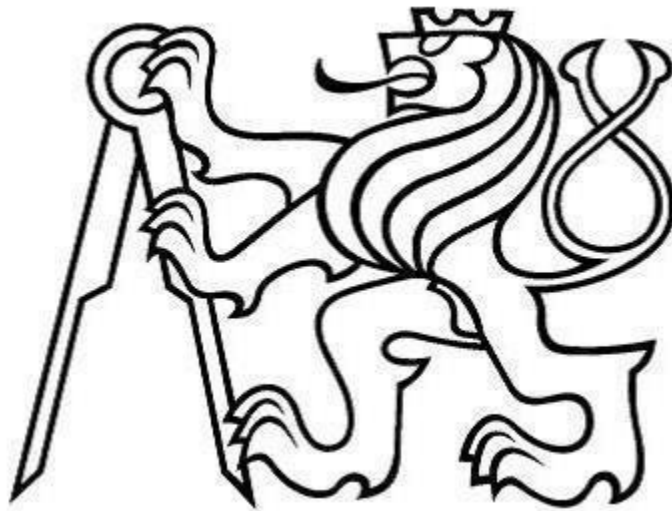


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**



Diplomová práce

Využití odlehčených struktur při výrobě
aditivními technologiemi

Praha 2020

Autor: Bc. Václav Knotek

Vedoucí: Ing. Lukáš Pelikán

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Knotek** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **460005**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití odlehčených struktur při výrobě aditivními technologiemi

Název diplomové práce anglicky:

Lattice Structures in Additive Manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Kovový 3D tisk.
2. Typy odlehčených struktur (lattice structure) a jejich využití.
3. Topologická optimalizace.
4. Návrh tělesa s využitím topologické a lattice optimalizace.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


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

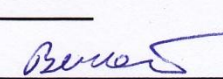
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

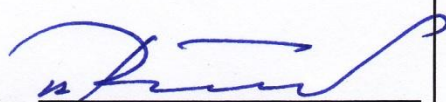
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Lukáš Pelikán
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.

23. 6. 2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

Podpis.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Lukáši Pelikánovi za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a všem, kteří mě při psaní diplomové práce podporovali.

Anotace

Diplomová práce se zabývá využitím odlehčených struktur při výrobě aditivními technologiemi. V teoretické části popisují metody aditivních technologií, detailněji poté metodu DMLS a pro ni používané materiály. V další části je uveden princip topologické optimalizace, na kterou navazuje blíže přiblížená optimalizace odlehčených struktur, její druhy, vyrobitelnost a použití v průmyslu. V praktické části je vymodelován nosník pomocí CAD softwaru, na kterém se demonstruje možnost použití topologické optimalizace. Po této optimalizaci následuje optimalizace odlehčených struktur, při které je vybírána nejvhodnější varianta provedení. Všechny typy nosníků jsou analyzovány a následně je vyhodnocováno, zdali optimalizované součásti dokážou zachovat mechanické vlastnosti při úbytku hmotnosti.

Klíčová slova: Aditivní technologie, DMLS, topologická optimalizace, optimalizace odlehčených struktur

Annotation

The diploma thesis deals with the use of lattice structures in the production of additive technologies. In the theoretical part is description of the methods of additive technologies, then in more detailed view description of the DMLS method and the materials used for it. The next part presents the principle of topological optimization, which is followed by a more detailed optimization of lattice structures, its types, manufacturability and use in industry. In the practical part the possibilities of topological optimization are shown on the modeled beam. This optimization is followed by the lattice structures optimization, in which the most suitable design variant is selected. All types of beams are analyzed and then it is evaluated whether the optimized components can maintain mechanical properties with weight loss.

Key words: Additive manufacturing, DMLS, Topology optimization, Lattice structure optimization

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Definice Aditivní technologie.....	9
2.1	Historie a vývoj aditivních technologií	10
2.2	Popis metod aditivní technologie	12
2.2.1	Fotopolymerizace.....	12
2.2.2	Tryskání materiálu (Material Jetting)	12
2.2.3	Tryskání pojiva (Binder Jetting)	13
2.2.4	Extruze materiálu	13
2.2.5	Slinování prášku	14
2.2.6	Laminování plechů	15
2.2.7	Direct energy deposition (DED)	15
3	Technologie kovového tisku	16
3.1	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	16
3.1.1	Pre-processing.....	16
3.1.2	Processing	16
3.1.3	Post-processing	18
3.1.4	Používané zdroje laserů	19
3.1.5	Výhody a nevýhody	19
3.1.6	Materiály	20
3.1.7	Porovnání mechanických vlastností materiálů	22
3.2	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	23
3.3	Electron Beam Melting (EBM)	24
4	Topologická optimalizace	25
5	Odlehčené struktury (Lattice structure)	27
5.1	Vyrobitelnost odlehčených struktur	28

5.2	Metody návrhu designu pro odlehčené struktury.....	29
5.2.1	Návrh buněčné struktury (Cell design).....	29
5.2.2	Vzorování (Pattern design).....	32
5.3	Kritéria pro volbu designu odlehčených struktur.....	35
5.4	Typy odlehčených struktur.....	36
5.4.1	Prutová struktura (strut-based).....	36
5.4.2	Trojité periodická povrchová struktura (TPMS).....	37
5.4.3	Skořepinové odlehčené struktury (Shell lattice structure).....	38
5.5	Využití odlehčených struktur.....	39
6	Topologická optimalizace a užití odlehčených struktur na vybrané součásti.....	45
6.1	Návrh součásti.....	49
6.2	Nastavení a simulace topologické optimalizace v programu Altair Inspire.....	55
6.3	Úprava součásti pro optimalizaci odlehčených struktur.....	67
6.4	Nastavení a simulace optimalizace odlehčených struktur v programu Altair Inspire.....	69
6.5	Analýza nosníku s odlehčenými strukturami.....	77
6.6	Porovnání obou typů nosníku při vyšším zatížení.....	79
7	Porovnání a zhodnocení.....	81
8	Závěr.....	84

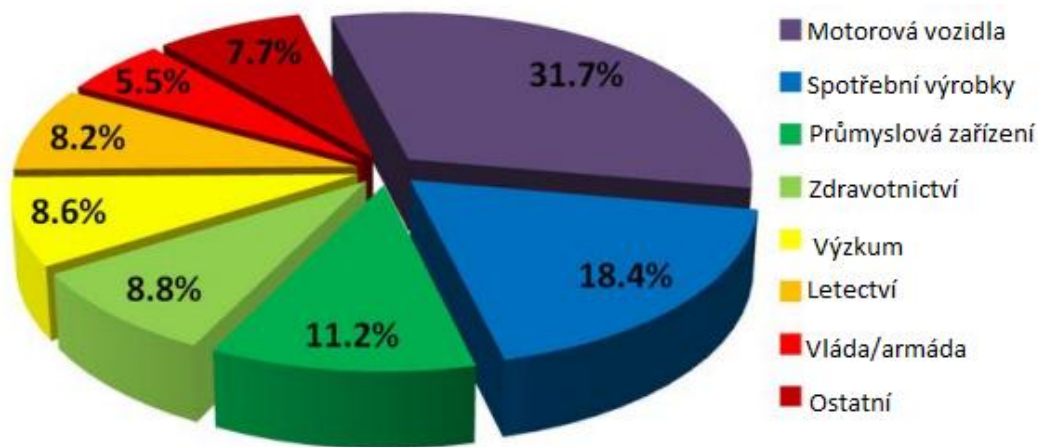
1 Úvod

3D tisk kovových součástí je ve srovnání s tiskem polymerních dílů poměrně nová a také drahá technologie. Zatímco z tiskáren, které tisknou plastové výrobky ať už pomocí extruze či fotopolymerizace, se stala ve větší míře kutilská záležitost a tiskárnu si může do svého vlastnictví pořídit téměř kdokoli, tak u tisku kovových součástí tento trend nastat ještě nemůže a to z důvodů vysoké pořizovací ceny, drahého provozu stroje, a nutnosti kvalifikované obsluhy. Z tohoto důsledku našel 3D tisk kovových součástí uplatnění v průmyslu při výrobě geometricky složitých součástí, které by bylo obtížné vyrábět jinou technologií. A právě požadavky na tvarově složité výrobky vyžaduje letecký, automobilový nebo biomedicínský průmysl, kde se hledá nejideálnější cesta, jak danou součást vyrobit a to z ekonomického i kvalitativního hlediska. K těmto účelům slouží topologická optimalizace, která je nám sice známa již několik let, ale také relativně nová optimalizace odlehčených struktur, při které jsou určité části dílu nahrazeny buněčnou strukturou a dojde tak k úspoře materiálu při dosažení dostatečných mechanických vlastností ve směru definovaného zatížení.

Cílem teoretické části je přiblížit aditivní výrobu kovových součástí, poukázat na výhody a nevýhody této technologie a popsat blíže používané materiály. V další části je úkolem popsat topologickou optimalizaci a následně optimalizaci odlehčených struktur, její využití, vyrobitelnost a možnosti designu. Následně v praktické části realizovat tyto optimalizace na vybrané součásti, vybrat nejvhodnější variantu a zjistit, zdali součást splňuje naše požadavky i po těchto optimalizacích. V úplném závěru realizovat samotný tisk těchto dílů a změřit, zdali snesou optimalizované součásti stejné zatížení jako původní díl.

2 Definice Aditivní technologie

Jelikož je to technologie aditivní, tak materiál přidáváme, na rozdíl od obrábění, kde materiál ubíráme. Aditivní technologie tedy znamená tvoření trojrozměrného objektu vrstvením roztaveného nebo částečně roztaveného materiálu na sebe. K tisku jsou použity různé materiály, jako je plast, kov, dřevo ale v dnešní době i jedlé látky, jako je čokoláda apod. Objekty jsou digitálně definovány pomocí 3D CAD softwaru, ve kterém se nejprve vytvoří požadovaný model a následně rozdělí na tenké vrstvy. Tato informace pak vede směr trysky nebo tiskové hlavy a nanáší či vytvrzuje materiál vrstvu po vrstvě. Po vychladnutí nebo vytvrzení materiálu, vznikne trojrozměrný objekt. V **grafu č. 1** lze vidět využití aditivních technologií v průmyslu. [23]



Graf č. 1 - Využití Aditivních technologií v průmyslu [23]

2.1 Historie a vývoj aditivních technologií

Počátkem 90. let se 3D tisk používal převážně jako rapid prototyping (RP). Prototyp umožňuje testovat a kontrolovat danou součást před zahájením její výroby. Rapid prototyping se vyznačuje rychlou výrobou prototypu, která může trvat několik hodin či dní, podle složitosti vyráběné součásti. Modely v RP se tvoří pomocí softwarového programu CAD, který definuje způsob výroby objektu. S používáním 3D tisku přišla na svět firma 3D systems a Messechutský technologický institut (MIT). [23]

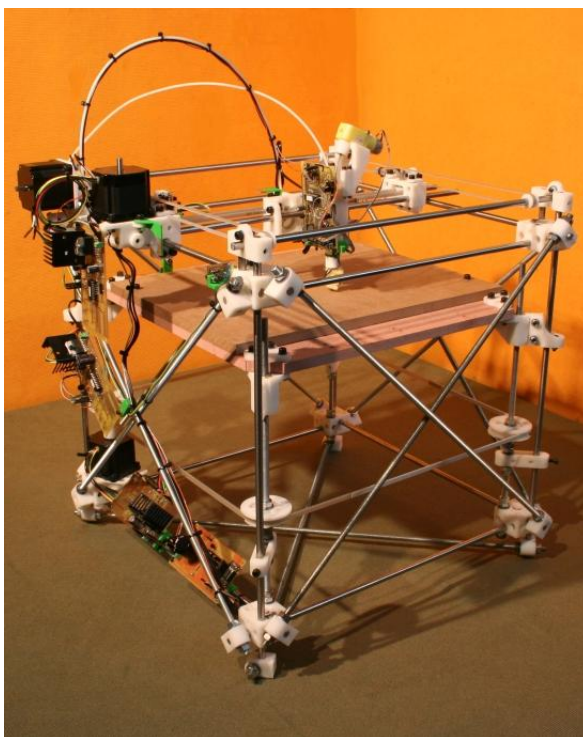
V roce 1986 si Charles Hull nechal patentovat technologii zvanou stereolitografie, při které se materiál vytvrzuje pomocí různých vlnových délek, ale nejčastěji je používáno známé UV záření. Princip metody spočívá v trojrozměrném laserovém tisku s použitím UV laseru a tekutého fotopolymeru. Zařízení dostupné veřejnosti, které dokázalo tisknout ve 3D formátu představil Hull na konci 90. let. Stroj nesl název **SLA-1**, a jednalo se o stereolitografický aparát, který se podobal nynějším 3D tiskárnám, i když se jako 3D tiskárna neoznačoval. [23]



Obr. 1 - Tiskárna SLA- 1[23]

V odvětví 3D tisku po dlouhou dobu vévodila firma 3D systems, do které patřil i Charles Hull. To je dokázáno i čísly, kdy například v roce 1996 prodala 600 SLA strojů po celém světě. Po nástupu konkurence na trh začaly vznikat nové technologie, a tím pádem byla představena technologie SLS Carlem Deckardem v roce 1988 na univerzitě v Texasu, při které je nahrazena pryskyřice práškovým materiálem. Mezitím spoluzakladatel společnosti Stratasys INC. Scott Crump podal patent na jednu z nejvyužívanějších technologií 3D tisku FDM (fusion deposition modeling). V roce 1993 si Massachusettský technologický institut nechal patentovat technologii trojrozměrných technik. Firma 7 Corporation, která koupila licenci právě na tuto technologii, začala vyvíjet stroje pro 3D tisk. Patenty ale v roce 2003 vypršely a začaly se objevovat nové technologie využívající fotopolymer.[23]

Přelom v oblasti 3D tisku nastal v roce 2005, kdy Andrew Bowyer založil projekt RepRap s myšlenkou vyrobit 3D tiskárnu, která by vytiskla většinu svých součástí. Projekt byl veden jako Open Source, což znamenalo, že na vývoj tiskárny mohl přispět jakýkoliv nadšenec z celého světa. Z tohoto projektu vzešla v roce 2008 tiskárna s názvem Darwin, viz obr. 2, která splňovala všechna požadovaná kritéria samo-replikační tiskárny. [23]



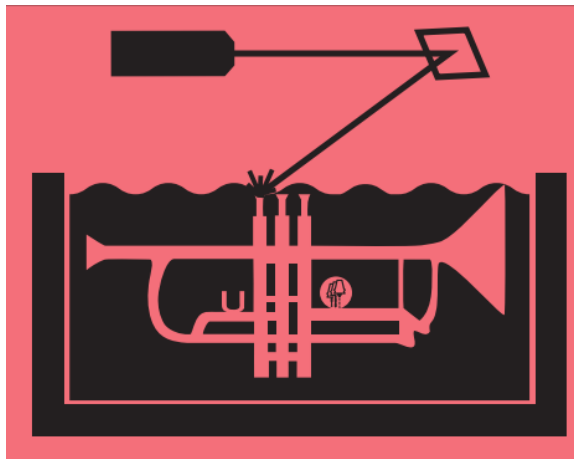
Obr. 2 - RepRap Darwin tiskárna [23]

2.2 Popis metod aditivní technologie

Americká asociace pro testování materiálu vydala standardy, které rozřazují aditivní výrobu do sedmi kategorií.

2.2.1 Fotopolymerizace

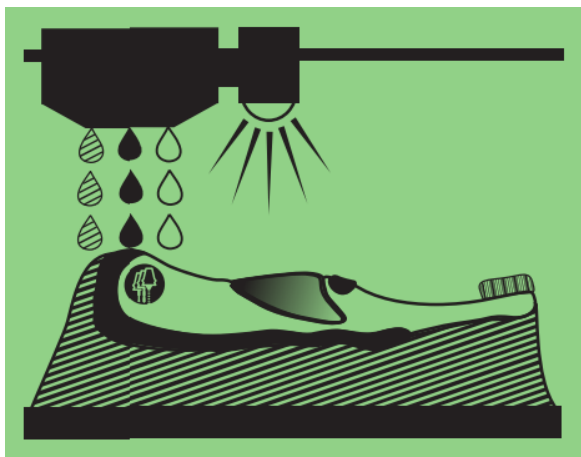
Fotopolymerizace využívá tekutou pryskyřici, z které je model tvořen vrstvou po vrstvě. Vytvrzování probíhá pomocí ultrafialového záření, přičemž se platforma pohybuje směrem nahoru, a po každém vytvrzení se vytvoří nová vrstva. Do této kategorie spadají metody SLA (stereolitografie), DLP (digital light processing) a CDLP (continuous digital light processing). [1]



Obr. 3 - Schématické zobrazení metody Fotopolymerizace [25]

2.2.2 Tryskání materiálu (Material Jetting)

Metoda je často srovnávána s klasickým 2D inkoustovým tiskem. Material Jetting pracuje se stovkami trysek, které nanášejí tekutý materiál ve formě kapiček na pracovní podložku a tvoří tak výrobek vrstvou po vrstvě, jelikož jsou kapičky ihned po nanesení vytvrzeny UV zářením. Složitější výrobky vyžadují podpůrnou konstrukci, která je tisknuta současně s výrobkem a je složena z materiálu, který je lehko odstranitelný v následujícím postprocessingu. Pro tryskání materiálu jsou používány metody jako DOD (Drop on Demand), NPJ (Nano Practice Jetting) či MJ (Material Jetting). [1][2]



Obr. 4 - Schématické zobrazení metody Material jetting [25]

2.2.3 Tryskání pojiva (Binder Jetting)

Při Binder jetting se nanáší pojivo na tenké vrstvy práškového materiálu. Práškový materiál je na bázi keramiky, skla nebo například kovu. Tryska se pohybuje po tiskové ploše a nanáší kapičky pojiva. Poté, co je vrstva kompletní se pracovní plocha posune směrem dolů a nanese se nová vrstva práškového materiálu. Proces se opakuje, dokud se nevytvoří požadovaný výrobek. Po dokončení tisku je třeba součást řádně mechanicky očistit. [2]

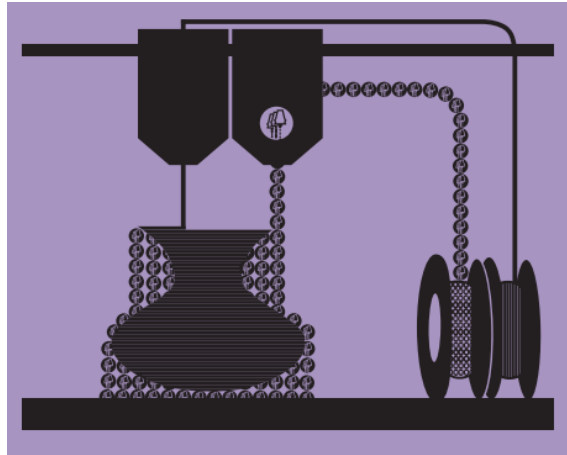


Obr. 5 - Schématické zobrazení metody Binder jetting [25]

2.2.4 Extruze materiálu

Nejrozšířenější metoda aditivních technologií. Materiál v tuhém stavu je přiveden do trysky, která se pohybuje podle typu stroje a to buďto v ose X a Y, nebo pouze ve směru osy Z, přičemž další pohyby koná podložka. Zde je materiál nataven a dále tlačěn skrz trysku na pracovní plochu. Tryska roznese materiál na předem zadané souřadnice a po

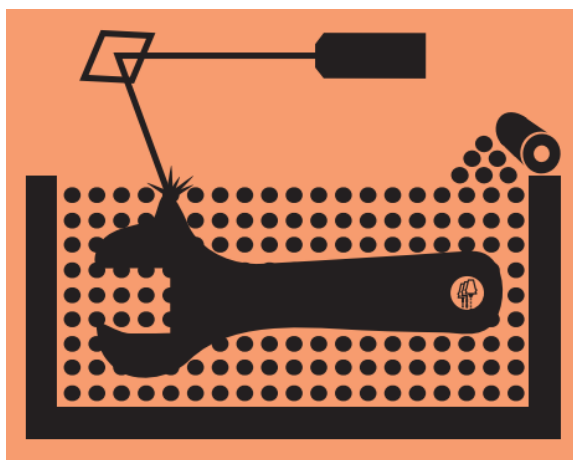
dokončení jedné vrstvy se posune o souřadnici Z nahoru a pokládá další vrstvu na již zaschlou vrstvu předešlou. Proces se opakuje, dokud není vytvořen požadovaný tvar. Metoda extruze se nazývá FDM neboli Fused Deposition Modeling. [1][2]



Obr. 6 - Schématické zobrazení metody Extruze [25]

2.2.5 Slinování prášku

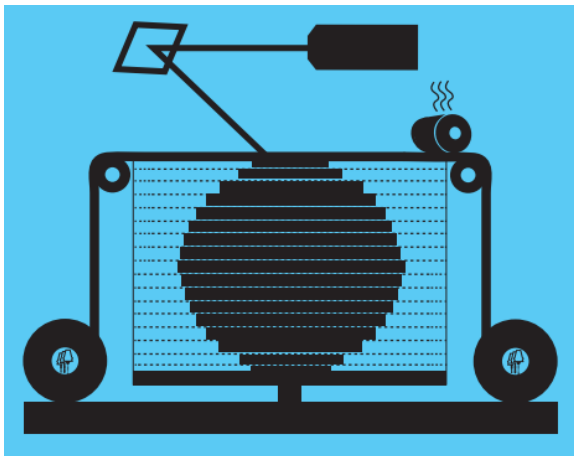
Technologie slinování prášku vytváří výrobky za použití tepelného zdroje, který indukuje fúzi slinování nebo tavení mezi částicemi plastu nebo kovu a tvoří tak strukturu vrstvu po vrstvě. Jelikož se při posunu o každou vrstvu nanese prášek na celý pracovní prostor, tudíž je po dokončení slinování výrobek zapouzdřen ve zbytku prášku a je nutné ho mechanicky očistit. Pro slinování prášku se používají buď laserové, nebo elektronové paprsky. Používané metody jsou SLS (Selective Laser Sintering), DMLS (Direct Metal Laser Sintering), EBM (Electron Beam Melting). [2]



Obr. 7 - Schématické zobrazení metody Slinování prášku[25]

2.2.6 Laminování plechů

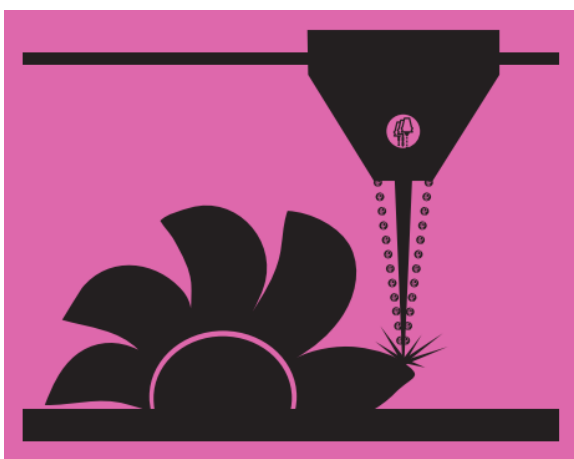
Pásy plechů jsou pokládány na sebe a spojovány pomocí ultrazvukového svařování. Po dokončení je třeba postprocesingu ve formě obrábění. Používané metody jsou UAM (Ultrasonic additive manufacturing). [1]



Obr. 8 - Schématické zobrazení metody Laminování plechů [25]

2.2.7 Direct energy deposition (DED)

Při metodě DED laserová hlava nataví materiál, který je přiváděn tryskou buď ve formě prášku, či v drátové podobě. Laser vytvoří svarovou lázeň, do níž je přiváděn materiál, kde se nataví a poté ztuhne. Tato metoda lze kombinovat i s obráběcím strojem, kdy se po nanesení každé jedné vrstvy kontura obrobí, aby bylo dosaženo přesnějšího výrobku. Obvykle se používají kovové materiály. [2]



Obr. 9 - Schématické zobrazení metody DED [25]

