jen PBF, je založena na sintrování nebo tavení polymerního, popřípadě kovového prášku. Proces spočívá v nanesení vrstvy prášku o tloušťce několik desítek mikrometrů do pracovní komory pomocí nanášeče ze zásobníku prášku. Prášek je spojen v požadovaných místech pomocí laserového paprsku, elektronového svazku (pouze pro kovové vodivé materiály) nebo pomocí tavicího činidla (pouze pro polymerní materiály). Následně dojde k nanesení nové vrstvy prášku a celý proces se opakuje, dokud nevznikne finální díl. Přebytečný materiál, který nebyl v procesu využit, se poté odstraní z pracovní komory a je možné jej recyklovat. [5] Podle způsobu spojování polymerních částic lze PBF rozdělit na Selective Laser Sintering (SLS) a Multi Jet Fusion (MJF). Pro obě zmíněné technologie se nejčastěji využívají termoplasty PA 11 a PA 12 (polyamid 11 a polyamid 12), známé jako nylon. [5] [8] PBF pro kovové materiály lze rozdělit na technologie Electron Beam Melting (EBM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS), popřípadě Selective Laser Melting (SLM).



Obrázek 4 Porovnání principu SLS a MJF [9], upraveno

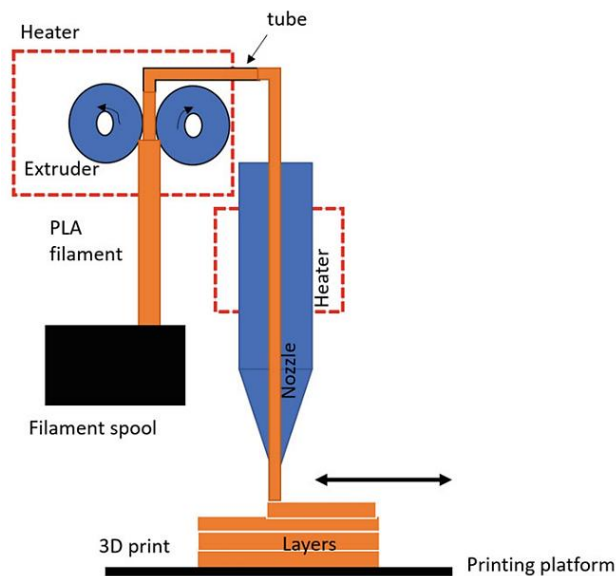
Na Obrázek 4 je zobrazeno porovnání principu technologie SLS (a) a MJF (b). Technologie SLS využívá v procesu laserový paprsek, pomocí kterého dojde k zahřátí částic těsně pod bod teploty tání a následné fúzi částic. Tomuto procesu se říká sintrování. MJF je poměrně nová technologie,

patentovaná společností HP v roce 2015. Na rozdíl od SLS nevyužívá laserového paprsku, ale tavicí činidlo a tzv. detailovací činidlo, které se nanáší na hraniční oblast mezi taveným materiálem a okolím. Po nanesení činidel dojde k fúzi částic pomocí infračervené lampy. Tavicí činidlo obsahuje grafitický uhlík, který napomáhá při absorpci infračerveného záření. Naopak detailovací činidlo má opačný účinek. [9] Princip technologií DMLS/SLM a EBM je téměř shodný s principem technologie SLS zobrazeném na Obrázek 4 a). Hlavní rozdíl spočívá v tom, že v případě DMLS/SLM a EBM dochází k natavení částic materiálu, čímž dojde k jejich spojení. DMLS i SLM využívá pro natavení částic laserový paprsek. Technologie EBM využívá fokusovaný elektronový svazek. Elektrony emitované ze zahřátého wolframového vlákna dopadají vysokou rychlostí na kovové částice, kde dojde k transformaci kinetické energie na tepelnou. Z tohoto důvodu je potřeba udržovat vysoké vakuum v pracovním prostoru. [10] Důležitými parametry, které ovlivňují vlastnosti výsledného dílu u PBF jsou velikost a distribuce částic prášku, výkon laserového paprsku, popřípadě elektronového svazku a jeho rychlost skenování povrchu, popřípadě použité tavidlo, rychlost nanášení a interakce mezi práškem a tavidlem. [5]

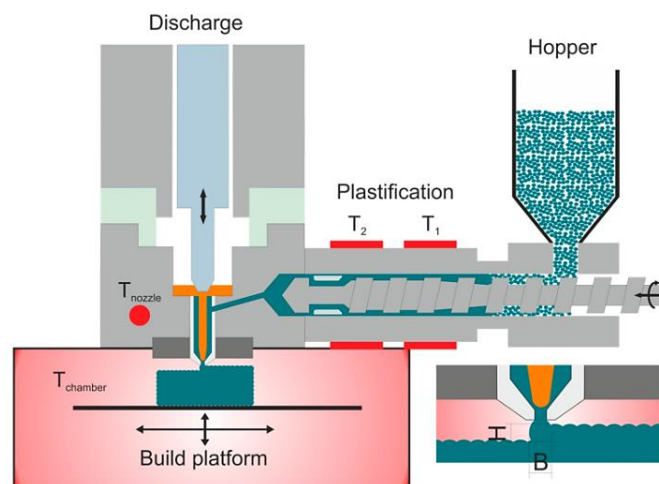
### **2.1.2 Material Extrusion**

Material Extrusion, zkráceně ME, je metoda aditivní výroby, při které dochází k vytlačování nataveného polymerního materiálu tryskou. Do této metody spadá technologie Fused Deposition Modeling (FDM), popřípadě Fused Filament Fabrication (FFF) a Arburg Plastic Freeforming (APF). FDM/FFF (viz Obrázek 5) jsou nejrozšířenější a nejjednodušší technologií aditivní výroby. Polymerní materiál ve formě filamentu je kontinuálně natavován a vytlačován skrz extrudér na pracovní desku, kde vrstvu po vrstvě vytváří požadovaný tvar. Pomocí této technologie je možné tisknout z více materiálů najednou. Technologie APF, zobrazená na Obrázek 6, využívá materiál ve formě polymerních granulí. Granule jsou pomocí šneku nataveny a vtlačeny do extruderu, ze kterého je materiál nanášen vrstvu po vrstvě do pracovního prostoru. Na rozdíl od FDM/FFF nedochází ke kontinuálnímu nanášení, ale

kmitáním uzavíracího ventilu dochází k tvorbě kapek. Díky tomu je možné regulovat velikost kapek. Kvalita tisku u těchto metod závisí především na orientaci tisku, průměru trysky, rychlosti extruze a tisku, na teplotě extruze a pracovního prostoru, popřípadě podložky. [11] [12]



Obrázek 5 Princip FDM [11]

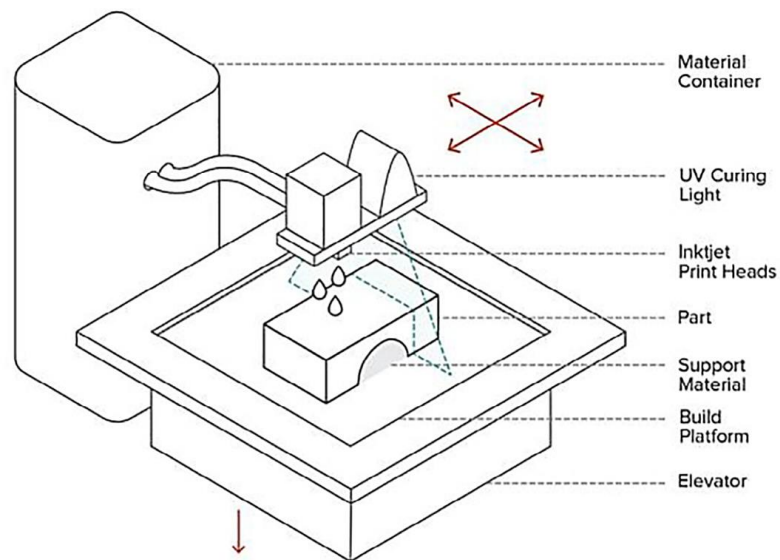


Obrázek 6 Princip APF [12]

### 2.1.3 Material Jetting

Metoda Material Jetting, zkráceně MJ, je jednou s nejrychlejších a nejpřesnějších metod aditivní výroby. Princip spočívá v tryskání kapek kapalného fotopolymeru (pryskyřice vytvrditelné UV světlem) do dané oblasti za použití několika velmi malých trysek. Následně dojde k okamžitému

vytvrzení naneseného materiálu za použití UV světla. Tento proces probíhá vrstvu po vrstvě, dokud nevznikne celý objekt. Proces je zobrazen na Obrázek 7. Před zahájením procesu nanášení je potřeba pryskyřici zahřát, aby bylo dosaženo ideální viskozity. Hlavní výhodou této metody je možnost využití několika materiálů najednou, lze tak například kombinovat pevné a elastické materiály nebo snadno rozpustitelné podpěry. Proces také umožňuje vytvářet desítky objektů na jednu stavbu, díky čemuž je dosažena velmi vysoká produktivita. Nevýhodou je vysoká cena a omezený počet materiálů (pouze fotopolymery). V závislosti na výrobci se lze setkat s několika názvy, například PolyJet (PJ) od Stratasys nebo MultiJet Printing (MJP) od 3D Systems. [13] [14]

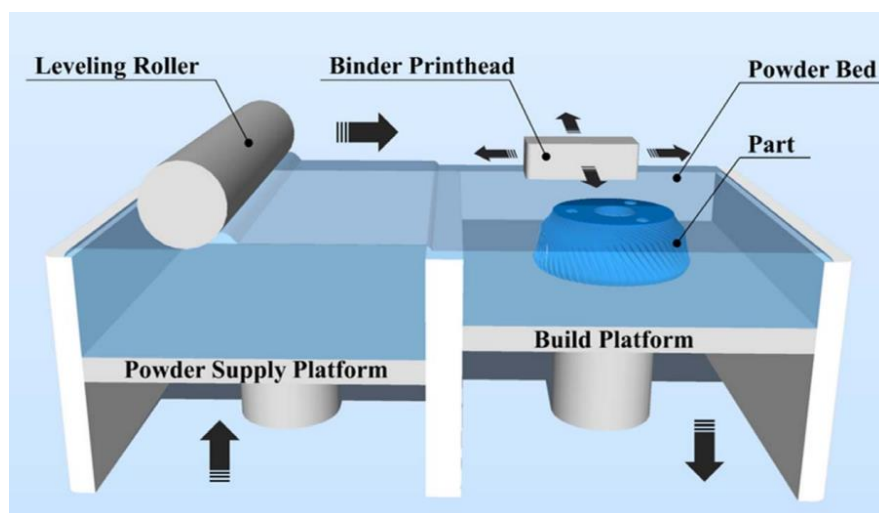


Obrázek 7 Princip MJ [13]

Zvláštní metodou MJ je Nano Particle Jetting. Jedná se o metodu určenou pro kovové a keramické materiály představenou v roce 2016 společností Xjet. Princip spočívá ve vstřikování nanočástic pomocí vstřikovacích trysek a vytváření vrstev o tloušťce pouhých 10  $\mu\text{m}$ . Spolu s materiálovými nanočásticemi je nanášen také kapalný nosný materiál. Bezprostředně po nanesení směsi dochází k vypaření tekutého nosného materiálu v důsledku vysoké teploty v pracovní komoře (300°C). Takto vytištěná součást je následně vložena do sintrovací pece, kde dojde k fúzi částic. [15]

## 2.1.4 Binder Jetting

Binder Jetting, dále pouze BJ, je aditivní technologií podobnou PBF. Stejně jako PBF, i BJ využívá práškový materiál nanesený po celé pracovní oblasti. Rozdíl spočívá v technologii spojování práškových částic. V případě BJ je proces rozdělený na dvě fáze. První fází procesu, zobrazenou na Obrázek 8, lze nazvat jako fází tisku. Materiál je nanesen plošně pomocí nanášeče. Následně dojde k tryskání kapalného pojiva do oblastí, kde má být materiál spojen. Proces se opakuje, dokud není vytvořen celý objekt. Přebytečný prášek je možné recyklovat. Objektu na konci této fáze se říká „zelená část“. Samotné sintrování prášku probíhá ve druhé fázi. Před sintrováním dochází ještě k odstranění pojiva. Toho je dosaženo zahřátím objektu na 175–450 °C po dobu několika hodin. Objekt v této fázi se nazývá „hnědá část“. Samotné sintrování poté probíhá při vyšší teplotě, v závislosti na použitém materiálu. Vlastnosti finálního dílu závisí na velikosti materiálových částic, na jejich rozložení, a především na interakci prášku s pojícím materiálem. BJ lze využít pro tisk kovových a keramických materiálů, ale i pro některé polymerní materiály, mimo jiné například PLA (kyselina polylaktónová) nebo PMMA (polymethylmethakrylát). [16] [17]

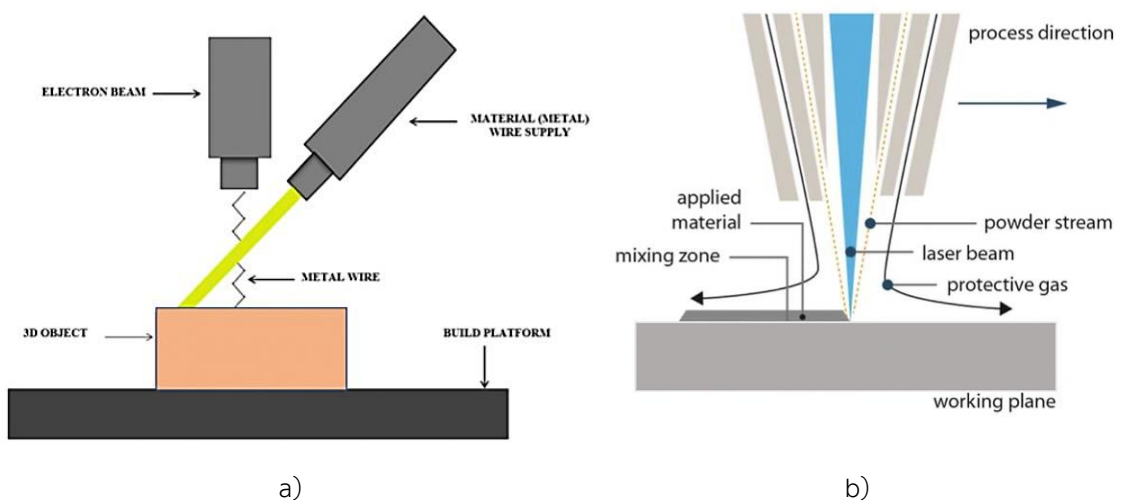


Obrázek 8 Princip BJ [16]



## 2.1.5 Direct Energy Deposition

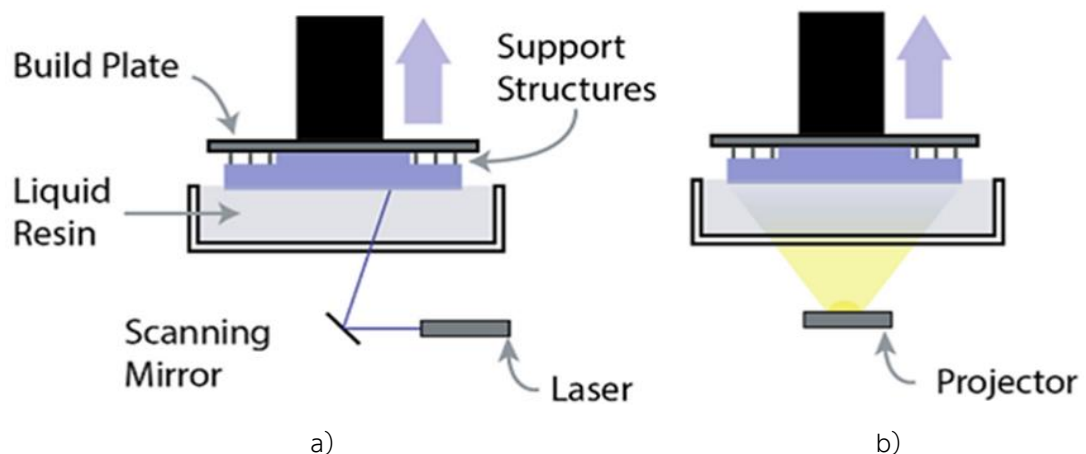
Direct Energy Deposition, dále jen DED, je metodou aditivních technologií založenou na tavení kovového materiálu a jeho lokálnímu nanášení na vytvářený objekt. Podle zdroje energie lze DED rozdělit na Laser-based DED, Electron beam-based DED a Plasma/Electric arc-based DED. Jak názvy napovídají, jako zdroj energie slouží laserový paprsek, elektronový svazek, respektive plazmový/elektrický oblouk. Dále lze DED rozdělit podle materiálu, který může být do systému dodáván v podobě kovového prášku nebo kovového drátu. Na Obrázek 9 a) je zobrazen princip nanášení kovového drátu, b) pak představuje princip s využitím kovového prášku. Základem těchto metod je tryska upevněná na víceosém rameni. Díky tomu je možné materiál nanášet pod libovolným úhlem. Celý proces obvykle probíhá v hermeticky uzavřeném prostoru. V případě laserového paprsku a oblouku v prostoru naplněném inertním plynem, nebo vakuem v případě systému s elektronovým svazkem. Pomocí technologií DED lze efektivně vytvářet velké objekty s hustotou a pevností vyšší než u ostatních metod kovového tisku. Lze taky snadno opravovat nebo upravovat již existující objekty. Nevýhodou metody je nízká rozměrová přesnost nebo horší kvalita povrchu, která často vyžaduje dodatečné opracování. Z podstaty DED také nelze tisknout za využití podpěr, proto jsou výrobní možnosti v tomto ohledu omezené. [18] [19]



Obrázek 9 Princip DED s materiálem v podobě a) drátu, b) prášku [18]

## 2.1.6 Vat Polymerization

Vat Polymerization, dále jen VP, je nejstarší metoda aditivní výroby. Základní princip spočívá ve vytvrzování tekutého fotopolymery (světlocitlivé pryskyřice) umístěného v nádrži, ze kterého je objekt tvořen vrstvou po vrstvě. Po vytvrzení jedné vrstvy dojde k zvednutí, nebo naopak poklesu stavicí plošiny, v závislosti na tom, zda stroj využívá proces shora dolů nebo zdola nahoru, přičemž výška jedné vrstvy nejčastěji bývá 100  $\mu\text{m}$ . Podle principu vytvrzování lze rozdělit VP na dvě základní technologie, a to Stereolithography (SLA) a Digital Light Processing (DLP). Technologie SLA využívá k vytvrzování materiálu laserový paprsek. Proces SLA s procesem zdola nahoru je znázorněn na Obrázek 10 a). Přesnost tohoto procesu závisí na průměru laserového paprsku v místě vytvrzování. Technologie DLP, zobrazená na Obrázek 10 b), využívá pro vytvrzení materiálu digitální světelný projektor. Pomocí projektoru je osvětlována celá vrstva najednou, díky čemuž je možné dosáhnout vyšších rychlostí. Přesnost vytištěného dílu závisí na rozlišení projektoru. [20] [21]

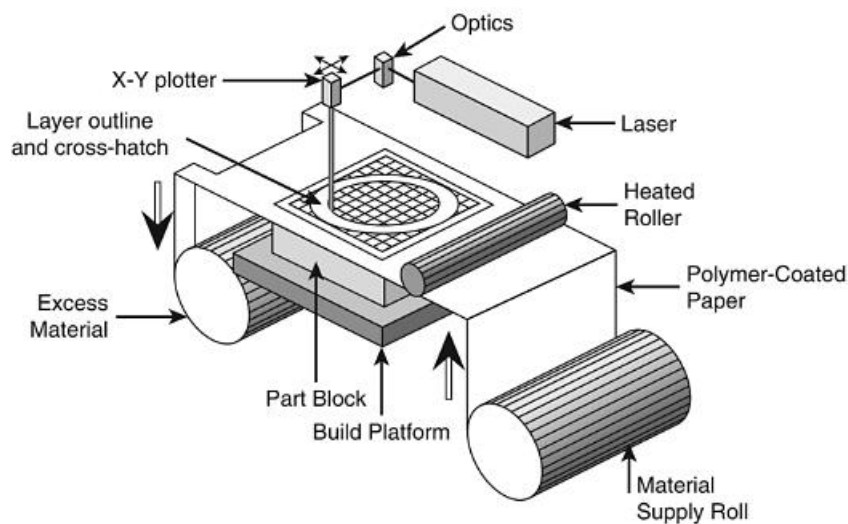


Obrázek 10 Porovnání technologií SLA a) a DLP b) [21]

## 2.1.7 Sheet Lamination

Sheet lamination (SL), je metoda spočívající ve skládání a laminování tenkých plátů materiálu na sebe, dokud nevznikne 3D objekt. Jednotlivé vrstvy mohou být spojeny lepením, ultrazvukovým svařováním nebo využitím tepla a tlaku. Ze všech sedmi uvedených metod aditivních technologií výroby produkuje SL díly s nejmenší přesností. Nicméně, díky své rychlosti

a nízké ceně umožňuje vytvářet prototypy ze snadno dostupných levných materiálů. Jako materiál lze využít papír, polymerní pláty, kovové pláty nebo také kompozity. Princip zobrazený na Obrázek 11 spočívá ve vyřezávání objektu z tenkých plátů pomocí laserového paprsku nebo CNC stroje. Tloušťka plátu představuje jednu vrstvu objektu. Nežádoucí materiál je nařezán na obdélníky a po dokončení procesu jej lze snadno odstranit. [22] [23]



Obrázek 11 Princip SL [23]

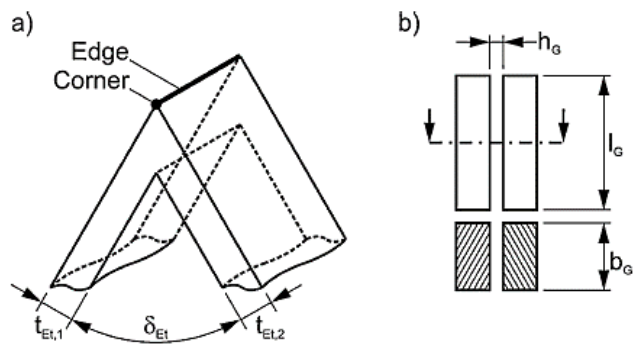
## 2.2 Omezení a pravidla aditivních technologií

Při navrhování dílu a následné volbě výrobní technologie je potřeba znát rozměrové přesnosti jednotlivých technologií, jejich možnosti a omezení. Ačkoliv každá metoda má své limity, hlavními faktory, které ovlivňují, zda se díl vytiskne podle specifikací, jsou design návrhu, jeho orientace vůči tisku a použitý materiál. V Tabulka 1 jsou uvedeny vybrané znaky pro nejběžnější technologie aditivní výroby, které mohou hrát důležitou roli při rozhodování. Rozměrová přesnost je odvozena od hodnot uváděnými výrobcí strojů a materiálů. Smrštění a deformace do značné míry závisí na designu součásti a použitém materiálu. Při některých technologiích nicméně dochází k většímu riziku vzniku těchto vad. Potřeba podpěr při tisku opět závisí na zvolené technologii. [24]

Tabulka 1 Rozměrová přesnost vybraných aditivních technologií [24]

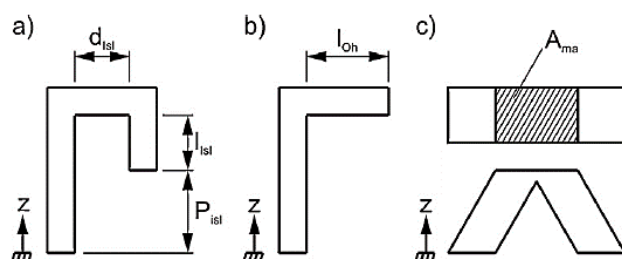
	<b>Rozměrová přesnost</b>	<b>Smrštění/ deformace</b>	<b>Podpěry</b>
<b>FDM (stolní)</b>	± 0,5 % (min. ± 0,5 mm)	V rozmezí 0,2–1 % v závislosti na použitém materiálu	Pro přesahy s úhlem více než 45°
<b>FDM (průmyslová)</b>	± 0,15 % (min. ± 0,2 mm)		
<b>SLA (stolní)</b>	± 0,5 % (min. ± 0,1 mm)	Pravděpodobné pro nepodporované části	Nezbytné pro dosažení přesné součásti.
<b>SLA (průmyslová)</b>	± 0,15 % (min. ± 0,01 mm)		
<b>SLS</b>	± 0,3 % (min. ± 0,3 mm)	V rozmezí 2–3 %	Nevyžadovány
<b>MJ</b>	± 0,1 % (min. ± 0,05 mm)	Žádné	Nezbytné pro dosažení přesné součásti
<b>DMLS/SLM</b>	± 0,1 mm	Vysoké riziko smrštění nebo deformace	Nezbytné pro dosažení přesné součásti

Jak již bylo zmíněno, jedním z hlavních faktorů ovlivňujících jakost výsledné součásti je samotný design a orientace vůči tisku. Pro zajištění jakostních produktů byla vytvořena určitá návrhová pravidla, která poukazují na omezení týkající se struktury součásti. Podle práce [25] lze strukturu rozdělit na tzv. standardní prvky. Jednotlivé prvky jsou dále rozděleny na základní prvky, přechody prvků a na agregované struktury. Základní prvky představují elementární geometrické tvary, např. válec. Přechody prvků vznikají kombinací základních prvků, např. spoje. Agregované struktury se skládají ze dvou nebo více základních prvků a jejich přechody, např. převisy. V případě přechodů prvků lze rozlišovat přechody pevně spojených prvků (Obrázek 12 a)) a přechody nespojených prvků (Obrázek 12 b)). Sledovanými atributy jsou tloušťka prvků, přechodový úhel mezi prvky, hrany a rohy, popřípadě výška mezery ( $h_G$ ), šířka mezery ( $b_G$ ) a délka mezery ( $l_G$ ) pro nespojené prvky. [25]

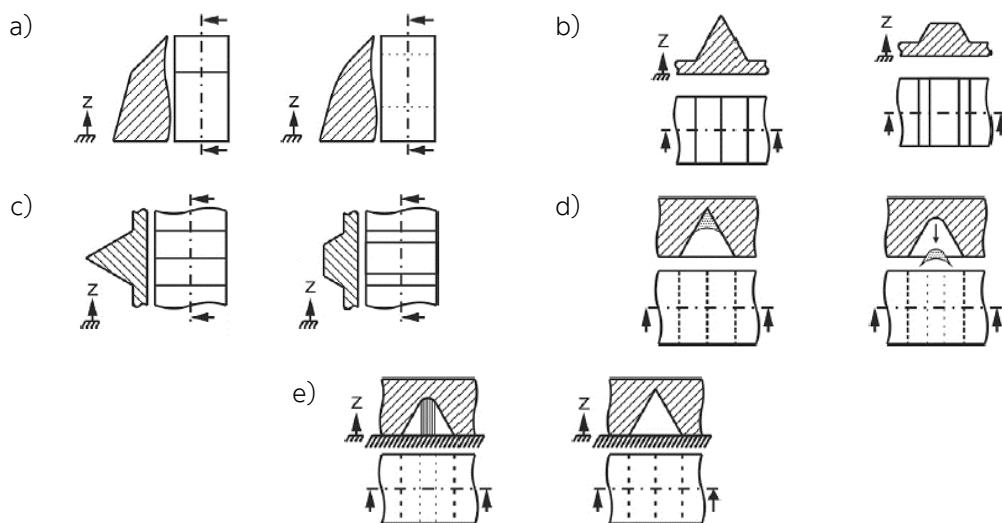


Obrázek 12 Přechody prvků a) spojených, b) nespojených [25]

Různou kombinací základních prvků a jejich přechodů lze definovat tři základní skupiny agregovaných struktur, a to ostrovy (Obrázek 13 a)), převisy (Obrázek 13 b)) a hromadění materiálu (Obrázek 13 c)). Ostrovy jsou charakterizovány výchozí polohou ( $P_{isl}$ ), délkou ( $l_{isl}$ ) a vzdáleností od hlavní struktury ( $d_{isl}$ ). Převisy lze popsat pomocí délky ( $l_{oh}$ ). Hromadění materiálu charakterizuje velikost plochy ( $A_m$ ), kde je materiál hromaděn. [25] V Tabulka 2 jsou uvedeny vybraná návrhová pravidla pro technologie SLS, SLM a FDM.