3 Technologie kovového tisku

3.1 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Hlavním cílem ve vývoji aditivních technologií bylo vytvořit komplexní třírozměrný model přímo z kovového prášku prostřednictvím CAD modelu. Sinterování laserem je právě jedna z metod 3D tisku, ve které je možné kovový prášek použít a můžeme ji rozdělit na přímé a nepřímé sinterování laserem. Nepřímá sinterizace nemá v průmyslu tak široké uplatnění kvůli nízké hustotě uspořádání struktury a nezbytnému postprocesingu po samotné výrobě. [6]

Přímá metoda sinterizace, neboli DMLS, je aditivní technologie vyvinuta společností RPI (Rapid Product Inovations) a EOS (Electro Optical Systems). Je to laserová technologie, při které je kovový prášek umístěn v nádobě s pracovní deskou, kde je poté finální výrobek tvořen vrstvu po vrstvě pomocí uživatele zadanými 3D daty. [5][6]

3.1.1 Pre-processing

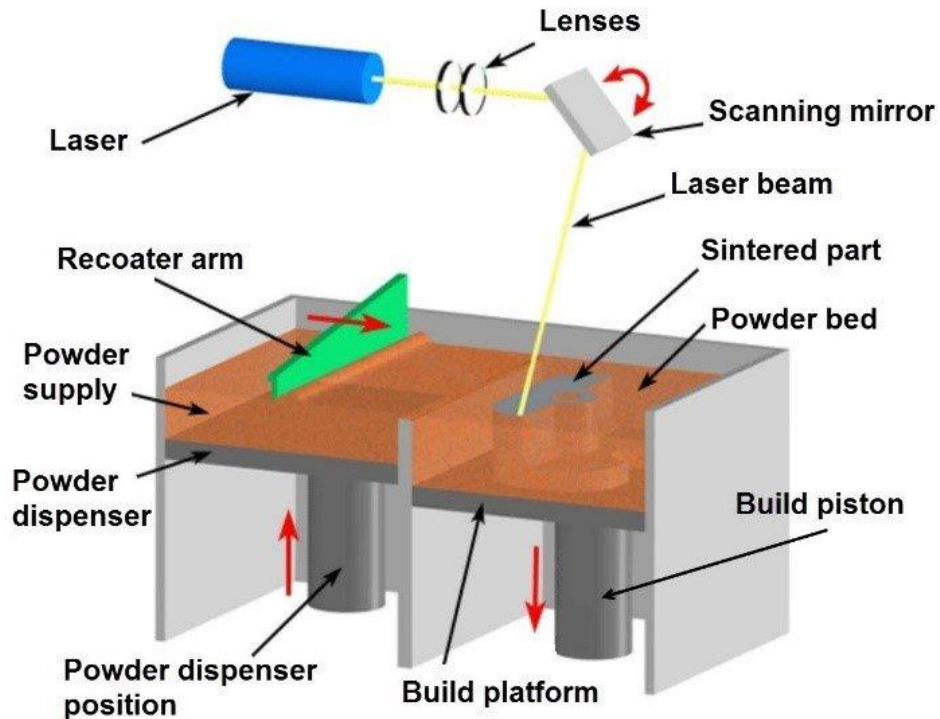
Abychom byli schopni vyrobit fyzický 3D objekt, je nutné nejdříve vytvořit CAD model tohoto objektu. Následně je model převeden do formátu STL, což znamená, že je povrch modelu rozčleněn na hustou trojúhelníkovou síť. V posledním kroku je STL soubor rozřezán na vrstvy a jsou zde nastaveny všechny parametry tisku nezbytné pro úspěšné vytvoření součásti při následném tisku. [7]

Před samotným procesem je nutné připravit pracovní prostor stroje. Pracovní deska se musí ofrézovat, očistit a odmagnetovat kvůli lepší přilnavosti prvních vrstev. Při použití reaktivních kovů, jako je hliník či titan, je potřeba celou pracovní komoru zaplavit inertním plynem. V dalším kroku se doplní kovový prášek do nádoby a nastaví se počáteční bod na pracovní desce. [7]

3.1.2 Processing

Po nastavení všech požadovaných parametrů je na řadě samotný proces výroby. Dávkořač určí potřebné množství prášku, které rozprostře stěrač po pracovní desce na požadovanou tloušťku vrstvy. Práškový materiál bez jakéhokoliv tavidla nebo pojiva je slinován pomocí vysoce výkonného laserového paprsku ve vrstvách pohybujících se mezi 20-40 μm . Po dokončení jedné vrstvy se pracovní deska posune směrem dolů, a stěrač nanese novou vrstvu nespěčeného prášku na již dokončenou vrstvu. Proces DMLS nevyžaduje žádné dodatečné slinování, jelikož díly jsou vyráběny s cca 95% hustotou v

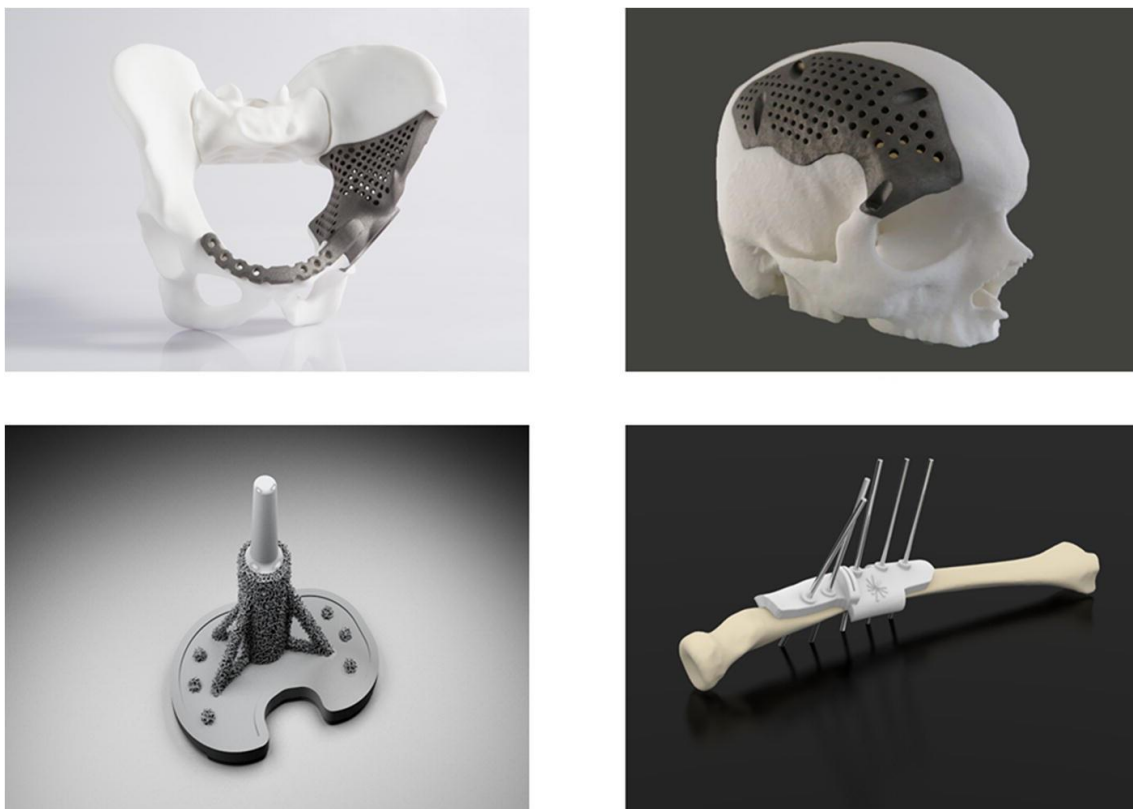
závislosti na slinovaném materiálu. V průběhu procesu je u složitějších dílů nutné ukotvení součástí pomocí podpůrné konstrukce. Ta je fixována jak k pracovní desce, tak k vyráběnému dílu, a slouží k podpoře mostů a převisů, aby nedošlo ke zboření výrobku. Zároveň také odvádí teplo vzniklé při slinování a urychluje tak chladnutí kovu.[5][8]



Obr. 10 - Schématické zobrazení DMLS metody [27]

Pro větší část používaných materiálů je pracovní komora vyplněna dusíkem, z důvodu ochrany vyráběných součástí před oxidací. Pro vyplnění se nepoužívá plněný dusík, jelikož generátor integrovaný ve stroji je zásobován tlakovým vzduchem, ze kterého pouze odděluje molekuly dusíku. Při použití titanu jako práškového materiálu se využívá namísto dusíku argon. [8]

DMLS metoda dokáže produkovat tenkostěnné výrobky s vysokou jakostí povrchu a mechanickými vlastnostmi. Proto je tato technologie často používána na výrobu složitých, plně funkčních kovových součástí, které by bylo obtížné vyrábět klasickými metodami. [5]



Obr. 11 - Možnosti využití DMLS metody [28]

3.1.3 Post-processing

Po dokončení výrobního procesu je vyjmuta pracovní deska ze stroje a odstraní se z ní hotová součást. Z 98% je nespečený prášek využitelný pro další výrobu, a proto je odsán zpátky do zásobníku. Před odejmutím dílu z pracovní desky je ve většině případů nutné tepelné zpracování, a to kvůli velkému vnitřnímu pnutí, které je způsobeno nerovnoměrným chladnutím během procesu stavby. Po vyžihání celé desky i s podporami, které drží díl a brání jeho zkroucení, se díl odřízne pomocí pily nebo drátořezu a odstraní se podpůrné konstrukce. Dále lze výrobek obrábět klasickým způsobem, jako běžný kovový polotovár. Poté můžeme použít dokončovací operace jako např. tryskání, broušení, leštění, kuličkování apod. [8]

3.1.4 Používané zdroje laserů

Od začátku používání DMLS metody byly nejčastěji využívány CO₂ a Nd:YAG lasery, které jsou také využívány na jiné technologické operace jako např. řezání laserem či svařování laserem. Postupem času, kdy jsou požadavky na kvalitu povrchu vyšší, začaly být tyto typy laserů limitujícím faktorem. Proto byly vyvíjeny lasery, které dokážou zajistit vyšší kvalitu laserového paprsku. Nejnovější technologie DMLS, jako například EOSINT M 270, používají ytterbiový vláknový laser, který dokáže zaostřit paprsek na průměr 100 μm při pracovní ploše 250mm x 250mm, což při výkonu 200W odpovídá intenzitě výkonu 25 kW/mm². Ytterbiový laser má oproti CO₂ laseru kratší vlnovou délku, a proto je lépe absorbován kovy, což vede k vyššímu výkonu a tím pádem ke kratším výrobním časům. [9]

3.1.5 Výhody a nevýhody

Tabulka 1 - Seznam výhod a nevýhod metody DMLS [24]

Výhody	
+	Vytváření geometricky složitých součástí. (Použití tam, kde nemohu použít běžnou výrobní metodu)
+	Výrobky s dobrými mechanickými vlastnostmi
+	Nízká spotřeba materiálu (Vysoká recyklace materiálu)
+	Možnost použití topologické optimalizace a odlehčených struktur (Snížení hmotnosti při zachování pevnosti)
+	Automatizovaný stroj
+	Kompatibilní s dalšími výrobními procesy (Svařování, vrtání, broušení)
Nevýhody	
-	Vysoké pořizovací náklady (Stroj, materiál)
-	Velikostní omezení výrobků
-	Nutnost dokončovacích operací

3.1.6 Materiály

Pro přehledný popis používaných materiálů při metodě DMLS bylo využito podkladů od společnosti EOS, která má vysokou úroveň materiálových znalostí a komplexní portfolio sofistikovaných kovů pro přímé laserové slinování kovu. Pro výrobu kovových komponentů je možno použít širokou škálu kovových prášků od hliníků, vysokopevnostní oceli až po titan či slitiny niklu a kobaltu. [10]

Aluminium AlSi10Mg

AlSi10Mg je typická slitina pro odlévání s dobrými licími vlastnostmi a používá se pro odlitky s tenkými stěnami a složitou geometrií. Legující prvky křemík a hořčík vedou k vysoké pevnosti a tvrdosti. Slitina má také dobré dynamické vlastnosti, a proto se používá pro součásti vystavené vysokému zatížení. Slinované díly mohou být obráběny, svařovány, tryskány či leštěny. Nepoužitý prášek lze znovu použít. [11]

Využití v praxi:

- Přímá výroba funkčních prototypů, malosériová výroba, zakázková výroba
- Produkty vyžadující kombinaci dobrých tepelných vlastností s nízkou hmotností součástí (Letectví a kosmonautika, motosport). [11]

CobaltChrome MP1

Z materiálu CobaltChrome MP1 se produkují výrobky ze superslitiny kobalt-chrom-molybden. Tato třída superslitiny se vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi (pevnost, tvrdost), odolností proti korozi a vysokým teplotám. [11]

Využití v praxi:

- Biomedicínské aplikace (Zubní a lékařské implantáty)
- Díly vyžadující výborné mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách (500-1000°C) a s dobrou odolností proti korozi. [11]

MaragingSteel MS1

Legovaná vysokopevnostní ocel ve formě jemného prášku. Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a je snadno tepelně zpracovatelný pomocí jednoduchého procesu tepelného kalení za účelem získání vynikající tvrdosti a pevnosti. [11]

Využití v praxi:

- Výroba nástrojů jako např. formy pro vstřikování plastů, tlakové lití slitin lehkých kovů apod.
- Vysoce namáhané průmyslové součásti (Letectví a kosmonautika, motosport).[11]

NickelAlloy IN625

Žárovzdorná slitina niklu a chromu NickelAlloy IN625 se vyznačuje vysokou pevností v tahu, odolností proti creepu do teploty 700°C a přetržení. Dále disponuje dobrou korozní odolností v různých korozivních prostředích. [11]

Využití v praxi:

- Části leteckých turbínových motorů.
- Výfukové a palivové systémy
- Chemické a procesní průmyslové díly [11]

StainlessSteel GP1

Legovaná nerezová ocel ve formě jemného prášku je charakterizovaná dobrou korozní odolností a dobrými mechanickými vlastnostmi zejména pak vyniká vysokou tažností při zpracování laserem. [11]

Využití v praxi:

- Funkční prototypy, malosériová výroba, zakázková výroba.
- Součásti vyžadující vysokou korozní odolnost, sterilitu povrchu atd.
- Díly s požadovanou vysokou houževnatostí a tažností. [11]

Titanium Ti64

Lehká slitina Ti6AL4V je poskytuje vynikající mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi v kombinaci s nízkou hmotností a biokompatibilitou. [11]

Využití v praxi:

- Funkční prototypy, malosériová výroba, zakázková výroba.
- Díly vyžadující kombinaci výborných mechanických vlastností při zachování nízké hmotnosti (Komponenty v letectví, kosmonautice a motosportu)
- Biomedicínské implantáty

3.1.7 Porovnání mechanických vlastností materiálů

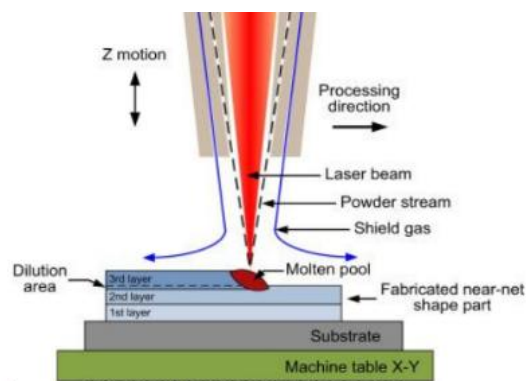
V tabulce č. 2 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti ve vertikálním směru Z. Hodnoty byly měřeny po výrobním procesu měřeného vzorku bez tepelného zpracování. [11]

Tabulka 2 - Porovnání mechanických vlastností předem zmíněných materiálů [11]

	Mez pevnosti v tahu [MPa] (Ve směru Z)	Mez kluzu [MPa] (Ve směru Z)	Prodloužení při přetržení [%] (Ve směru Z)	Tvrdość (Ve směru Z)
AlSi10Mg	340	250	1,5	97 HBW
CobaltChrome MP1	1200	1060	24	35 - 45 HRC
MaragingSteel MS1	1100	1000	8	33 - 37 HRC
NickelAlloy IN625	900	615	42	30 HRC
StainlessSteel GP1	980	500	25	230 HV
Titanium Ti64	1150	1030	11	400 - 430 HV

3.2 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

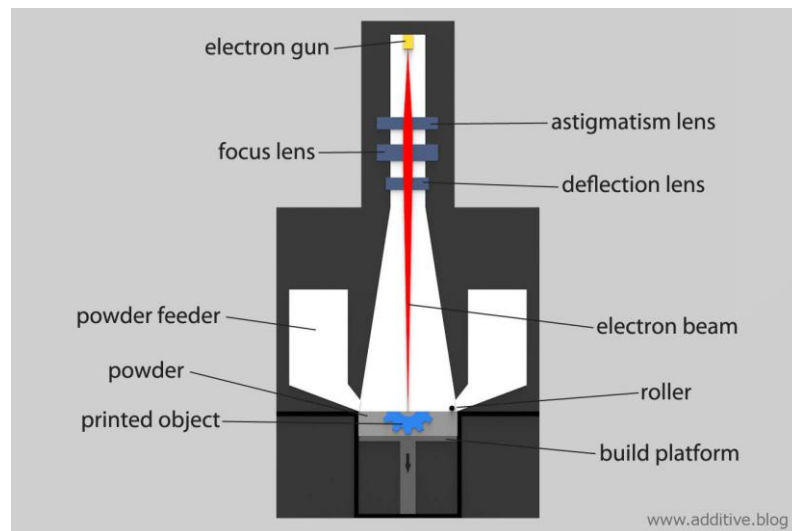
Laser Engineered Net Shaping je typ aditivní technologie, který se v největší míře používá pro kovové materiály. Při této metodě se počítačem řízená hlava pohybuje nad pracovní plochou a práškový materiál je přiváděn do trysek, které jsou koaxiální s laserovou hlavou. Tlakem vzduchu nebo inertního plynu je prášek vytlačován z trysek do ohniska laseru a po dosažení pracovního povrchu je roztaven působením právě jistého laserového paprsku. Podobně jako u metody DMLS je z 99% zaručena výroba fungujících výrobků, které mají dobré mechanické vlastnosti. LENS metodou lze dosáhnout složitých geometrických útvarů, u kterých je ale z velké části potřeba podpěrných konstrukcí, aby nedošlo k deformaci výrobku během výrobního procesu. Přísun materiálu za pomoci vzduchu nebo inertního plynu způsobuje ochlazování dříve nanesených vrstev, což vede ke zlepšení integrity tištěné struktury. Pro metodu LENS lze použít kovové materiály vysokých pevností, jako je například nerezová ocel, nitinol (slitina niklu a titanu), ale také měkké materiály jako hliník či měď. Právě hliník s mědí mají vysokou odrazivost, což způsobuje potíže při dopadu laserového paprsku na materiál, ale v případě této technologie jsou tyto negativní účinky minimalizovány. Parametry ovlivňující kvalitu výrobního procesu jsou tedy odrazivost materiálu, rychlost přísunu práškového materiálu, teplota tavení materiálu a výkon laseru. Nevýhoda aditivní technologie LENS oproti DMLS metodě je nižší geometrická přesnost výrobků, která vyžaduje postprocessing například ve formě vysokorychlostního obrábění. V některých případech je třeba využít tepelného zpracování. Největší výhodou této technologie je taková, že materiál můžeme nanášet přesně do míst, které je třeba vyplnit. To znamená, že uplatnění najde především u drahých slévárenských forem nebo u kovacíh zápustek, kde dojde k porušení stěny například ve formě trhliny. [3]



Obr. 12 - Schéma metody LENS [3]

3.3 Electron Beam Melting (EBM)

Při metodě EBM je pracovní plocha podobná jako při DMLS metodě tzn., kovový prášek je nasypán v nádobě, ve které je umístěna pracovní deska, a je po ní rozprostírán pomocí stěrače. Obvyklá tloušťka vrstvy naneseného prášku činí 50 - 200 μm . Namísto laserového paprsku je zde použit elektronový paprsek, který funguje jako zdroj tepla pro roztavení prášku. Elektronový paprsek je generován v elektronovém dělu, poté zrychlen napětím o velikosti 60kV, zaostřen elektromagnetickými čočkami a usměrněn skenovací cívkou na pracovní desku. Nejprve je pracovní deska předehřátá rozostřeným elektronovým paprskem, který několikrát po sobě pracovní desku naskenuje. Pro materiály vysoké pevnosti jako je například Ti-6Al-4V se používá proud o velikosti 30mA, skenovací rychlost 10^4 mm/s a teplota paprsku vyšší než 700°C . Při měkčích materiálech, jako je např. měď, se teplota pohybuje okolo 550°C . Aby se zajistilo úplné roztavení prášku, proud paprsku a rychlost skenování se během procesu sníží na 10^2 mm/s a 5-10 mA. Toto všechno nastavení vede nejen k natavení prášku, ale také ke slinování částic prášku. Jako je tomu u DMLS, pracovní deska se po dokončení vrstvy pohybuje směrem dolů a pomocí stěrače je dodán nový kovový prášek. Proces slinování horní vrstvy prášku a následné posouvání pracovní desky směrem dolů se opakuje, dokud není součást hotova. [4]

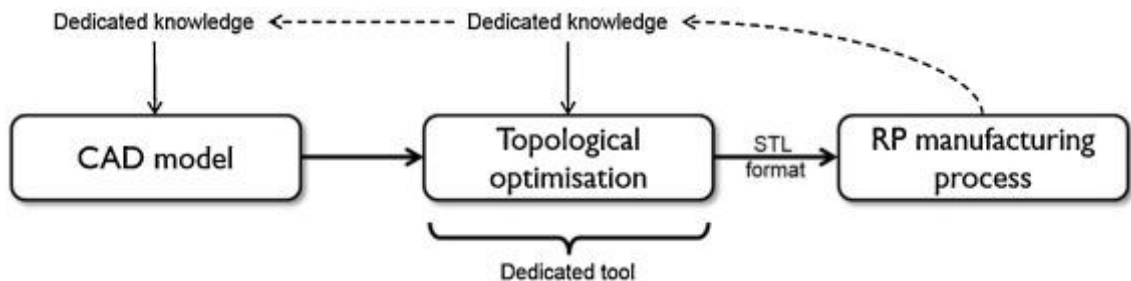


Obr. 13 - Schéma EBM metody [26]

4 Topologická optimalizace

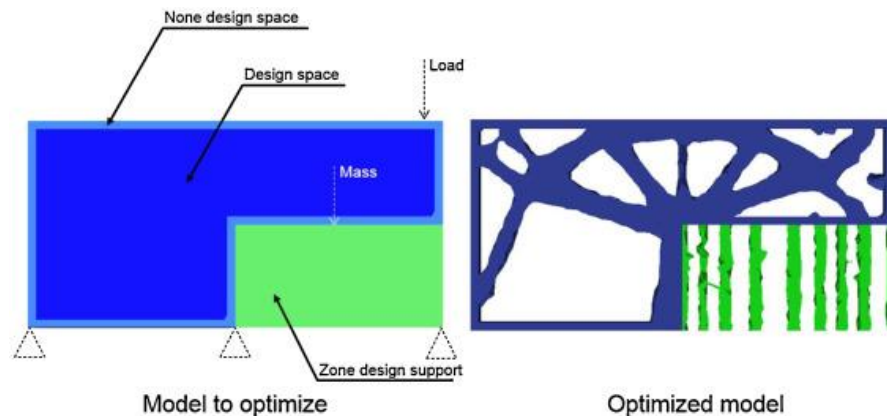
V poslední dekádě rapidně roste využití optimalizované struktury. Fáze designu produktu zabere pouze 5% času, ale představuje 75% z vynaložených nákladů v celkovém vývoji daného produktu, a proto je integrace optimalizace v raných fázích projektu velmi důležitá. Využití numerické simulace k optimalizaci produktů se stalo nezbytným při testování odlišných forem, materiálů, ale také pro lepší pochopení příslušných fyzikálních jevů. [12]

Topologická optimalizace znamená snížení hmotnosti součásti při zachování podmínek, jako jsou pevnostní namáhání v zadaných směrech a vyrobitelnost. To znamená, že se optimalizace snaží najít ideální rozložení materiálu v zadaném objemu součásti a tím určit nejvhodnější rozložení silových napětí v celé konstrukci. Tato kategorie optimalizace je vhodnou metodou při fázi návrhu nové součásti, jelikož se dají zkoumat nové koncepty řešení u složitějších součástí. [12] [13] [14]



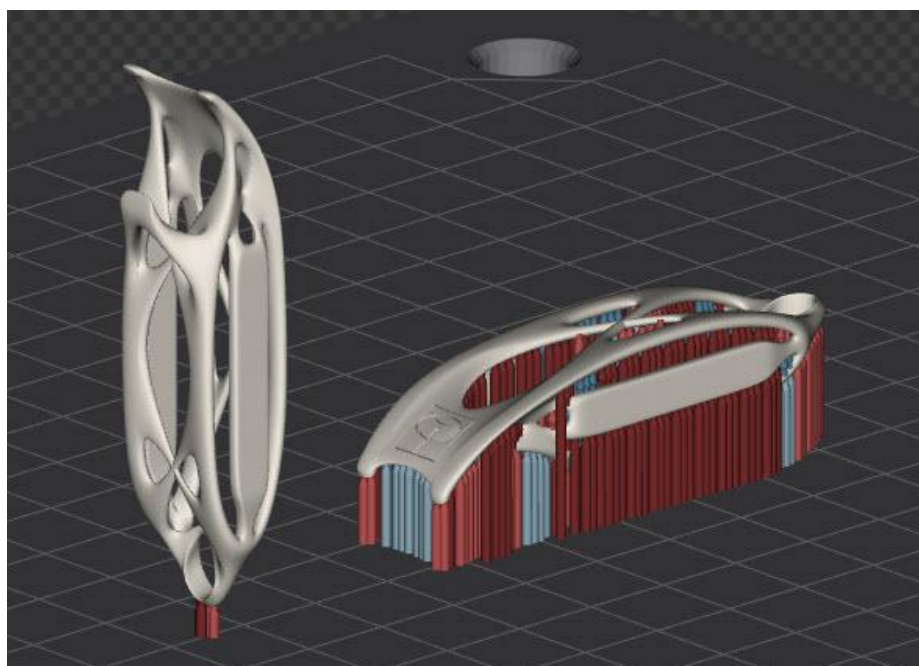
Obr. 14 - Schématický postup topologické optimalizace [12]

Při použití výrobního procesu aditivní technologie se topologicky navrhuje tzv. bionická konstrukce. Při tomto označení konstrukce se vzhled dílu podobá biologické struktuře, viz obr. 15. [13]



Obr. 15 - Porovnání součásti před a po Topologické optimalizaci [12]

Při správném umístění bionické konstrukce do pracovní komory není zpravidla nutné vytvářet podpůrnou konstrukci, jelikož je bionická struktura navržena tak, aby vytištěná vrstva sloužila jako podpora pro další tisknutou vrstvu. Na obr. 16 jsou vidět dvě rozdílná umístění součásti v pracovní komoře. Součást ve vodorovné poloze vyžaduje tisk podpůrných konstrukcí, což znamená následný postprocessing ve formě obrábění, otryskávání, omílání, broušení, leštění apod. Při uložení součásti ve svislé poloze dokáže bionická struktura tisknout díl bez podpor. Ty jsou nutné pouze ve spodní části, kde se spojuje součást s pracovní podložkou. [13]

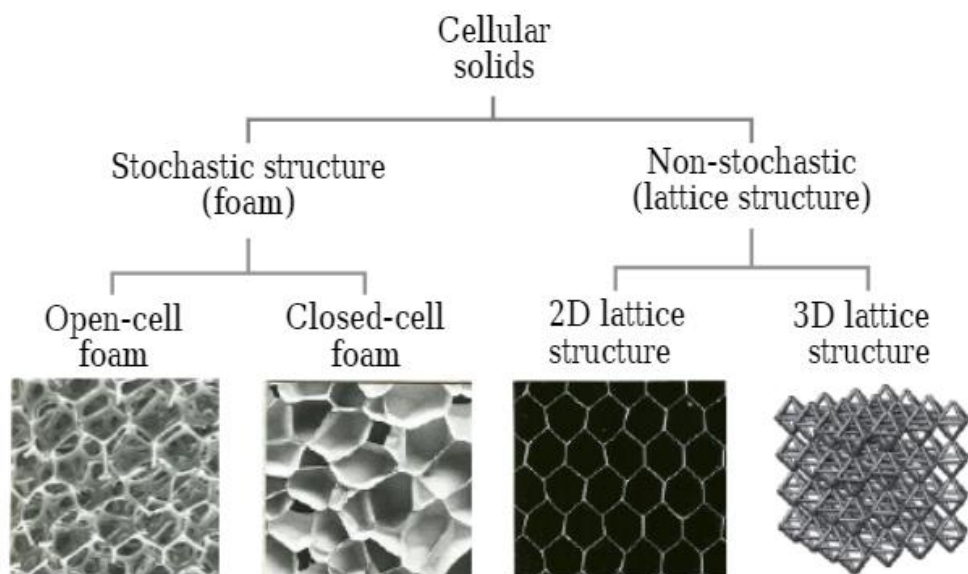


Obr. 16 - Uložení součásti s bionickou strukturou ve svislé (vlevo) a vodorovné poloze (vpravo) [13]

5 Odlehčené struktury (Lattice structure)

Odlehčené struktury jsou otevřené buněčné struktury s nepřetržitou sítí příhradových konstrukcí. Tyto příhradové konstrukce mohou být různě uspořádány pro dosažení odlišných typů odlehčených struktur. Díky své nízké hmotnosti a vysoké nosnosti jsou odlehčené struktury vhodné jako strukturální komponenty v automobilovém, leteckém a zdravotním průmyslu. Otevřená buněčná struktura má velkou plochu vystavovanou vnějšímu prostředí, a tudíž jsou účinné při přenosu tepla ze součásti. [15]

Unikátní schopnost, kterou aditivní technologie poskytuje, je právě možnost výroby součástí s odlehčenými strukturami. Pro výrobu odlehčených struktur bylo zavedeno mnoho procesů, u kterých byla zkoušena jejich zpracovatelnost. Některé z těchto procesů využívají specializovaných softwarových programů k přeměně koncepční technologie v praktické využití tištěných dílů. V potaz se musí brát mechanické chování při výběru materiálu, tvaru a pórovitosti odlehčených struktur. Funkční flexibilita činí tyto struktury velmi atraktivní pro mnoho aplikací. [16]



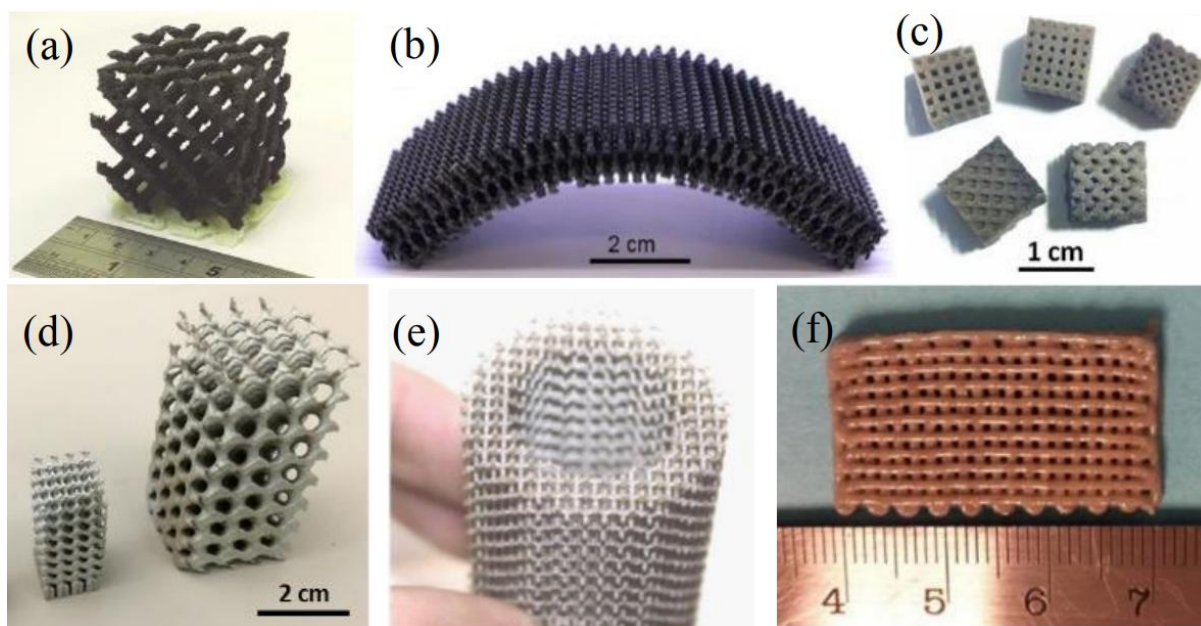
Obr. 17 - Rozdělení buněčných struktur[16]

5.1 Vyrobitelnost odlehčených struktur

Vyrobitelnost odlehčených struktur znamená co nejsnadnější zhotovení struktury určitým výrobním procesem aditivní technologie. Minimální velikost příhradové konstrukce určuje nejmenší vlastnosti a tím nejmenší velikosti buněčných struktur, kterých lze dosáhnout v odlehčených strukturách. Například při použití metody slinování prášku má přímý vliv na velikost příhradové konstrukce velikost částic prášku, průměr laserového paprsku, výkon laseru a rychlost skenovacího zařízení. Čím je jemnější prášek a menší průměr paprsku laseru, tím je možné dosáhnout menších příhradových konstrukcí. Další faktor omezující minimální velikost buněčných struktur je úroveň obtížnosti odstraňování nepoužitého prášku po výrobě součásti. [16]

Přestože aditivní technologie umožňují výrobu odlehčených struktur v součástích se složitým geometrickým tvarem, mohou zde nastat tvarové rozdíly mezi navrženým a vytištěným dílem. Například při metodě SLM (DMLS) je silně ovlivněna velikost příhradové konstrukce podmínkami zpracování a vlastnostmi prášku. Další tvarová odchylka může být způsobena adhezivostí částic, tzn. možností připojení částečně natavených surových částic na příhradové konstrukce. Tepelné nebo chemické ošetření může optimalizovat drsnost povrchu, ale tyto povrchové úpravy mohou vést k dalším tvarovým rozdílům. [16]

Všechny procesy aditivní technologie sdílejí koncept vrstvení materiálu, který vyžaduje, aby další vrstva byla přilepena na předchozí. Pokud neexistuje žádné kontaktní rozhraní mezi dvěma vrstvami nebo je toto rozhraní příliš malé, je potřeba podpůrných konstrukcí k podepření další vrstvy nebo k minimalizování potenciálních deformací. Nicméně, při výrobě odlehčených struktur se neočekává tvorba podpůrných konstrukcí, z důvodu jejich obtížného, až nemožného odstranění z vnitřku odlehčených struktur. Proto je nutné, aby odlehčené struktury poskytovaly samy sobě podpůrné konstrukce. Výjimky jsou při použití metody FDM, kde je možné použít vodou rozpustitelný materiál, a v procesu SLS metody, jehož neslinovaný prášek může sloužit jako podpůrná konstrukce. [16]



Obr. 18 - Příklad odlehčených struktur vyrobených odlišnými metodami aditivních technologií.
 (a) FDM, (b) SLA, (c) SLS, (d) SLM, (e) EBM, (f) FEF [16]

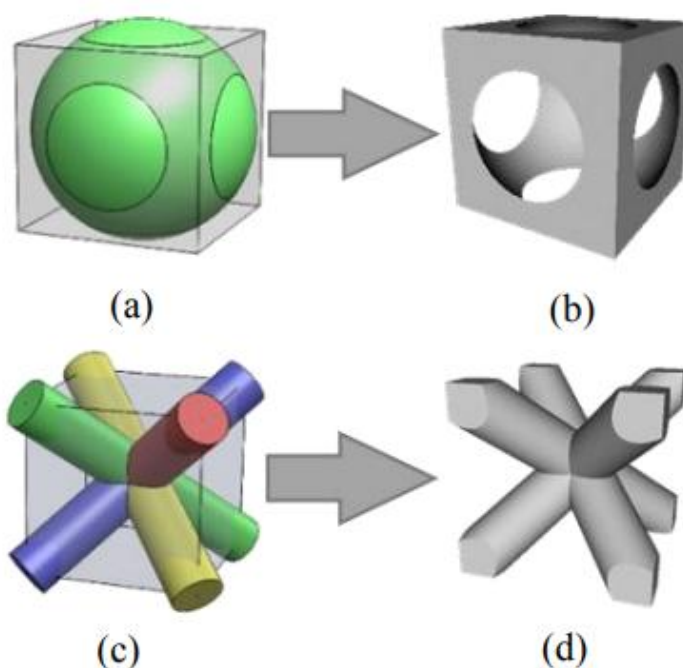
5.2 Metody návrhu designu pro odlehčené struktury

Z konstrukčního pohledu mohou být odlehčené struktury tvořeny opakováním buněčných struktur podle určeného vzoru. Tím pádem konstrukce odlehčené struktury se skládá z designu buněčné struktury (Cell design) a jejího vzorování (Pattern design). [16]

5.2.1 Návrh buněčné struktury (Cell design)

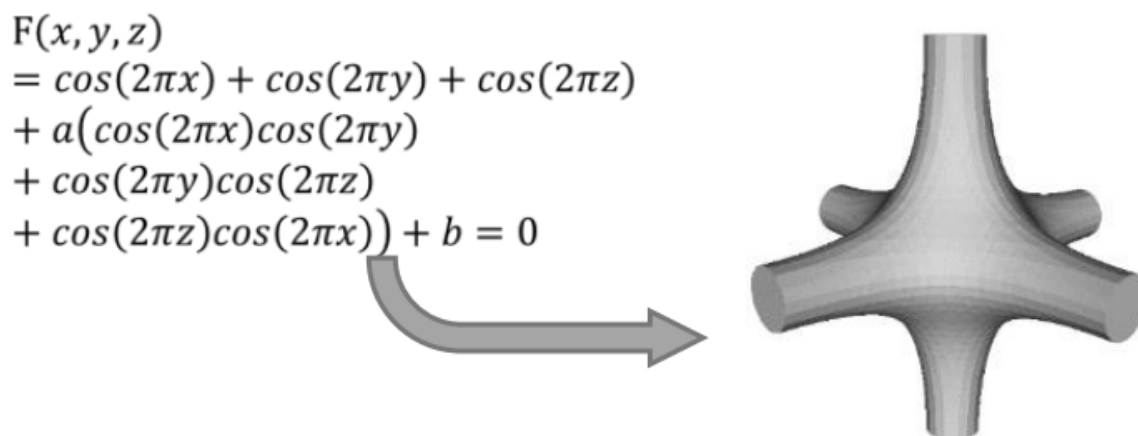
Buněčná struktura je nejmenší prvek tvořící a charakterizující následnou odlehčenou strukturu. Buněčná struktura může být navržena pomocí primitivní metody, při které se struktura skládá z jednoduchých geometrických útvarů, implicitní povrchové metody, při které je povrch struktury definován pomocí matematických rovnic, a topologické optimalizace, při které je geometrie struktury získána pomocí optimalizačních výpočtů. [16]

Primitivní metoda přímo využívá Booleovské operace jednoduchých geometrických tvarů, viz obr. 19, kde je buněčná struktura tvořena pomocí Booleovského odečítání. Na obr. 19 (a) je využita krychle jako základní objekt a koule jako odečítaný objekt. Příhradová buněčná struktura obr. 19 (d) je tvořena za pomoci Booleovského spojení čtyř diagonálně orientovaných válců, s následným průnikem krychle (obr. 19 (c)). [16]



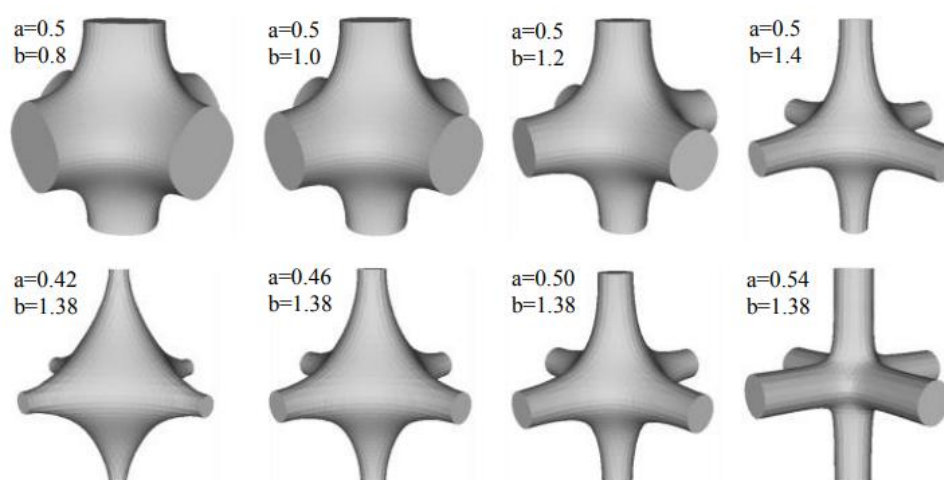
Obr. 19 - Schéma Primitivní metody [16]

Implicitní metoda je také účinný prostředek ke konstrukci buněčných struktur. Tato metoda využívá implicitní rovnice, které představují povrch struktur ve 3D prostoru. Rovnice $F(x,y,z) = 0$ definuje počátek pro funkci o třech proměnných, které určují řadu bodů, které jsou umístěny na povrchu. Např. obr. 20 znázorňuje buněčnou strukturu a jí odpovídající rovnici. [16]



Obr. 20 - Buněčná struktura generována užitím Implicitní povrchové metody [16]

Pórovitost buněčné struktury se vztahuje na objemový zlomek póru v buňce, což výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Při použití Primitivní metody je pórovitost závislá na velikosti použitých geometrických tvarů, což je nevhodné na úpravu. Naproti tomu u Implicitní povrchové metody můžeme pórovitost parametricky kontrolovat upřesněním souřadnic v rovnici. Například, jak je znázorněno na obr. 21, pórovitost a tvar buňky lze snadno měnit úpravou hodnoty koeficientu a , či konstantního členu b v rovnici. Tato flexibilita je užitečná pro numerický design a algoritmickou integraci buňky. [16]

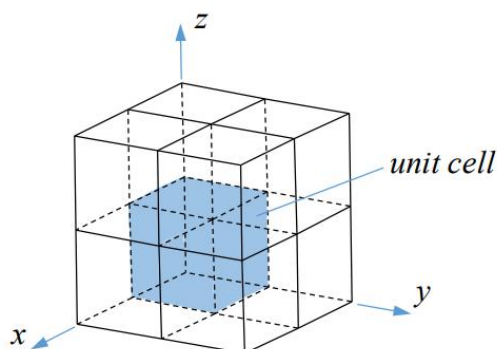


Obr. 21 - Geometrické změny při úpravě hodnot v rovnici [16]

Topologická optimalizace využívá matematický algoritmus k realizaci optimálního rozložení materiálu, zatímco se tvoří odlehčená struktura uvnitř součásti, aby bylo dosaženo nejefektivnějšího využití materiálu. Tím pádem se metoda Topologické optimalizace používá při optimálním návrhu buněčné struktury, pro výběr nejvhodnější buněčné struktury ze široké škály struktur. [16]

5.2.2 Vzorování (Pattern design)

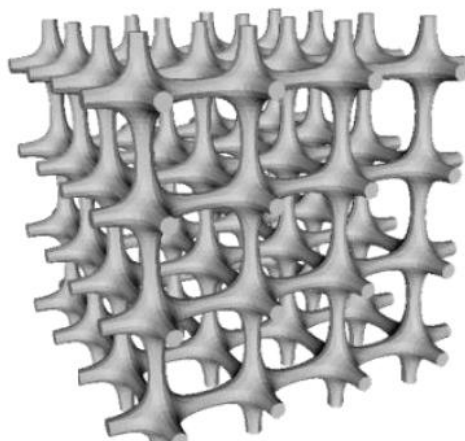
Vzorování znázorňuje, jak se opakuje buněčná struktura v 3D prostoru. Odlehčené struktury se tedy tvoří skupením buněčných struktur za pomoci přímého vzorování, při kterém se buněčná struktura zrcadlí přímočaře, konformního vzorování, při kterém se opakované buněčné struktury přizpůsobují povrchu geometrie součásti, a topologickou optimalizací, která se nemusí využívat pouze pro optimální rozvržení materiálu v jednotlivých buňkách, ale také k organizaci celé buněčné struktury v prostoru designu. [16]



Obr. 22 - Schéma přímého vzorování

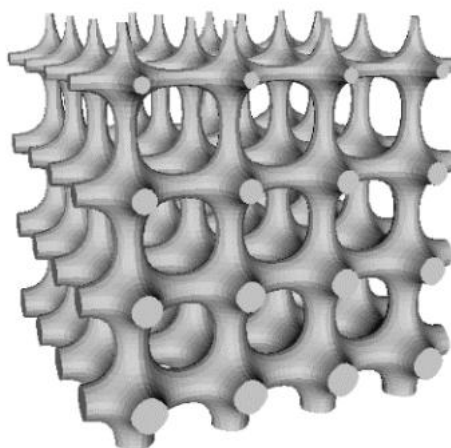
Ve většině případů jsou buněčné struktury navrženy jako krychlové prvky. Poté může být odlehčená struktura přímo generována opakováním buněčné struktury ve třech směrech (x,y,z). Tato metoda je znázorněna na obr. 22, kde se odlehčená struktura skládá z $2 \times 2 \times 2$ přímočaře opakujících se buněk. [16]

Pro buňky navržené Implicitní povrchovou metodou je generování odlehčené struktury snazší. Změnou rozsahu proměnných v implicitní funkci se pozmění celé vzorování. Například při změně souřadnic z [0,1] na [0,4], získáme odlehčenou strukturu skládající se ze $4 \times 4 \times 4$ buněk, viz obr. 23. [16]



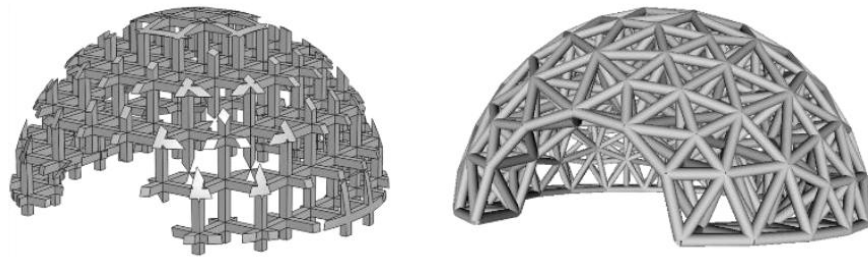
Obr. 23 - Odlehčená struktura bez gradientu pórovitosti [16]

Další výhodou Implicitní metody je snadné zavedení gradientu pórovitosti do odlehčené struktury, a to přidáním lineárního členu. Např. přidáním kz členu vzroste pórovitost ve směru Z, viz obr. 24. [16]



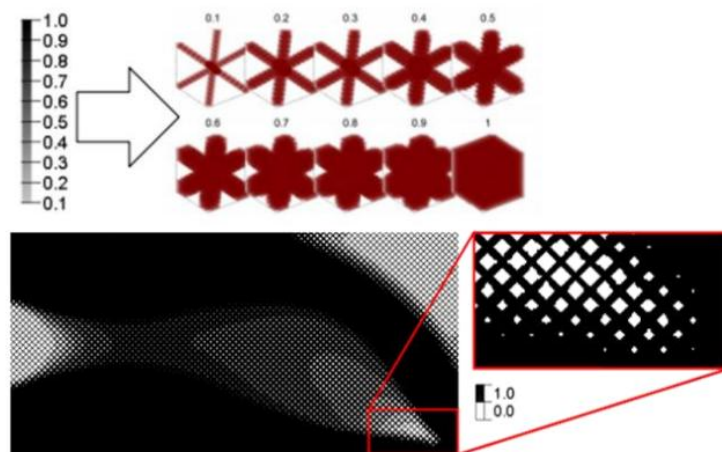
Obr. 24 - Odlehčená struktura s gradientem pórovitosti [16]

Konformní vzorování je schopné vést buněčnou strukturu po povrchu prostoru designu. Na obr. 25 je znázorněn kulový model s odlehčenou strukturou, ze kterého je patrné, že namísto přímého vzorování s Booleovskými operacemi (vlevo), konformní vzorování zachová integritu buňky, což zajistí lepší vyztužení a posílení struktury a tím pádem rozložení zátěže rovnoměrně v celé struktuře (vpravo). [16]

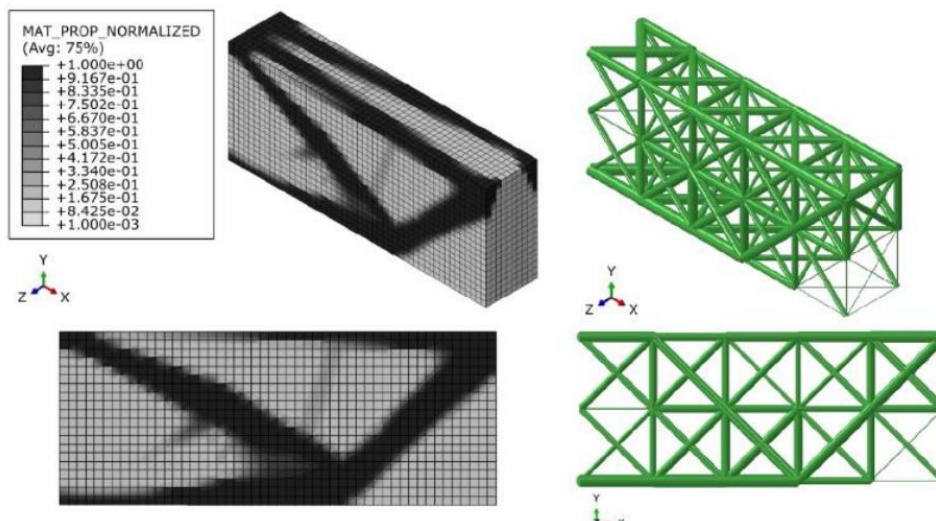


Obr. 25 Srovnání přímého vzorování (vlevo) a konformního vzorování (vpravo)[16]

Topologickou optimalizací lze využít jak při designu buněk, tak při návrhu vzorování. Kvůli rozložení materiálu v odlehčené struktuře, které je dosažitelné prostřednictvím kontroly rozložení pórovitosti, vědci integrovali topologickou optimalizaci se vzorováním odlehčených struktur pro nejoptimálnější provedení. Jeden ze způsobů funguje na principu rozmístění buněk s různou pórovitostí v povrchu součásti k nahrazení střední hustoty získané z uzavřeného plného izotropního materiálu (SIMP), pro získání lepších vlastností součásti, viz obr. 26. [16] Další možný způsob pro generování odlehčených struktur je v získávání informací o hustotě materiálu z topologické optimalizace z programu Abaqus/Atom (obr. 27).