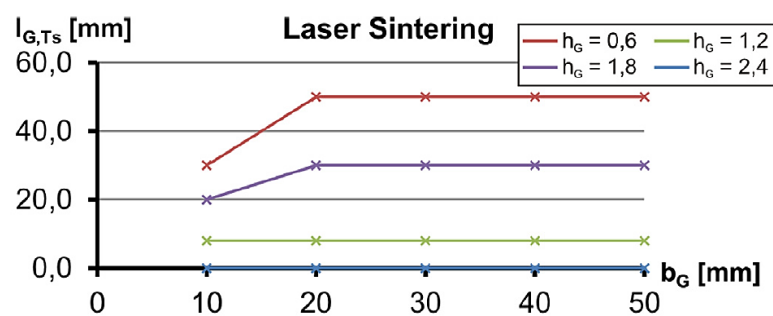
Obrázek 13 Agregované struktury a) ostrovy, b) převisy, c) hromadění materiálu [25]



Obrázek 14 Jednotlivé případy návrhových pravidel pro hrany [25]

Tabulka 2 Vybraná návrhová pravidla pro technologie SLS, SLM a FDM [25]

		SLS	SLM	FDM
<b>Spojené prvky</b>	<b>Tloušťka</b>	Libovolná		
	<b>Hrany</b>	Vnitřní a vnější hrany zaoblené (Obrázek 14 a)) Hrany (vertikální maxima) otupené ve směru tisku (Obrázek 14 b)) Hrany (horizontální maxima) otupené kolmo na směr tisku (Obrázek 14 c))		
		Zaoblené vnitřní hrany pro snadné odstranění prášku (Obrázek 14 d))		
		Ostré vnitřní hrany, aby nebyly vyžadovány podpěry (Obrázek 14 e))		
<b>Nespojené prvky</b>	<b>Výška <math>h_G</math></b>	$h_G \geq 0,6$ mm	$h_G \geq 0,2$ mm	$h_G \geq 0,4$ mm
	<b>Šířka <math>b_G</math></b>	Libovolná, pokud je přístupnost k díře po celé délce		
	<b>Délka <math>l_G</math></b>	Závisí na šířce viz Obrázek 15	$l_G \leq 50$ mm	Libovolná
<b>Přesah</b>	<b>Délka <math>l_{oh}</math></b>	Libovolná	$l_{oh} \leq 2$ mm	$l_{oh} \leq 1,8$ mm
<b>Hromadění materiálu</b>	<b>Plocha <math>A_m</math></b>	-	$A_m \leq 20 \times 20$ mm	-
<b>Ostrovky</b>	<b>Výchozí poloha <math>P_{isl}</math></b>	Libovolná		Co nejnižší



Obrázek 15 Závislost délky díry na tloušťce a výšce Pro technologii SLS [25]

Významnou roli při navrhování součásti hraje orientace vůči směru tisku (viz Obrázek 16). Vhodnou polohou součásti lze snížit celkový počet podpěr, změnit mechanické vlastnosti nebo výrazně snížit výrobní čas. Z tohoto důvodu byl vytvořen postup volby orientace. Návrh je rozdělen do

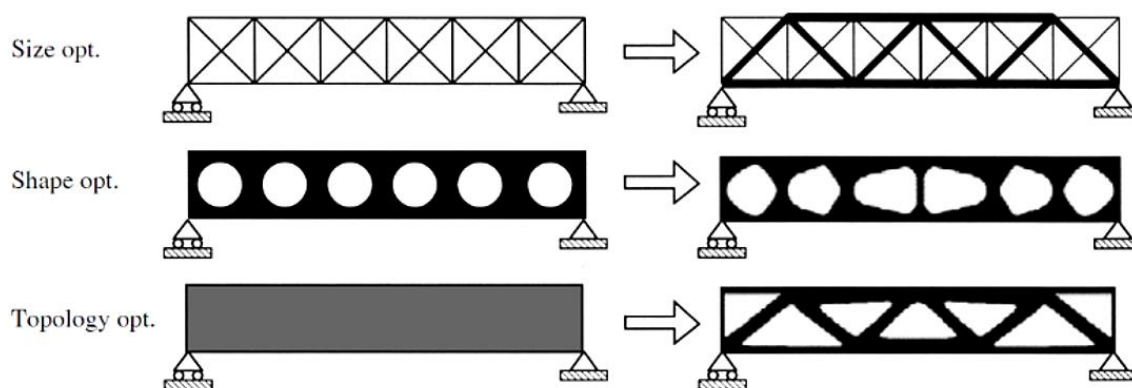
několika konstrukčních prvků, pro které se jednotlivě vyhodnotí vliv orientace. Následně je určena optimální orientace jednotlivých prvků a jejich důležitost. Na základě vyhodnocení je určena celková orientace součásti. Pokud nemá orientace na prvek významný vliv, může být během hodnocení zanedbán. Může se stát, že dojde ke konfliktu mezi různými kvalitativními znaky, například v jedné orientaci nejsou potřeba podpěry, zatímco druhá orientace vede k lepší kvalitě povrchu. V tomto případě závisí na preferencích konstruktéra. [26]



Obrázek 16 Vliv orientace vůči tisku na design součásti [26]

### 3 Strukturální optimalizace

Ve vývojovém cyklu produktu hraje fáze koncepčního návrhu klíčovou roli. Rozhodnutí provedená v této fázi vývoje mají silný dopad na průběh dalších fází, ať už výrobu nebo testování. Z těchto důvodů je potřeba vyhodnocovat více variant a alternativ tak, aby bylo nalezeno co nejoptimálnější řešení. Výrazné pokroky výpočetní techniky v posledních letech umožnily provádět simulace různých konfigurací v různých podmínkách, což podnikům šetří jak čas, tak peníze. [27] Strukturální optimalizace je proces, při kterém dochází k určení optimálního rozložení materiálu tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností pomocí zvolených podmínek a omezení. Volbou těchto parametrů lze dosáhnout různých cílů strukturální optimalizace, ať už snížení hmotnosti konstrukce, zvýšení tuhosti, snížení napětí nebo vyrobitelnosti pomocí požadované výrobní technologie. Existují tři typy optimalizačních metod, které se od sebe liší svými možnostmi a cílem optimalizace. Jedná se o optimalizaci velikosti, tvaru a o topologickou optimalizaci. Všechny zmíněné metody jsou zobrazeny na Obrázek 17. Na obrázku je patrný rozdíl v přístupech k optimalizaci a možnostech jednotlivých metod. [28]



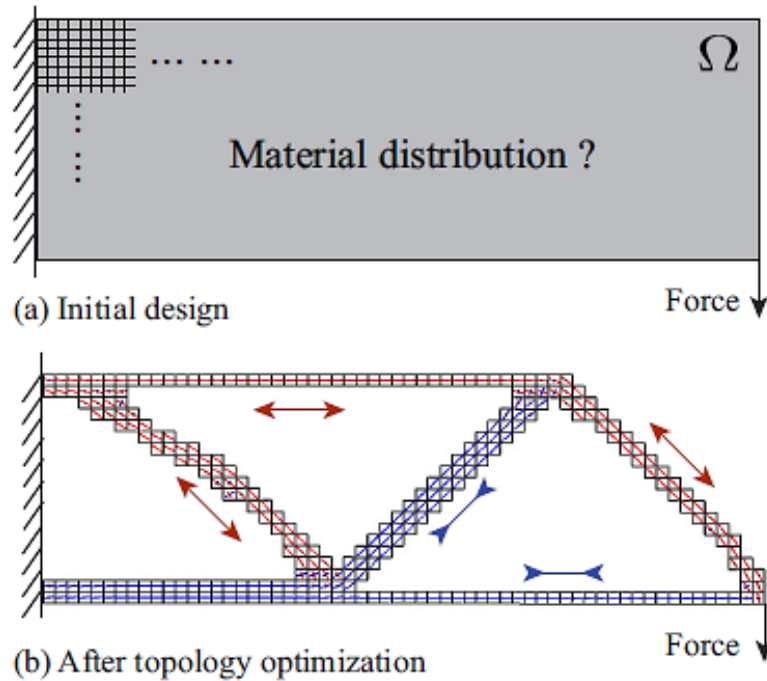
Obrázek 17 Rozdělení strukturální optimalizace: a) optimalizace velikosti, b) optimalizace tvaru, c) topologická optimalizace [29]



Zatímco optimalizace velikosti a tvaru se zaměřuje pouze na změnu velikosti komponent, respektive změnu obrysu nebo formy struktury, při topologické optimalizaci dochází k optimalizaci celé geometrie součásti, tedy jak tvaru, tak i rozměrů. Jedná se nejobecnější formu strukturální optimalizace. Pomocí topologické optimalizace lze dosáhnout výrazného snížení spotřeby času při navrhování součásti, stejně tak spotřeby materiálu. Výsledným produktem je odlehčená struktura, která splňuje specifické funkční požadavky. Do oblasti strukturální optimalizace lze zařadit také topografickou optimalizaci a optimalizaci lattice. Tyto dvě metody jsou popsány v následujících kapitolách, stejně tak i topologická optimalizace. [28] [30]

### **3.1 Topologická optimalizace**

Topologická optimalizace, jak již bylo řečeno, je jednou ze tří základních optimalizací struktury. Vzhledem k zaměření diplomové práce je této problematice věnována největší pozornost. Jedná se o metodu, jejímž cílem je optimalizovat rozložení materiálu v daném návrhovém prostoru (tzv. design space) s ohledem na zatížení a na definované omezení. Návrhový prostor představuje objem materiálu, ve které dochází k optimalizaci rozložení materiálu. Mezi omezení se řadí například maximální hodnota posunutí (displacement), požadovaná hmotnost konstrukce, tloušťka prvků, vyrobitelnost danou technologickou metodou, podmínka symetrie struktury atd. Tyto omezení představují hranici pro optimalizaci a lze pomocí nich dosáhnout požadovaných vlastností struktury. Na Obrázek 18 je zobrazen princip topologické optimalizace na jednoduchém nosníku, který je zatížen silou. Horní část obrázku (a) představuje nosník před optimalizací, ve spodní části (b) je zobrazen nosník po topologické optimalizaci se znázorněním působících tlakových (modře) a tahových napětí (červeně). [31]



Obrázek 18 Topologická optimalizace nosníku, (a) původní design, (b) optimalizovaný design [32]

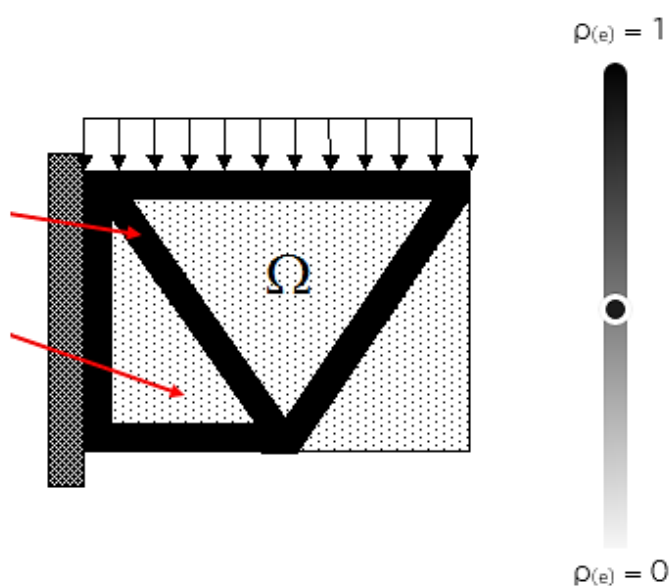
Topologická optimalizace ve své podstatě kombinuje CAD systém, analýzu pomocí konečných prvků (FEA – Finite Element Analysis) a různé matematické algoritmy. Role CAD systému spočívá ve vytvoření počátečního modelu, který má být optimalizován, zatímco analýza konečných prvků slouží k zobrazení rozložení napětí a deformací ve struktuře. Pomocí této analýzy lze snadno odhalit místa s vysokou koncentrací napětí a jiné nedostatky ve struktuře, což umožňuje konstruktérům během fáze finálního modelování tyto místa přepracovat a předejít tak možnému budoucímu porušení struktury. Využitím topologické optimalizace lze dosáhnout vysoké úspory materiálu, výrobního času a energií. Analýza deformací a napětových stavů ve struktuře také výrazně omezuje potřebu prototypů a fyzického testování. [29]

### 3.1.1 Metody topologické optimalizace

V dnešní době existuje mnoho metod topologické optimalizace, které k problematice přistupují různými způsoby. V této kapitole je uveden princip vybraných optimalizačních metod, se kterými se lze v odborné literatuře i v praxi nejčastěji setkat, konkrétně se jedná o metody SIMP a BESO.

#### SIMP

Metoda SIMP, celým názvem Solid Isotropic Material with Penalization je nejpublikovanější a zároveň nejpoužívanější metodou topologické optimalizace v komerčních softwarech včetně softwaru Altair Inspire, který je v rámci diplomové práce využit. Metoda je založená na gradientním hledání, to znamená, že v každém kroku postupuje podle směru klesání funkce, dokud se nedosáhne minima. Princip spočívá v rozdělení návrhového prostoru (označen jako  $\Omega$ ) na síť konečných prvků, tzv. izotropních pevných mikrostruktur a následnému přiřazení hodnoty hustoty  $\rho_{(e)}$  ke každému prvku. Tato proměnná nabývá hodnot od 0 do 1, kde  $\rho_{(e)} = 1$  znamená, že je zde materiál potřeba (černá místa) a  $\rho_{(e)} = 0$  naopak označuje místa, kde je materiál odebrán. Tento princip je zobrazen na Obrázek 19. Prvky, které nabývají hodnoty proměnné  $\rho_{(e)}$  v intervalu  $0 < \rho_{(e)} < 1$  by se na obrázku jevily jako šedá místa. [33] [34]



Obrázek 19 Zobrazení rozdílu v hodnotě proměnné  $\rho(e)$  [33], upraveno

Vzhledem k tomu, že hustota prvků  $\rho_{(e)}$  se může plynule měnit, dochází také ke změně Youngova modulu pružnosti. Pro každý prvek ( $e$ ) s přiřazenou hustotou  $\rho_{(e)}$  lze spočítat Youngův modul pružnosti ze vztahu:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0$$

kde  $E_0$  představuje původní hodnotu Youngova modulu pružnosti pro daný materiál,  $E(\rho_e)$  značí nový modul pružnosti pro daný prvek a  $p$  je penalizační faktor (nejčastěji nabývá hodnoty  $p=3$ ). Ten slouží k převodu šedých prvků (prvky s hodnotami mezi 0 a 1) na bílá a černá místa, tzn. místa s hustotou 0, respektive 1. V důsledku penalizačního faktoru dojde ke snížení tuhosti některých prvků, čímž se stanou nepotřebnými a dojde k jejich odstranění během optimalizačního procesu. Díky tomu vznikne stav, který je zobrazen na Obrázek 19. [33] [34]

### **BESO**

Další známou metodou topologické optimalizace je metoda Bilinear Evolutionary Structural Optimization (volně přeloženo jako Oboustranně se vyvíjející strukturální optimalizace), zkráceně BESO. Tato metoda, stejně jako v případě metody SIMP, rozdělí návrhový prostor na síť konečných prvků. Rozdíl spočívá ve snaze získat přímo 0–1 strukturu, to znamená buď materiál, nebo prázdné místo. Během procesu optimalizace dochází k postupnému odebírání neefektivního materiálu, popřípadě jeho přidávání do potřebných míst, dokud se nedosáhne optimálního stavu. Prvky, které splňují níže uvedenou nerovnici jsou ze struktury odstraněny: [35]

$$\sigma_e \leq RR_s \cdot \sigma_{max}$$

kde  $s$  představuje číslo aktuální interakce,  $\sigma_e$  značí napětí v prvku  $e$ ,  $\sigma_{max}$  značí maximální napětí ve struktuře a  $RR_s$  představuje odebírací poměr, jehož počáteční hodnota je obvykle  $RR_0 = 0,01$ . Pro každou další interakci dochází ke zvětšení odebíracího poměru podle vzorce:

$$RR_{s+1} = RR_s + ER$$

kde  $ER$  představuje evoluční poměr, jehož typická hodnota je  $ER = 0,01$ . Naopak okolo prvků, které splňují níže uvedenou nerovnici je přidán nový materiál:

$$\sigma_e \geq IR_s \cdot \sigma_{max}$$

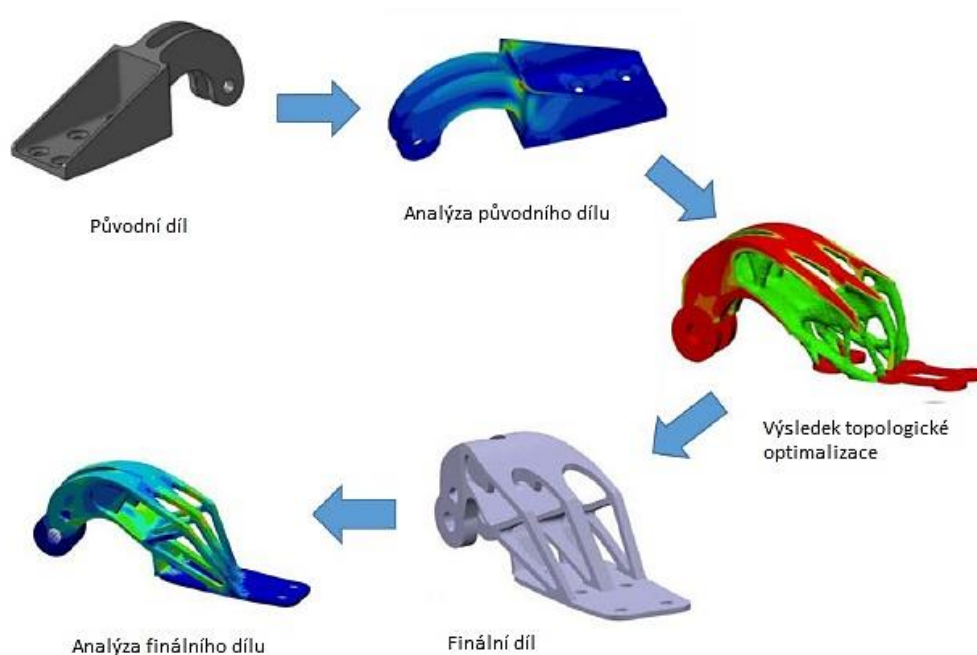
kde  $IR_s$  značí poměr zařazení, který lze vypočítat ze vztahu:

$$IR_{s+1} = IR_s - EIR$$

kde  $EIR$  značí evoluční poměr zařazení, jehož typická hodnota je  $EIR = 0,01$ . Počáteční hodnota  $IR$  je obvykle  $IR_0 = 0,99$ . Optimalizace probíhá tak dlouho, dokud se pomocí jednotlivých interakcí nedosáhne požadovaných vlastností. [28]

### 3.1.2 Proces topologické optimalizace

Topologická optimalizace lze aplikovat v rané fázi návrhu nového produktu nebo při úpravě designu již existujícího produktu za účelem snížení hmotnosti, aniž by došlo ke ztrátě funkčních vlastností. Na základě stanovených cílů, požadavků a problémů může být cílem optimalizace minimalizace hmotnosti, maximalizace tuhosti, případně snížení napětí. Je nutné podotknout, že proces topologické optimalizace se může lišit v závislosti na použitém softwaru a níže uvedený postup nemusí platit pro všechny. V rámci diplomové práce byl použit software Altair Inspire 2021. Na Obrázek 20 je zobrazen proces topologické optimalizace složený z několika kroků. Na samotném začátku stojí 3D model součásti. Po definování zatížení a podpor je možné přejít na analýzu součásti. Následuje samotná topologická optimalizace, jejíž výsledkem je optimální rozložení hmoty v rámci návrhového prostoru při dodržení definovaných omezení. Posledním krokem v procesu je přemodelování součásti na finální podobu a ověření pomocí analýzy.



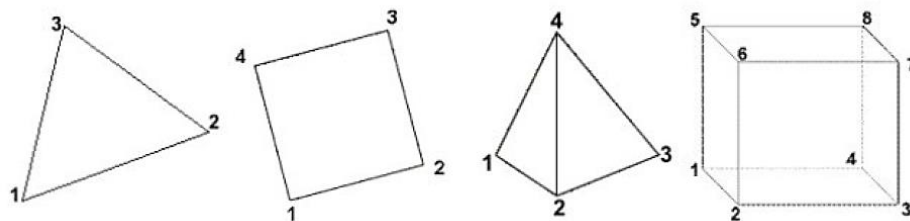
Obrázek 20 Proces topologické optimalizace, [29] upraveno

### **Příprava modelu**

Model součásti lze nainportovat v některém z podporovaných formátů. Mezi nejběžnější formáty patří Altair Inspire (.stmod), IGES (.iges, .igs), STEP (.stp, .step) nebo STL (.stl). V některých případech lze model vytvořit přímo v softwaru pro topologickou optimalizaci, což vylučuje potřebu dalších softwarů. Jakmile je model součásti nainportován, je možné přejít k přípravě analýzy a topologické optimalizace. Materiál součásti lze zvolit z knihovny, kde je nabízena široká škála materiálů od kovů až po polymery s uvedenými základními mechanickými vlastnostmi. Dalším krokem je definování zatížení a podpor (fixace), které odpovídají reálnému provozu součásti.

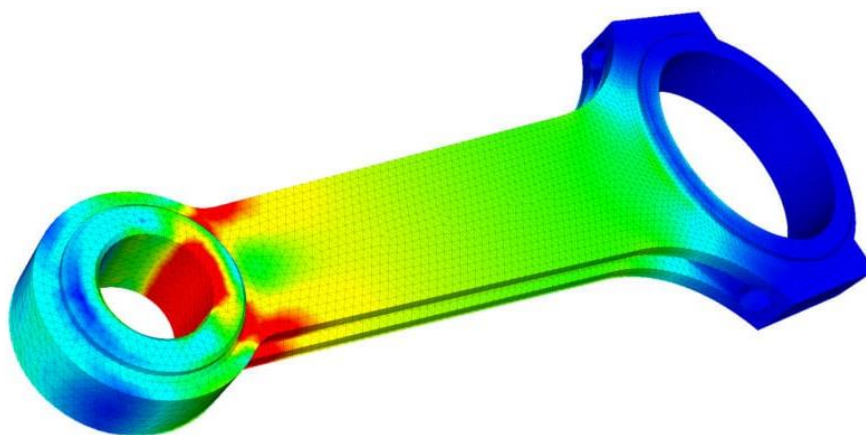
### **Analýza**

Simulační analýza v Altair Inspire je založena na metodě konečných prvků. V metodě konečných prvků je geometrie součásti rozdělena na malé pravidelné oblasti nebo objemy (tzv. diskretizace), které se nazývají konečné prvky. Společně vytváří síť tisíců až milionů prvků, tzv. mesh. Tyto prvky mohou nabývat různých tvarů, ať už 2D, nebo 3D (viz Obrázek 21). Po vytvoření sítě prvků proběhne výpočet, který definuje chování jednotlivých prvků a uzlů v rámci struktury. [36]



Obrázek 21 Příklad jednotlivých tvarů prvků [36]

V případě topologické optimalizace je doporučeno analýzu provádět jak u původní součásti, tak u finálního dílu. Prvotní analýza slouží k získání přehledu o mechanickém chování součásti. Tyto výsledky jsou následně použity pro porovnání s mechanickým chováním optimalizované součásti. Pokud optimalizovaná součást nespĺňuje stanovené mechanické požadavky, je potřeba upravit finální model, popřípadě parametry a provést topologickou optimalizaci znovu. Na Obrázek 22 je zobrazena analýza napětí na modelu ojnice. Barvy zde slouží jako indikátory změny napětí v součásti.



Obrázek 22 Rozložení napětí na ojnici [37]

### **Příprava topologické optimalizace**

Před samotnou topologickou optimalizací je potřeba definovat prostor, ve kterém proběhne optimalizace – návrhový prostor. Pro dosažení nejlepších výsledků je doporučeno model součásti zjednodušit a zvětšit návrhový prostor i za hranice původního designu součásti. Dalším krokem je stanovení cíle topologické optimalizace a omezujících podmínek ať už fyzikálních, nebo geometrických. Ideální řešení je kombinace optimalizace s cílem

minimalizace hmotnosti a optimalizace s cílem maximalizace tuhosti. Nejprve proběhne minimalizace hmotnosti. Následně se hmotnost vzniklé struktury použije jako cílová hmotnost při maximalizaci tuhosti.

### **Zpracování výsledků**

Po dokončení optimalizace přichází na řadu vizualizace optimalizované struktury. V některých případech může dojít k problémům se spojitostí materiálu, jako je tomu tak na Obrázek 23. Tento problém lze často eliminovat navýšením podílu materiálu ve struktuře za pomoci posuvníku, který umožňuje v určitém rozmezí přidávat nebo ubírat materiál ve struktuře. Pokud problém přetrvává, je zapotřebí upravit parametry a provést optimalizaci znovu.



Obrázek 23 Problém vzniklý během topologické optimalizace [27]

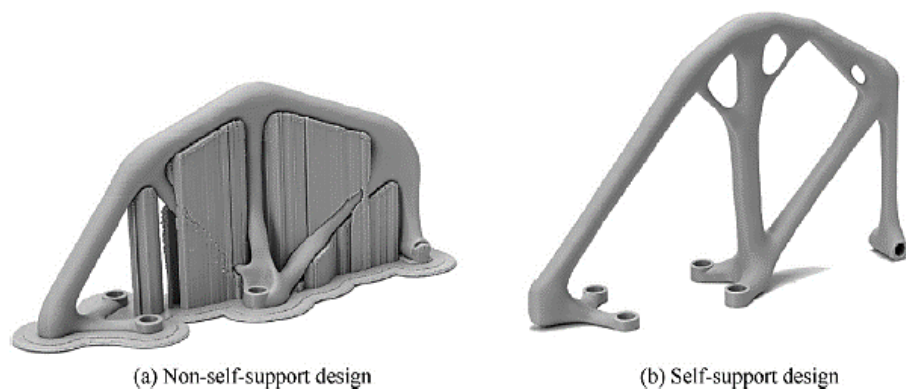
Topologická optimalizace slouží pouze jako návrh optimálního rozložení materiálu. Málokdy lze výsledek optimalizace považovat za finální design. Součást může být přemodelována buď přímo v Altair Inspire, nebo v jakémkoliv CAD softwaru. Finální díl je následně ověřen pomocí analýzy (viz Analýza).