Obr. 26 - Odlehčená struktura získána mapováním hustoty pomocí metody SIMP[16]



Obr. 27 - Odlehčená struktura získána z informace o hustotě [16]

5.3 Kritéria pro volbu designu odlehčených struktur

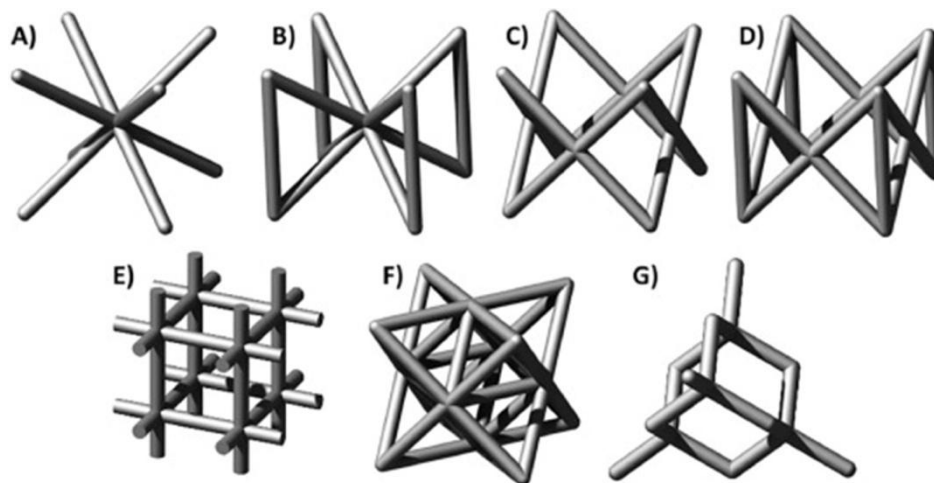
Mechanické chování odlehčené struktury závisí na jejím materiálu, geometrickém tvaru, a pórovitosti. Materiál, z kterého je struktura tvořena, určuje základní mechanické vlastnosti jako např. Youngův modul, mez kluzu, mez pevnosti, tažnost apod. Tyto mechanické vlastnosti mohou být u kovových odlehčených struktur ovlivněny teplem, a proto je vhodné použít tepelné zpracování k zlepšení meze kluzu a tuhosti celé struktury. Další výhodou tepelného zpracování je zvýšení tažnosti struktury a z toho vyplívá schopnost struktur absorbovat energii. Tudiž při výběru odlehčených struktur musíme systematicky zvážit chování zvoleného materiálu, proces aditivní technologie, metody následného postprocesingu, a výrobní náklady spojené s výběrem materiálu pro splnění našich požadavků. [17][18]

5.4 Typy odlehčených struktur

Odlehčené struktury lze kategorizovat podle jejich mechanického zatížení, a to buďto ohybem nebo tahem. Struktury zatížené ohybem využívají ohybový moment, a tudíž jsou poddajné, zatímco u struktur při tahovém namáhání dochází k axiálnímu zatížení, což znamená, že jsou pevnější a silnější než struktury zatížené ohybem. Pro zjištění dominantního namáhání se používá topologická optimalizace, o které bylo pojednááno v předešlé kapitole. V literatuře je zkoumána široká škála typů odlehčených struktur, které jsou poté blíže rozděleny na prutovou strukturu (strut-based) nebo trojitou periodickou povrchovou strukturu (TPMS). [19]

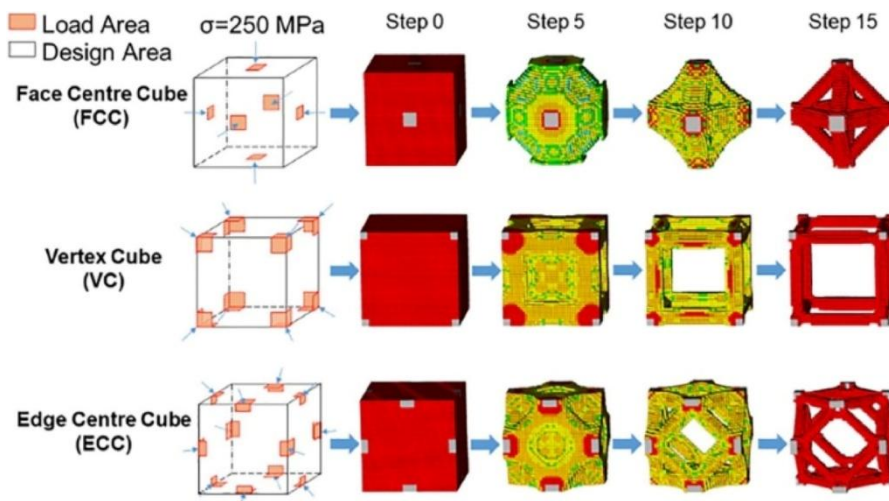
5.4.1 Prutová struktura (strut-based)

Nejběžnějšími zástupci této skupiny jsou krychlově tělesně středěná (BCC) a krychlově plošně středěná (FCC) struktura, nebo jejich variace, jako je například přidání prutu v ose Z (BCCZ, FCCZ), viz obr. 28. Existují i další struktury, jako např. krychlová, hvězdicová a diamantová struktura. [19]



Obr. 28 - Typy prutových struktur: BCC(a), BCCZ(b), FCC(c), FCCZ(d), Krychlová(e), Hvězdicová(f), diamantová(g) [19]

Tyto struktury jsou častou volbou pro jejich jednoduchou konstrukci, ale i prutové struktury jsou generovány pomocí topologické optimalizace pro maximální efektivnost při rozvržení materiálu v odlehčené struktuře. [19]



Obr. 29 - Postup při topologické optimalizaci prutové struktury [19]

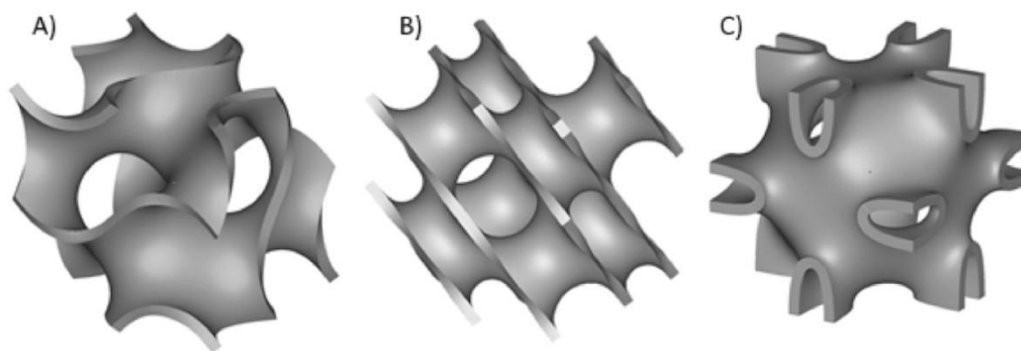
Prutové struktury jsou charakterizovány tzv. Maxwellovým číslem (M), které závisí na počtu prutů (s) a uzlů (n) viz rovnice č.1.

$$M = s - 3n + 6 \quad (1)$$

Když je $M < 0$, je ve struktuře příliš málo prutů, aby odolaly vnějším silám působícím na uzly, kde začne vznikat ohybový moment, a ve strukturách začne působit ohybové napětí. Zatímco při stavu, kdy $M > 0$, se vnější zatížení vyrovnají axiálním napětím ve vzpěrách, z čehož plyne, že v uzlech nevzniká ohybový moment a struktury budou zatíženy pouze na tah. V důsledku těchto jevů jsou struktury zatěžované na tah tuhé a silné, zejména v porovnání s jejich hmotností, zatímco struktury s převažujícím ohybovým napětím jsou poddajné a lépe se deformují. [19]

5.4.2 Trojitá periodická povrchová struktura (TPMS)

Také byly zkoumány trojitě periodické povrchové (TPMS) odlehčené struktury, jako například gyroid, diamant a neovius. Tyto útvary jsou generovány pomocí matematických vzorců, které definují rozhraní mezi pevnými a prázdnými částmi ve struktuře. Pro dosažení nejlepších mechanických vlastností lze měnit různé parametry, jako je například periodičita a hustota struktury. [19]



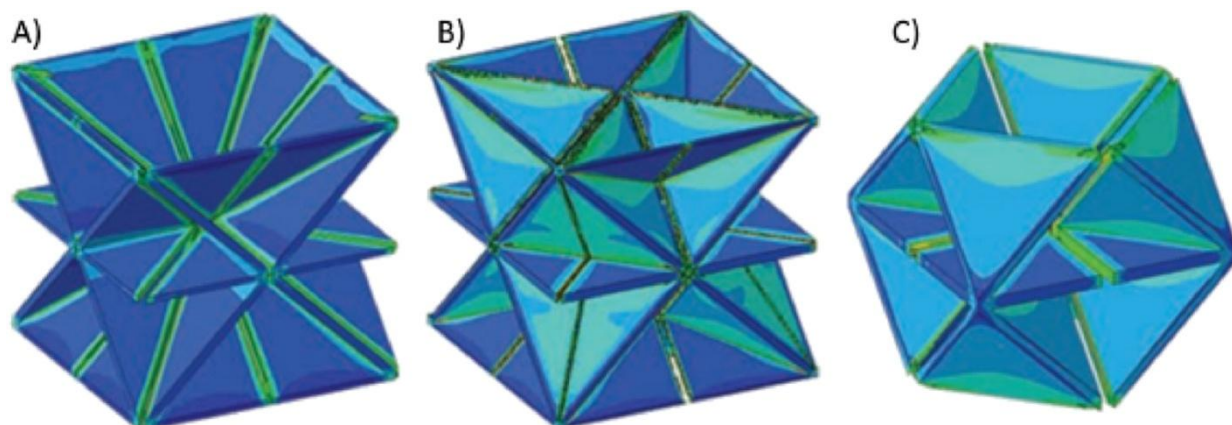
Obr. 30 - TPMS odlehčená struktura: Gyroid(a), diamant(b), neovius(c) [19]

TPMS odlehčené struktury mají potenciální výhody oproti prutovým odlehčeným strukturám, a to z hlediska zpracovatelnosti a fixace tisknutých vrstev na sebe. Je možné potlačit omezení sklonu úhlu dané DMLS procesem, a to kvůli neustále měnícímu se úhlu buněčné struktury, z čehož plyne, že struktura slouží sama sobě i jako podpůrná struktura.

Zakřivený povrch má podobnou strukturu jako je tomu u struktury kostí, a proto je právě vhodný jako volba pro implantát do kostní struktury. TPMS struktury mají také oproti prutovým strukturám lepší kostní fixaci. Studia rovněž ukazují, že gyroidní odlehčené struktury mají téměř třikrát zvýšenou absorpci energie, než je tomu u BCC struktur s podobnou pórovitostí. Potenciální výhody těchto struktur nebyly ještě přesvědčivě prokázány, a tudíž je třeba dalšího výzkumu. [19]

5.4.3 Skořepinové odlehčené struktury (Shell lattice structure)

Proces aditivní technologie umožňuje výrobu odlehčených struktur, jejichž jednotlivé buňky jsou složeny z desek namísto prutů. Tyto odlehčené struktury jsou podobné TPMS strukturám a jsou označovány jako skořepinové struktury. Tyto struktury na bázi desek s uzavřenými buňkami mají vynikající elastické vlastnosti ve srovnání s otevřenými prutovými strukturami s podobnou hustotou, ale právě kvůli uzavřenosti buněk nastává problém s odstraněním neslinovaného prášku z vnitřku struktur. Nicméně tato struktura vykazuje vynikající pevnost a tuhost při nízké hustotě buněk. [19]

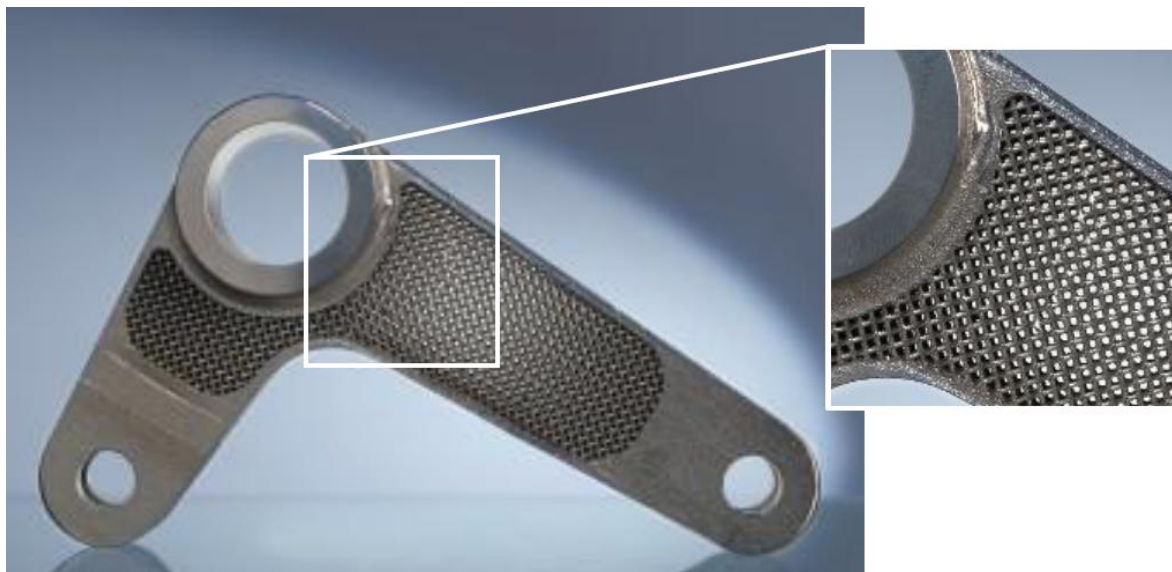


Obr. 31 - Skořepinové odlehčené struktury: SC-BCC(a), SC-BCC-FCC(b), SC-FCC(c) [19]

5.5 Využití odlehčených struktur

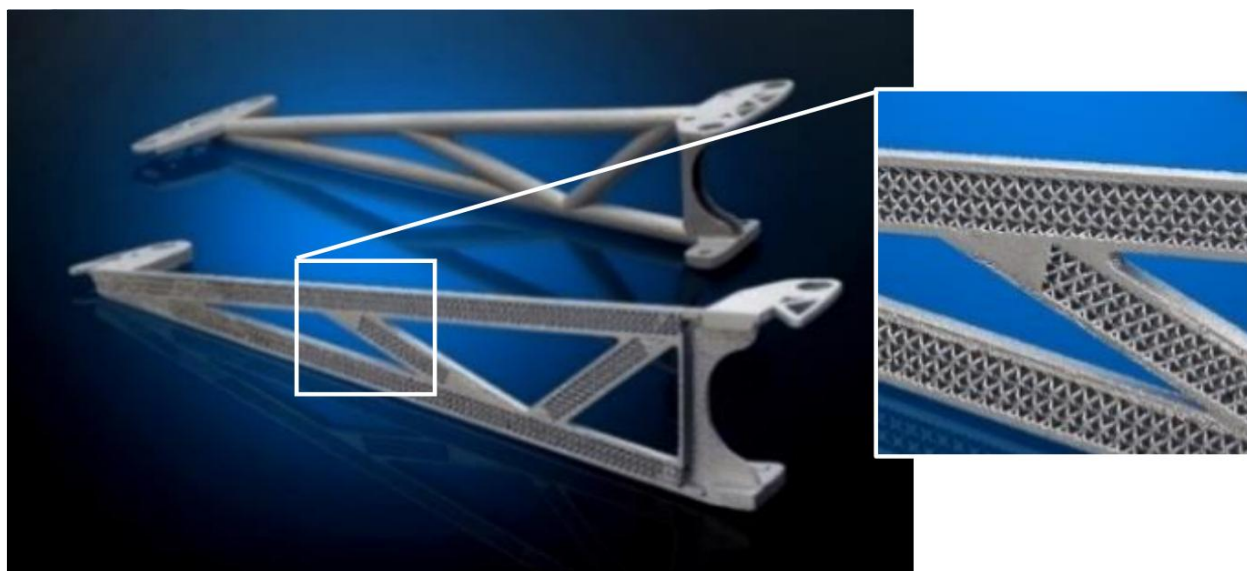
Díky svým geometrickým tvarům, specifickým vlastnostem (např., velká plocha povrchu, vysoká tuhost a pevnost, velká absorpce energie), a pružností při volbě designu, která je umožněna aditivní technologií, jsou odlehčené struktury využity v mnoha oblastech. Dále mohou odlehčené struktury integrovat více než jednu funkci do jednoho dílu, což dokazuje výbornou funkční flexibilitu. Mezi průmyslová odvětví, které se zajímají o využití odlehčených struktur, patří hlavně biomedicínský, automobilový a letecký průmysl. [16][19]

V leteckém a automobilovém průmyslu je snižování váhy hlavním konstrukčním cílem, což vede k menšímu využití materiálu, nižší spotřebě paliva a současně ke zvýšení výkonu. Například Fraunhoferský Institut pro laserovou technologii použil metodu DMLS pro výrobu komplexních dílů pro letectví, kosmonautiku, a automobilové aplikace. Na obr. 32 je zobrazena část z helikoptéry z nerezové oceli 316L s odlehčenými strukturami. Touto modifikací se dosáhlo 50% snížení váhy ve srovnání s původním dílem. [16][19][20]



Obr. 32- Součást z nerezové oceli 316L s odlehčenými strukturami používána v leteckém průmyslu [16]

Obr. 33 ukazuje ovládací rameno v systému odpružení pro závodní auto. Vnitřní konstrukce odlehčené struktury sníží hmotnost celého systému odpružení, což výrazně zvýší výkon závodního auta. [16]



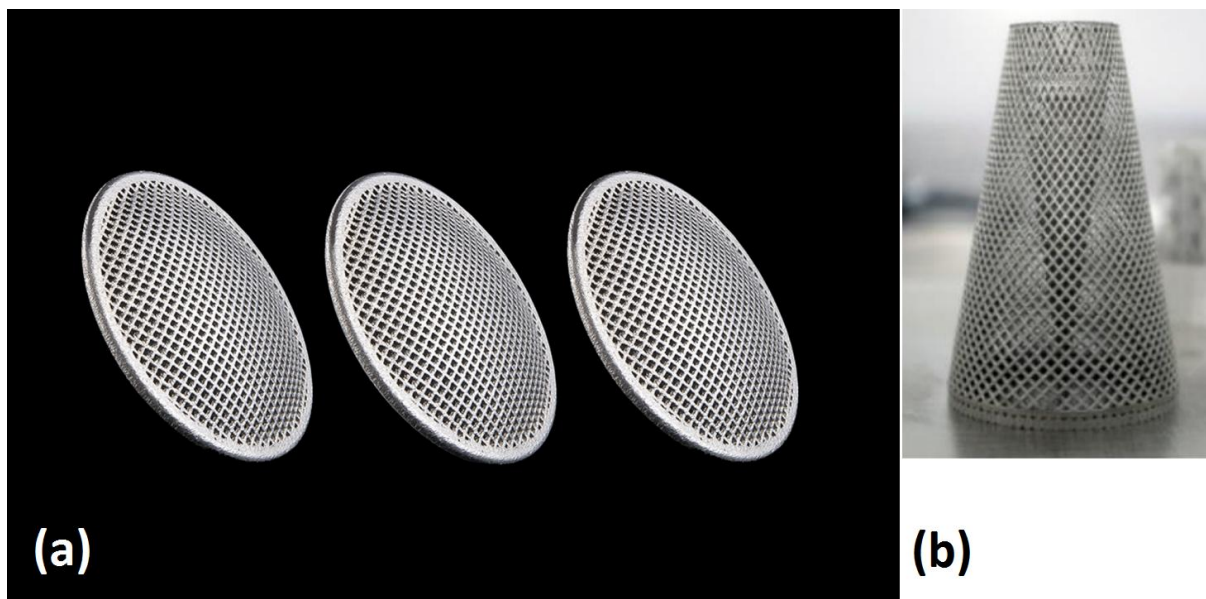
Obr. 33 - Odlehčená součást systému odpružení u závodního auta [16]

Kromě schopnosti odlehčení součásti při zachování stejných mechanických vlastností disponuje odlehčená struktura velké ploše s kanálkami, které se dají využít ke zvýšení účinnosti přenosu tepla. Například společnost FIT West Corp. využila metodu DMLS s odlehčenými strukturami k výrobě hlavy válců ve spalovacím motoru viz obr. 34. Při této modifikaci bylo sníženo 66% celkové hmotnosti a plocha povrchu vzrostla z 823cm^3 na $6\,052\text{cm}^3$ díky odlehčeným strukturám, které zároveň přispívají k lepšímu chlazení.