### 3.1.3 Omezení pro topologickou optimalizaci

Pomocí topologické optimalizace lze dosáhnout optimálního rozložení hmoty v rámci návrhového prostoru. Ne vždy však toto rozložení splňuje požadované vlastnosti. Ve většině případů je potřeba definovat více než jedno omezení, které ve výpočtové fázi topologické optimalizace figurují jako okrajové podmínky. Rozlišují se fyzikální a geometrické omezení. Fyzikální omezení představují volba fixace součásti (umístění podpěr) a maximální, popřípadě minimální hodnota veličin jako požadované procento objemu materiálu, velikost posunutí nebo napětí. Mezi geometrické omezení se řadí symetrie, definování oblastí bez materiálu, volba návrhového prostoru, výrobitelnost požadovanou technologií atd. [30]

Právě výrobitelnost hraje velmi důležitou roli ať už při definování omezení topologické optimalizace, tak i při závěrečném přemodelování. Každá technologie výroby má své specifické omezení. Bez výrazného omezení komplexnosti struktury nelze počítat s konvenčními technologiemi výroby. Je potřeba najít kompromis mezi vyhovujícími mechanickými vlastnostmi a snadnou výrobitelností. Oproti tomu aditivní technologie umožňují vyrábět i komplexní struktury bez dalších nástrojů, forem a složitých postupů, čímž otevírají nové možnosti v aplikaci topologické optimalizace. Kombinace aditivních technologií a topologické optimalizace zbavuje strukturu omezení vyplývající z konvenčních metod výroby. Zůstávají však stále omezení, která závisí na dané aditivní technologii a použitém materiálu. Typickými omezeními jsou minimální délka, konektivita či přesah. Pozornost je také potřeba upírat na uzavřené dutiny a snadnou odstranitelnost podpěr. V případě výroby technologiemi PBF může dojít k uvíznutí nenataveného prášku v uzavřené dutině a následném poškození struktury při jeho odstraňování. [38]



Obrázek 24 Porovnání konstrukce s podpěrami (a) a samopodpůrné konstrukce (b) [38]

Součást by měla být navržena tak, aby bylo použito co možná nejmenší množství podpěr, popřípadě aby bylo možné eliminovat potřebu podpěr úplně. Minimalizací množství podpěr lze dosáhnout úspory materiálu, vyšší kvality povrchu i značné časové úspory. V některých případech (např. u FDM) lze bez podpěr tisknout prvky se sklonem více než  $45^\circ$ . Struktura, která nevyžaduje žádné podpěry, se říká samopodpůrná. Při porovnání tohoto typu konstrukce s běžnou konstrukcí s podpěrami (viz Obrázek 24) je zde patrný výrazný rozdíl ve sklonu jednotlivých nosných prvků. [39]

### 3.1.4 Využití topologické optimalizace

Jak již bylo zmíněno, topologická optimalizace je obecnou metodou strukturální optimalizace, která slouží k optimálnímu rozložení materiálu v návrhovém prostoru, ale zároveň splňuje specifikované podmínky. Pomocí této metody je možné vytvářet lehké, výkonné a multifunkční konstrukce. Z těchto důvodů je široce využívána v letectví, automobilovém a lékařském průmyslu. Slouží také jako nástroj designu v architektuře či jiných odvětvích. [38]

#### **Automobilový průmysl, letectví a kosmonautika**

Již od počátku letectví a kosmonautiky byla snaha o co největší snížení hmotnosti konstrukcí, aniž by došlo k výraznému snížení pevnosti. Topologická optimalizace umožňuje zanalyzovat jednotlivé součásti a vytvořit odlehčenou konstrukci, což vede ke zvýšení nosnosti přepravy nebo snížení

spotřeby paliva. Stejně výhody platí i pro automobilový průmysl, především pro sportovní vozidla, kde hraje hmotnost také důležitou roli.

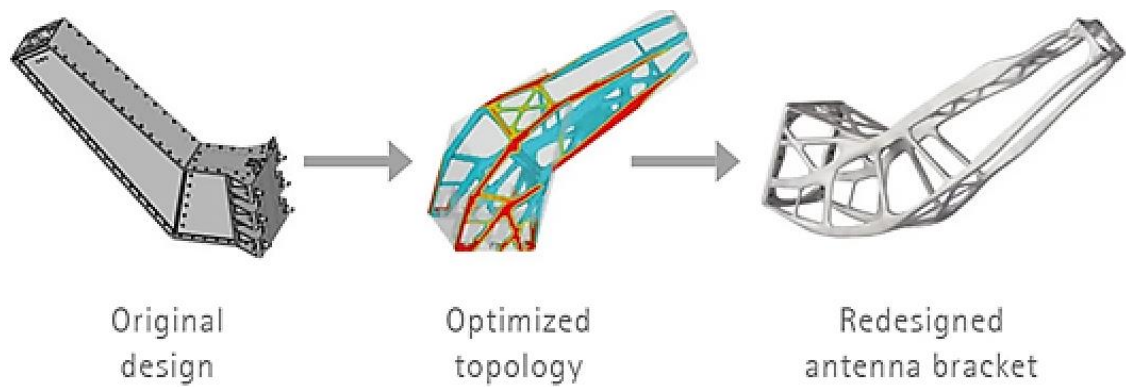
Jako příklad využití topologické optimalizace v automobilovém průmyslu lze uvést 3D tištěný kovový držák střechy vyvinutý společností BMW pro vůz BMW i8 Roadster. Pomocí softwaru pro topologickou optimalizaci bylo dosaženo snížení hmotnosti dílu o 44 % oproti dílu použitým v předešlé generaci modelu, který byl vytvořen konvenčními technologiemi. Díl je navržený tak, aby šel tisknout bez jakýchkoliv podpěr, což představuje značnou časovou i materiálovou úsporu. Na Obrázek 25 je zobrazen jak původní díl (úplně vlevo), tak i optimalizovaný díl vytvořený 3D kovovým tiskem (úplně vpravo). [1]



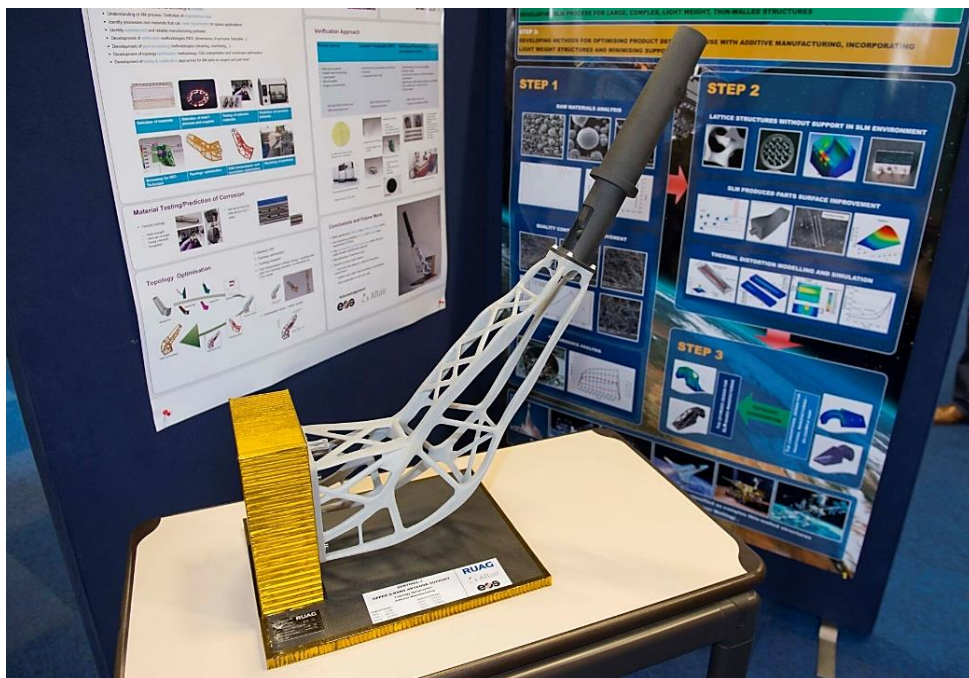
Obrázek 25 Vývoj designu součásti pro automobil BMW i8 Roadster [1]

V letectví a kosmonautice, kde každý gram navíc představuje značné finanční náklady, se lze setkat s aplikací topologické optimalizace například u držáku antény pro satelit Sentinel, který je zobrazen na Obrázek 26. V levé části obrázku je znázorněn původní design, prostřední část znázorňuje rozložení hmoty po dokončení topologické optimalizace, v pravé části je pak zobrazena finální přemodelovaná součást připravená pro výrobu. Použitá hliníková slitina AlSi10Mg se vyznačuje vysokou pevností a odolností vůči dynamickému namáhání, díky čemuž je materiál vhodný pro použití s vysoce namáhanými součástmi. Oproti původním požadavkům došlo díky kombinaci

topologické optimalizace a aditivních technologií výroby k navýšení tuhosti o 30 %. Navíc bylo dosaženo snížení hmotnosti na 940 g z původních 1,6 kg, což představuje úsporu přes 40 %. Velkým úspěchem bylo získání potřebné certifikace a schválení pro aplikaci součásti ve vesmíru. Na Obrázek 27 je demonstrováno uchycení a funkce již vytištěné součásti. [40]



Obrázek 26 Proces topologické optimalizace držáku antény pro satelit Sentinel [40],  
upraveno

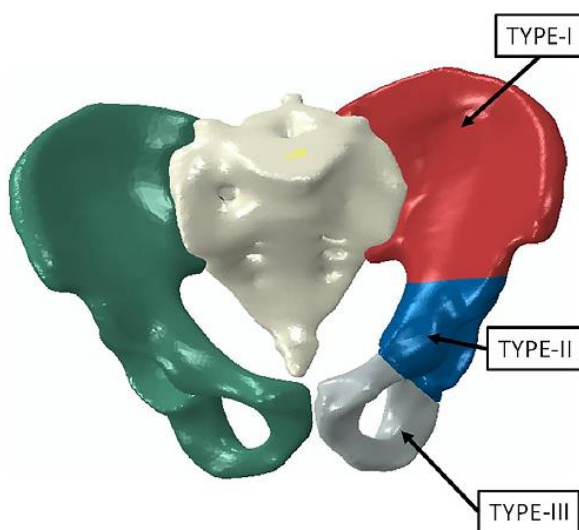


Obrázek 27 Vytištěný držák antény pro satelit Sentinel [41]

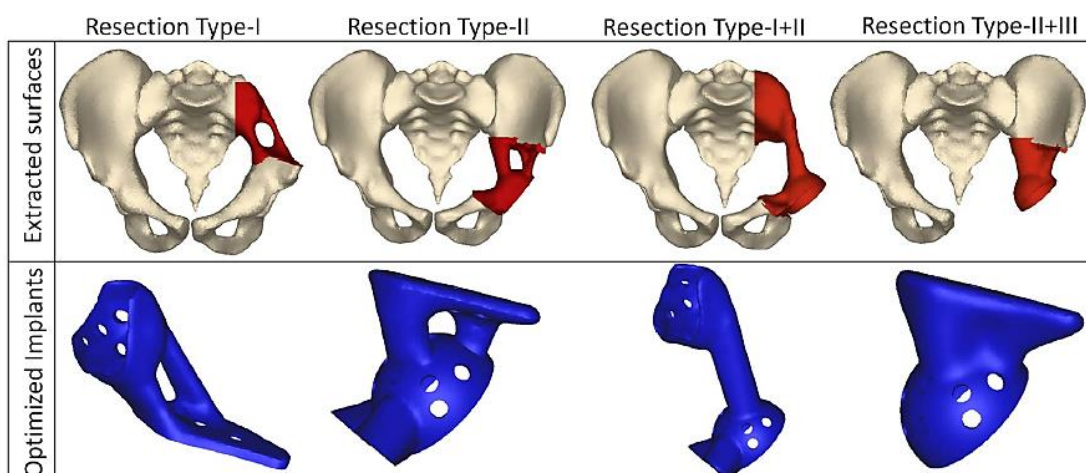
## Lékařský průmysl

V lékařském průmyslu se lze setkat s topologickou optimalizací především v oblasti implantátů a protéz. Za pomoci topologické optimalizace lze navrhnout strukturu implantátů a protéz pro individuální potřeby pacienta, která se svými vlastnostmi přibližuje vlastnostem kosti. Často se v lékařském průmyslu využívá kombinace topologické optimalizace a mřížkových struktur. [42]

Pacienti s pokročilým nádorem v pánvi mohou podstoupit chirurgické odstranění (resekci) částí pánevní kosti. Resekce pánve jsou rozděleny na tři typy podle lokalizace defektů. Tyto třídy jsou zobrazeny na Obrázek 28. Typ I zahrnuje odstranění kyčelního kloubu, typ II odstranění periacetabulární oblasti, typ III zahrnuje odstranění sedací a stydké kosti. Pacienti, kteří podstoupí tyto chirurgické operace se následně neobejdou bez implantátů, díky kterým je možné pánev zrekonstruovat. Pomocí topologické optimalizace byly vytvořeny čtyři specifické návrhy pánevních protéz podle oblastí, které musely být odstraněny. Bylo dosaženo snížení objemů jednotlivých návrhů na 19 %, 31 %, 18 % a 22 % původních částí pro typy I, II, I+II a II+III v tomto pořadí. Na Obrázek 29 jsou zobrazeny optimalizované kostní náhrady pro jednotlivé typy. [42]



Obrázek 28 Rozdělení pánevní kosti podle oblasti odstranění [42]



Obrázek 29 Topologicky optimalizované pánevní protézy podle oblasti použití [42],  
upraveno

### Design

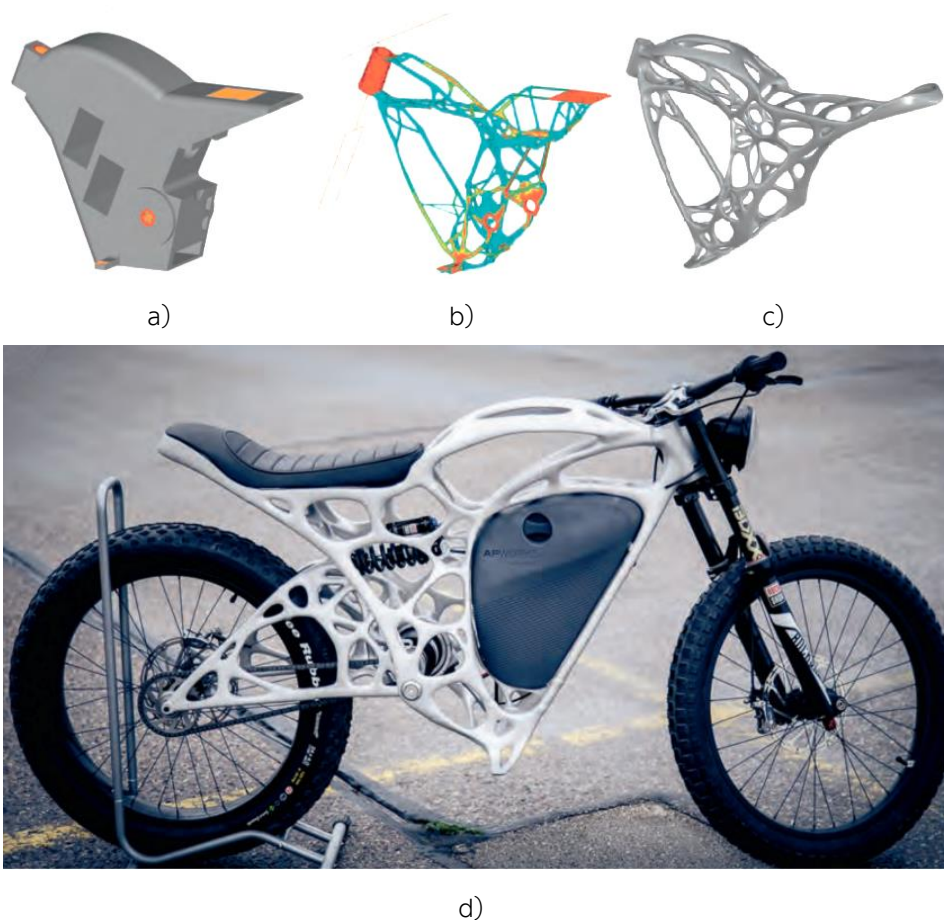
Topologická optimalizace se také často využívá pro vytvoření netypického funkčního designového návrhu. Příkladem může být budova národního kongresového centra (Qatar National Convention Centre) v katarském Dauhá. Hlavním prvkem budovy je 250 metrů dlouhá a 110 metrů široká střecha podepřená rozvětřujícími se nosníky (viz Obrázek 30). [43]



Obrázek 30 Budova národního kongresového centra v Dauhá [43]



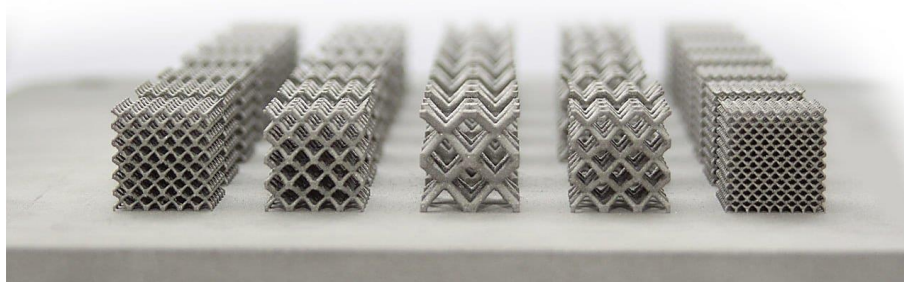
Dalším příkladem je výroba netypicky vypadajícího rámu pro elektrickou motorku. Pomocí nástroje pro topologickou optimalizaci a 3D tisku byl společností APWorks vytvořen motocykl nazvaný „Light Rider“. Na Obrázek 31 a) je zobrazen návrhový prostor rámu, b) představuje topologicky optimalizovanou strukturu, c) finální přemodelovaný design a d) znázorňuje již sestavený motocykl. Motocykl váží pouhých 35 kg, z toho 6 kg připadá na samotný rám. Díky tomu je o téměř 30 % lehčí než v případě použití klasického rámu. [44]



Obrázek 31 Motocykl s topologicky optimalizovaným rámem, a) návrhový prostor rámu, b) topologicky optimalizovaná struktura, c) finální přemodelovaný design, d) sestavený motocykl [44]

## 3.2 Optimalizace lattice

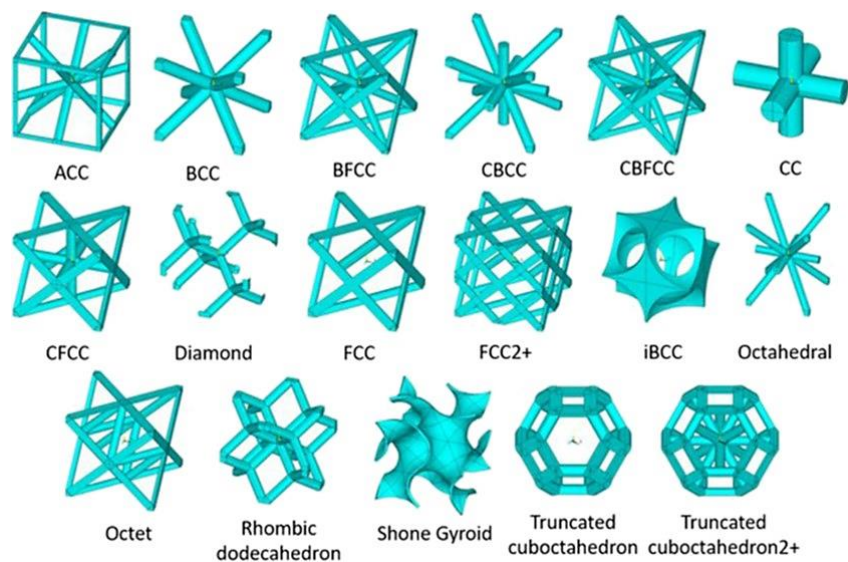
Lattice structure, neboli mřížková struktura, je definována jako struktura složená s periodicky se opakujícími buňkami. Tyto buňky jsou tvořeny vzpěrnými prvky, které se spojují ve specifických uzlech. Princip optimalizace s použitím mřížkových struktur spočívá v nahrazení daného objemu materiálu soustavou buněk. Pomocí řízení parametrů jednotlivých buněk struktury, jako velikost buněk a rozměry vzpěr lze dosáhnout různých mechanických, tepelných a elektrických vlastností. Mřížkový typ struktury poskytuje mnoho výhod. Díky možnosti snížit hmotnost konstrukce při zachování dostatečných mechanických vlastností se s tímto typem konstrukce lze setkat především v leteckém průmyslu a v lékařství. [45] Mřížkové struktury s různými velikostmi buněk jsou zobrazeny na Obrázek 32.



Obrázek 32 Mřížkové struktury s různými velikostmi buněk [46]

Vlastnosti mřížkové struktury závisí na tvaru jednotlivých buněk, jejich rozměrech, hustotě, zvoleném materiálu a použité technologii výroby. Existuje velké množství tvarů buněk, přičemž každý tvar buňky má své jedinečné vlastnosti, které mají vliv na celkové vlastnosti mřížkových struktur. Nejběžnějšími tvary buněk jsou krychle, hvězdy, šestiúhelníky nebo tvar diamantu. Je možné se setkat i se složitými tvary pro specifické použití. Příklady tvarů jednotlivých buněk jsou zobrazeny na Obrázek 33. Klíčovými faktory při navrhování mřížkových struktur je velikost buňky a hustota. Vyšší hustota buněk v dané ploše znamená menší rozměry buněk. [46]





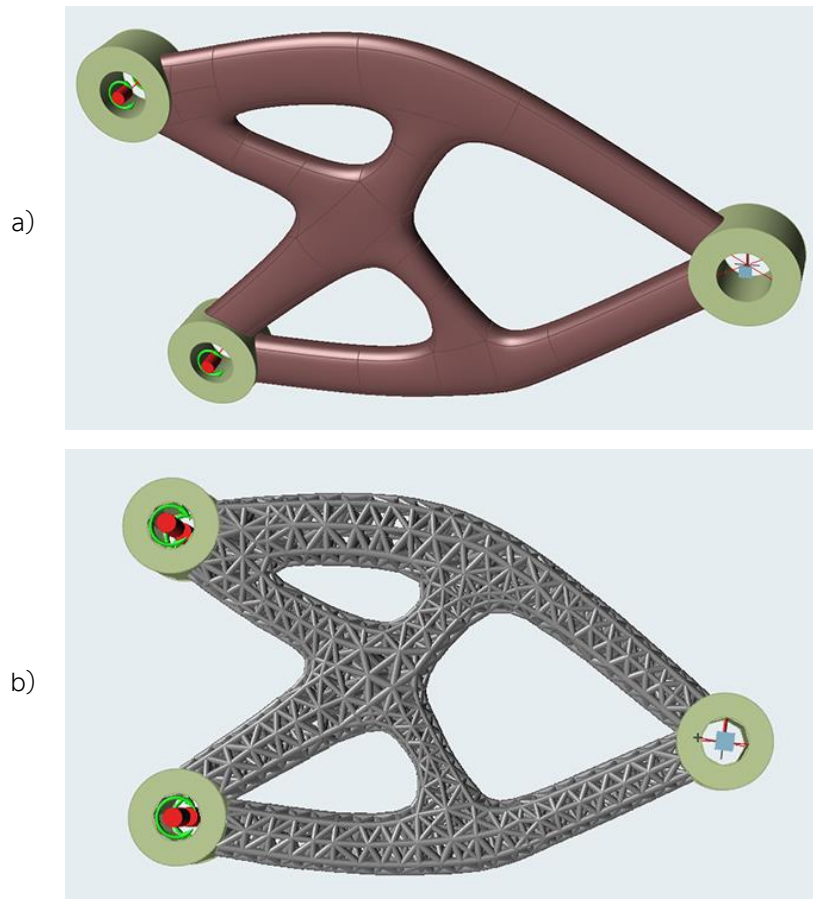
Obrázek 33 Typy buňek v mřížkových strukturách [47]

Mřížkový typ struktury je možné vyrobit dvěma způsoby. Prvním způsobem je výroba pomocí konvenčních technologií. Mezi tyto technologie patří například odlévací metoda ztraceného vosku nebo elektroerozivní obrábění. Druhým způsobem je výroba za použití aditivních technologií, ať už z polymerních nebo kovových materiálů. V případě konvenčních technologií se jedná o časově náročnou výrobu s omezenou geometrií mřížek. [48] Aditivní proces výroby se oproti tomu skládá pouze z několika kroků od modelování v počítači až po výrobu s minimálním strojním vybavením. Vytvíratelnost mřížkových struktur pomocí aditivních technologií závisí na konkrétní technologii tisku. Minimální velikost vzpěry ovlivňuje minimální velikost buňky v mřížkové struktuře. Ta přitom závisí na několika faktorech. V případě tisku technologií SLM se jedná o velikost částic kovového prášku, průměr laserového paprsku, výkon laseru a jeho skenovací rychlost. Pokud je zvolen jemnější prášek a menší průměr laserového paprsku, je možné vytvořit tenčí vzpěry. [49]

### 3.2.1 Proces optimalizace lattice

Optimalizaci lattice lze předvést na demonstračním modelu v softwaru Altair Inspire. Samotná příprava je shodná s přípravou topologické optimalizace (viz Proces topologické optimalizace). Po vložení modelu a volbě materiálu přichází na řadu definování návrhového prostoru. Následuje

umístění podpor, zatížení a definování požadovaných omezení pro optimalizaci. Jako omezení lze použít například podmínku symetrie nebo maximální hodnotu posunutí v určitém místě. V tomto případě byla použita druhá zmíněná podmínka. Model v této fázi přípravy je zobrazen na Obrázek 34 a). V pravé válcové díře je umístěna zatěžující síla a podmínka maximální možného posunutí. V levé části modelu jsou umístěny podpory. [50]