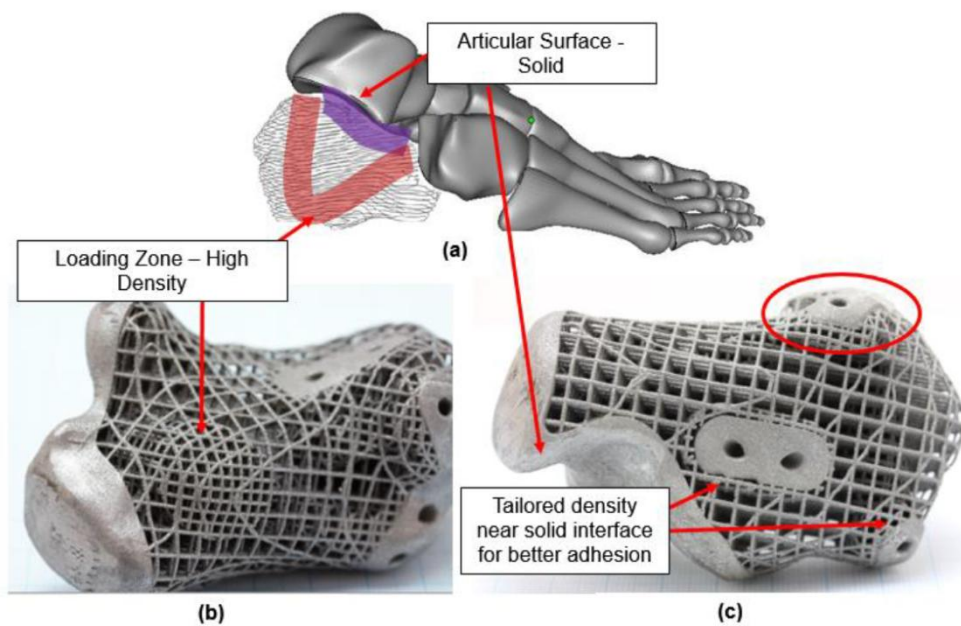
Obr. 34 - Hlava válců s odlehčenými strukturami [16]

Další způsob využití odlehčených struktur je v podobě filtru, viz obr. 35 (a). Tyto kotoučové filtry vyrobené z nerezové oceli se používají ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu k zastavení nečistot tam, kde je potřeba zvýšené hygieny. [16][21]



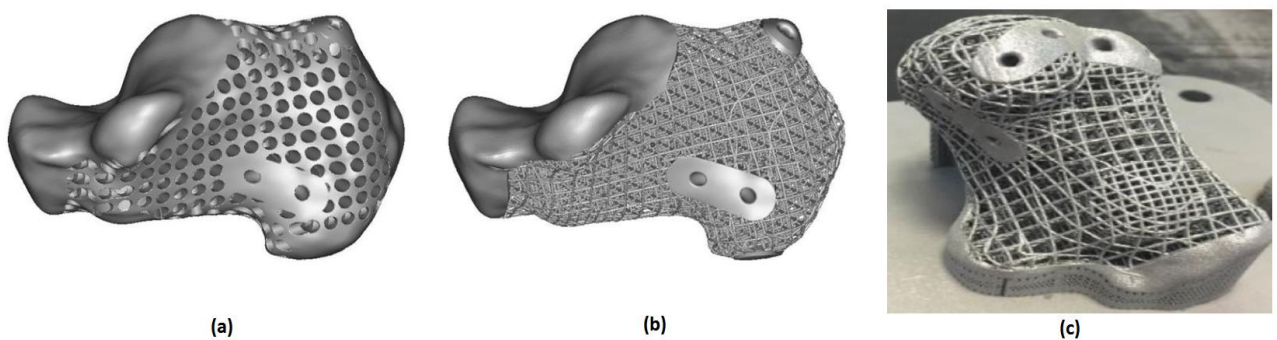
Obr. 35 - Filtry používané ve farmaceutickém (a) a automobilovém průmyslu (b) [16][21]

Aditivní technologie je příležitostí pro výrobu geometricky složitých biomedicínských dílů, které se dají upravovat podle potřeby uživatele. Odlehčená struktura se využívá při výrobě ortopedického implantátu, který je poté použit na výměnu chybějícího kloubu, či na vyztužení poškozené kosti. Implantát je schopen kopírovat mechanické vlastnosti lidské kosti a dokáže rozložit zatěžující sílu tak, abychom se vyhnuli problémům s přetížením implantátu a následné deformaci implantátu. Odlehčená struktura se dá dále použít pro výrobu síťoviny, která podporuje regeneraci lidské tkáně. Na obr. 36 je zobrazen pracovní postup, při kterém dochází ke kombinaci počítačové tomografie a 3D tisku. Tento postup vede ke zkrácení času, který je potřebný k návrhu a výrobě implantátu specifického pro pacienta. V tomto speciálním případě se jedná o lidskou patu poškozenou v důsledku nemoci.[16][22]



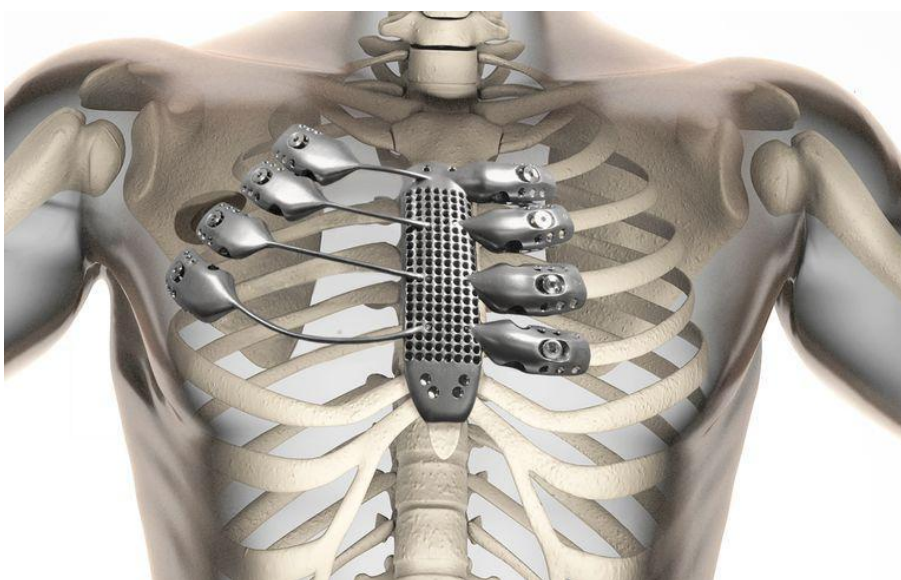
Obr. 36 - Kontury získané z CT (a), zobrazení hustoty odlehčených struktur v místech s vyšším zatížením (b), nutnost plného materiálu v místech fixace šrouby (c) [22]

Vytvoření anatomických struktur specifických pro potřeby pacienta vyžaduje značnou odbornost kvůli rozmanitosti optimalizačních platform. Proces návrhu a výroby anatomicky složitých částí je navíc výpočetně náročný. Na obr. 37 je uveden postup při návrhu nejvhodnější odlehčené struktury pro implantát lidské paty. [22]



Obr. 37 - Počáteční návrh (280g)(a), odlehčená struktura s nejlepšími vlastnostmi (89,4g)(b), vyrobený implantát vycházející z předchozího návrhu (c) [22]

Další chirurgický zákrok, který byl zaznamenán, je úspěšná transplantace žebér vyrobených procesem aditivní technologie pro pacienta s prodělanou rakovinou. Do implantátu hrudního koše byly použity prvky odlehčené struktury, a výroba celého implantátu se realizovala pomocí EBM procesu. Obr. 38 zobrazuje počítačovou simulaci uložení a uchycení hrudního koše a žebér v těle pacienta. [16]



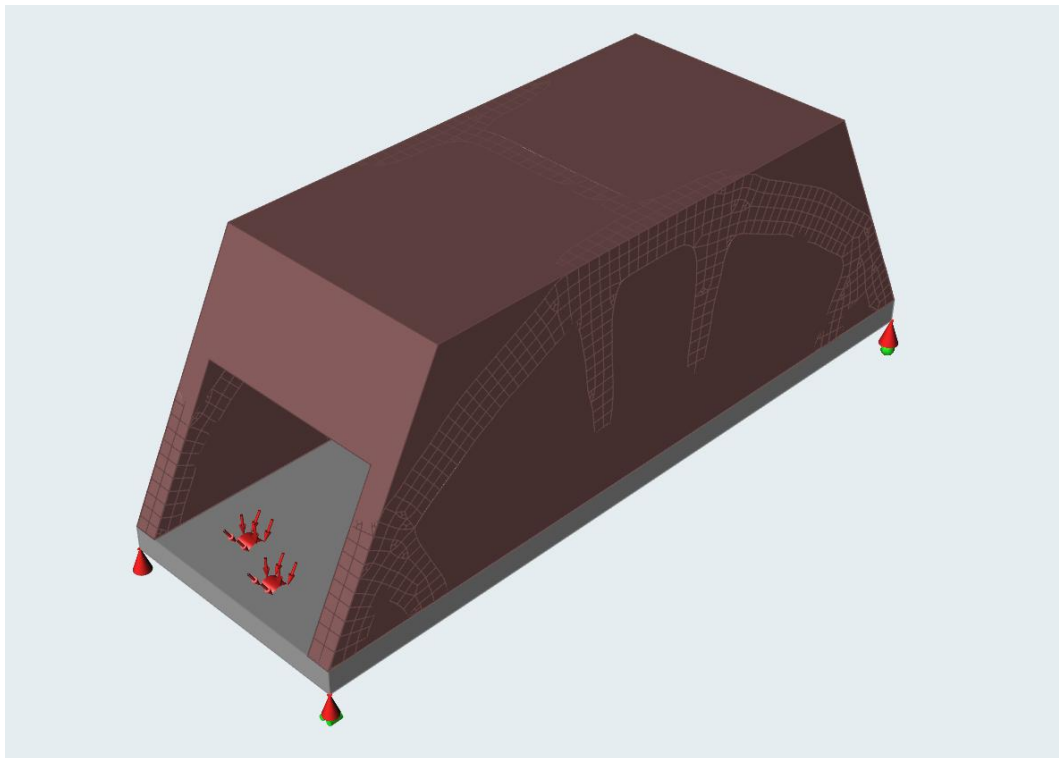
Obr. 38 - Implantát hrudního koše vyrobený pomocí 3D tisku s odlehčenými strukturami [16]

6 Topologická optimalizace a užití odlehčených struktur na vybrané součásti

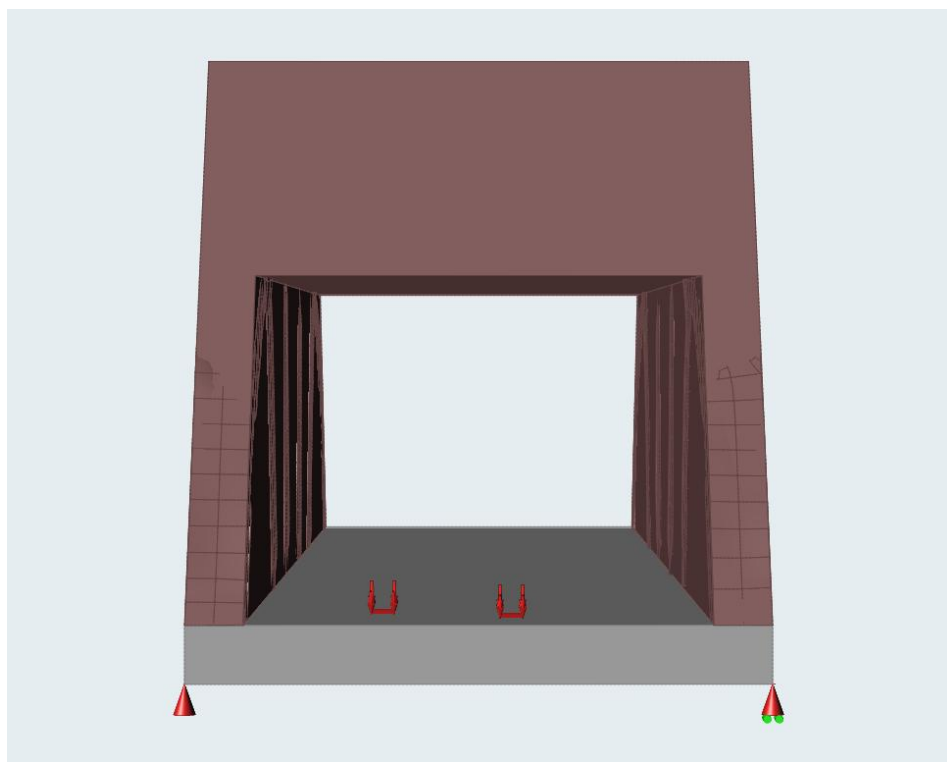
V dnešní době jsou v průmyslu aditivní technologie používány převážně pro výrobu tvarově složitých součástí, které by se jinou technologií vyráběly obtížněji nebo finančně nákladněji. I proto jsou využívány topologické optimalizace s následnou optimalizací odlehčených struktur pro úsporu materiálu i tiskového času při použití aditivních technologií.

Cílem praktické části diplomové práce bylo praktikovat předešlé informace v teoretické části o topologické optimalizaci a optimalizaci odlehčených struktur na uměle vytvořené situaci, která by mohla nastat v praxi, a porovnat, zdali dojde k úspoře materiálu při zachování stejných mechanických vlastností.

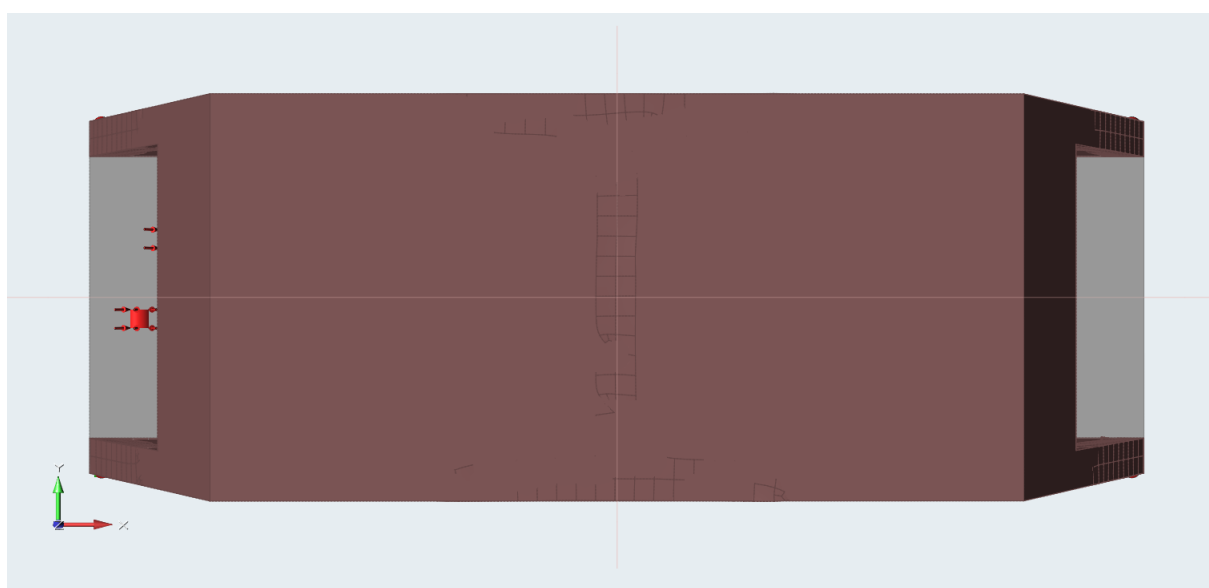
Jako předloha pro výběr testovaného artefaktu sloužil model v podobě mostu, který slouží pro edukativní účely programu Altair Inspire od společnosti Altair solidThinking, viz obr. 39,40 a 41.



Obr. 39 - Zobrazení edukativního modelu před optimalizací (ISO)

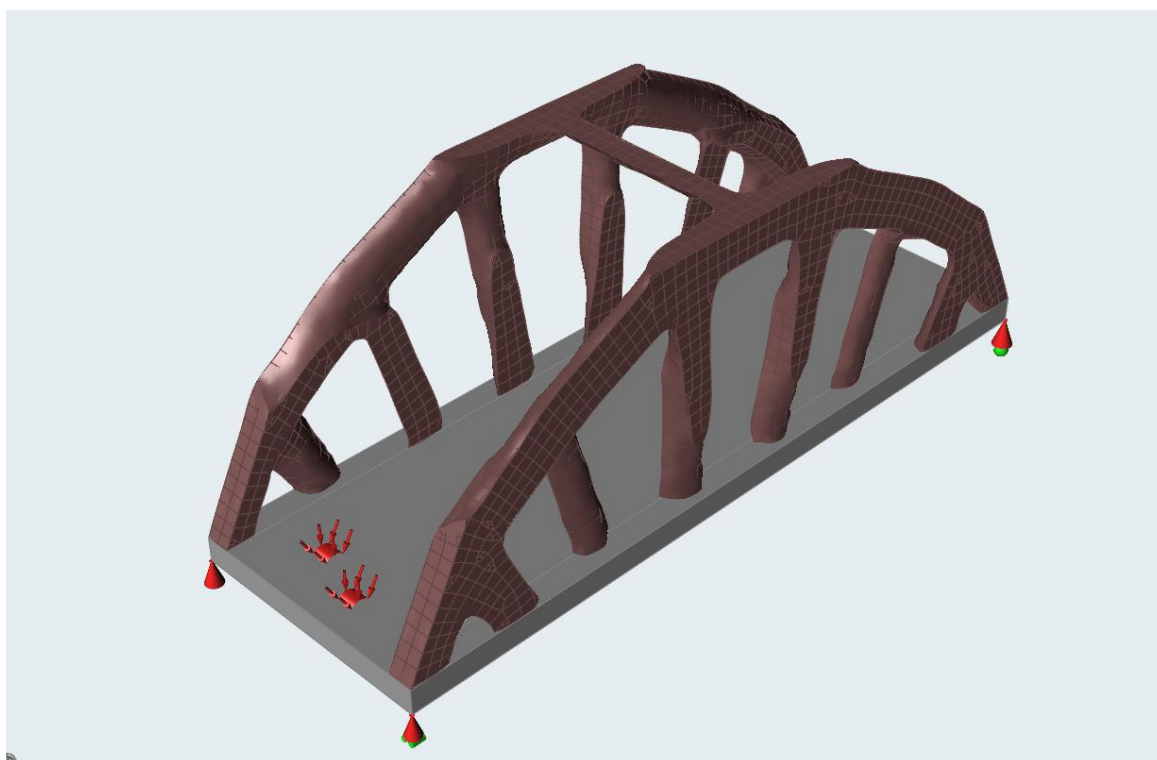


Obr. 40 - Zobrazení edukativního modelu před optimalizací (a)

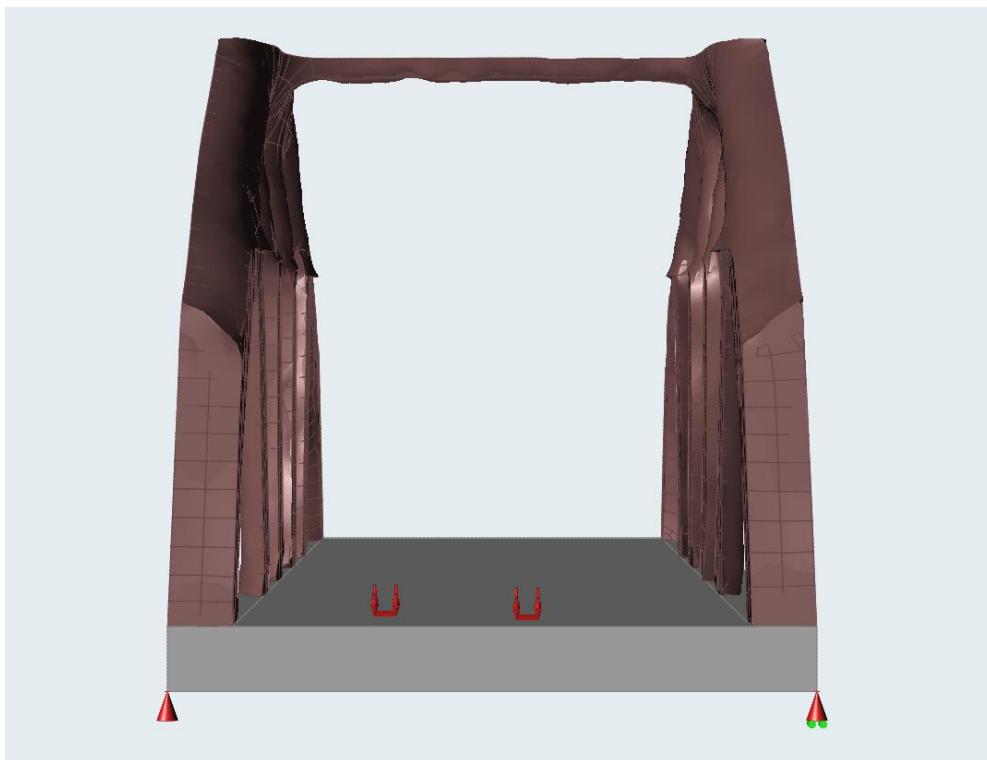


Obr. 41 - Zobrazení edukativního modelu před optimalizací (b)

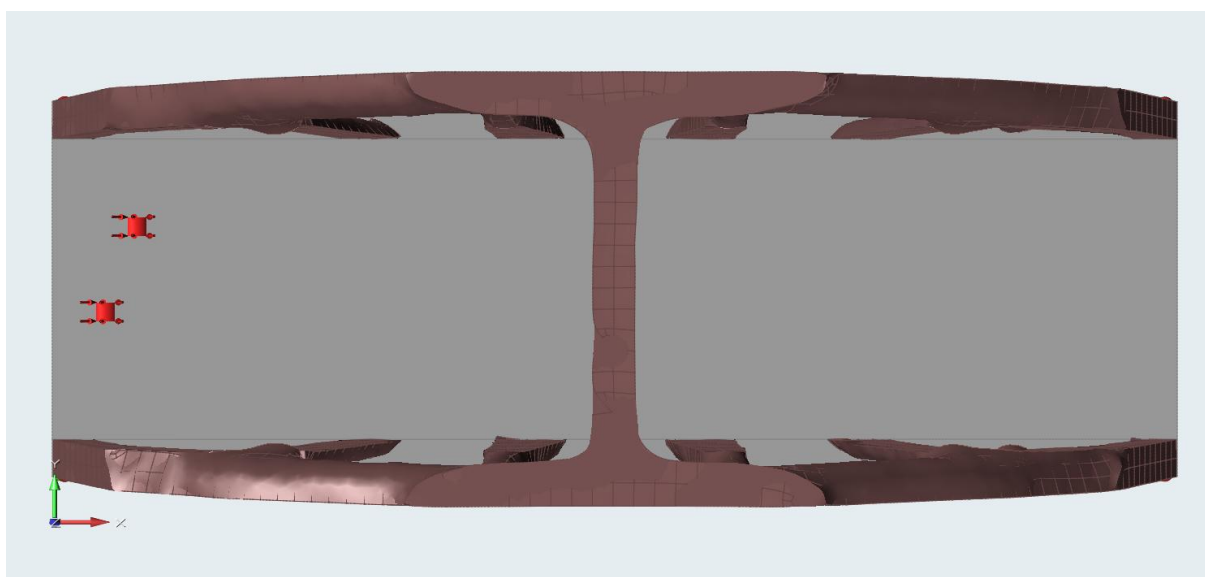
Software Altair Inspire je využíván právě v počáteční fázi vývoje produktu pro optimalizaci, vývoj nových konstrukčních řešení a tím zrychlení výroby. Tento model je zatížen na šedé ploše tlakem 200MPa a podepřen čtyřmi podporami. Jelikož je to dokonale optimalizovaná součást, tak je minimální potřeba úpravy výsledné bionické struktury, jak je vidět na obr. 42, 43 a 44. V tomto konkrétním případě se dosáhlo úspory váhy z 13,283 kg na 4,9709 kg při zachování podobných mechanických vlastností. Tento model slouží jako odrazový můstek pro optimalizování mnou navržené součásti.



Obr. 42 - Zobrazení výsledné optimalizace (ISO)



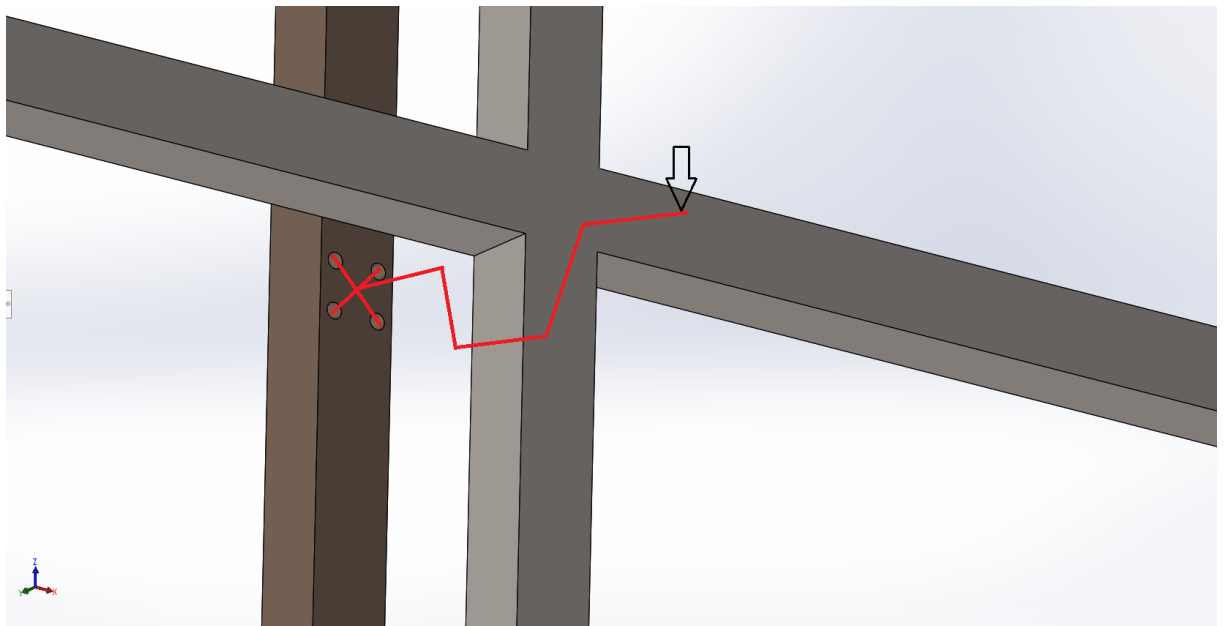
Obr. 43 - Zobrazení výsledné optimalizace



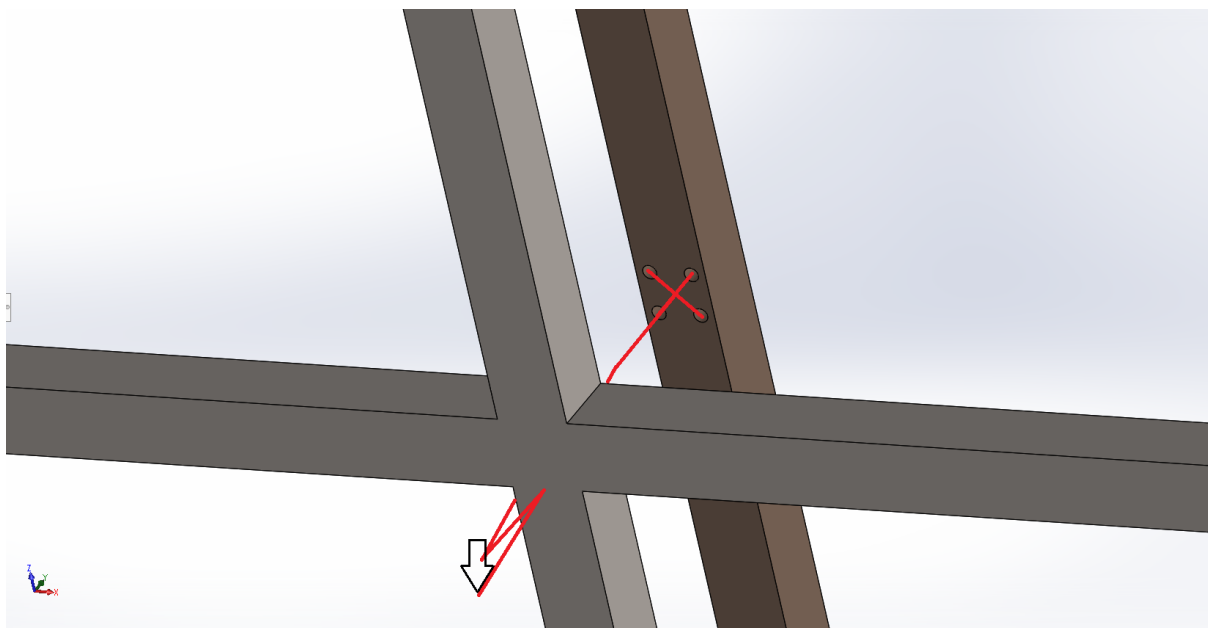
Obr. 44 - Zobrazení výsledné optimalizace

6.1 Návrh součásti

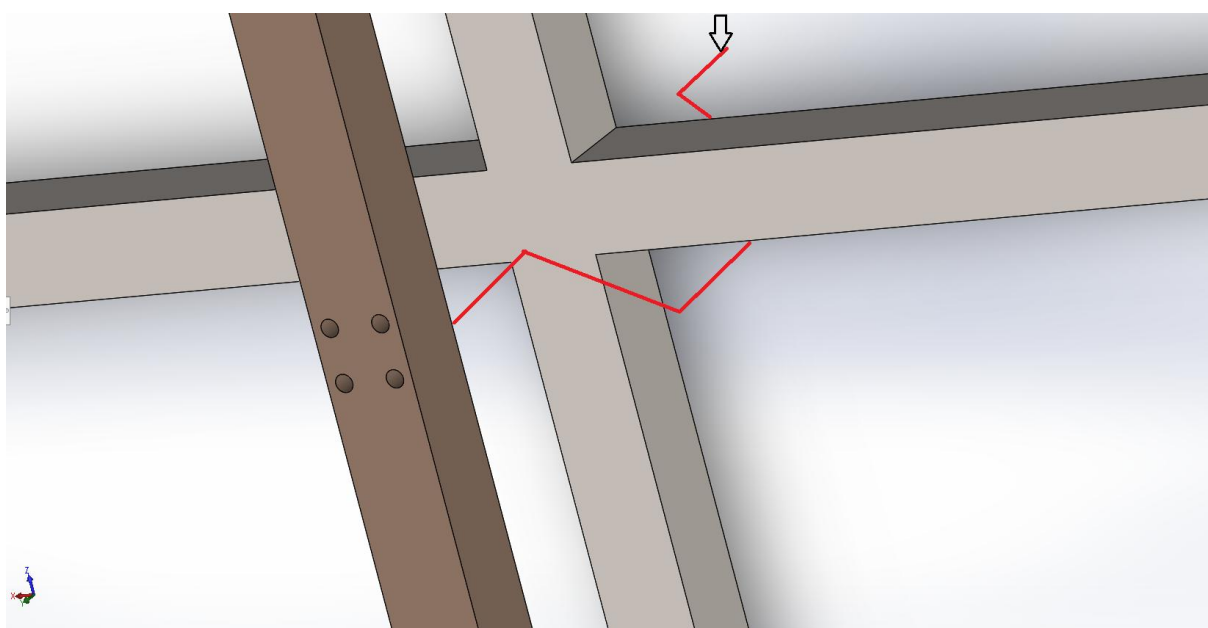
Nejvhodnější způsob, jak ukázat schopnosti obou optimalizací bylo v použití součásti v podobě nosníku, který je na jednom konci vetknutý a na druhém konci zatížen statickou silou. Pro ztížení vstupních podmínek bylo vloženo do směru Z těleso, a tím se omezila trasa nosníku ve směru osy X a Y, viz obr. 45,46 a 47. Z grafického zobrazení tedy vyplývá, že pokud nosník má pevnou základnu uchycení, musí se vychýlit ve směrech X a Y.



Obr. 45 - Grafické zobrazení návrhu nosníku

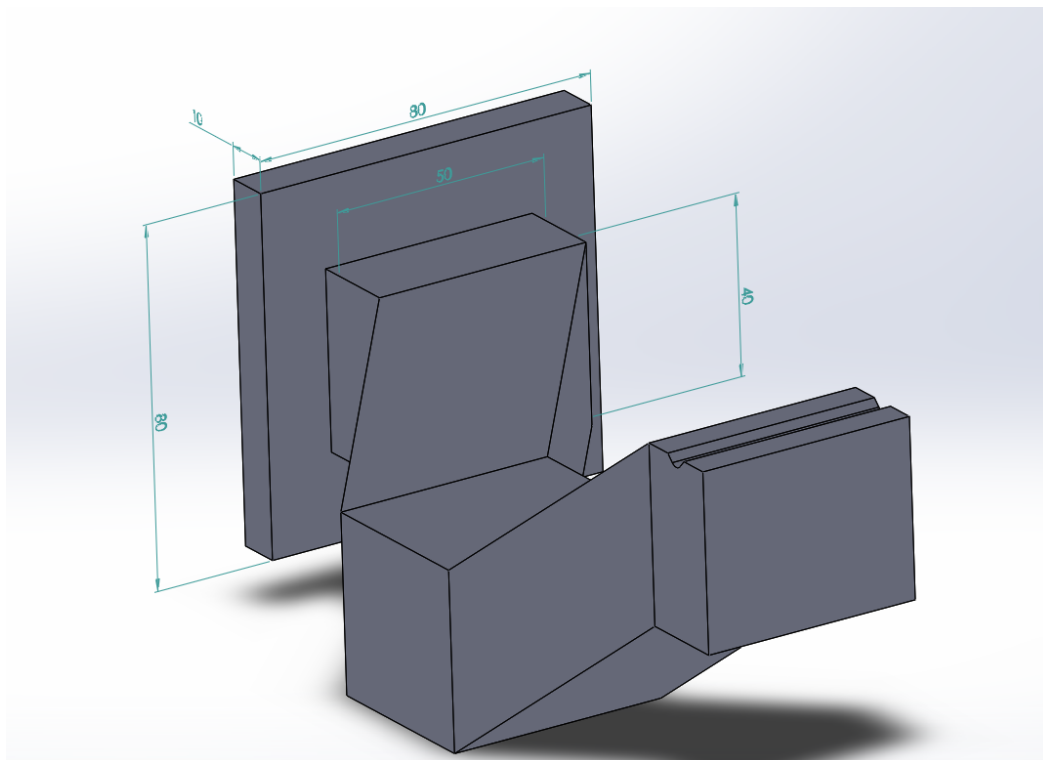


Obr. 46 - Grafické zobrazení návrhu nosníku

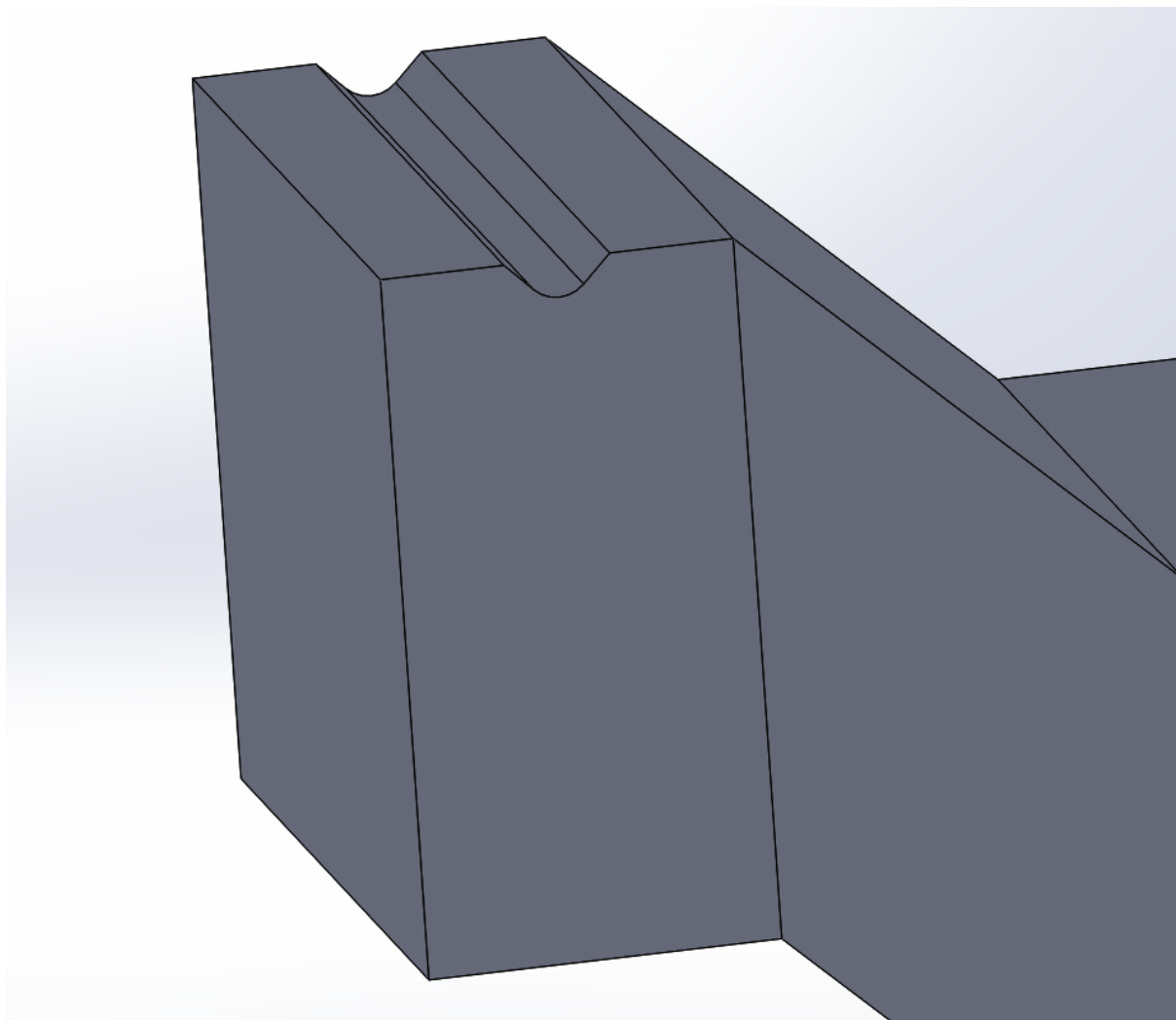


Obr. 47 - Grafické zobrazení návrhu nosníku

Podle grafického zobrazení byl navrhnut vyosený nosník ve směru X a Y, s jednoduchým hranatým designem bez větších zaoblení. Výsledkem byl 150 x 50 x 40 mm velký nosník, viz obr 48, 49.

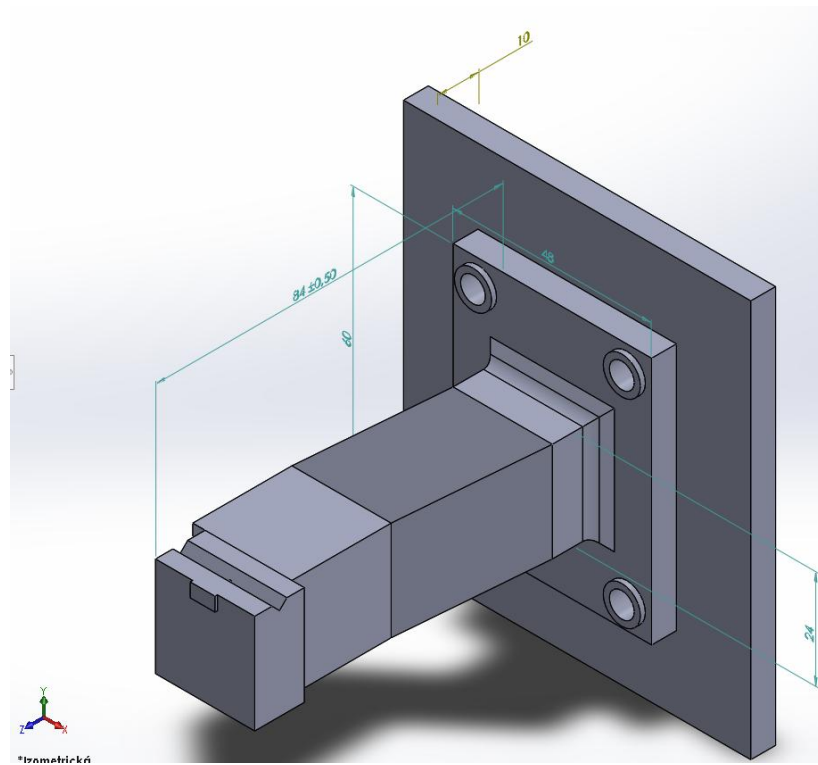


Obr. 48 - Počáteční návrh nosníku bez úprav

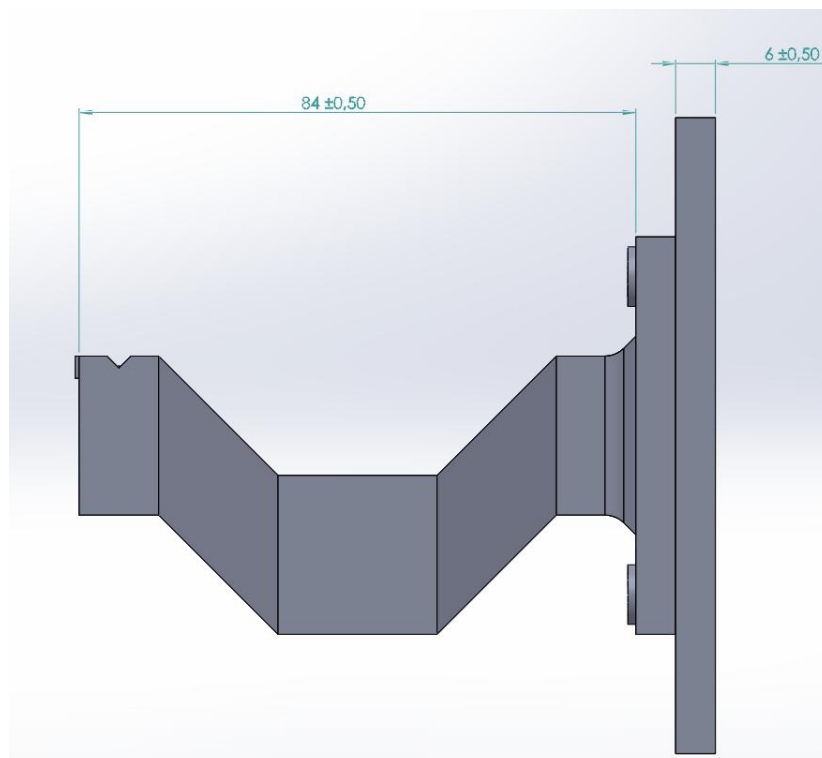


Obr. 49 - Detail drážky pro zatížení nosníku

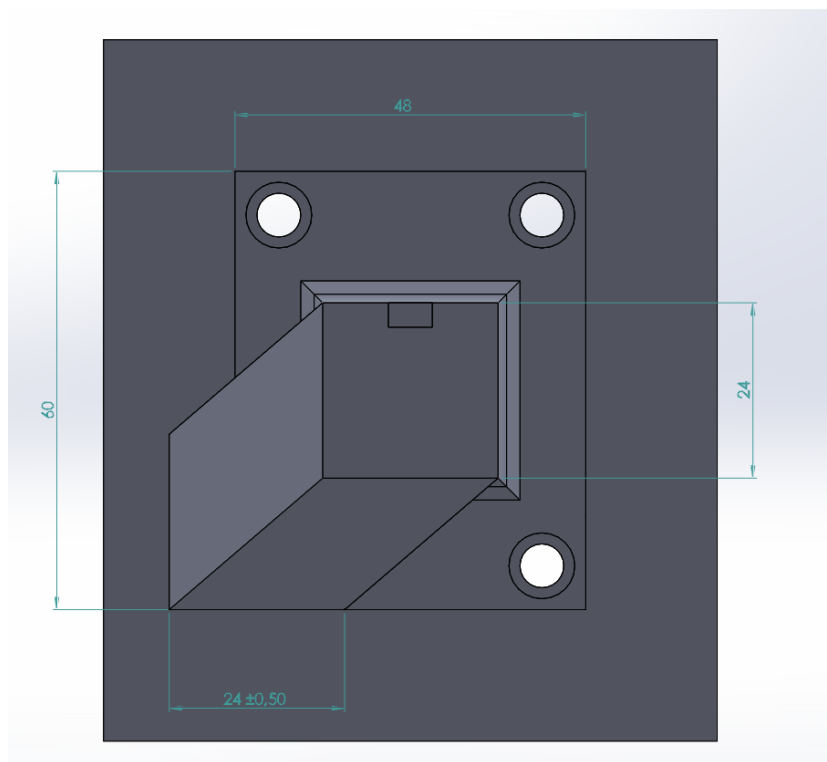
Před následnou topologickou optimalizací bylo provedeno na nosníku několik úprav. Celý model byl zmenšen s faktorem měřítka 0,6 a byly přidány otvory pro šrouby. Další modifikace spočívala v přidání opěrné desky za nosník, která slouží jako nepoddajné těleso, a tím simuluje situaci, při které by byl nosník pevně uchycen k rámu. Finální úprava spočívala v přidání malé plošky do drážky, pro lepší nastavení zatěžující síly při optimalizaci, a také v přidání malého výstupku na čelo nosníku, pro usnadnění vymezení prostoru designu při následné optimalizaci.