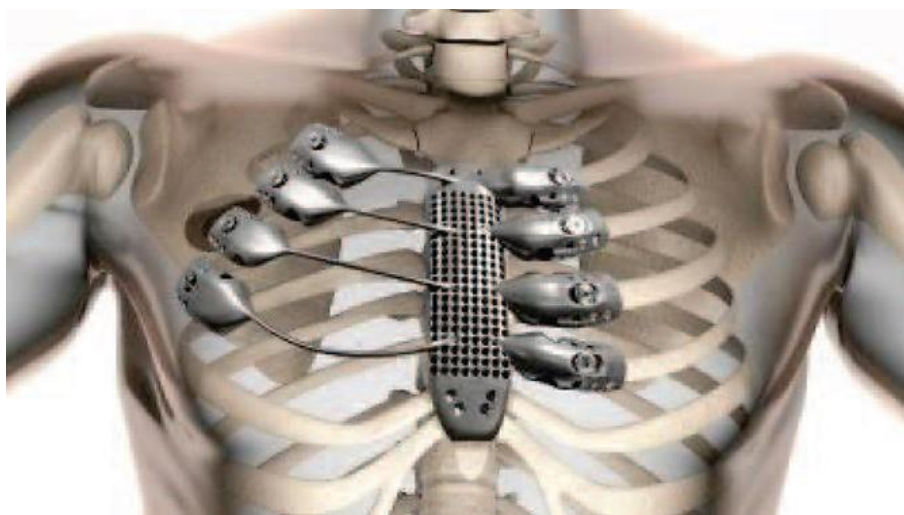


Obrázek 34 Porovnání modelu před optimalizací (a) a po optimalizaci (b) [50]

Před samotným spuštěním optimalizace je potřeba definovat cíl optimalizace (např. minimalizace hmotnosti nebo maximalizace tuhosti), rozměry buněk mřížkové struktury a procento objemu hmoty, které má být vyplněno mřížkovou strukturou (v tomto případě se jedná o 100 % objemu). Následně je možné spustit optimalizaci. Jakmile jsou výpočty dokončeny, přichází na řadu vizualizace optimalizovaného modelu, popřípadě analýza napěťových stavů. Na Obrázek 34 b) je zobrazena výsledná mřížková struktura na vzorovém modelu. [50]

### 3.2.2 Využití lattice structure

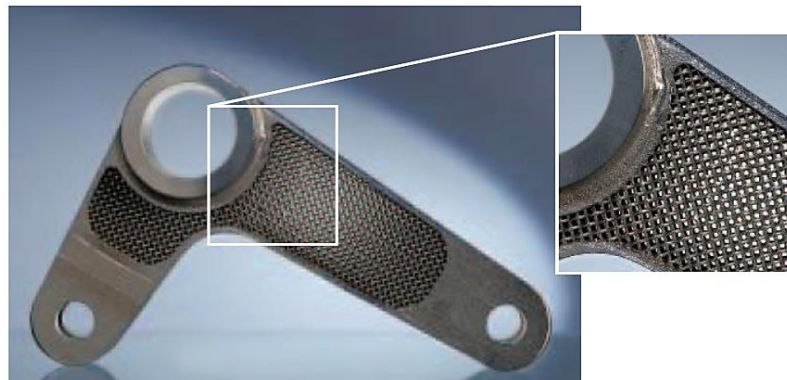
Unikátní vlastnosti mřížkových struktur poskytují nové příležitosti pro konstrukce. Díky nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a biokompatibilitě se často využívají v leteckém, kosmickém, automobilovém a biomedicínském průmyslu. Mřížkové struktury se v biomedicínském průmyslu využívají především pro výrobu implantátů, kloubních náhrad nebo pro podporu poškozených kostí. Pomocí technologie kovového 3D tisku je možné vyrobit vysoce kvalitní kovové komponenty, které lze přizpůsobit dle specifických požadavků pacienta. [45] Porézní struktura umožňuje prorůstání živých buněk napříč celou strukturou. Příkladem použití mřížkových struktur v biomedicínském průmyslu je 3D tištěný implantát hrudní kosti a žeber v těle pacienta (viz Obrázek 35). [49]



Obrázek 35 Hrudní implantát s využitím mřížkové struktury [49]

V automobilovém a leteckém průmyslu našly mřížkové struktury uplatnění zejména kvůli nízké hmotnosti. Snižování hmotnosti komponent letadel a automobilů přímo vede ke snižování spotřeby paliva a ke zvýšení výkonu. Jednou z praktických ukázek je 3D tištěná část vrtulníku z oceli 316L zobrazena na Obrázek 36. Použití mřížkové struktury vedlo ke snížení hmotnosti o 50 % oproti původnímu dílu. Kromě snížení hmotnosti dílu je také dosaženo lepšího přenosu tepla. Například společnost FIT West Corp. vytvořila 3D tištěnou hlavu válců za použití mřížkových struktur (viz Obrázek 37), čímž

bylo dosaženo snížení hmotnosti o 66 % a zároveň navýšení celkové povrchové plochy dílu, což vede ke zvýšení chladicí účinnosti. [49]



Obrázek 36 3D tištěná komponenta z vrtulníku za použití mřížkových struktur [49]



Obrázek 37 3D tištěná hlava válce za použití mřížkových struktur [49]

Své využití našly mřížkové struktury také ve sportovním oblečení a pomůckách. Například firmy New Balance a Adidas integrovaly strukturu přímo do bot. Díky tomu vykazují pružnou a zároveň pevnou strukturu ideální pro běhání. [46]

### 3.3 Topografická optimalizace

Topografická optimalizace je pokročilou formou optimalizace tvaru, při které dochází ke zvýšení tuhosti konstrukce, zatímco tloušťka stěny zůstává konstantní. Funguje obdobně jako topologická optimalizace s tím rozdílem, že využívá jako proměnnou tvar namísto hustoty. Princip optimalizace spočívá v rozdělení návrhového prostoru do velkého počtu tvarových

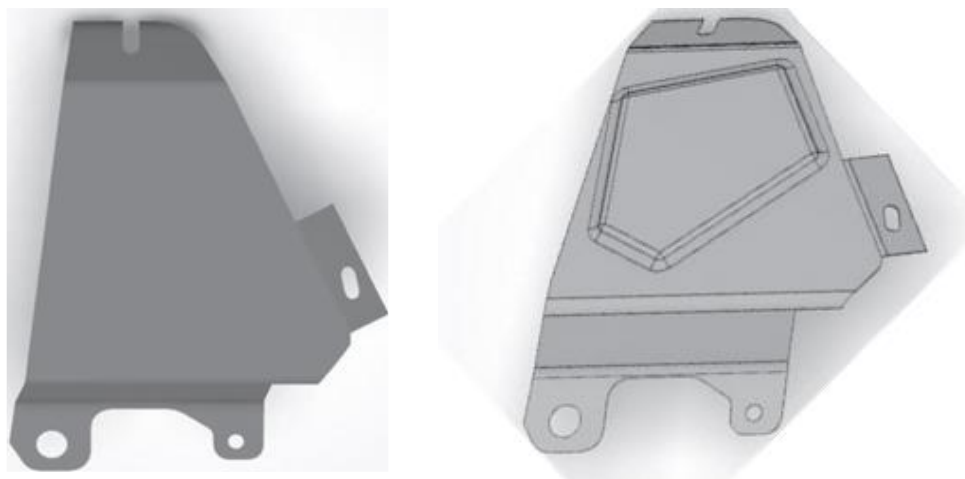
proměnných, což umožňuje vytvoření jakéhokoliv vzoru v oblasti. Následně dochází k určení vlivu jednotlivých proměnných na strukturu, k jejich optimalizaci a k vygenerování vzorů výztuh. [36]

### **3.3.1 Proces topografické optimalizace**

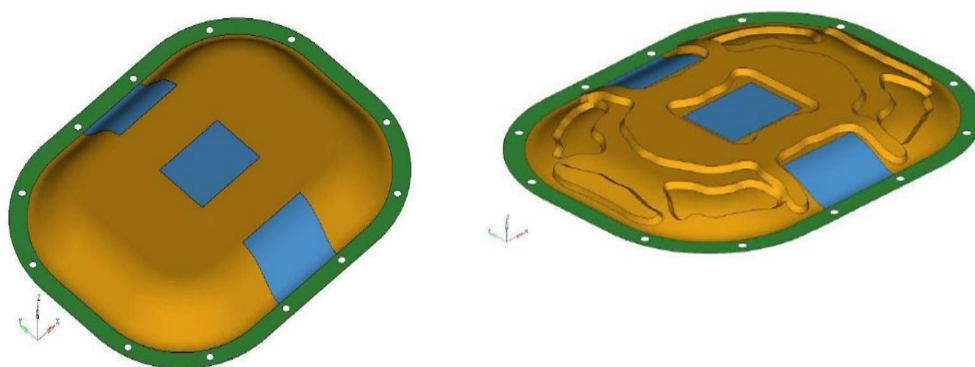
Proces topografické optimalizace je v mnohém shodný s procesem topologické a lattice optimalizace (viz Proces topologické optimalizace). Prvním krokem před samotnou optimalizací je definování návrhového prostoru. Stejně jako u předchozích typů strukturálních optimalizací, i zde se jedná o prostor, který chceme nějakým způsobem optimalizovat. Po definování návrhového prostoru přichází na řadu volba cíle optimalizace a charakterizování okrajových podmínek, jako minimální šířka vzoru, úhel přechodu vzoru, minimální hloubku vzoru nebo podmínku maximalizace, popřípadě minimalizace frekvencí. Výsledek topografické optimalizace představuje pouze návrh řešení, konečný vzor závisí na konstruktérovi. Při volbě tvarů, rozměrů a rozmístění jednotlivých vzorů je potřeba brát ohled na následnou vyrobitelnost zvolenou technologickou metodou.

### **3.3.2 Využití topografické optimalizace**

S topografickou optimalizací se lze setkat u skořepinových a tenkostěnných konstrukcí. Příkladem topografické optimalizace může být také tepelný štít z diesellového motoru. Požadavkem optimalizace bylo zvýšení tuhosti a hodnot vlastní frekvence. Na Obrázek 38 je zobrazen tepelný štít před a po topografické optimalizaci. [51] Dalším příkladem je topografická optimalizace olejové vany (viz Obrázek 39), jejíž účelem bylo zvýšení vlastní frekvence. Vlevo se nachází součást před optimalizací, vpravo po optimalizaci. [36]



Obrázek 38 Tepelný štít motoru před topografickou optimalizací (vlevo) a po topografické optimalizaci (vpravo) [51]



Obrázek 39 Olejová vana před topografickou optimalizací (vlevo) a po topografické optimalizaci (vpravo) [36]

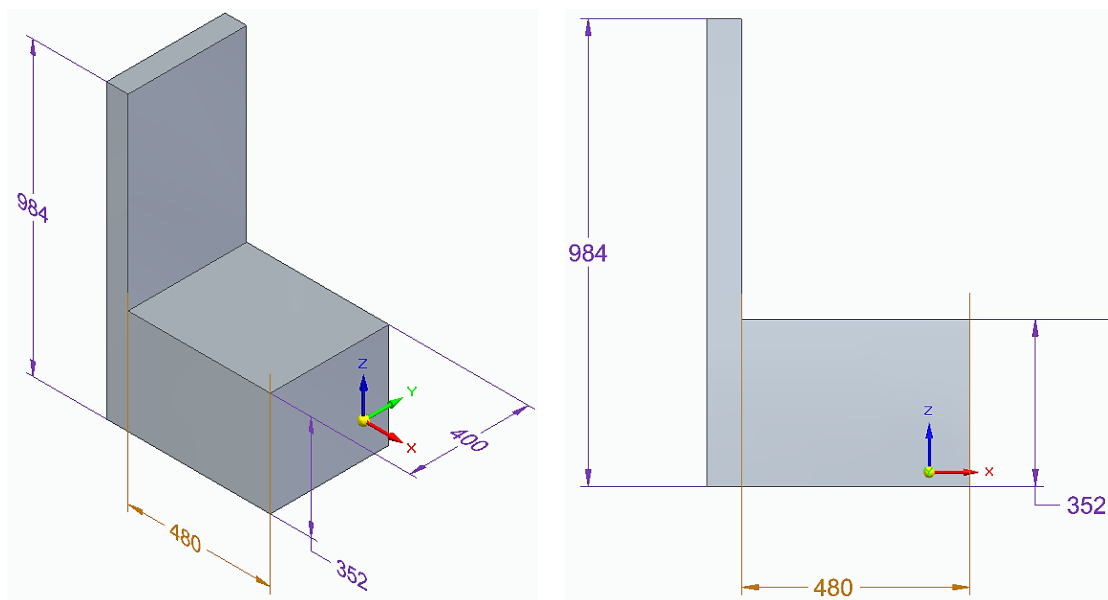


## 4 Aplikace topologické optimalizace

Cílem diplomové práce bylo pochopení topologické optimalizace jak z hlediska postupu a přípravy, tak i z hlediska principu fungování optimalizace. Dále aplikace znalostí při realizaci topologické optimalizace na zvoleném modelu v softwaru Altair Inspire 2021 a jeho následná výroba. Pro demonstraci topologické optimalizace byl zvolen předmět, který se využívá denně po celém světě, konkrétně židle. Cílem topologické optimalizace tohoto předmětu bylo poukázat na designové možnosti využití procesu optimalizace a zároveň vytvoření funkčního produktu.

### 4.1 Návrh modelu

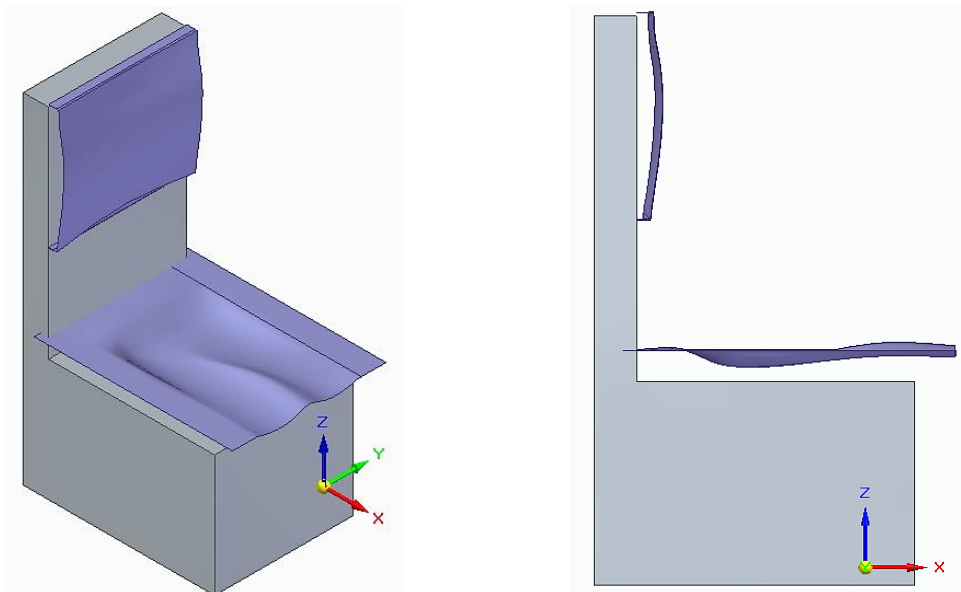
Návrh modelu probíhal v softwaru SolidEdge 2022. Při tvorbě modelu bylo vycházeno z rozměrů klasické židle. V průběhu modelování i samotné topologické optimalizace byly rozměry průběžně upravovány tak, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. Rozměry holého modelu (bez tvarových částí) jsou uvedeny na Obrázek 40.



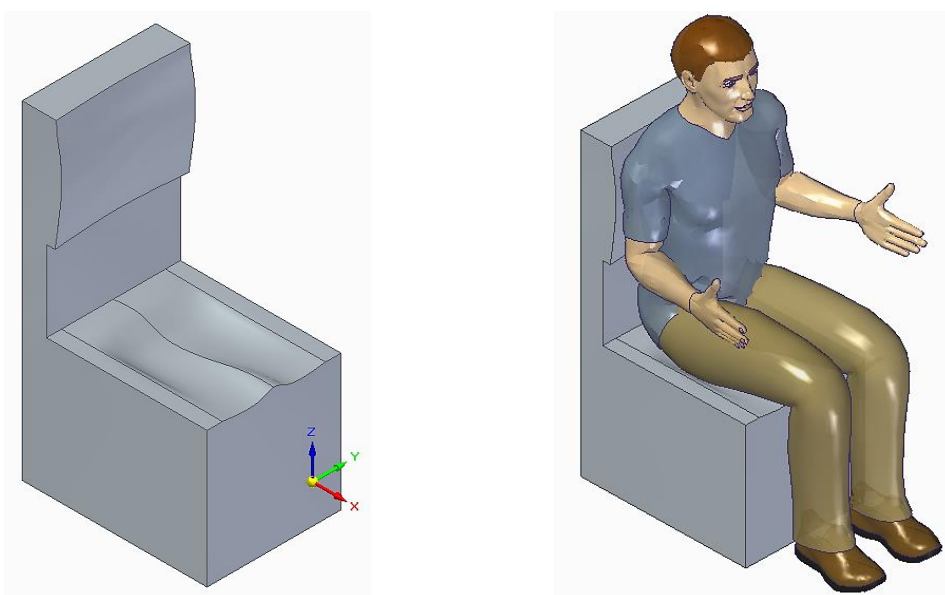
Obrázek 40 Rozměry původního modelu

V dalším kroku byla snaha vytvořit ergonomicky tvarovanou opěrnou a sedací část modelu. K tomu posloužil model člověka, vygenerovaný v Siemens Jack, o výšce 180 cm a hmotnosti 80 kg. Pro vytvoření tvarových ploch

bylo nejprve potřeba vytvořit několik 2D skic, které svým tvarem kopírují tělo v sedě. Vytvořené skici byly následně spojeny do tvarové plochy pomocí funkce „BlueSurf“, čímž vzniknul objekt zobrazený na Obrázek 41. V dalším kroku bylo potřeba vytvořit objem, který by svým tvarem kopíroval tvar ploch. K tomu posloužila funkce „Nahradit plochu“. Na Obrázek 42 je zobrazen vzniklý model včetně usazeného modelu člověka. Tímto krokem končí fáze návrhu modelu. Následuje import souboru do softwaru pro topologickou optimalizaci.



Obrázek 41 Tvorba tvarových ploch pro lepší ergonomii



Obrázek 42 Finální podoba modelu před TO



## 4.2 Příprava topologické optimalizace

Po nahrání modelu do softwaru by měla vždy proběhnout kontrola, zda se nevyskytují na modelu některé problémy, např. neuzavřené plochy. Tento problém se objevil při nahrávání modelu ve formátu STL. Problém nejspíše vzniknul již během ukládání souboru jako STL a ne při samotném importu. Z tohoto důvodu byl model naimportován ve formátu IGES. Dalším krokem je volba materiálu. Tento krok je pro topologickou optimalizaci klíčový, jelikož mechanické vlastnosti materiálu figurují jako jedna z omezujících podmínek. Z knihovny materiálů zobrazené na Obrázek 43 byl vybrán termoplast ABS, především kvůli dostačujícím mechanickým vlastnostem (viz Tabulka 3) a odolností proti opotřebení.

Parts	Material Library	My Materials			
Material	E	Density	Yield Stress		
Magnesium Alloy	44.000E+03 MPa	1.920E-6 kg/mm3	20.000E+00 MPa		
Iron (Alloy Cast)	155.000E+03 MPa	7.190E-6 kg/mm3	160.000E+00 MPa		
Steel (High Carbon)	200.000E+03 MPa	7.870E-6 kg/mm3	375.000E+00 MPa		
Steel (Medium Carbon)	200.000E+03 MPa	7.850E-6 kg/mm3	350.000E+00 MPa		
Steel (Low Carbon)	200.000E+03 MPa	7.860E-6 kg/mm3	285.000E+00 MPa		
Steel (S235JR)	210.000E+03 MPa	7.850E-6 kg/mm3	235.000E+00 MPa		
Steel (S275JR)	210.000E+03 MPa	7.850E-6 kg/mm3	275.000E+00 MPa		
Steel (S355JR)	210.000E+03 MPa	7.850E-6 kg/mm3	355.000E+00 MPa		
Steel (C45E)	210.000E+03 MPa	7.700E-6 kg/mm3	490.000E+00 MPa		
Steel (25CrMo4)	210.000E+03 MPa	7.750E-6 kg/mm3	700.000E+00 MPa		
Steel (X5CrNi18-10)	200.000E+03 MPa	7.900E-6 kg/mm3	190.000E+00 MPa		
Steel (EN-GJL-200)	100.000E+03 MPa	7.150E-6 kg/mm3	150.000E+00 MPa		
Steel (EN-GJS-400-18)	169.000E+03 MPa	7.100E-6 kg/mm3	250.000E+00 MPa		
Plastic (ABS)	2.000E+3 MPa	1.060E-6 kg/mm3	45.000E+00 MPa		
Plastic (Nylon)	2.910E+3 MPa	1.230E-6 kg/mm3	75.000E+00 MPa		

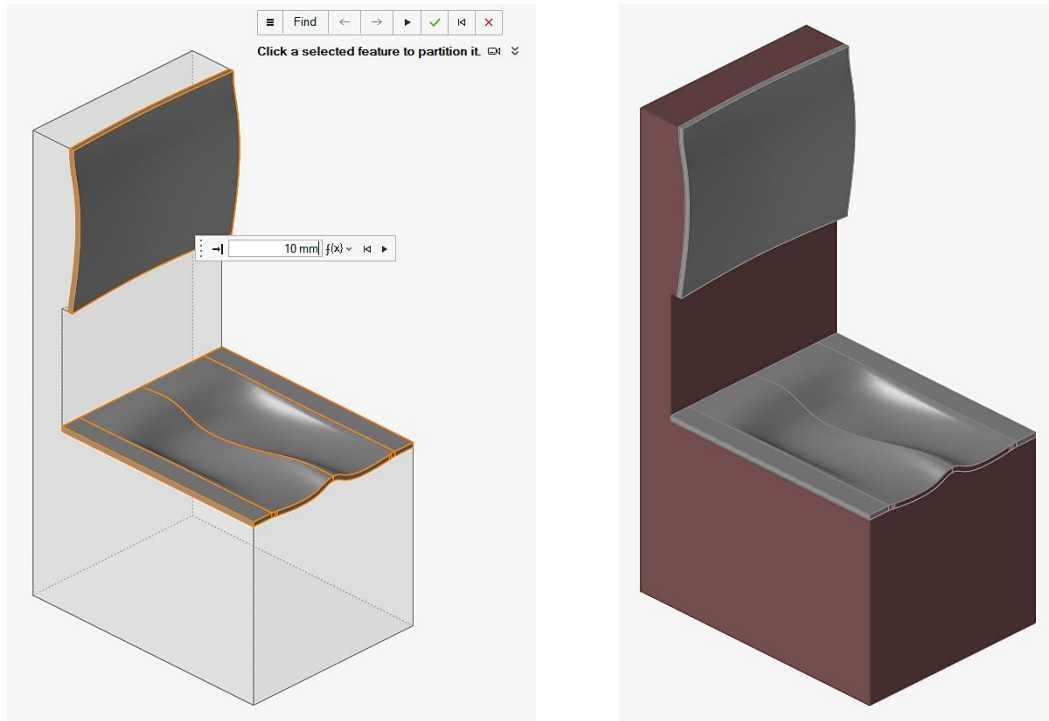
Obrázek 43 Knihovna materiálů

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti materiálu ABS uváděné v softwaru Altair Inspire

Modul pružnosti v tahu	Hustota	Napětí na mezi kluzu
2000 MPa	1060 kg/m3	45 MPa

Jakmile je definován materiál, přichází na řadu definování návrhového prostoru. K tomu byla využita funkce „Partition“. Pomocí této funkce lze snadno oddělit díry a různé tvarové plochy od zbytku součásti a zároveň umožňuje zachovat tvar prvku. V tomto případě byla funkce „Partition“ využita pro oddělení opěrné a sedací plochy (viz Obrázek 44 vlevo). Nejprve byly

obě plochy vybrány a následně byla zvolena požadovaná tloušťka nově vzniklých prvků (v obou případech 10 mm). Veškerý zbylý materiál byl definován jako návrhový prostor (viz Obrázek 44 vpravo).



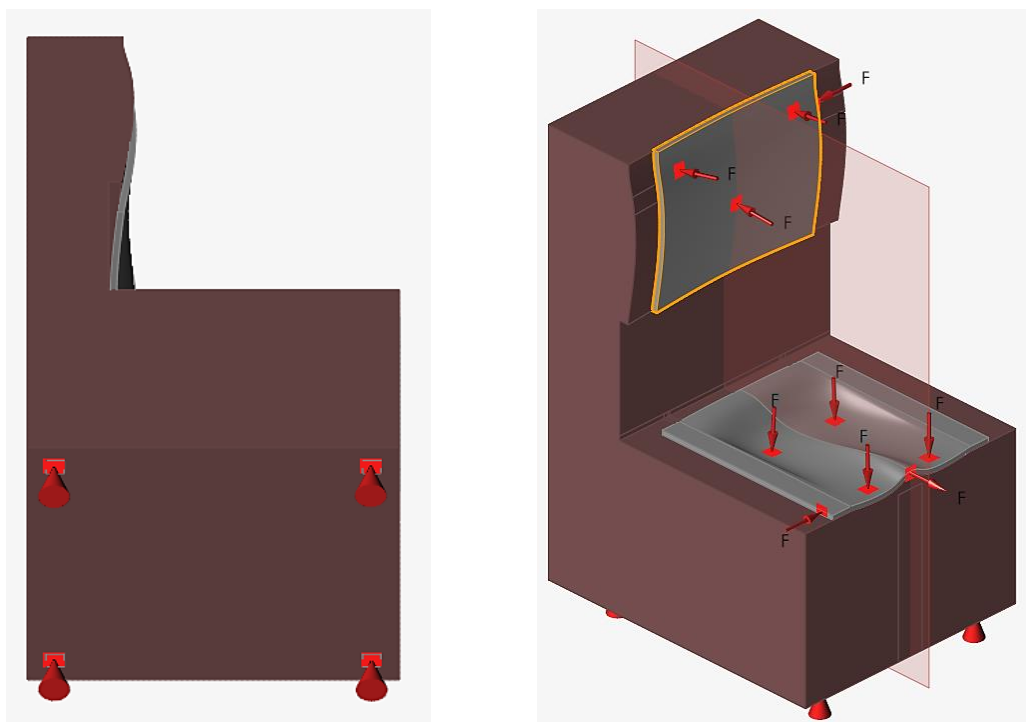
Obrázek 44 Využití funkce „Partition“ (vlevo), definování návrhového prostoru (vpravo)

V dalším kroku došlo ke zvětšení návrhového prostoru pomocí funkce „Push“. Díky tomu lze dosáhnout stejných, v některých případech i lepších mechanických vlastností, než kdyby probíhala optimalizace pouze v rámci původního designu. Zadní (opírací) stěna byla zvětšena o 80 mm, boční stěny o 50 mm. Dále byla pomocí funkce „Cut“ byla oddělena a odstraněna zadní část podsedáku, která by nebyla nějak využita, pouze by navyšovala hmotnost konstrukce. V Tabulka 4 je uvedeno porovnání hmotnosti návrhového prostoru a zbylých částí.

Tabulka 4 Porovnání hmotností návrhového prostoru a zbylých částí

<b>Návrhový prostor (design space)</b>	<b>Zbylé části (non-design space)</b>
202,73 kg (98,36 % celkové hmotnosti)	3,37kg

V neposlední řadě je potřeba definovat podpory a zatížení, popřípadě další omezující podmínky. Podpory byly umístěny na čtyři kvádřovité útvary o rozměrech 30x30x10 mm vytvořené ve spodní části modelu tak, aby byla zajištěna stabilita konstrukce (Obrázek 45 vlevo). Útvary byly vytvořeny pomocí funkcí „Push“ a „Partition“. Zatížení bylo nejprve nastaveno na 1600 N na sedací části (jedná se o váhu 80 kg s koeficientem bezpečnosti 2) a 800 N na opěrné části. Při tomto zatížení nicméně program hlásil chybu a topologická optimalizace byla přerušena. Dané zatížení proto bylo navyšováno do té doby, dokud nebylo možné optimalizaci spustit bez problémů. Finální navolené zatížení na sedací části činí 3200 N (rozložené na čtyři shodně velké zatížení) a 1500 N na opěrce (rozložené na tři shodná zatížení). Dále byly přidány síly působící do boku opěrky o velikosti 500 N a podsedáku o velikosti 2x1000 N. Tyto síly byly zavedeny z důvodu zvýšení stability konstrukce. V posledním kroku před nastavením parametrů topologické optimalizace byla přidána podmínka symetrie podle definované roviny zobrazené v pravé části Obrázek 45 (jeví se jako světle červená rovina procházející středem modelu).



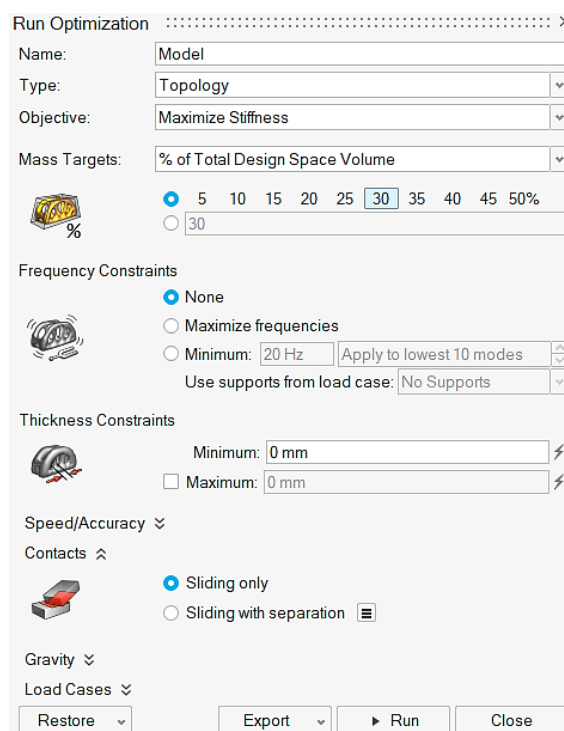
Obrázek 45 Umístění podpěr (vlevo), model připravený na TO (vpravo)

Vzhledem k tomu, že se jedná o navržený model pro demonstraci topologické optimalizace, který v této podobě nepředstavuje fyzickou součást, nebyla provedena počáteční analýza součásti. Výsledky této analýzy by nebyly porovnatelné s výsledky analýzy optimalizované součásti.

### 4.3 Provedení topologické optimalizace

Jak již bylo zmíněno, topologická optimalizace je proces, který slouží k optimalizaci rozložení materiálu v rámci předem definovaného prostoru s ohledem na zvolené podmínky a omezení. V rámci diplomové práce byla provedena demonstrace možností topologické optimalizace s ohledem na design a funkčnost předmětu.

Jakmile je model připraven pro topologickou optimalizaci (viz předchozí kapitola) je možné přejít k finálnímu nastavení. Na Obrázek 46 je zobrazeno okno, ve kterém je možné nastavit celou řadu parametrů pro optimalizaci. Jako první možnost se zde nabízí typ optimalizace. Dále cíl optimalizace, cílové procento objemu materiálu návrhového prostoru (případně hmotnost), požadované zatížení a další omezení, např. tloušťka prvků, frekvenční omezení nebo gravitace.



Obrázek 46 Nastavení topologické optimalizace

Vzhledem k minimálním počátečním znalostem procesu topologické optimalizace byla provedena celá řada optimalizací. S každou další optimalizací došlo k posílení znalostí, což vedlo k úpravě vstupních parametrů pro optimalizaci. V práci jsou uvedeny tři finální optimalizace, jejichž výsledky byly v průběhu práce využity. Nastavení pro jednotlivé optimalizace jsou uvedena v Tabulka 5.

Tabulka 5 Nastavení topologické optimalizace

Pořadové č. optimalizace	1	2	3
Cíl optimalizace	Maximalizace tuhosti	Minimalizace hmotnosti	Maximalizace tuhosti
Cílový objem (hmotnost)	10 % objemu návrhového prostoru	-	Minimální hmotnost z předchozí optimalizace
Tloušťka prvků	Min. 30 mm Max. 60 mm		

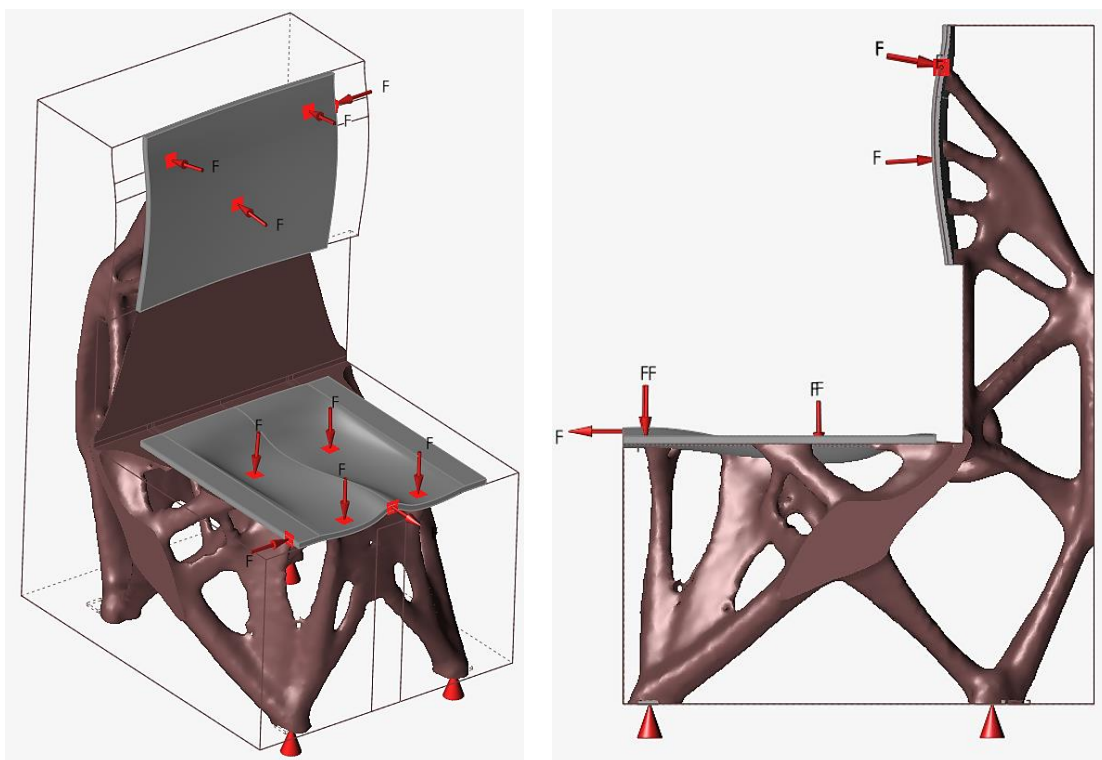
Nejdůležitější optimalizace z hlediska využitelnosti výsledků pro finální model je optimalizace pro maximalizaci tuhosti s omezující podmínkou hmotnosti. Ta je získána z předchozí optimalizace cílící na minimalizaci hmotnosti. V rámci těchto optimalizací byly provedeny také analýzy, aby následně mohly být porovnány s přemodelovaným modelem. Sledované charakteristiky jsou uvedeny v Tabulka 6.

Tabulka 6 Sledované charakteristiky konstrukce [52]

Sledované charakteristiky	Význam
Displacement (posunutí)	Vyjadřuje posunutí bodů struktury oproti nezatíženému stavu. Tato charakteristika je důležitá z hlediska znalosti deformačního chování struktury. Lze snadno indikovat jakékoliv nesprávné chování.
Napětí von Mises	Jedná se o kritérium využívané pro posouzení strukturální výkonosti tvárných materiálů. Pokud napětí von Mises dosáhne meze kluzu, dochází k deformaci materiálu.

Jako první optimalizace (s pořadovým číslem 1) byla provedena optimalizace za účelem maximalizace tuhosti s cílovým objemem 10 % návrhového prostoru. Minimální tloušťka prvků uváděná softwarem byla 21 mm, nicméně při této tloušťce došlo při optimalizaci k chybě a byla přerušena. Z tohoto důvodu byla nastavena na 30 mm. Cílem bylo dosáhnout co nejmenších prvků. Maximální velikost prvků musí být minimálně dvojnásobná oproti minimálnímu rozměru.

Tato optimalizace byla provedena za účelem zjištění, ve kterých místech dochází ke kumulaci materiálu, a naopak ve kterých místech není materiál potřeba. Výsledek optimalizace, který je zobrazen na Obrázek 47, byl zohledněn při tvorbě finálních modelů.



Obrázek 47 Topologická optimalizace s cílem maximalizace tuhosti při 10 % návrhového prostoru

### 4.3.1 Minimalizace hmotnosti

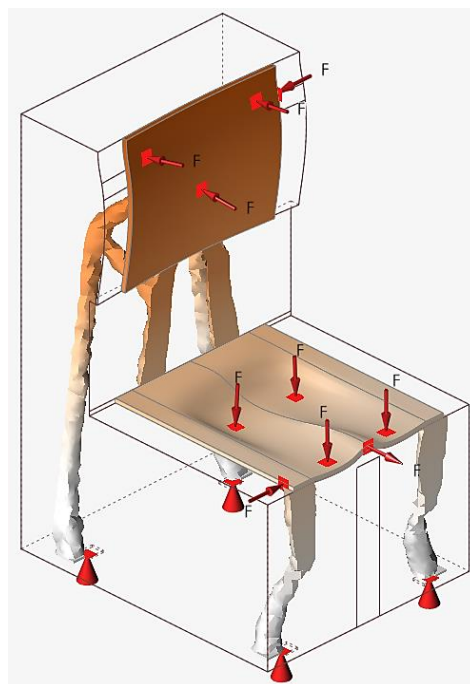
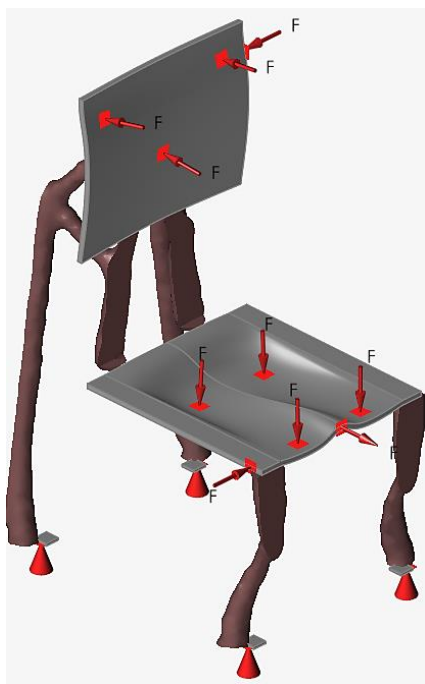
Jedním ze dvou hlavních cílů topologické optimalizace je minimalizace hmotnosti. Tato optimalizace (s pořadovým číslem 2) poskytla minimální možnou hmotnost, která ještě unese aplikovaná zatížení. Výsledná hmotnost byla dále využita jako cílová hmotnost při maximalizaci tuhosti. Nastavení optimalizace je uvedeno v Tabulka 5. Po dokončení optimalizačních výpočtů byla provedena analýza součásti a byly zaznamenány jednotlivé sledované charakteristiky. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 7.

Tabulka 7 Výsledné hodnoty z topologické optimalizace s cílem minimalizace hmotnosti

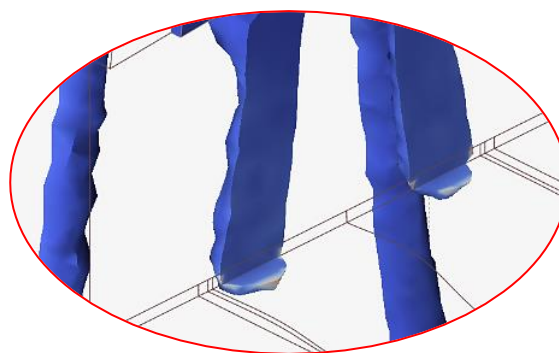
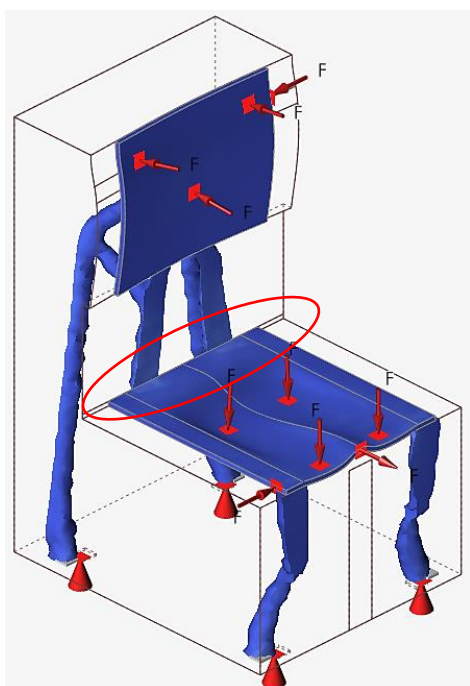
Cíl TO	Hmotnost	Posunutí	Napětí von Mises
Minimalizace hmotnosti	7,26 kg	99,97 mm	37,24 MPa

Vizuální zobrazení výsledné konstrukce je zobrazeno na Obrázek 48 vlevo. Jak je z obrázku patrné, výsledná konstrukce se skládá z velmi malého množství nosných a spojovacích prvků. Nevyhovující je řešení spojení mezi sedací a opěrnou částí. Hmotnost zobrazené konstrukce činí 7,26 kg, a to včetně částí, které nebyly zahrnuty do návrhového prostoru.

První sledovanou charakteristikou v rámci analýzy je posunutí (displacement). Posunutí jednotlivých částí konstrukce je zobrazeno v pravé části Obrázek 48. Změna barvy zde charakterizuje změnu hodnot posunutí. Čím tmavší barva, tím větší posunutí. Z obrázku je patrné, že největší posunutí se nachází v horní části opěrné desky objektu, kde dosahuje hodnot 99,97 mm. Naopak s minimálním posunutím se potýká sedací část. Druhou sledovanou charakteristikou je napětí von Mises, jehož rozložení v rámci konstrukce je zobrazeno na levé části Obrázek 49. Maximální napětí dosahuje hodnot 37,24 MPa, což je hodnota blízká napětí na mezi kluzu pro materiál ABS ( $\sigma_e = 45$  MPa, viz Tabulka 3). Detail s maximálním napětím je zobrazen v pravé části Obrázek 49. Nachází se v místě, kde je podepřena sedací deska zadními nosnými prvky.



Obrázek 48 Vizualní zobrazení optimalizace s cílem minimalizace hmotnosti (vlevo), posunutí v rámci konstrukce (vpravo)



Obrázek 49 Rozložení napětí von Mises v rámci konstrukce při minimalizace hmotnosti (vlevo), místo s maximální hodnotou napětí (vpravo)



### 4.3.2 Maximalizace tuhosti

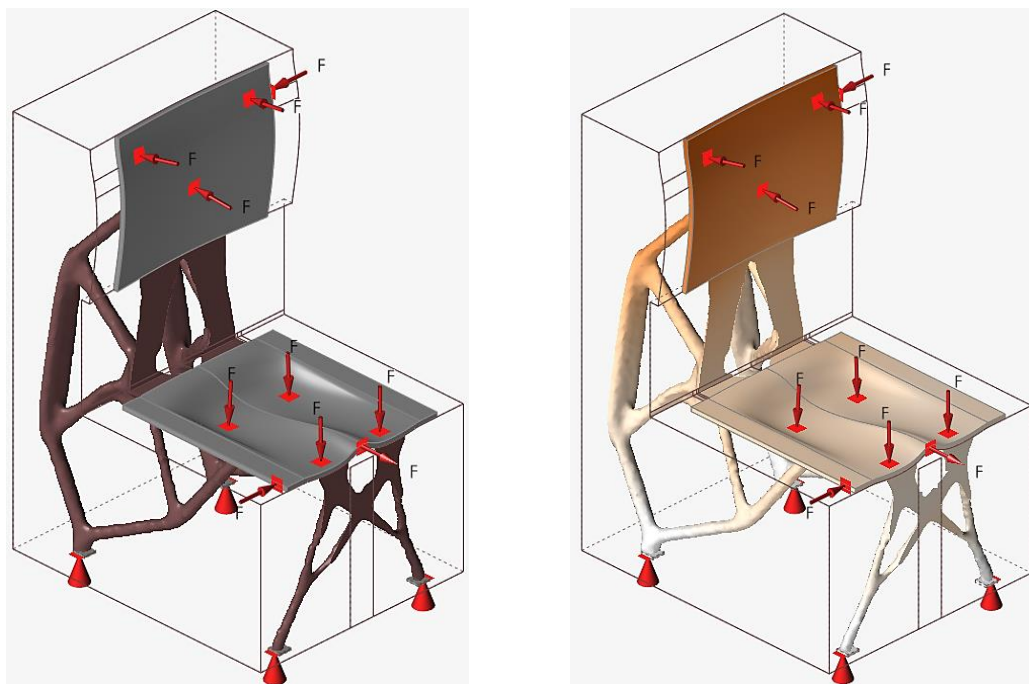
Jako poslední byla provedena optimalizace s cílem maximalizace tuhosti konstrukce. Optimalizace s tímto cílem (pořadové číslo 3) poskytla takové rozložení hmoty v návrhovém prostoru, které při zadaných podmínkách vykazuje nejmenší posunutí. Nastavení pro tuto optimalizaci je uvedeno v Tabulka 5. Jako cílová hmotnost byla zadána hmotnost konstrukce z předchozí optimalizace pro minimalizaci hmotnosti, konkrétně 7,26 kg. V Tabulka 8 jsou uvedeny hodnoty sledovaných charakteristik.

Tabulka 8 Výsledné hodnoty z topologické optimalizace s cílem maximalizace tuhosti

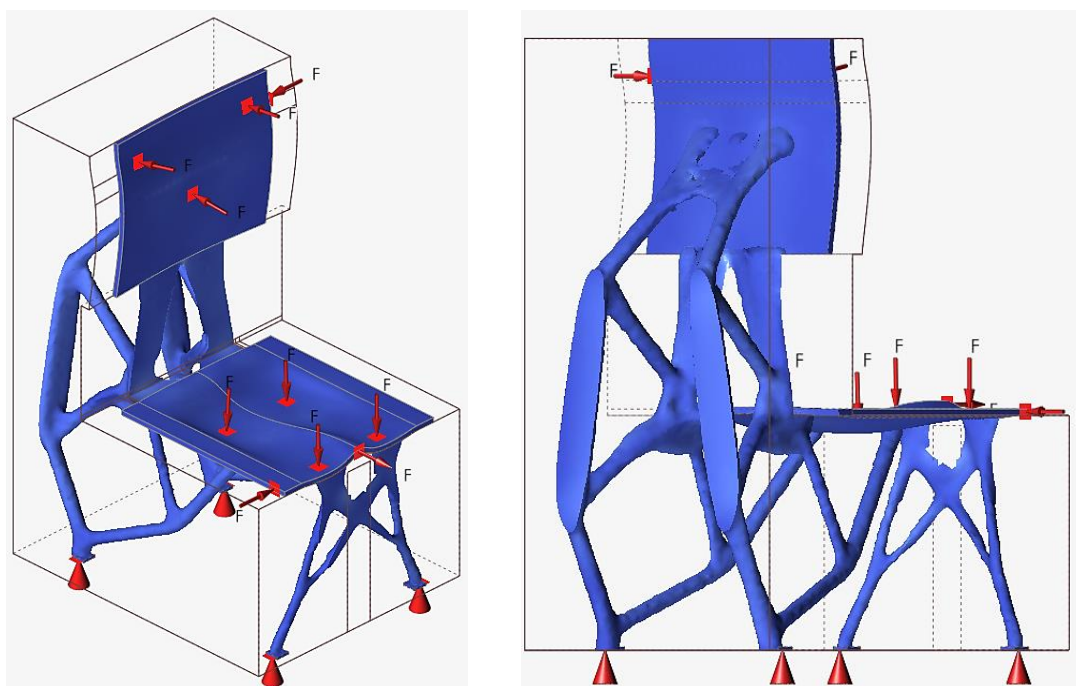
Cíl TO	Hmotnost	Posunutí	Napětí von Mises
Maximalizace tuhosti	7,49 kg	7,750 mm	9,749 MPa

V levé části Obrázek 50 je zobrazena výsledná optimalizovaná konstrukce. Oproti předchozí optimalizaci se zde vyskytuje větší množství nosných a spojovacích prvků s menší tloušťkou, díky čemuž došlo ke zlepšení mechanických vlastností. Jak je z tabulky patrné, oproti předchozí optimalizaci došlo pouze k nepatrnému navýšení hmotnosti konstrukce. Oproti tomu klesla maximální hodnota posunutí na 7,750 mm, což je více než desetkrát méně. V pravé části Obrázek 50 je zobrazeno posunutí pro jednotlivé části objektu. Maximální hodnota se opět nachází v horní části opěrné desky. Zlepšení mechanických vlastností je možné pozorovat i na snížení napětí von Mises, jehož maximální hodnota klesla na 9,749 MPa. Rozložení napětí v rámci konstrukce je zobrazeno na Obrázek 51. Místa s maximálními hodnotami napětí se nachází pod opěrnou deskou a v zadní části sedací desky (v místě podepření).

Vzhledem k vyhovujícím mechanickým vlastnostem optimalizované konstrukce byl výsledek této optimalizace vybrán jako vzor pro následné přemodelování a vytvoření finálního objektu.



Obrázek 50 Výsledná optimalizovaná konstrukce s cílem maximalizace tuhosti (vlevo), posunutí v rámci konstrukce (vpravo)

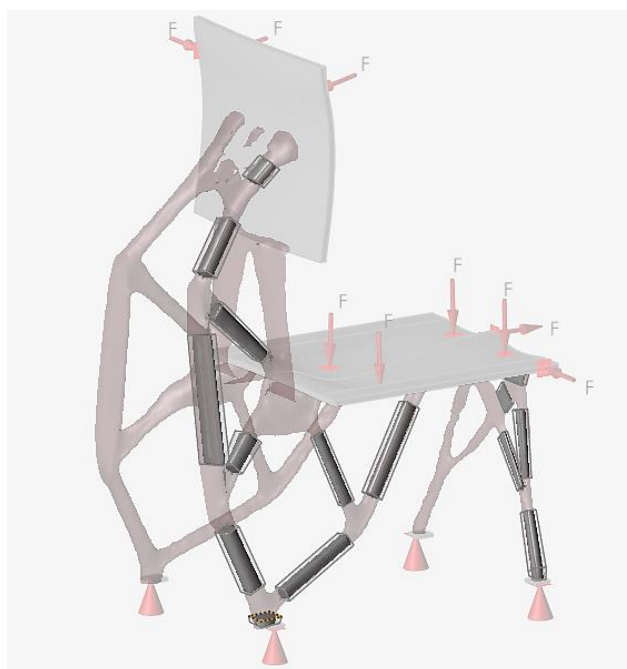


Obrázek 51 Rozložení napětí von Mises v rámci konstrukce při maximalizaci tuhosti

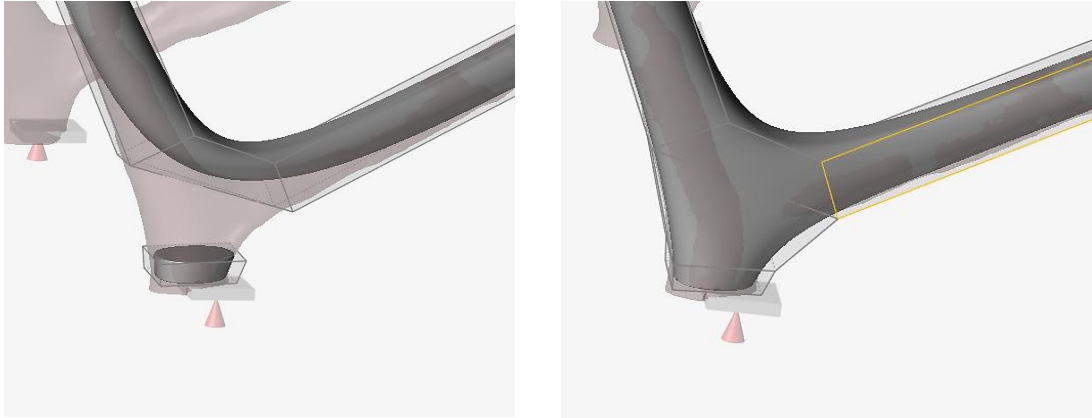
## 4.4 Přemodelování demonstrátoru

Poslední fází procesu topologické optimalizace je přemodelování demonstrátoru a tvorba finálního objektu. Objekt je následně podroben analýze a výsledné hodnoty jsou porovnány s ostatními. Pokud jsou výsledky vyhovující, je možné přejít k výrobě objektu. V případě nevyhovujících výsledků je potřeba objekt upravit, popřípadě změnit nastavení topologické optimalizace.

Jako vzor byl použit výsledný objekt optimalizace pro maximalizaci tuhosti s minimální cílovou hmotností. Pro přemodelování byly využity funkce v sekci „PolyNURBS“ přímo v softwaru Altair Inspire. Pomocí funkce „Wrap“ byly vytvořeny rovné prvky s vyhlazeným povrchem, které částečně kopírují původní optimalizovanou strukturu (viz Obrázek 52). Jedná se o NURBS povrch obklopený polymeshovou klecí, kterou je možné dle potřeby různě natáčet, popřípadě měnit její rozměry. Následně byly jednotlivé prvky spojeny dohromady pomocí funkce „Bridge“. Příklad spojení je zobrazen na Obrázek 53. Tímto způsobem byla vytvořena celá jedna strana konstrukce, druhá strana vznikla využitím funkce „Mirror Bodies“, pomocí které byla vytvořena zrcadlová kopie konstrukce.