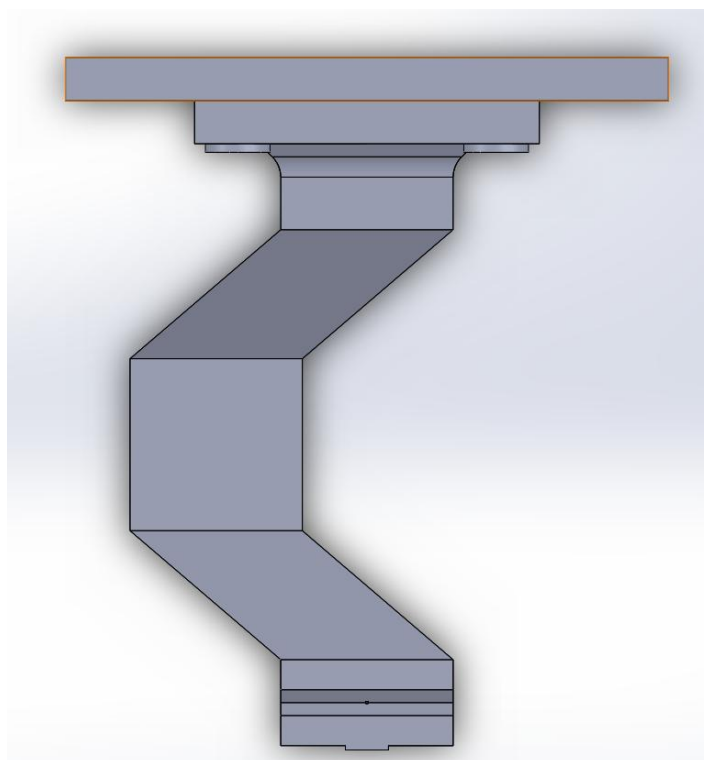
Obr. 50 - Zmenšený model nosníku (ISO)



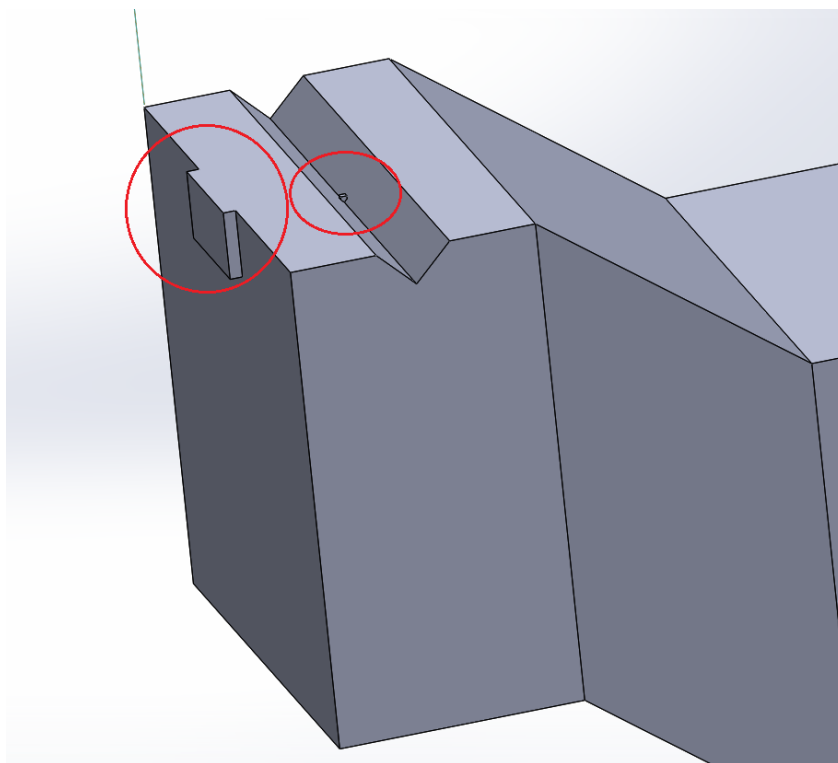
Obr. 51- Zmenšený model nosníku (bokorys)



Obr. 52 - - Zmenšený model nosíku



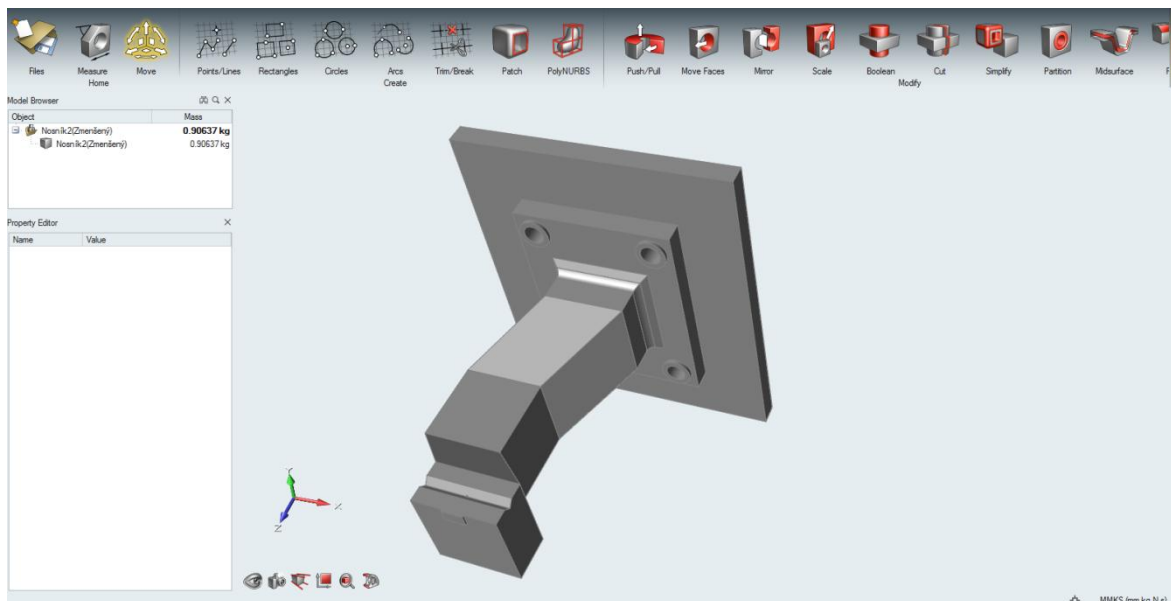
Obr. 53 - Zmenšený model nosíku (Přídorys)



Obr. 54 - Detail plošky pro sílu a výstupku na čele nosníku

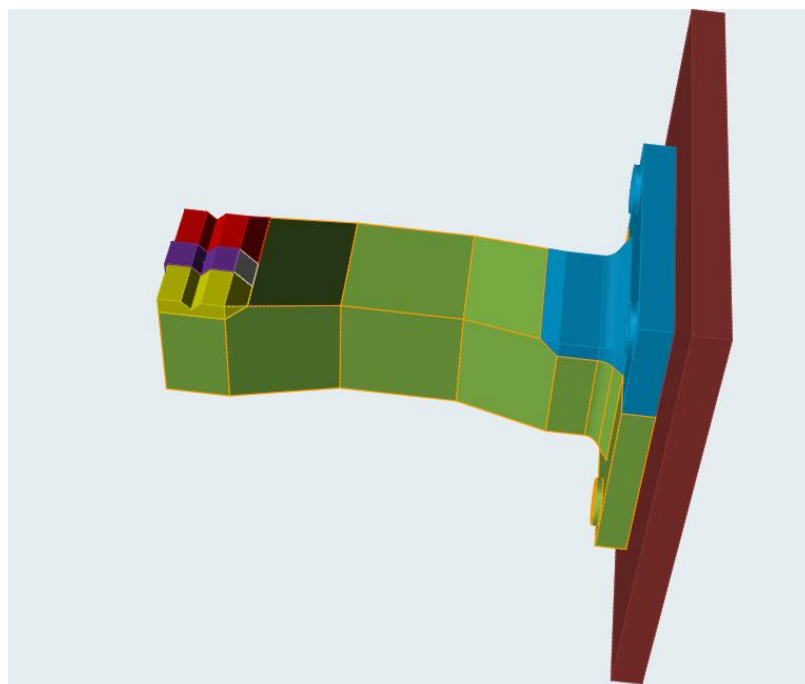
6.2 Nastavení a simulace topologické optimalizace v programu Altair Inspire

Před samotnou optimalizací bylo nutno provést několik nastavení, aby simulace zdárně proběhla. Model do samotného programu vstoupí jako jednolitý díl, viz obr 55, který bylo třeba přes určité operace rozdělit. Toto rozdělení slouží k vymezení si tzv. "design space", který určuje, na jaké části se bude provádět optimalizace.



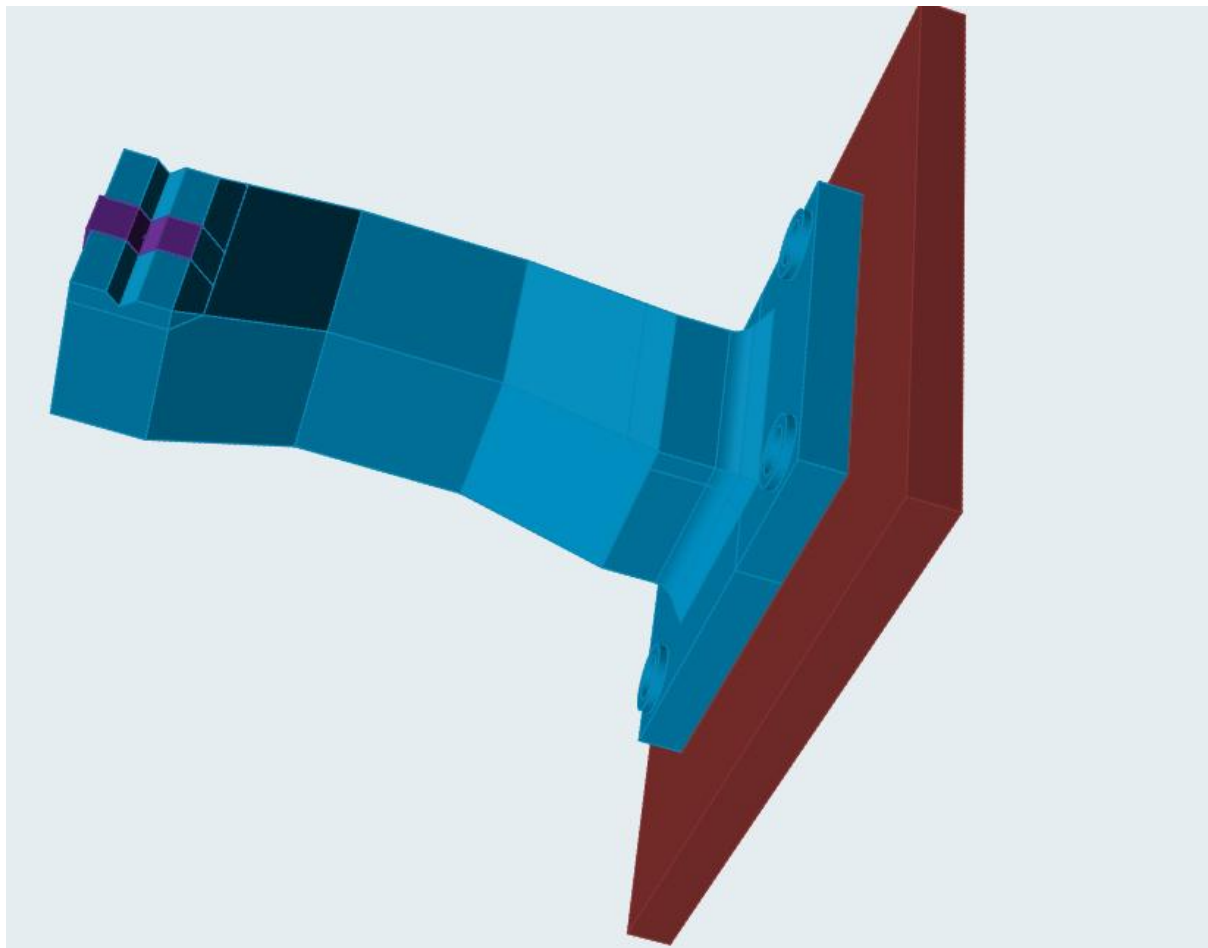
Obr. 55 - Převedení součásti ze SolidWorksu do Altair Inspire

Pomocí funkce Cut, byla oddělena opěrná deska za nosníkem, aby spolu nepředstavovali jedno těleso. Dále byla stejná funkce použita na rozdělení části s drážkou, která slouží k přenosu sil. Pro lepší orientaci je výsledek rozdělení zobrazen několika barvami.



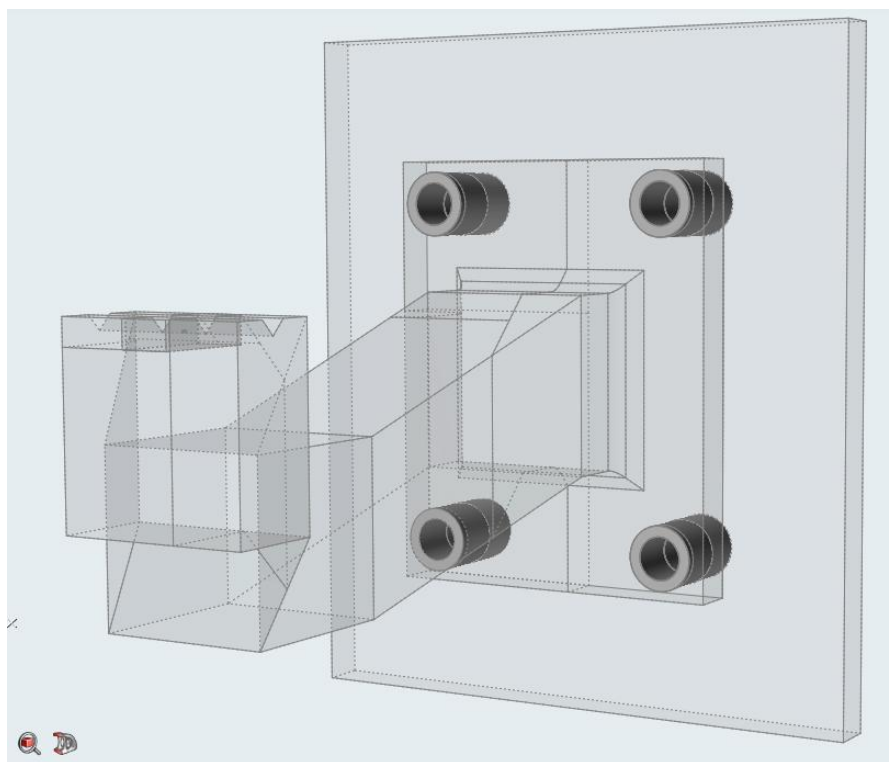
Obr. 56 - Zobrazení rozdělených částí

V dalším kroku byly využity Booleovské operace, viz obr. 57, které sloučily požadované rozdělené části dohromady tak, aby vznikla část pro "design space"(Modrá), část pro přenos síly (fialová), a část, která je opěrným bodem pro nosník (červená).



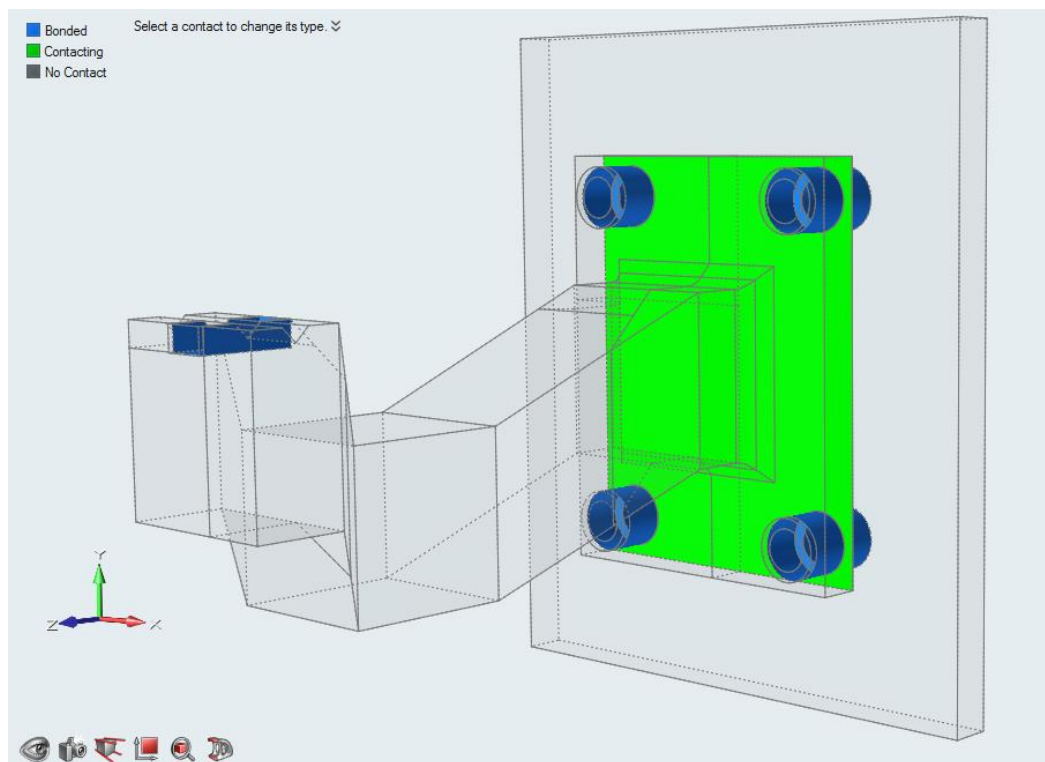
Obr. 57 - Použití Booleovských operací pro sloučení

Kvůli výsledku simulace bylo nežádoucí, aby do části pro optimalizaci zasahovaly díry pro šrouby, a funkce Cut tuto podmínku nedokáže splnit, musela být použita funkce "Partition". Tato funkce slouží k oddělení kruhových či válcovitých částí z dílu. Po tomto kroku se definitivně nastaví modře zbarvená část jako prostor určený pro topologickou optimalizaci.



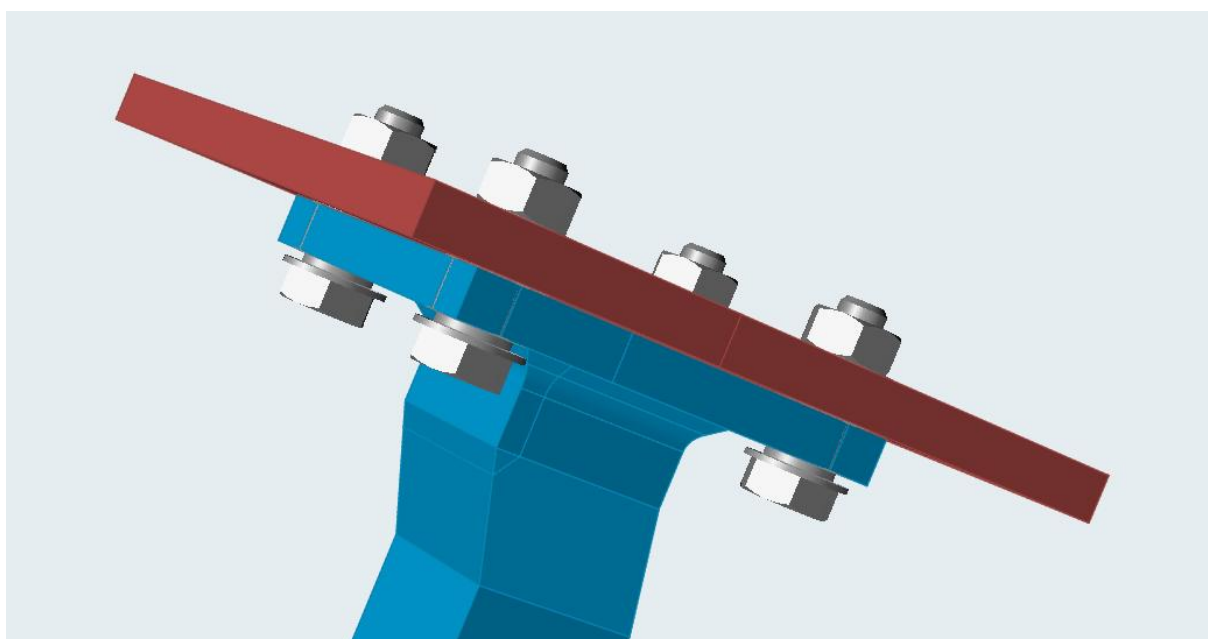
Obr. 58 - Použití funkce Partition

Jelikož byl nosník nyní rozdělen na čtyři části, byla potřeba vymežit, jaké plochy jsou kontaktní a jaké jsou pevně vázány s částí pro optimalizaci. Na obr. 59 je zeleně označena kontaktní plocha mezi opěrnou deskou a nosníkem. Díry pro šrouby a místo, které nese zatížení, jsou ke zbytku nosníku připevněny napevno, a proto jsou označeny modrou barvou.



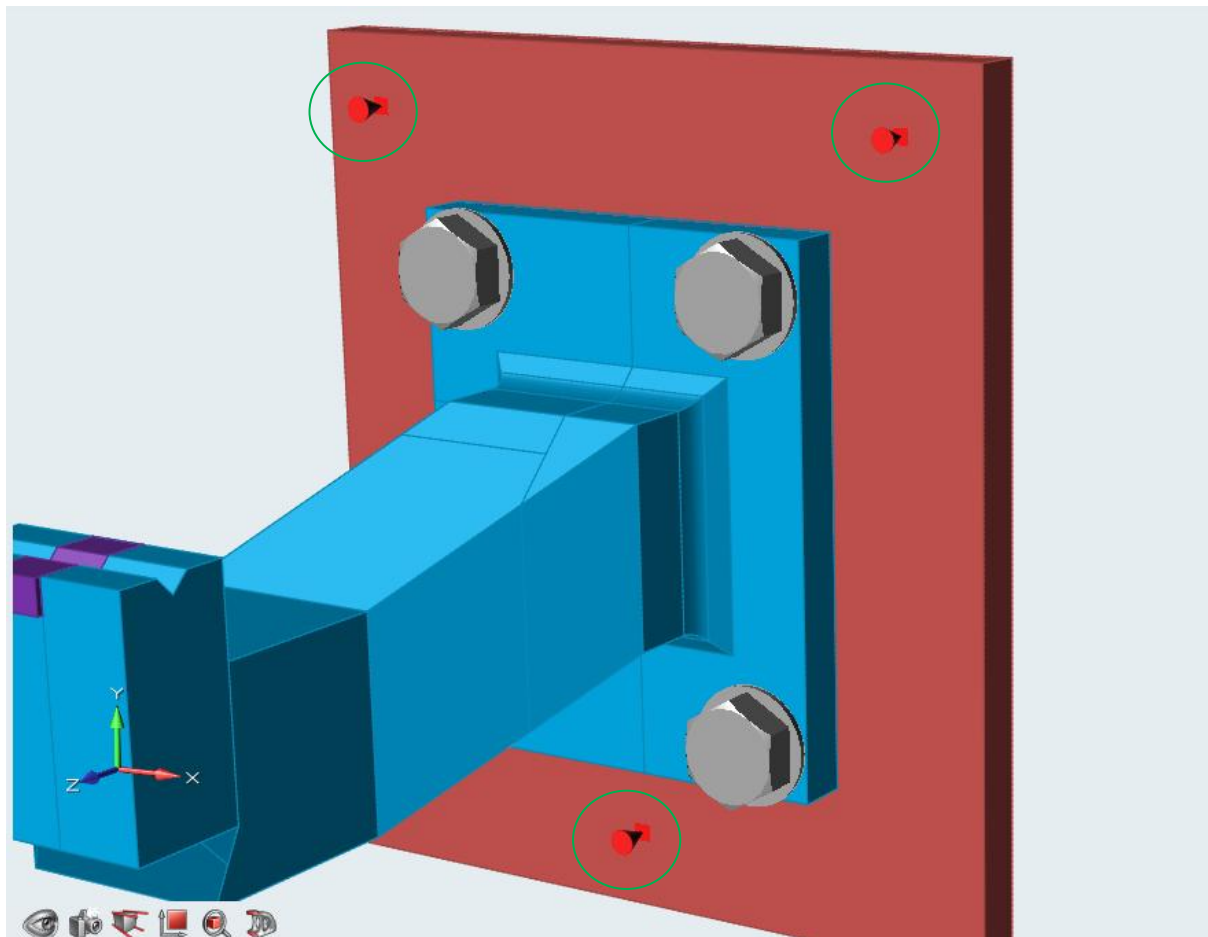
Obr. 59 - Zobrazení kontaktních částí (zelená) a částí napevno (modrá)

Do oddělených děr byly přidány šrouby z nerezové oceli (AISI 304), které simulují reálné uchycení nosníku do konstrukce.



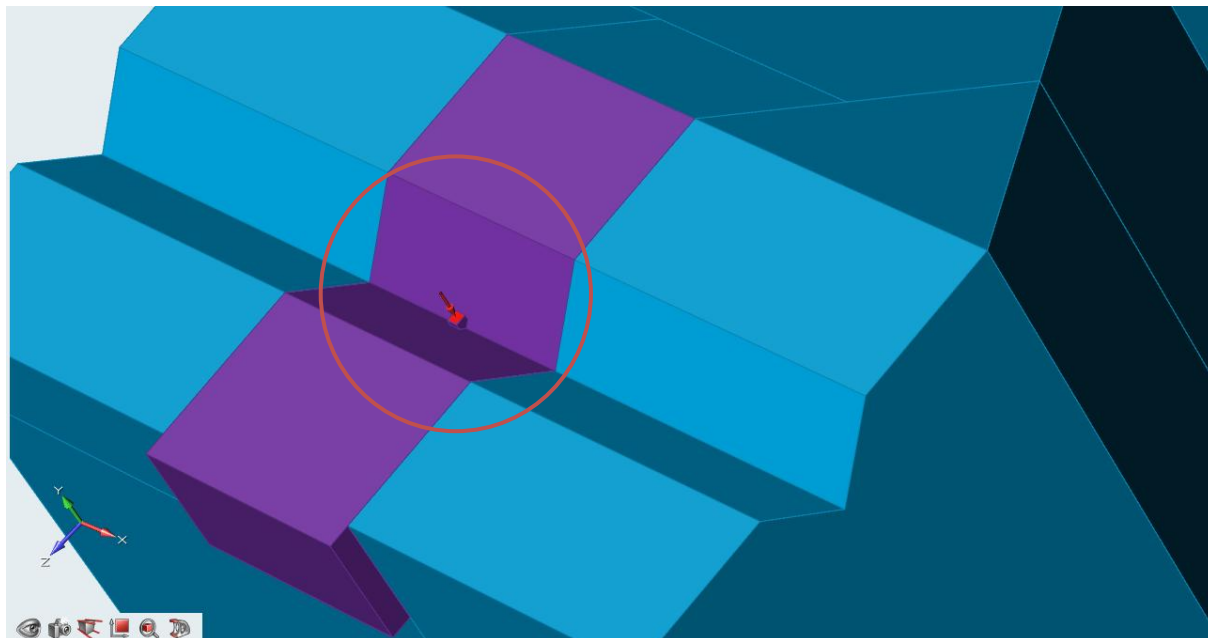
Obr. 60 - Uchycení nosníku šrouby

Pro úplné ustavení opěrné desky bylo nutné přidat podpory. Podpory vymezi plochu, od které budou působit napětí, která jsou způsobena silou na konci nosníku. Na desku byly nastaveny tři podpory bez přesných souřadnic umístění.