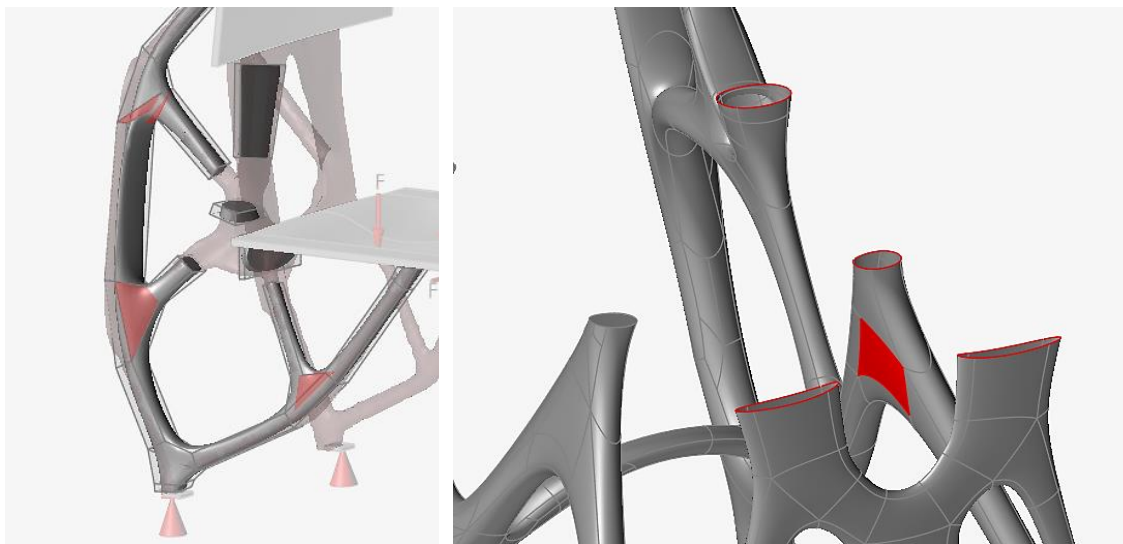


Obrázek 52 Využití funkce „Wrap“



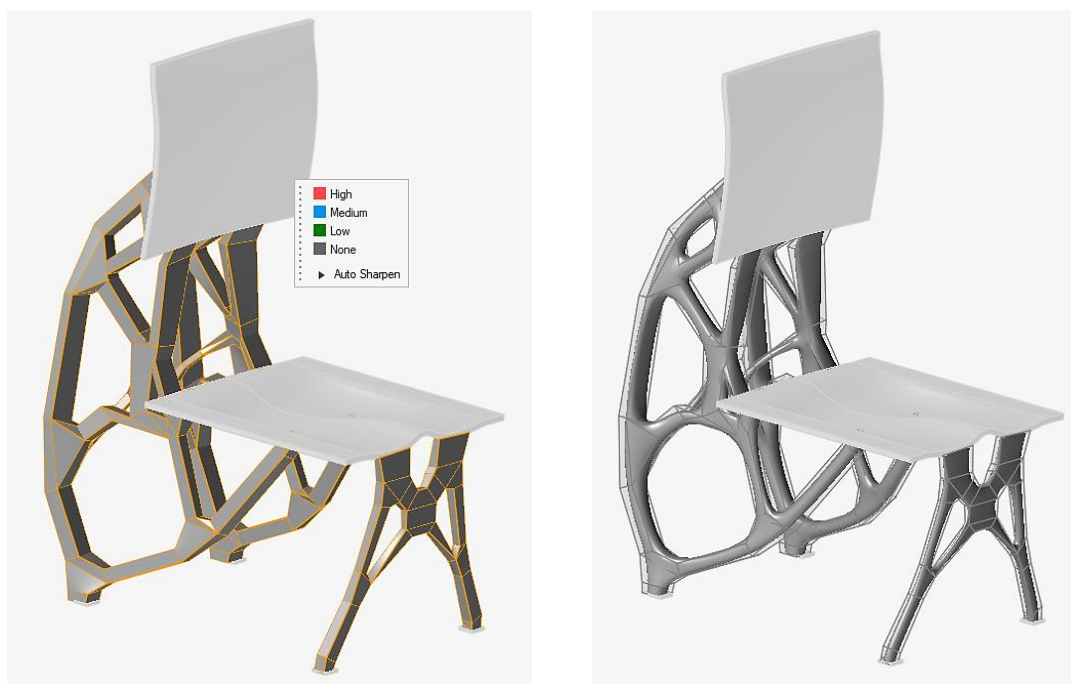
Obrázek 53 Využití funkce „Bridge“

Při tvorbě finálního modelu vznikla řada problémů. Prvním problémem je zobrazen v levé části Obrázek 54. Jedná se o problém vzniklý nevhodným napojením jednotlivých prvků. Druhý problém, zobrazený v pravé části Obrázek 54, se týká neuzavřených stykových ploch s opěrnou a sedací deskou. K opravě vzniklých problémů byla využita funkce „Repair“, která po kliknutí na daný problém automaticky provede úpravy NURBS povrchu. V některých případech musela být provedena manuální úprava prvků.



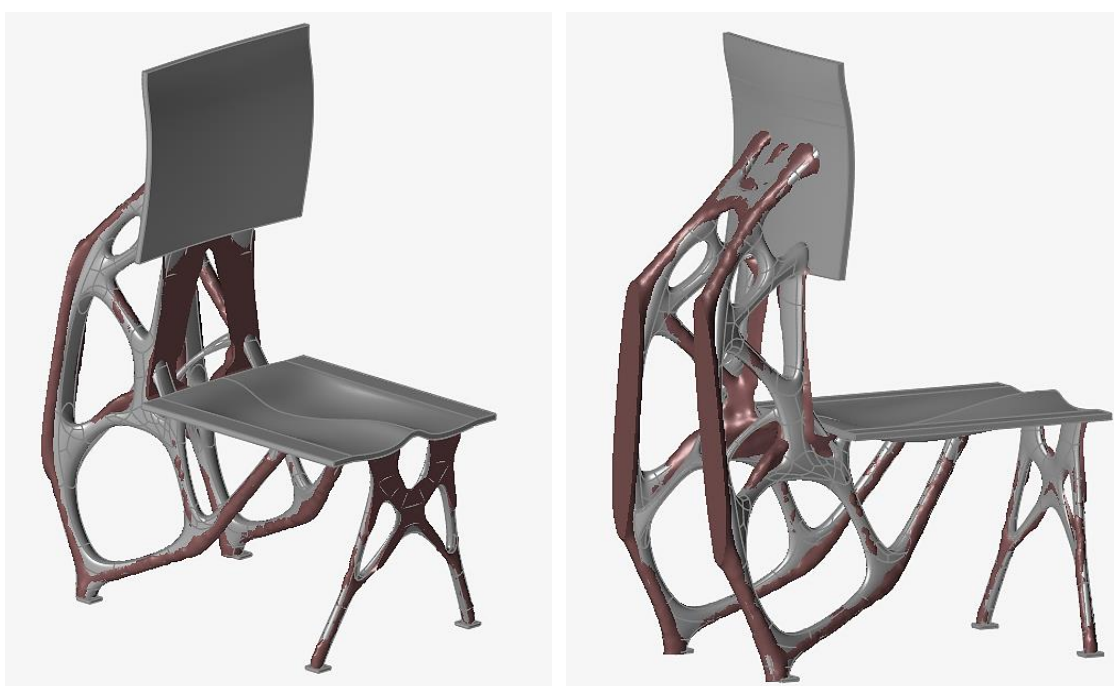
Obrázek 54 Problémy vzniklé při přemodelování demonstrátoru

Jakmile je vytvořen celý PolyNURBS objekt je možné upravit ostrost povrchu pomocí funkce „Sharpen“. Na Obrázek 55 vlevo je zobrazena konstrukce při nastavení nejvyšší možné ostrosti. NURBS povrch v tomto případě vyplňuje celou klec. Pro tvorbu finálního objektu byla využita možnost žádné ostrosti (viz Obrázek 55 vpravo).



Obrázek 55 Maximální úroveň ostrosti (vlevo), žádná ostrost (vpravo)

Po ukončení nástroje „PolyNURBS“ došlo ke zmizení klece okolo povrchu a zůstal pouze PolyNURBS objekt. Na Obrázek 56 je zobrazeno porovnání původní optimalizované konstrukce objektu (hnědá barva) a nově vzniklé přemodelované konstrukce (šedá barva). Při tvorbě tohoto modelu byla snaha dosáhnout co možná nejvyšší podobnosti.



Obrázek 56 Porovnání optimalizované a přemodelované konstrukce

Vzniklý PolyNURBS objekt byl spojen dohromady s ostatními částmi objektu pomocí funkce „Combine“, čímž došlo také k zabránění prolínání jednotlivých částí objektu. Následně byla provedena analýza, která poskytla informace o sledovaných charakteristikách. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 9. Tento přemodelovaný objekt bude dále nazýván jako varianta 1.

Tabulka 9 Výsledné hodnoty sledovaných charakteristik přemodelovaného objektu (varianta 1)

Varianta modelu	Hmotnost	Posunutí	Napětí von Mises
1	7,84 kg	15,98 mm	29,32 MPa

Hmotnost přemodelovaného objektu činí 7,84 kg, což je jen nepatrně vyšší než v případě optimalizované konstrukce. Rozložení posunutí v rámci objektu je zobrazeno na Obrázek 57. Zde došlo oproti optimalizované konstrukci přibližně ke dvojnásobnému nárůstu maximální hodnoty na 15,98 mm. V případě napětí von Mises došlo k nárůstu na 29,32 MPa, stále se ale nachází pod hodnotou napětí na mezi kluzu pro ABS materiál. Kritickými místy (místa s maximální hodnotou) jsou spojovací prvky mezi zadní konstrukcí a podpůrnými prvky sedací desky.



Obrázek 57 Posunutí v rámci přemodelovaného objektu (varianta 1)





Obrázek 58 Maximální hodnota napětí von Mises pro přemodelovaný objekt (varianta 1)

Při dalším pokusu o přemodelování optimalizované struktury byla snaha o snížení váhy a zmenšení rozměrů konstrukce. Bylo vytvořeno větší množství prvků s menším průměrem. Jejich umístění vychází také z topologické optimalizace zobrazené na Obrázek 47. Cílem bylo také vytvoření konstrukce, která nevyžaduje žádné, nebo minimální množství podpěr při výrobě. Veškeré prvky svírají se zemí úhel  $45^\circ$ , což pro technologii FDM, kterou bude daný objekt vyráběn, představuje kritický úhel, při kterém je možné tisknout bez podpěr (viz Tabulka 1). Výsledný model je zobrazen na Obrázek 59. Tato varianta je označena jako varianta 2.



Obrázek 59 Přemodelovaný objekt (varianta 2)

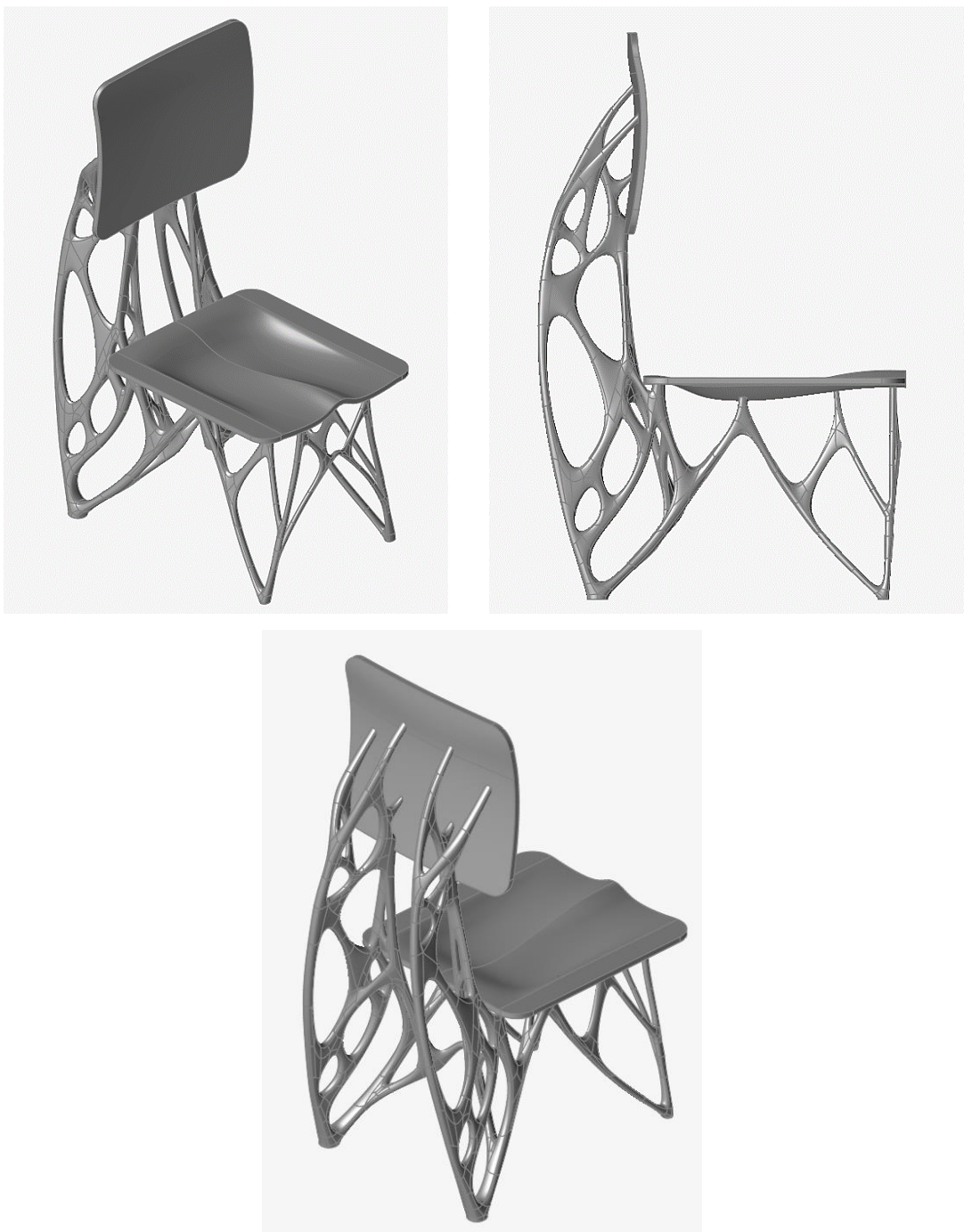
Hmotnost celého objektu klesla na pouhých 5,47 kg. Analýza konstrukce však odhalila kritické místo napětí von Mises, které dosahuje hodnoty 126 MPa. Tato hodnota výrazně převyšuje hodnotu napětí na mezi kluzu, což by mohlo vést k výrazné deformaci materiálu v daném místě. Z tohoto důvodu bylo nutné variantu upravit. Kritické místo je zobrazeno na Obrázek 60.



Obrázek 60 Kritické místo s maximální hodnotou napětí von Mises (varianta 2)



V rámci úprav došlo ke zvětšení tloušťky zadních prvků. Dále byly přidány prvky nové pro dosažení vyšší tuhosti konstrukce. Došlo také k úpravě místa, ve kterém došlo u předchozích modelů ke kritické koncentraci napětí. Finální podoba přemodelovaného objektu je z několika pohledů zobrazena na Obrázek 61. Po úpravě objektu byla opět provedena analýza. Výsledky jsou uvedeny v Tabulka 10.



Obrázek 61 Přemodelovaný objekt (varianta 2 – finální verze)

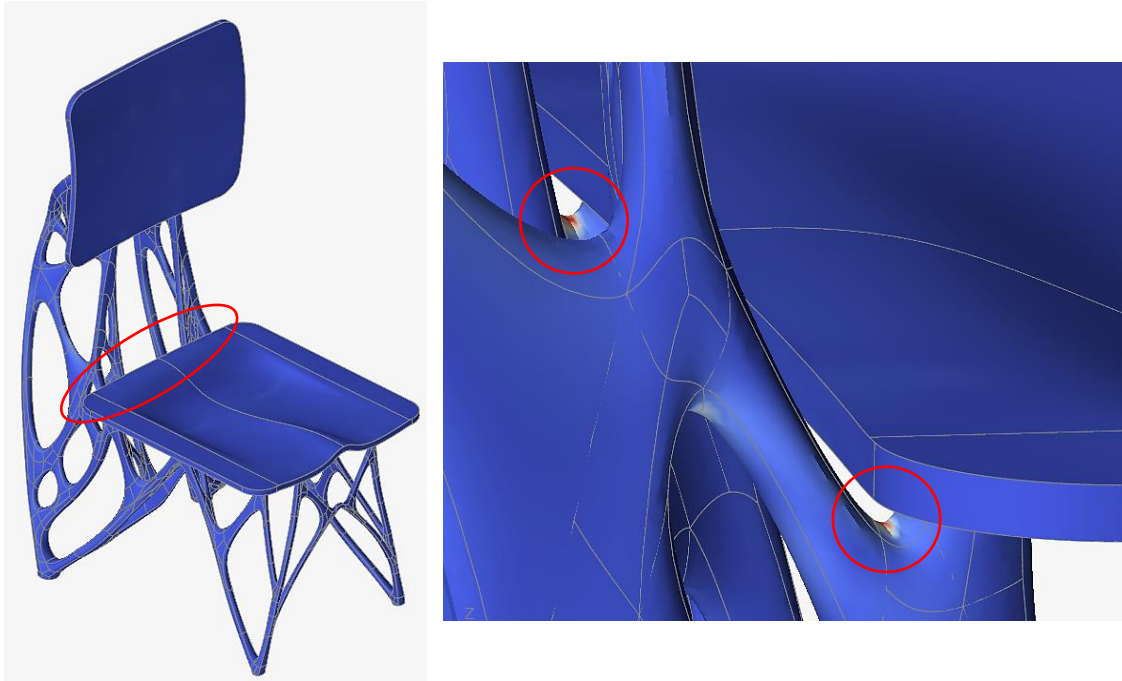
Tabulka 10 Výsledné hodnoty sledovaných charakteristik přemodelovaného objektu  
(varianta 2 – finální verze)

Varianta modelu	Hmotnost	Posunutí	Napětí von Mises
2	6,142 kg	33,62 mm	58,36 MPa

Jak je z tabulky patrné, došlo k nepatrnému nárůstu hmotnosti objektu na 6,142 kg, což je ovšem stále nižší hodnota než u varianty 1. Maximální hodnota posunutí, která činí 33,62 mm, se opět nachází v horní části opěrné desky (viz Obrázek 62). Oproti objektu zobrazenému na Obrázek 59 došlo ke snížení maximální hodnoty napětí von Mises na 58,36 MPa. Tato hodnota stále mírně přesahuje hodnotu napětí na mezi kluzu, dalšími úpravami se však nepodařilo napětí dále snížit. Rozložení napětí včetně kritických míst je zobrazeno na Obrázek 63. Vzhledem k vysokým hodnotám napětí byla provedena analýza při zatížení, které bylo původně myšleno, tzn. 1600 N na sedací desce a 800 N na opěrné desce. Při těchto podmínkách odpovídá maximální napětí von Mises 32,92 MPa a posunutí 20,95 mm. Lze tedy konstatovat, že v zamýšlených reálných podmínkách jsou mechanické vlastnosti dostačující. Tento model byl vybrán pro následnou výrobu pro svou nízkou hmotnost a složitou geometrii. Cílem výroby tohoto modelu je také demonstrovat vliv sklonu a tloušťky prvků na potřebu podpěr při tisku.



Obrázek 62 Posunutí v rámci přemodelovaného objektu (varianta 2 – finální verze)



Obrázek 63 Kritické místo s maximální hodnotou napětí von Mises (varianta 2 – finální verze)

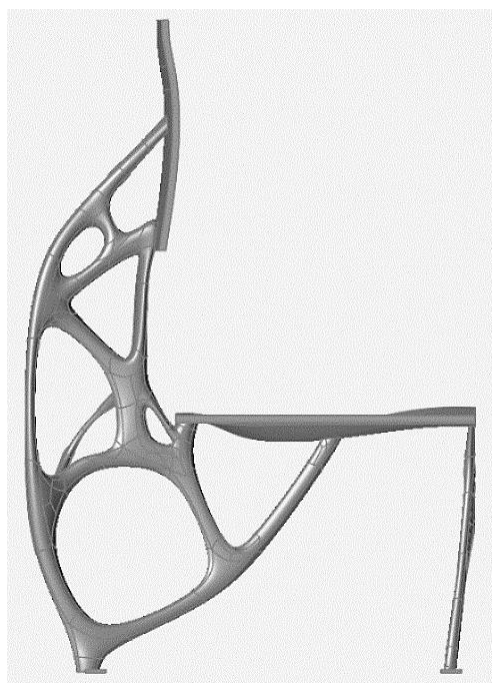
## 4.5 Shrnutí výsledků topologické optimalizace

V této kapitole se nachází shrnutí výsledků topologické optimalizace. Na Obrázek 64, Obrázek 65, Obrázek 66 je uvedeno porovnání dvou výsledných přemodelovaných demonstrátorů. Hlavním rozdílem mezi těmito variantami je množství a tloušťka prvků. Vpravo se nachází přemodelovaný demonstrátor, u kterého bylo cíleno na co možná největší podobnost s optimalizovanou strukturou zobrazenou na Obrázek 50. Ačkoliv byly při analýze zjištěny vyhovující vlastnosti, při reálném provozu by mohlo dojít k podlomení předních podpůrných prvků. Vlevo se nachází varianta, u které byla snaha o co možná nejtenčí prvky. Z důvodu zajištění stability této konstrukce bylo potřeba zavést nové prvky, které se ve finální topologické optimalizaci (viz Obrázek 50) nevyskytovaly. Pro inspiraci posloužila topologická optimalizace zobrazená na Obrázek 47. Hlavní změnou prošla konstrukce především v přední části, kde byla snaha předejít případnému podlomení v reálném provozu. Tato varianta byla následně vybrána pro tisk.

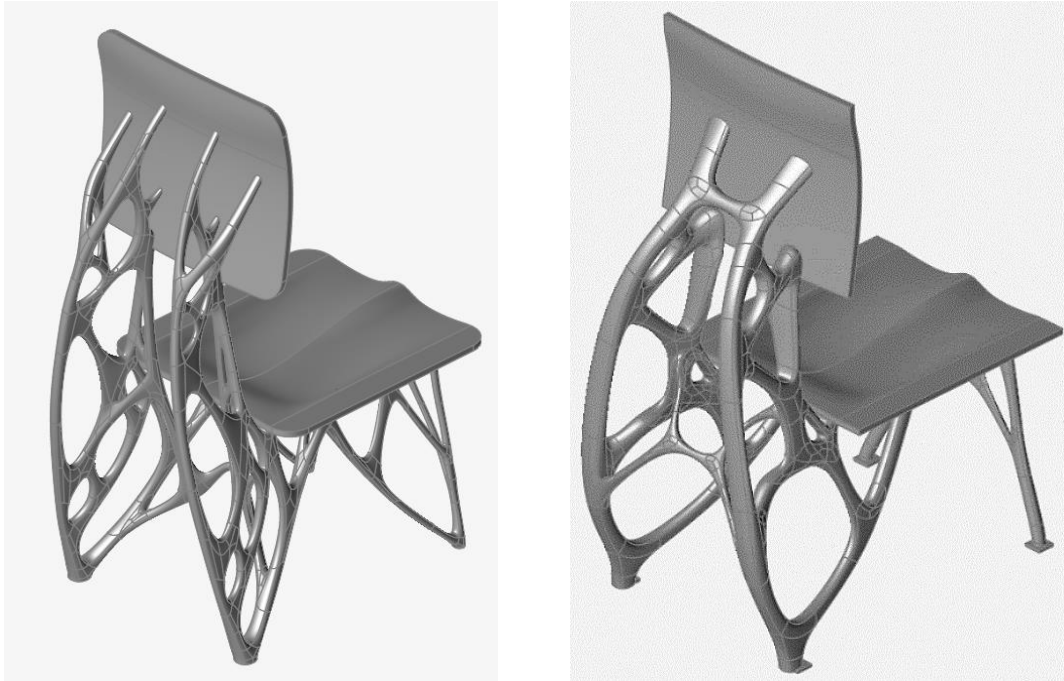




Obrázek 64 Porovnání přemodelovaných variant – pohled 1

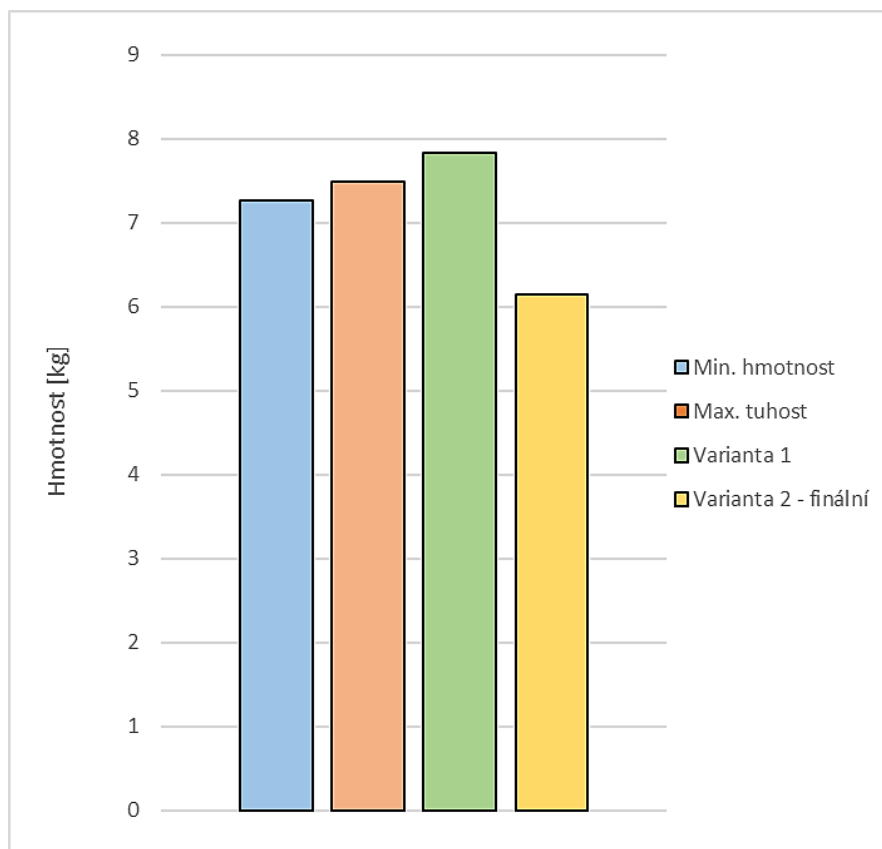


Obrázek 65 Porovnání přemodelovaných variant – pohled 2



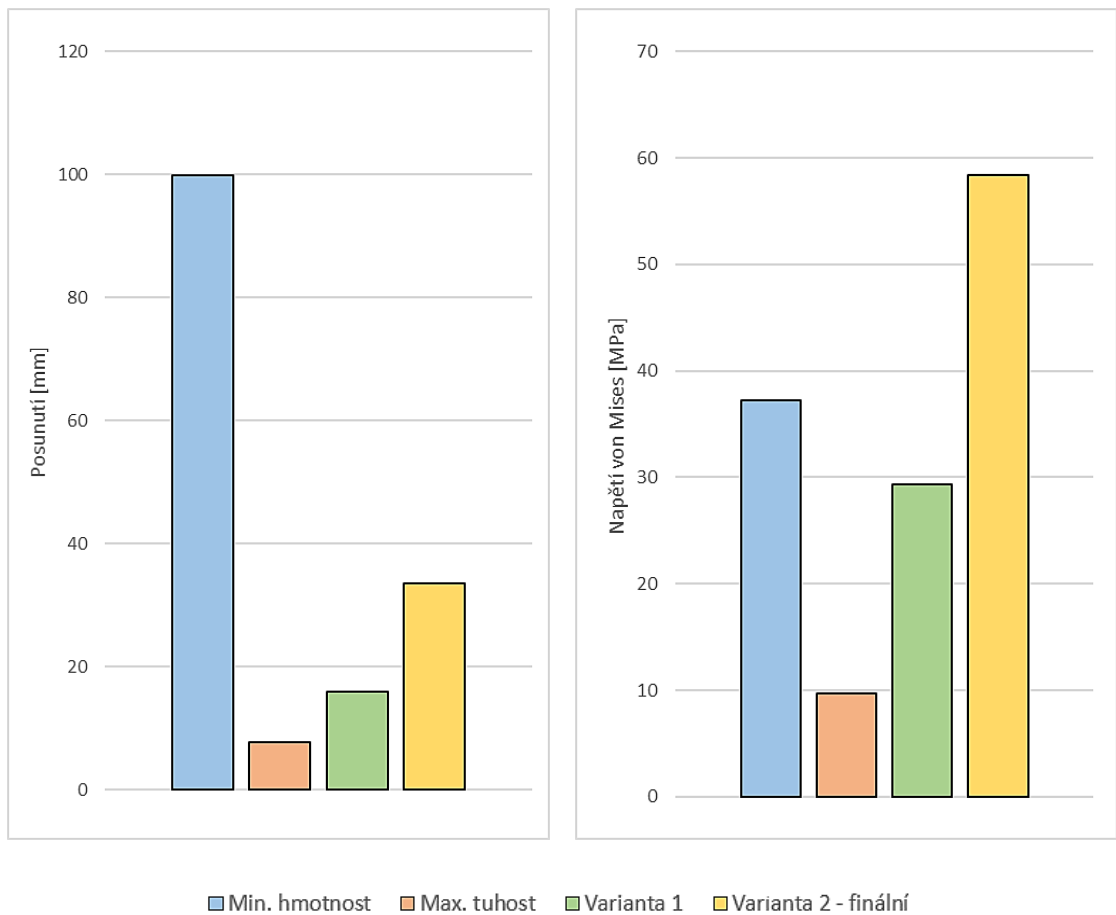
Obrázek 66 Porovnání přemodelovaných variant – pohled 3

Na Obrázek 67 a Obrázek 68 je zobrazeno grafické porovnání hmotností, respektive posunutí a napětí von Mises pro jednotlivé optimalizované a přemodelované struktury. Jak je z prvního grafu patrné, hmotnost struktury v případě optimalizovaných struktur je téměř shodná (jednou z omezujících podmínek v případě maximalizace tuhosti byla hmotnost z předchozí optimalizace). Nepatrný nárůst hmotnosti lze pozorovat v případě přemodelované varianty 1. Naopak v případě přemodelované varianty 2 došlo k výraznému poklesu hmotnosti na 6,142 kg.



Obrázek 67 Porovnání hmotností optimalizovaných struktur a přemodelovaných variant

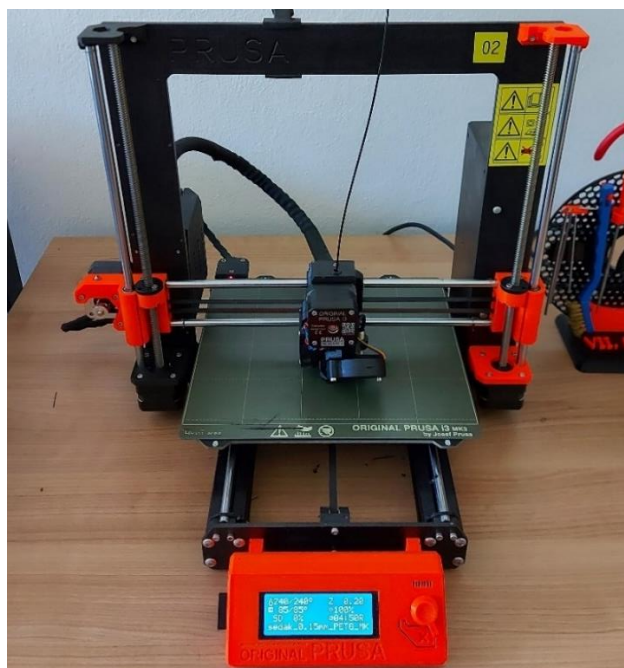
Výraznější rozdíly mezi jednotlivými strukturami lze najít u posunutí a napětí von Mises. Zatím co hmotnosti optimalizovaných struktur zůstali téměř shodné, posunutí kleslo u struktury s cílem maximalizace tuhosti o více než desetinásobek. Napětí von Mises kleslo přibližně na čtvrtinu. V případě obou přemodelovaných struktur došlo ke zhoršení sledovaných charakteristik oproti struktuře s maximální tuhostí. Hlavní rozdíl je patrný u varianty 2. Zde došlo k téměř šestinásobnému nárustu napětí von Mises. Zvýšení hodnot napětí von Mises bylo způsobeno přepracováním napojení sedací desky na zadní nosné prvky. Řešení vytvořené topologickou optimalizací bylo nejen obtížné vyrobitelné, ale především obtížně sestavitelné při následné výrobě. Vzhledem k hodnotám napětí von Mises přesahující napětí na mezi kluzu pro materiál ABS, byla provedena analýza při očekávaném reálném zatížení (1600 N na sedací desce a 800 N na opěrné desce). Při těchto podmínkách odpovídá maximální napětí von Mises 32,92 MPa a posunutí 20,95 mm, což je v obou případech vyhovující.



Obrázek 68 Porovnání posunutí a napětí von Mises optimalizovaných struktur a přemodelovaných variant

## 5 Výroba demonstrátoru

Výroba demonstrátoru proběhla s pomocí tiskárny Original Prusa i3 MK3S zobrazené na Obrázek 69. Tiskárna pracuje na principu FDM/FFF. Jako přídatný materiál je využit filament, který je kontinuálně natavován a vytlačován skrz extrudér na pracovní desku. ABS je obecně náročnější na tisk. Během tisku je vyžadována jak vyhřívaná podložka, tak vyhřívaná pracovní komora, jinak hrozí deformace, praskání a kroucení, především u dlouhých a tenkých konstrukcí. [53] Z těchto důvodů byl pro tisk nakonec vybrán materiál PETG. PETG má menší teplotní roztažnost, během tisku tudíž nedochází k výrazným deformacím a kroucení. Nevýhodnou tohoto materiálu je tendence stringovat, tzn. vytahovat tenká vlákna filamentu při přejezdech. [54] V Tabulka 11 je uvedeno porovnání základních vlastností PETG a ABS.



Obrázek 69 Original Prusa i3 MK3S

Tabulka 11 Porovnání základních vlastností materiálů ABS a PETG

	<b>ABS</b>	<b>PETG [55]</b>
<b>Hustota</b>	1,06 g / cm <sup>3</sup>	1,27 g / cm <sup>3</sup>
<b>Modul pružnosti</b>	2000 MPa	1500 MPa
<b>Napětí na mezi kluzu</b>	45 MPa	46 MPa

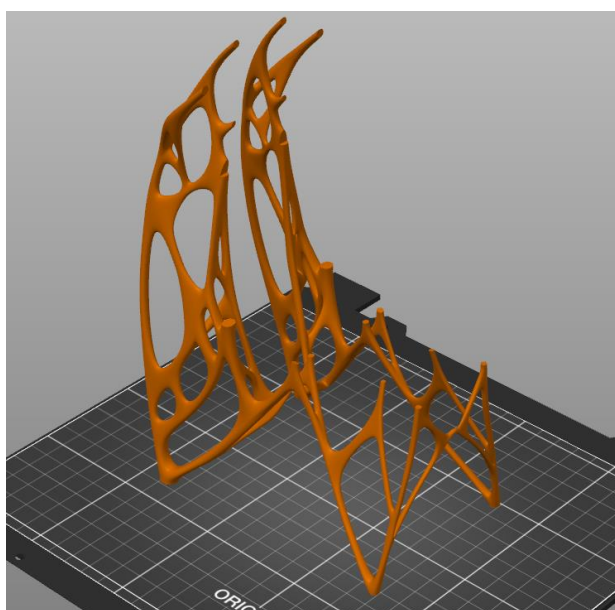


## 5.1 Příprava tisku

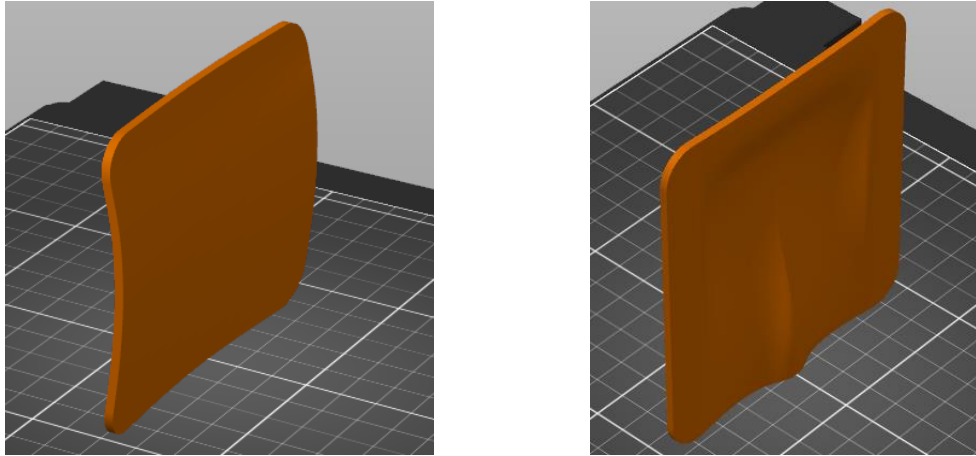
Jak již bylo zmíněno, pro tisk byl vybrán model zobrazený na Obrázek 61 (označován jako varianta 2 – finální). Během tisku byla snaha minimalizovat potřebu podpěr. Z tohoto důvodu byl model rozdělen na tři samostatně tištěné díly, a to na kostru, sedací a opěrnou desku. Kvůli omezeným rozměrům pracovního prostoru (250 x 210 x 200 mm) byly všechny zmíněné části zmenšené na 24 % velikosti (maximální možná velikost). Pro přípravu tisku byl využit software PrusaSlicer. Základní parametry tisku jsou uvedeny v Tabulka 12. Orientace součástí v pracovním prostoru tiskárny je zobrazena na Obrázek 70 a Obrázek 71.

Tabulka 12 Příprava tisku

<b>Tiskárna</b>	Original Prusa i3 MK3S
<b>Software pro přípravu tisku</b>	PrusaSlicer 2.4.2
<b>Materiál</b>	PETG
<b>Průměr trysky</b>	0,4 mm pro konstrukci 0,6 mm pro desky
<b>Nastavení tisku</b>	0,15 mm QUALITY
<b>Výplň</b>	100 %
<b>Velikost tištěného modelu</b>	24 %



Obrázek 70 Orientace kostry demonstrátoru vůči tisku



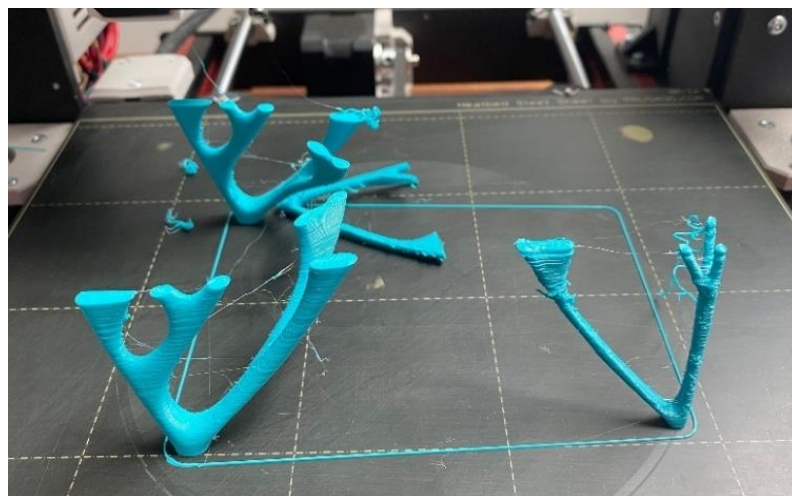
Obrázek 71 Orientace opěrné a sedací desky vůči tisku

## 5.2 Průběh tisku

Tisk jednotlivých součástí probíhal odděleně. Pokud by během tisku všech součástí dohromady došlo k jakékoliv chybě, materiálové ztráty by byly výrazně vyšší než v případě tisku jen jedné části. Jako první byl spuštěn tisk samotné kostry demonstrátoru bez jakýchkoliv podpěr (tak, jak je zobrazen na Obrázek 70). V Tabulka 13 jsou uvedeny informace o tisku. Jak je zobrazeno na Obrázek 72, během tisku došlo k překlopení jedné z podpůrných částí konstrukce, jedná se tedy o neúspěšný pokus.

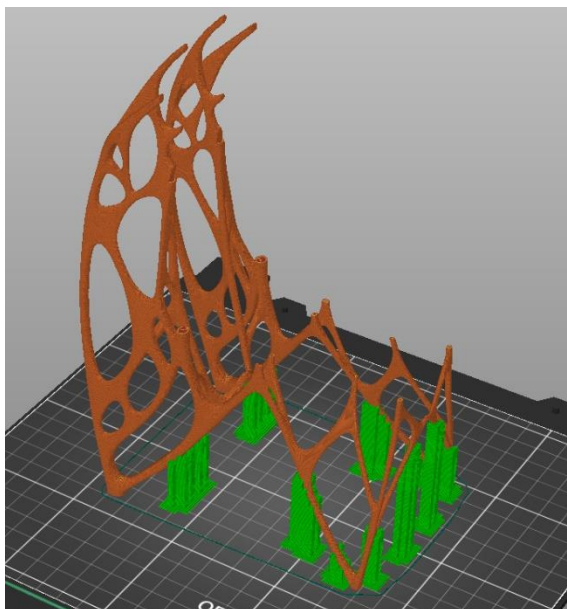
Tabulka 13 Informace o tisku – kostra, bez podpěr

<b>Použito filamentu</b>	47,52 g
<b>Odhadovaný čas tisku</b>	11 h 5 m



Obrázek 72 Selhání tisku bez podpěr

Při přípravě dalšího pokusu byla snaha zvýšit stabilitu konstrukce v průběhu tisku. Bylo přidáno malé množství podpěr do míst, u kterých byla vysoká pravděpodobnost ztráty stability. Umístění podpěr je zobrazeno na Obrázek 73. V Tabulka 14 jsou uvedeny informace týkající se tohoto tisku.



Obrázek 73 Příprava tisku s minimem podpěr

Tabulka 14 Informace o tisku – kostra, minimum podpěr

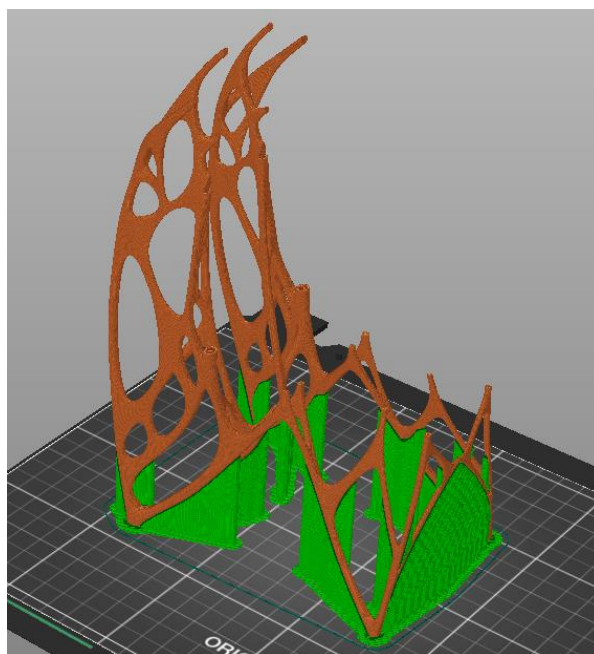
<b>Použito filamentu</b>	53,41 g
<b>Odhadovaný čas tisku</b>	12 h 10 m

Během tohoto tisku také došlo ke zborcení konstrukce, pravděpodobně z důvodu odtržení od tiskové podložky (viz Obrázek 74).



Obrázek 74 Selhání tisku s minimem podpěr

V rámci dalšího pokusu byly přidány další podpěry pro vyšší stabilitu konstrukce. Pro dosažení lepší přilnavosti součásti k podložce byly přidány dvě vrstvy raftu. Jedná se o vrstvy přídavného materiálu na tiskové podložce, na kterých následně probíhá tisk součásti. Díky tomu je dosažena vyšší stabilita během tisku. Model s podpěrami včetně raftu je zobrazen na Obrázek 75. V Tabulka 15 jsou pak uvedeny informace o tisku. Tento tisk již proběhl bez větších problémů. I při doporučeném nastavení tisku došlo v některých částech ke stringování, které se vyznačuje všudypřítomnými nitkami filamentu. V místě kontaktu konstrukce s podpěrami také došlo ke zhoršení kvality povrchu.



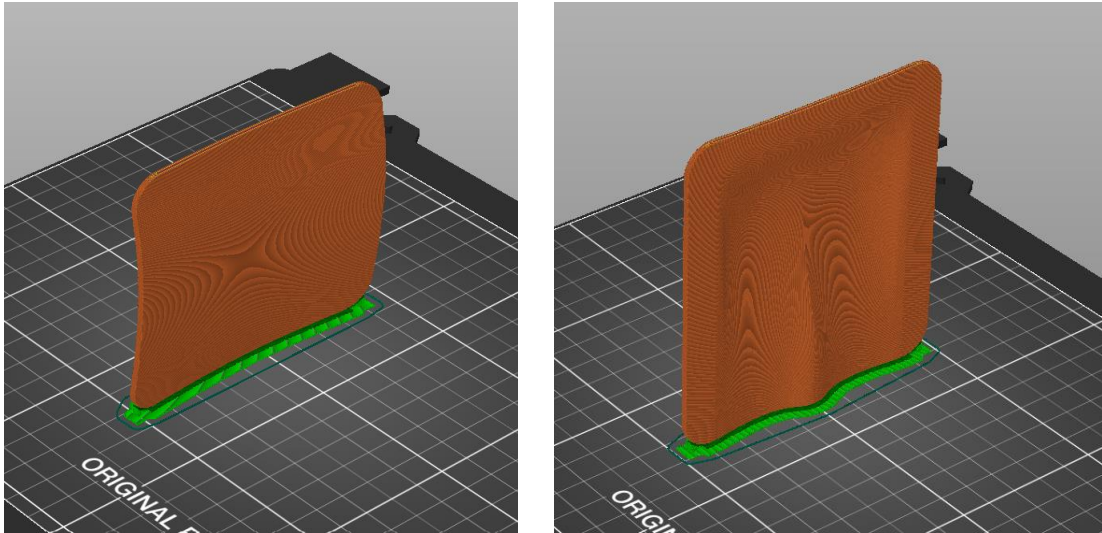
Obrázek 75 Příprava tisku – podpěry + raft

Tabulka 15 Informace o tisku – kostra, podpěry + raft

<b>Použito filamentu</b>	62,23 g
<b>Odhadovaný čas tisku</b>	14 h 13 m

V dalším kroku přišla na řadu příprava tisku sedací a opěrné desky. V obou případech byly nastaveny pouze podpěry na tiskové podložce tak, jak je zobrazeno na Obrázek 76. Informace o tisku jsou uvedeny v Tabulka 16.

Po zkušenostech z tisku kostry byly již od začátku přidány dvě vrstvy raftu, čímž došlo ke zvýšení stability. Tisk tak proběhl v pořádku již na první pokus. I zde však došlo ke zhoršení kvality povrchu v místech styku s podpěrami.



Obrázek 76 Příprava tisku sedací a opěrné desky

Tabulka 16 Informace o tisku – sedací a opěrná deska

	<b>Opěrná deska</b>	<b>Sedací deska</b>
<b>Použito filamentu</b>	25,62 g	33,95 g
<b>Odhadovaný čas tisku</b>	3 h 42 m	4 h 52 m

Oddělení jednotlivých částí od tiskové podložky a následné odstranění vytištěných podpěr bylo provedeno manuálně. Především u kostry bylo potřeba provádět odstranění velmi opatrně z důsledku tenkých prvků. Následně byl demonstrátor spojen dohromady za pomoci epoxidového lepidla. Pro lepší napojení částí byly v sedací a opěrné části již ve fázi modelování přidělané malé drážky. Výsledný vytištěný model je zobrazen na Obrázek 77 a Obrázek 78.





Obrázek 77 Vytisknutý model – pohled 1



Obrázek 78 Vytisknutý model – pohled 2 a 3

### 5.3 Ověření

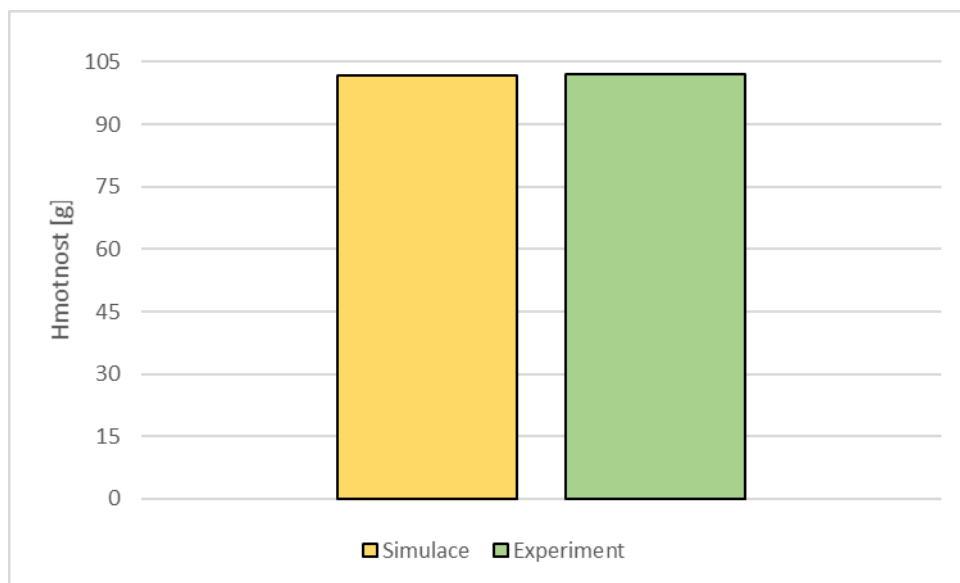
Vytištěný a sestavený model bylo následně potřeba ověřit. Aby bylo možné provést porovnání výsledků analýzy s reálným stavem, musela být provedena také simulační analýza pro zmenšený model. Místo materiálu ABS byly manuálně zadány mechanické vlastnosti použitého PETG. Zmenšení v Altair Inspire bylo provedeno pomocí funkce „Scale“. Následně byl model zatížen silou o velikosti 5 N působící kolmo na sedací desku. Sledovanou charakteristikou v tomto případě bylo posunutí vybraného bodu ve směru zatížení. Vybraný bod se nachází na konci sedací desky (pod opěrnou deskou) přesně v polovině. Hodnota posunutí byla následně experimentálně ověřena. Pro měření byl model umístěn na podložku, ke které byl přichycen páčkový úchylkoměr. Závaží umístěné na model způsobilo deformaci, která byla zaznamenána úchylkoměrem umístěným vespod modelu (viz Obrázek 79). Výsledná hodnota byla vypočtena jako průměr ze tří měření.



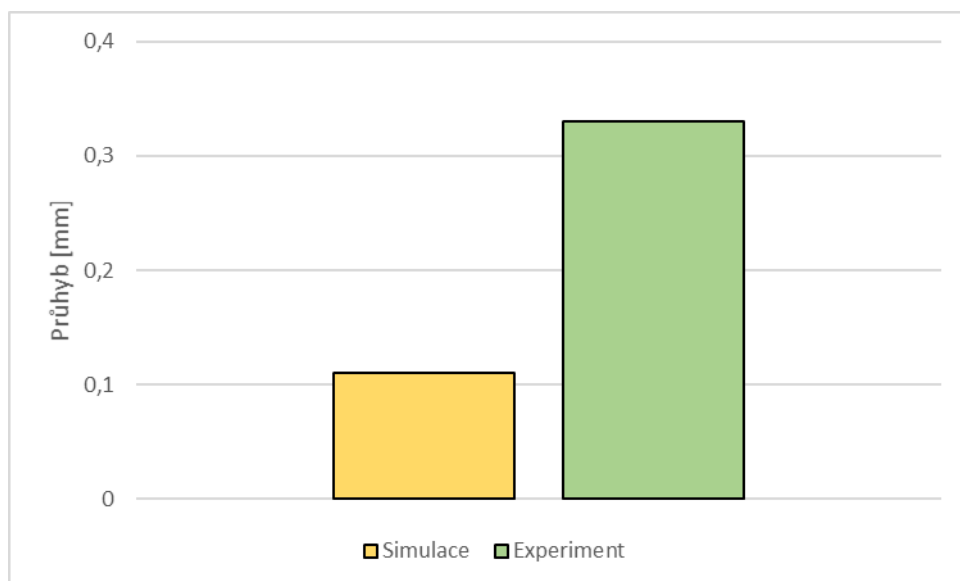
Obrázek 79 Průběh měření posunutí ve vybraném bodě

Na Obrázek 80 je zobrazeno porovnání hmotnosti vytištěného demonstrátoru s hmotností 3D modelu uváděnou v Altair Inspire. Hmotnost vytištěného modelu je nepatrně vyšší, což je pravděpodobně způsobeno epoxidovým lepidlem použitým při spojování jednotlivých částí. Hmotnost vytištěného demonstrátoru činí 102 g, zatímco hmotnost uváděná programem 101,7 g. Na Obrázek 81 je zobrazeno porovnání posunutí v daném místě pro simulaci

a reálnou vytištěnou součást. Experimentálně byla zjištěna hodnota posunutí, která dosahuje trojnásobku hodnoty zjištěné simulací. Konkrétně se jedná o 0,11 mm získanou pomocí simulace a 0,33 mm získanou pomocí měření. Tento rozdíl mohl být způsoben nedostatečně pevným spojením jednotlivých částí demonstrátoru nebo defekty vzniklémi v průběhu tisku. Během zatížení došlo k podlamování předních opěrných prvků, což také mohlo výsledky nepříznivě ovlivnit.



Obrázek 80 Porovnání hmotnosti vytištěného demonstrátoru s 3D modelem



Obrázek 81 Porovnání posunutí ve vybraném místě vytištěného modelu s výsledkem simulace



## 6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo pochopení problematiky odlehčování dílů v rámci strukturální optimalizace jak z hlediska principu a procesu, tak z hlediska přípravy. Tyto znalosti byly následně aplikovány na běžně využívaný objekt, který byl posléze vyroben ve zmenšené verzi za pomoci aditivních technologií. Topologická optimalizace je velmi silný nástroj, který umožňuje dosáhnout odlehčených funkčních struktur díky odstranění nepotřebného materiálu. Pomocí simulační analýzy lze snadno získat přehled o deformačním chování struktury a o rozložení napětí při různých podmínkách a konfiguracích. Proces optimalizace se skládá z několika kroků. Prvním krokem je analýza původní součásti. Následuje definování návrhového prostoru, požadovaných podmínek a omezení. Dalšími kroky jsou topologická optimalizace, přemodelování součásti a finální analýza. Finální analýza slouží k ověření struktury a k porovnání s původní součástí. Fáze přemodelování objektu hraje v procesu topologické optimalizace velmi důležitou roli. Samotná optimalizace slouží pouze jako návrh optimálního rozložení materiálu a málokdy lze výsledek považovat za finální podobu. Z tohoto důvodu jsou také velmi důležité znalosti a zkušenosti konstruktéra, který o finální podobě rozhoduje.

V rešeršní části práce je uvedeno základní rozdělení aditivních technologií dle normy ISO/ASTM 52900 včetně principu fungování. Dále jsou zde stručně popsány omezení a pravidla jednotlivých aditivních technologií, ať už se jedná o rozměrovou přesnost, potřebu podpěr, omezení prvků nebo vliv orientace vůči tisku na design součásti. V rámci strukturální optimalizace jsou popsány tři různé přístupy, a to topologická optimalizace, topografická optimalizace a optimalizace lattice. Důraz byl kladen především na topologickou optimalizaci, která byla provedena v rámci praktické části práce. Je zde uveden princip dvou nejběžnějších metod topologické optimalizace, celkový proces, omezení i využití napříč různými odvětvími. Získané znalosti z oblasti topologické optimalizace byly následně aplikovány v praktické části práce.

Pro demonstraci topologické optimalizace byl vybrán běžně využívaný předmět, na kterém lze snadno demonstrovat designové možnosti optimalizace, konkrétně se jedná o židli. Samotné modelování, včetně tvorby ergonomicky tvarovaných ploch, proběhlo v softwaru SolidEdge 2022. Výsledný model byl naimportován do softwaru Altair Inspire 2021, ve kterém byla následně provedena topologická optimalizace. V rámci práce byla provedena celá řada optimalizací. V průběhu byly jednotlivé parametry upravovány tak, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. Navolené zatížení na sedací části činí 3200 N (rozložené na čtyři shodně velké zatížení) a 1500 N na opěrné desce (rozložené na tři shodná zatížení). Pro lepší stabilitu výsledné struktury byly přidány síly působící do boku opěrky o velikosti 500 N a podsedačku o velikosti 2x 1000 N. V práci jsou uvedeny tři finální optimalizace. Jako první je zde topologická optimalizace s cílem maximalizace tuhosti a s 10 % objemu původního návrhového prostoru. Tato optimalizace posloužila jako inspirace při tvorbě finálních modelů. Druhá je uvedena optimalizace s cílem minimalizace hmotnosti. Jako poslední je optimalizace s cílem maximalizace tuhosti a s cílovou hmotností z předešlé optimalizace pro minimalizaci hmotnosti. Výsledná struktura následně posloužila jako vzor pro přemodelované objekty. Byly vytvořeny celkem dva finální objekty, v případě prvního (označován jako varianta 1) byl kladen důraz na podobu s optimalizovanou strukturou, zatímco u druhého (označován jako varianta 2 – finální) byla snaha o dosažení většího množství tenkých nosných prvků. Při volbě orientace jednotlivých prvků u této varianty bylo také přihlíženo k následné obtížnosti výroby. Z tohoto důvodu jsou veškeré prvky se sklonem větším než 45° (limitní úhel prvků pro potřebu podpěr u technologií FDM/FFF). Analýzou obou variant byl zjištěn výrazný nárůst maximálních hodnot posunutí i napětí von Mises. V případě varianty 1 došlo k nárůstu hmotnosti na 7,84 kg oproti hmotnosti optimalizované struktury s maximalizací tuhosti, která činí 7,49 kg. Posunutí se zvýšilo z původních 7,750 mm na 15,98 mm a u maximální hodnoty napětí von Mises došlo k navýšení z 9,749 MPa na 29,32 MPa. V případě varianty 2 – finální došlo ke snížení hmotnosti na 6,142 kg, maximální hodnoty posunutí a napětí von Mises však

výrazně stouply na 33,62 mm, respektive 58,36 MPa. Z důvodu vysoké hodnoty napětí byla provedena analýza součásti při zatížení, které bylo původně myšleno, tzn. 1600 N na sedací desce a 800 N na opěrné desce. Výsledné hodnoty napětí von Mises 32,92 MPa a posunutí 20,95 mm jsou již vyhovující. Lze tedy předpokládat dostačující tuhost konstrukce při zamýšlených reálných podmínkách. Pro následnou výrobu byla vybrána varianta 2 - finální především kvůli nízké hmotnosti a složité geometrii. Snaha byla také o demonstraci vlivu sklonu a tloušťky prvků na potřebu podpěr při tisku. Zmenšený demonstrátor (24 % původní velikosti) byl rozdělen na tři samostatně tištěné části, které byly následně spojeny dohromady za pomoci epoxidového lepidla. Vzhledem k horší tisknutelnosti byl pro výrobu demonstrátoru nakonec zvolen materiál PETG. Následně bylo provedeno měření posunutí vybraného bodu při zatížení silou 5 N a výsledné hodnoty byly porovnány s výsledky analýzy, která proběhla dodatečně pro zmenšený model také při zatížení 5 N. Pro možnost porovnání byly při analýze manuálně zadány vlastnosti materiálu PETG. Výsledné porovnání poukazuje na trojnásobně větší hodnotu posunutí v případě experimentu než v případě simulace. Tento rozdíl mohl být způsoben nedostatečným spojením jednotlivých částí, defekty nebo vlivem nadměrného podlamování předních tenkých opěrných prvků. Diplomová práce zahrnuje veškerá témata, která měla být obsažena a její cíle byly splněny.

# Bibliografie

- [1] BMW receives Altair Enlighten Award for metal 3D printed roof bracket. In: *3D Printing Industry* [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/bmw-receives-altair-enlighten-award-for-metal-3d-printed-roof-bracket-138080/>
- [2] 3D printing market size worldwide from 2013 to 2021. In: *Statista* [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>
- [3] BHATIA, Akash a Anuj SEHGAL. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.04.379
- [4] DAVIS, Andrea, Andrea HUXOL, Franz-Josef VILLMER a Eva SCHEIDELER. DEPLOYMENT OF PROCESS CAPABILITY ANALYSIS FOR SINGLE-PART PRODUCTION. *7th International Conference*. 2017, 63-74.
- [5] NGO, Tuan, Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018, 143, 172-196. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [6] *ISO/ASTM 52900:2021: Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. 2. ASTM International, 2021.
- [7] MOHAN, Denesh, Zee TEONG, Afifah BAKIR, Mohd SAJAB a Hatika KACO. Extending Cellulose-Based Polymers Application in Additive Manufacturing Technology: A Review of Recent Approaches.

- Polymers*. 2020, 12(9). ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12091876
- [8] SLS polymer materials. In: *EOS* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials>
- [9] CALIGNANO, Flaviana, Federico GIUFFRIDA a Manuela GALATI. Effect of the build orientation on the mechanical performance of polymeric parts produced by multi jet fusion and selective laser sintering. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, 65, 271-282. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.03.018
- [10] DEV SINGH, D., T. MAHENDER a Avala RAJI REDDY. Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 46, 350-355. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.08.415
- [11] MWEMA, Fredrick a Esther AKINLABI. Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). *Fused Deposition Modeling*. Cham: Springer International Publishing, 2020, 1-15. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. ISBN 978-3-030-48258-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-48259-6\_1
- [12] HENTSCHEL, Lukas, Frank KYNAST, Sandra PETERSMANN, Clemens HOLZER a Joamin GONZALEZ-GUTIERREZ. Processing Conditions of a Medical Grade Poly(Methyl Methacrylate) with the Arburg Plastic Freeforming Additive Manufacturing Process. *Polymers*. 2020, 12(11). ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12112677
- [13] TYAGI, Shubhang, Amber YADAV a Samadhan DESHMUKH. Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process. *Materials Today: Proceedings*. 2022, 51, 1012-1016. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.07.073

- [14] What Is Material Jetting? – 3D Printing Basics. In: *ALL3DP* [online]. [cit. 2022-06-11]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics/>
- [15] Understanding XJet's NanoParticle Jetting™ Technology. In: *Manufactur3D* [online]. [cit. 2022-06-11]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/understanding-xjets-nanoparticle-jetting-technology/>
- [16] LI, Ming, Wenchao DU, Alaa ELWANY, Zhijian PEI a Chao MA. Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020, 142(9). ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4047430
- [17] ZIAEE, Mohsen a Nathan CRANE. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*. 2019, 28, 781-801. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.05.031
- [18] PRATHEESH KUMAR, S., S. ELANGO VAN, R. MOHANRAJ a J.R. RAMAKRISHNA. A review on properties of Inconel 625 and Inconel 718 fabricated using direct energy deposition. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 46, 7892-7906. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.02.566
- [19] Directed Energy Deposition. In: *Loughborough University* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- [20] PAGAC, Marek, Jiri HAJNYS, Quoc-Phu MA, Lukas JANCAR, Jan JANSKA, Petr STEFEK a Jakub MESICEK. A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*. 2021, 13(4). ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13040598

- [21] AL RASHID, Ans, Waqas AHMED, Muhammad KHALID a Muammer KOÇ. Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. *Additive Manufacturing*. 2021, 47. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.102279
- [22] ALAMMAR, Amirah, John KOIS, Marta REVILLA-LEÓN a Wael ATT. Additive Manufacturing Technologies: Current Status and Future Perspectives. *Journal of Prosthodontics*. 2022, 31(1), 4-12. ISSN 1059-941X. Dostupné z: doi:10.1111/jopr.13477
- [23] Sheet Lamination. In: *Engineering product design* [online]. [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
- [24] Dimensional accuracy of 3D printed parts. In: *Hubs* [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts/#metal>
- [25] ADAM, Guido A.O. a Detmar ZIMMER. Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2014, 7(1), 20-28. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2013.10.001
- [26] LEUTENECKER-TWELSIEK, Bastian, Christoph KLAHN a Mirko MEBOLDT. Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*. 2016, 50, 408-413. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.05.016
- [27] DELLA CROCIATA, Diego. *Evaluation of design and optimization software for Additive Manufacturing with focus on topology optimization*. Stockholm, 2016. Degree Project. University of Nottingham.

- [28] QUERIN, Osvaldo, Mariano VICTORIA, Cristina ALONSO, Rubén ANSOLA a Pascual MARTÍ. *Topology Design Methods for Structural Optimization*. 2017. ISBN 9780081009161.
- [29] GEBISA, A a H LEMU. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 276. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/276/1/012026
- [30] VENDRELL, Pau Pallares. *Comparative study of the goodness of Topology Optimization software on additive manufactured parts*. Barcelona, 2020. Master's Degree in Industrial Engineering. Polytechnická univerzita v Katalánsku. Vedoucí práce Francisco Javier Freire Venegas.
- [31] VLAH, D., R. ŽAVBI a N. VUKAŠINOVIĆ. EVALUATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION AND GENERATIVE DESIGN TOOLS AS SUPPORT FOR CONCEPTUAL DESIGN. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*. 2020, 1, 451-460. ISSN 2633-7762. Dostupné z: doi:10.1017/dsd.2020.165
- [32] MENG, Liang, Weihong ZHANG, Dongliang QUAN et al. From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020, 27(3), 805-830. ISSN 1134-3060. Dostupné z: doi:10.1007/s11831-019-09331-1
- [33] Metoda SIMP pro optimalizaci topologie. In: *SOLIDWORKS Web Help* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://help.solidworks.com/2022/czech/SolidWorks/cworks/c\\_\\_simp\\_method\\_topology.htm?verRedirect=1](https://help.solidworks.com/2022/czech/SolidWorks/cworks/c__simp_method_topology.htm?verRedirect=1)



- [34] HAGNELL, Christian a Kiavosh MOSANEN. *Topology optimization: A comparison between the SIMP and BESO methods using open-source software*. Švédsko, 2021. Akademická práce. Uppsalská univerzita.
- [35] YUKSEL, Osman. YAPISAL MÜHENDİSLİKTE KULLANILAN TOPOLOJİ ENİYİLEMESİ YÖNTEMLERİ ÜZERİNE GENEL BİR BAKIŞ. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*. ISSN 2458-7494. Dostupné z: doi:10.34186/klujes.606666
- [36] *EBook: Practical Aspects of Structural Optimization with Altair OptiStruct TM* [online]. Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved. /, 2021 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://advanced-eng.cz/ke-stazeni/optimization-ebook>
- [37] What Is FEA | Finite Element Analysis?. In: *SIMSCALE* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-fea-finite-element-analysis/>
- [38] ZHU, Jihong, Han ZHOU, Chuang WANG, Lu ZHOU, Shangqin YUAN a Weihong ZHANG. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021, 34(1), 91-110. ISSN 10009361. Dostupné z: doi:10.1016/j.cja.2020.09.020
- [39] ORME, Melissa, Ivan MADERA, Michael GSCHWEITL a Michael FERRARI. Topology Optimization for Additive Manufacturing as an Enabler for Light Weight Flight Hardware. *Designs*. 2018, 2(4). ISSN 2411-9660. Dostupné z: doi:10.3390/designs2040051
- [40] Antenna Bracket for RUAG's Sentinel Satellite - Certified for Deployment in Outer Space. In: *EOS* [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/ruag-aerospace-3d-printed-satellite-components>

- [41] 3D-printed antenna support. In: *ESA* [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2014/11/3D-printed\\_antenna\\_support](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/11/3D-printed_antenna_support)
- [42] IQBAL, Taimoor, Ling WANG, Dichen LI, Enchun DONG, Hongbin FAN, Jun FU a Cai HU. *A general multi-objective topology optimization methodology developed for customized design of pelvic prostheses*. 2019, 69, 8-16. ISSN 13504533. Dostupné z: doi:10.1016/j.medengphy.2019.06.008
- [43] NABONI, Roberto a Ingrid PAOLETTI. Architectural Morphogenesis Through Topology Optimization. *Handbook of Research on Form and Morphogenesis in Modern Architectural Contexts*. IGI Global, 2018, 69-92. Advances in Media, Entertainment, and the Arts. ISBN 9781522539933. Dostupné z: doi:10.4018/978-1-5225-3993-3.ch004
- [44] Weight watchers. In: *Develop 3D* [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://develop3d.com/product-design/weight-watchers-light-rider-3d-printing-topology-optimisation-design/>
- [45] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. *SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges*. 2019, 183. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108137
- [46] How 3D Printed Lattice Structures Improve Mechanical Properties. In: *3D printing* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/tips-tricks/3d-printed-lattice-structures/>
- [47] RIVA, Leonardo, Paola GINESTRA a Elisabetta CERETTI. Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review. *The International Journal of Advanced*

*Manufacturing Technology*. 2021, 113(3-4), 649-671. ISSN 0268-3768.  
Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-06631-4

- [48] PAN, Chen, Yafeng HAN a Jiping LU. Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Applied Sciences*. 2020, 10(18). ISSN 2076-3417.  
Dostupné z: doi:10.3390/app10186374
- [49] TAO, Wenjin a Ming LEU. Design of lattice structure for additive manufacturing. *2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA)*. IEEE, 2016, 325-332. ISBN 978-1-5090-3467-3.  
Dostupné z: doi:10.1109/ISFA.2016.7790182
- [50] Tutorial: Optimizing Lattice. In: *Altair Inspire* [online]. [cit. 2022-04-02].  
Dostupné z: [https://2021.help.altair.com/2021.2/inspire/en\\_us/topics/inspire/tutorials/tut\\_lattice\\_c.htm#tut\\_lattice\\_c](https://2021.help.altair.com/2021.2/inspire/en_us/topics/inspire/tutorials/tut_lattice_c.htm#tut_lattice_c)
- [51] YILDIZ, Ali, Ulaş KILIÇARPA, Emre DEMIRCI a Mesut DOĞAN. Topography and topology optimization of diesel engine components for light-weight design in the automotive industry. *Materials Testing*. 2019, 61(1), 27-34. ISSN 2195-8572. Dostupné z: doi:10.3139/120.111277
- [52] PONGINAN, Rahul. Finite Element Analysis With Inspire. In: *Altair University* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2015/10/Inspireanalysis.pdf>
- [53] ABS vs PETG: Which is Best For 3D Printing?. In: *3DSourced* [online]. [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/abs-vs-petg/>
- [54] Prusament PETG Jet Black 1kg. In: *Prusa3D* [online]. [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-petg-jet-black-1kg/#downloads>

[55] TECHNICKÝ LIST: Prusament PETG od Prusa Polymers. In: *Prusament* [online]. [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: [https://prusament.com/media/2020/05/PETG\\_TechSheet\\_CZ\\_22052020.pdf](https://prusament.com/media/2020/05/PETG_TechSheet_CZ_22052020.pdf)

# Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Velikost trhu s 3D tiskem celosvětově 2013-2021 (v miliardách amerických dolarů) [2], upraveno .....	8
Obrázek 2 Závislost nákladů na výrobním množství [4].....	10
Obrázek 3 Základní rozdělení aditivních technologií [4], upraveno.....	11
Obrázek 4 Porovnání principu SLS a MJF [9] , upraveno.....	12
Obrázek 5 Princip FDM [11].....	14
Obrázek 6 Princip APF [12].....	14
Obrázek 7 Princip MJ [13].....	15
Obrázek 8 Princip BJ [16].....	16
Obrázek 9 Princip DED s materiálem v podobě a) drátu, b) prášku [18] .....	17
Obrázek 10 Porovnání technologií SLA a) a DLP b) [21].....	18
Obrázek 11 Princip SL [23].....	19
Obrázek 12 Přejechy prvků a) spojených, b) nespojených [25] .....	21
Obrázek 13 Agregované struktury a) ostrovy, b) převisy, c) hromadění materiálu [25] .....	21
Obrázek 14 Jednotlivé případy návrhových pravidel pro hrany [25].....	21
Obrázek 15 Závislost délky díry na tloušťce a výšce Pro technologii SLS [25] .....	22
Obrázek 16 Vliv orientace vůči tisku na design součásti [26].....	23
Obrázek 17 Rozdělení strukturální optimalizace: a) optimalizace velikosti, b) optimalizace tvaru, c) topologická optimalizace [29].....	24
Obrázek 18 Topologická optimalizace nosníku, (a) původní design, (b) optimalizovaný design [32].....	26
Obrázek 19 Zobrazení rozdílu v hodnotě proměnné $\rho(e)$ [33], upraveno .....	27
Obrázek 20 Proces topologické optimalizace, [29] upraveno.....	30
Obrázek 21 Příklad jednotlivých tvarů prvků [36] .....	31
Obrázek 22 Rozložení napětí na ojnici [37] .....	31
Obrázek 23 Problém vzniklý během topologické optimalizace [27].....	32

Obrázek 24 Porovnání konstrukce s podpěrami (a) a samopodpůrné konstrukce (b) [38].....	34
Obrázek 25 Vývoj designu součásti pro automobil BMW i8 Roadster [1].....	35
Obrázek 26 Proces topologické optimalizace držáku antény pro satelit Sentinel [40], upraveno .....	36
Obrázek 27 Vytisknutý držák antény pro satelit Sentinel [41].....	36
Obrázek 28 Rozdělení pánevní kosti podle oblasti odstranění [42] .....	37
Obrázek 29 Topologicky optimalizované pánevní protézy podle oblasti použití [42], upraveno.....	38
Obrázek 30 Budova národního kongresového centra v Dauhá [43] .....	38
Obrázek 31 Motocykl s topologicky optimalizovaným rámem, a) návrhový prostor rámu, b) topologicky optimalizovaná struktura, c) finální přemodelovaný design, d) sestavený motocykl [44].....	39
Obrázek 32 Mřížkové struktury s různými velikostmi buňek [46].....	40
Obrázek 33 Typy buňek v mřížkových strukturách [47] .....	41
Obrázek 34 Porovnání modelu před optimalizací (a) a po optimalizaci (b) [50] .....	42
Obrázek 35 Hrudní implantát s využitím mřížkové struktury [49] .....	43
Obrázek 36 3D tištěná komponenta z vrtulníku za použití mřížkových struktur [49] .....	44
Obrázek 37 3D tištěná hlava válce za použití mřížkových struktur [49].....	44
Obrázek 38 Tepelný štít motoru před topografickou optimalizací (vlevo) a po topografické optimalizaci (vpravo) [51].....	46
Obrázek 39 Olejová vana před topografickou optimalizací (vlevo) a po topografické optimalizaci (vpravo) [36].....	46
Obrázek 40 Rozměry původního modelu .....	47
Obrázek 41 Tvorba tvarových ploch pro lepší ergonomii.....	48
Obrázek 42 Finální podoba modelu před TO .....	48
Obrázek 43 Knihovna materiálů .....	49
Obrázek 44 Využití funkce „Partition“ (vlevo), definování návrhového prostoru (vpravo).....	50
Obrázek 45 Umístění podpěr (vlevo), model připravený na TO (vpravo).....	51

Obrázek 46 Nastavení topologické optimalizace .....	52
Obrázek 47 Topologická optimalizace s cílem maximalizace tuhosti při 10 % návrhového prostoru .....	54
Obrázek 48 Vizuelní zobrazení optimalizace s cílem minimalizace hmotnosti (vlevo), posunutí v rámci konstrukce (vpravo) .....	56
Obrázek 49 Rozložení napětí von Mises v rámci konstrukce při minimalizace hmotnosti (vlevo), místo s maximální hodnotou napětí (vpravo).....	56
Obrázek 50 Výsledná optimalizovaná konstrukce s cílem maximalizace tuhosti (vlevo), posunutí v rámci konstrukce (vpravo).....	58
Obrázek 51 Rozložení napětí von Mises v rámci konstrukce při maximalizaci tuhosti .....	58
Obrázek 52 Využití funkce „Wrap“ .....	59
Obrázek 53 Využití funkce „Bridge“ .....	60
Obrázek 54 Problémy vzniklé při přemodelování demonstrátoru .....	60
Obrázek 55 Maximální úroveň ostrosti (vlevo), žádná ostrost (vpravo).....	61
Obrázek 56 Porovnání optimalizované a přemodelované konstrukce .....	61
Obrázek 57 Posunutí v rámci přemodelovaného objektu (varianta 1).....	62
Obrázek 58 Maximální hodnota napětí von Mises pro přemodelovaný objekt (varianta 1).....	63
Obrázek 59 Přemodelovaný objekt (varianta 2).....	64
Obrázek 60 Kritické místo s maximální hodnotou napětí von Mises (varianta 2).....	64
Obrázek 61 Přemodelovaný objekt (varianta 2 – finální verze) .....	65
Obrázek 62 Posunutí v rámci přemodelovaného objektu (varianta 2 – finální verze).....	66
Obrázek 63 Kritické místo s maximální hodnotou napětí von Mises (varianta 2 – finální verze) .....	67
Obrázek 64 Porovnání přemodelovaných variant – pohled 1 .....	68
Obrázek 65 Porovnání přemodelovaných variant – pohled 2 .....	68
Obrázek 66 Porovnání přemodelovaných variant – pohled 3 .....	69
Obrázek 67 Porovnání hmotností optimalizovaných struktur a přemodelovaných variant .....	70



Obrázek 68 Porovnání posunutí a napětí von Mises optimalizovaných struktur a přemodelovaných variant.....	71
Obrázek 69 Original Prusa i3 MK3S.....	72
Obrázek 70 Orientace kostry demonstrátoru vůči tisku.....	73
Obrázek 71 Orientace opěrné a sedací desky vůči tisku.....	74
Obrázek 72 Selhání tisku bez podpěr .....	74
Obrázek 73 Příprava tisku s minimem podpěr .....	75
Obrázek 74 Selhání tisku s minimem podpěr .....	75
Obrázek 75 Příprava tisku – podpěry + raft.....	76
Obrázek 76 Příprava tisku sedací a opěrné desky .....	77
Obrázek 77 Vytisknutý model – pohled 1 .....	78
Obrázek 78 Vytisknutý model – pohled 2 a 3 .....	78
Obrázek 79 Průběh měření posunutí ve vybraném bodě .....	79
Obrázek 80 Porovnání hmotnosti vytištěného demonstrátoru s 3D modelem .....	80
Obrázek 81 Porovnání posunutí ve vybraném místě vytištěného modelu s výsledkem simulace .....	80

# Seznam uvedených tabulek

Tabulka 1 Rozměrová přesnost vybraných aditivních technologií [24].....	20
Tabulka 2 Vybraná návrhová pravidla pro technologie SLS, SLM a FDM [25]	22
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti materiálu ABS uváděné v softwaru Altair Inspire.....	49
Tabulka 4 Porovnání hmotností návrhového prostoru a zbylých částí.....	50
Tabulka 5 Nastavení topologické optimalizace .....	53
Tabulka 6 Sledované charakteristiky konstrukce [52].....	53
Tabulka 7 Výsledné hodnoty z topologické optimalizace s cílem minimalizace hmotnosti .....	55
Tabulka 8 Výsledné hodnoty z topologické optimalizace s cílem maximalizace tuhosti.....	57
Tabulka 9 Výsledné hodnoty sledovaných charakteristik přemodelovaného objektu (varianta 1).....	62
Tabulka 10 Výsledné hodnoty sledovaných charakteristik přemodelovaného objektu (varianta 2 – finální verze) .....	66
Tabulka 11 Porovnání základních vlastností materiálů ABS a PETG.....	72
Tabulka 12 Příprava tisku .....	73
Tabulka 13 Informace o tisku – kostra, bez podpěr.....	74
Tabulka 14 Informace o tisku – kostra, minimum podpěr .....	75
Tabulka 15 Informace o tisku – kostra, podpěry + raft.....	76
Tabulka 16 Informace o tisku – sedací a opěrná deska .....	77

# Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Význam
TO	Topologická optimalizace
PBF	Powder Bed Fusion
MJ	Material Jetting
VP	Vat Polymerization
ME	Material Extrusion
BJ	Binder Jetting
DED	Direct Energy Deposition
SL	Sheet Lamination
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
APF	Arburg Plastic Freeforming
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
SLS	Selective Laser Sintering
MJF	Multi Jet Fusion
EBM	Electron Beam Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting

PJ	PolyJet
MJP	MultiJet Printing
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PETG	Polyethylentereftalát-glykol
PS	Polystyren
PLA	Kyselina polymléčná
PET	Polyethylentereftalát
PMMA	Polymethylmethakrylát
CNC	Computer Numerical Control
FEA	Finite Element Analysis
CAD	Computer Aided Design
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
BESO	Bilinear Evolutionary Structural Optimization