Obr. 61 - Zobrazení umístění podpor













Do drážky pro zatížení byla umístěna na připravenou plošku síla o velikosti 300N. Tato síla byla zvolena kvůli případnému experimentu s vyrobenou částí pomocí DMLS 3D tiskárny.



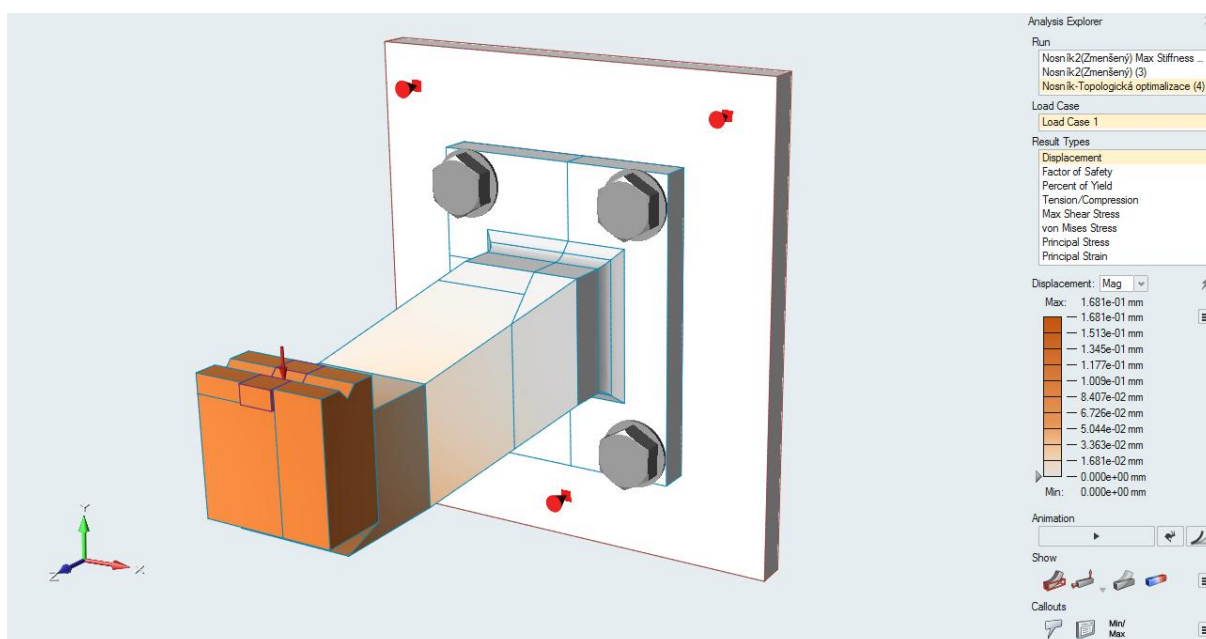
Obr. 62 - Zobrazení umístění síly

Na závěr nastavení byla potřeba zvolit materiál všech používaných součástí. Jak už je zmíněno výše, normalizované šrouby byly z nerezové oceli (AISI 304). Pro opěrnou desku byl zvolen materiál v podobě slitiny titanu Ti-6Al-4V, a to pro jeho výborné mechanické vlastnosti a také proto, aby opěrná deska neovlivňovala výsledky optimalizace. Zbylé části tj. díry pro šrouby, část pro optimalizaci a drážka pro přenos zatížení jsou z hliníkové slitiny 6061 - T6. Přehled všech částí a použitých materiálů je v tabulce č. 3. Po nastavení materiálů byla celková hmotnost neoptimalizované součásti (bez opěrné desky) 173g.

Tabulka 3 - Přehled částí a použitých materiálů

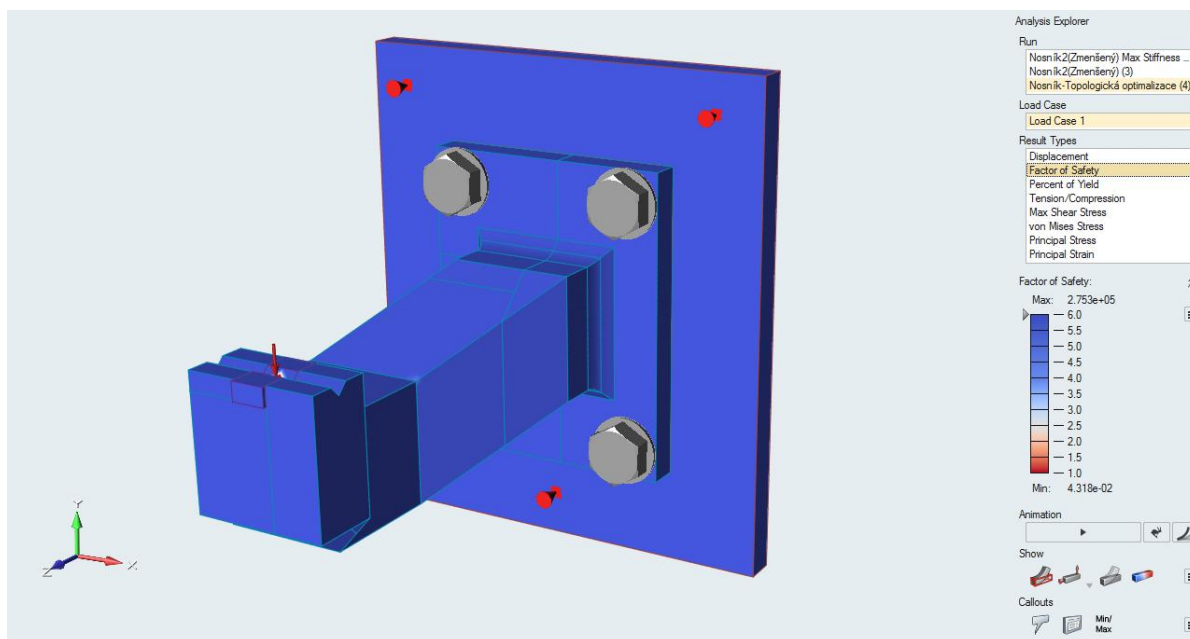
Part	Color	Material
Nosník - Opěrná deska		Titanium Alloy(Ti-6Al-4V)
Nosník - Design space		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Drážka pro zatížení		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)
Nosník - Díra pro šrouby		Aluminum (6061-T6)

Pro srovnání výsledků byla před topologickou optimalizací provedena analýza neoptimalizované součásti. Z analýzy byl zjištěn průhyb nosníku, koeficient bezpečnosti, tažnost, Napětí v tahu/tlaku, stříhové napětí, a maximální povolené napětí.



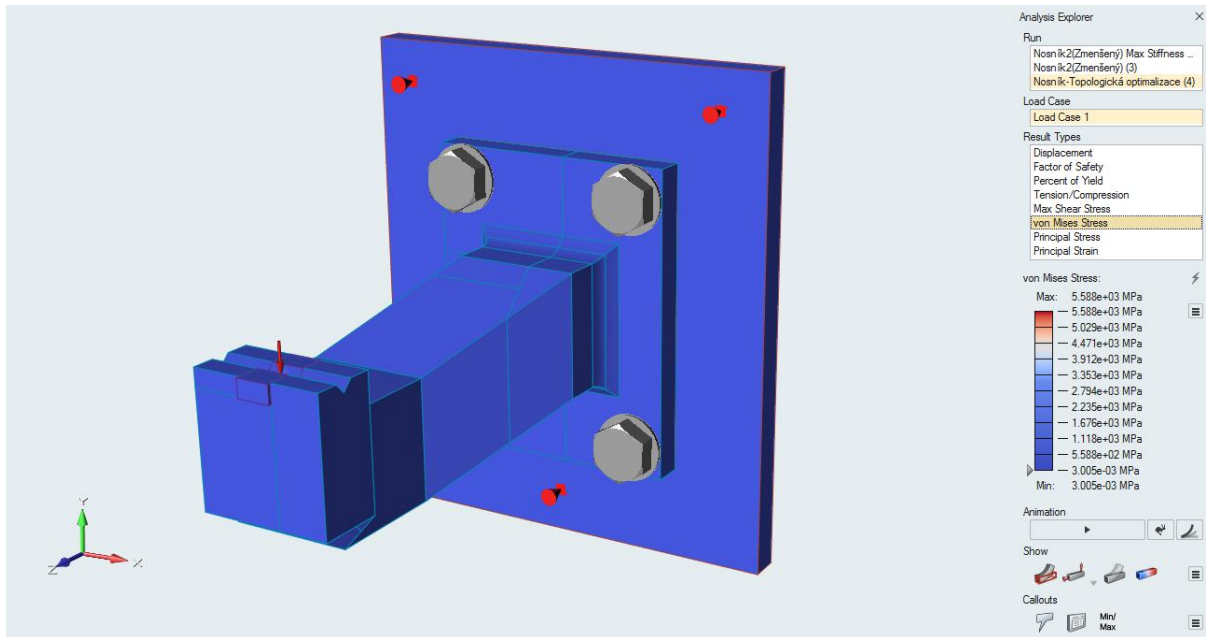
Obr. 63 - Zobrazení průhybu neoptimalizovaného nosníku

Průhyb neoptimalizovaného nosníku při zatěžující síle v nevetknuté části činí 0,17 mm, viz obr. 63. Koeficient bezpečnosti se v celé části nosníku pohybuje nad hranicí 6, tudíž je nosník pro zatížení 300N naddimenzován.

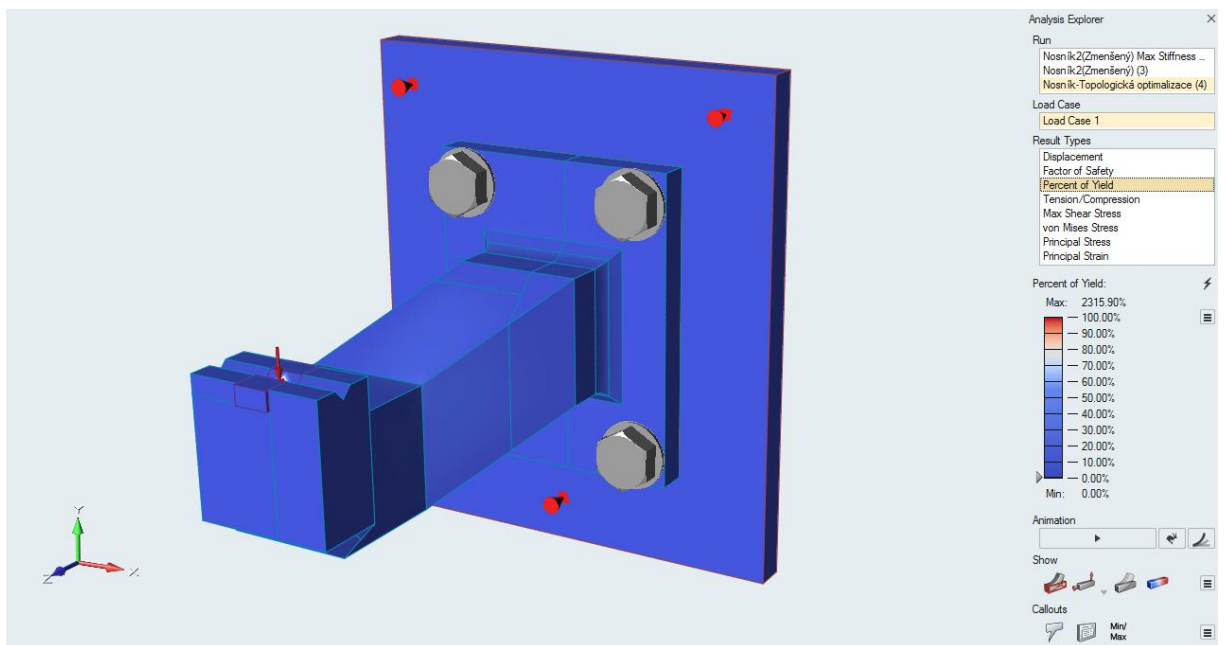


Obr. 64 - Koeficient bezpečnosti

Maximální napětí 5580 MPa se vyskytuje pouze v části, kde je vytvořena ploška pro zatěžující sílu, a proto tento výsledek považuji za zavádějící. Ve zbytku součásti převažuje minimální napětí o velikosti 0,0017 MPa (obr. 65). Poměrné využití meze kluzu znázorňuje v procentech, jaká oblast se blíží k překročení meze kluzu, a tím pádem k trvalé deformaci nosníku. Na obr. 66 je vidět, že v případě naddimenzovaného nosníku se pohybuje v nulových hodnotách, a tudíž deformace nehrozí.



Obr. 65 - Maximální napětí



Obr. 66 - Zobrazení překročení meze kluzu (červeně), které se zde nevyskytuje

Před samotným spuštěním simulace je potřeba nastavit parametry, které od optimalizace očekáváme. Hlavní cíl topologické optimalizace byl nastaven na zachování maximální tuhosti součásti. V dalším kroku bylo nastaveno zachování 30% z původní hmotnosti a také podmínka, aby minimální povolená tloušťka nepřekročila hodnotu pod 10mm. Další omezení jako např. vibrace součásti nebyly použity.

Tabulka 4 - Nastavení pro topologickou optimalizaci

Run Optimization

Name: Nosník-Topologická optimalizace

Type: Topology

Objective: Maximize Stiffness

Mass Targets: % of Total Design Space Volume

5 10 15 20 25 30 35 40 45 50%

30

Frequency Constraints

None

Maximize frequencies

Minimum: 20 Hz Apply to lowest 10 modes

Use supports from load case: No Supports

Thickness Constraints

Minimum: 10 mm

Maximum: 8.9672 mm

Speed/Accuracy

Contacts

Sliding only

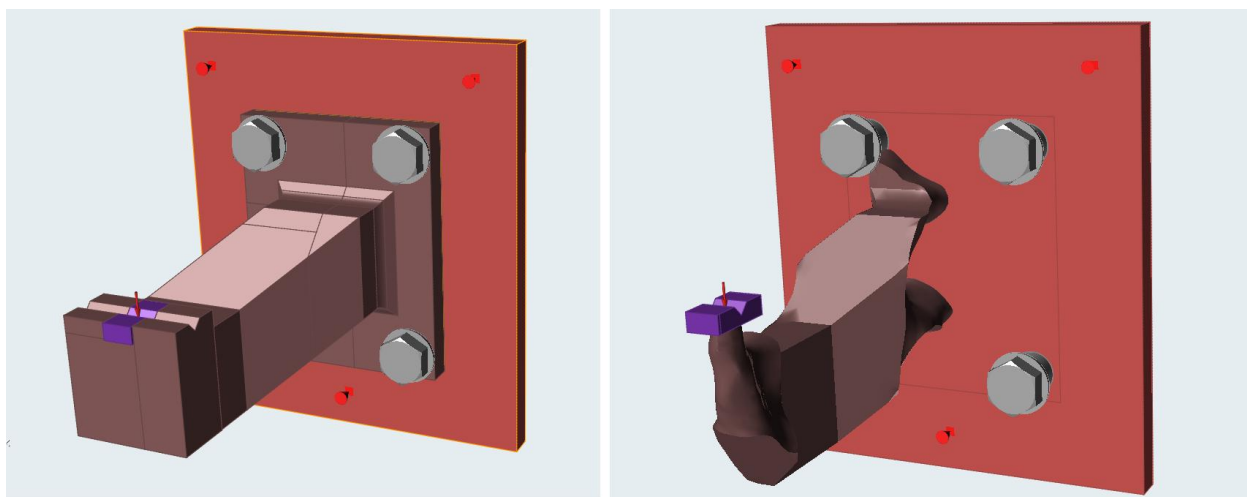
Sliding with separation

Gravity

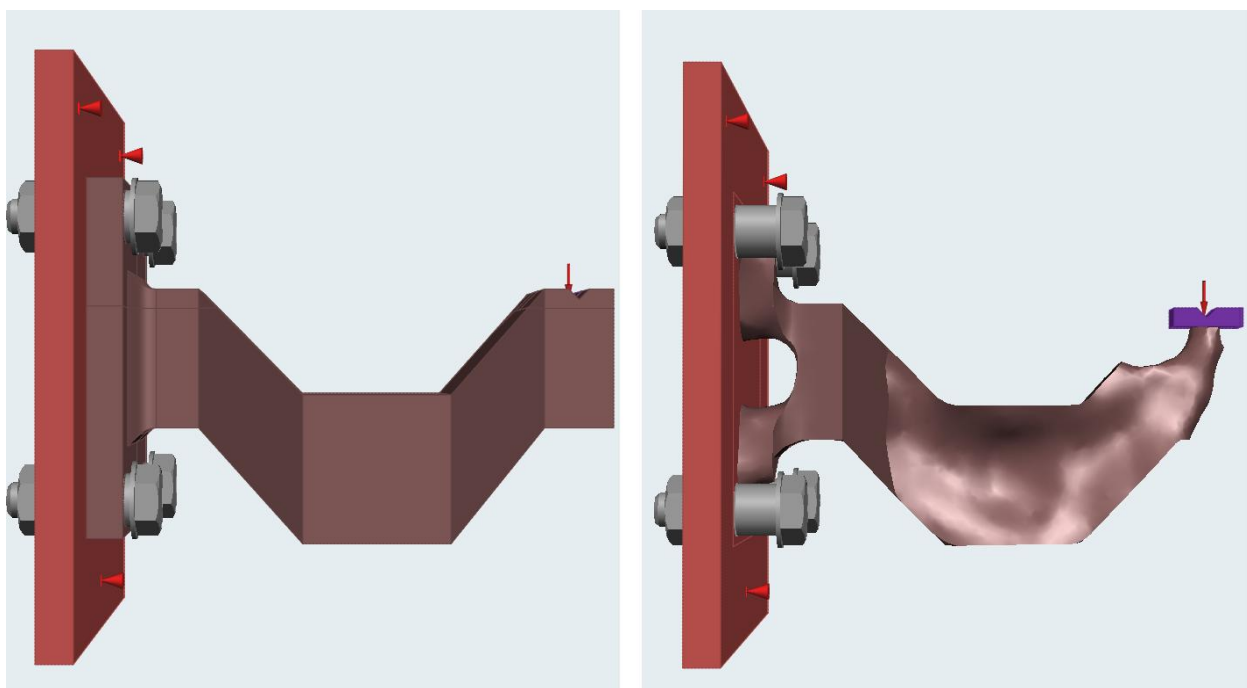
Load Cases

Restore Export Run Close

Po následné optimalizaci vznikl nosník z bionické konstrukce s výrazným hmotnostním úbytkem. Nynější redukovaná hodnota činila 52g, tzn. 121 gramový úbytek hmotnosti z předešlých 173g. Software vyhodnotil, že při zátěži 300N není třeba nosník uchycovat čtyřmi šrouby a zvolil tedy pouze uchycení pomocí dvou šroubů. Další změnou bylo odebrání materiálu mezi šrouby a vzniknutí mostu viz obr. 68.

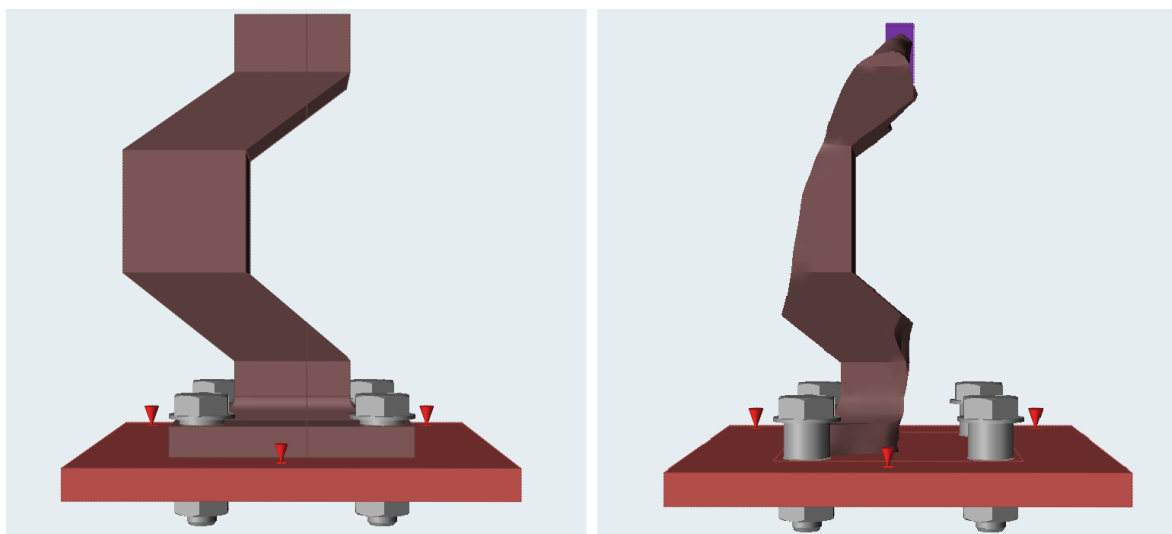


Obr. 67 - Porovnání neoptimalizovaného nosníku (vlevo) a nosníku po topologické optimalizaci (vpravo)



Obr. 68 - Porovnání neoptimalizovaného nosníku (vlevo) a nosníku po topologické optimalizaci (vpravo)

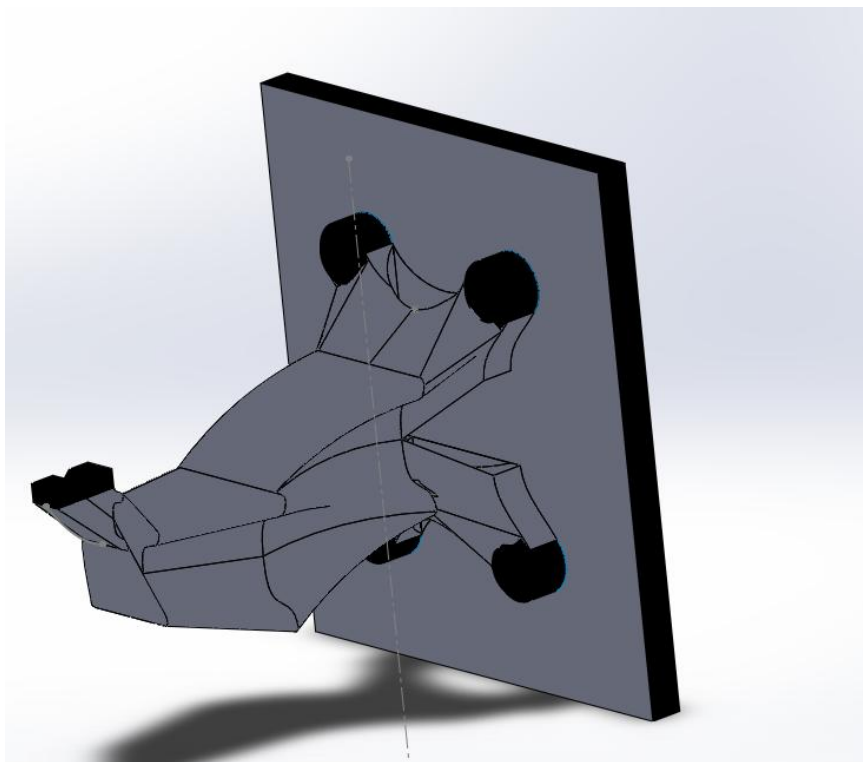
(bokorys)



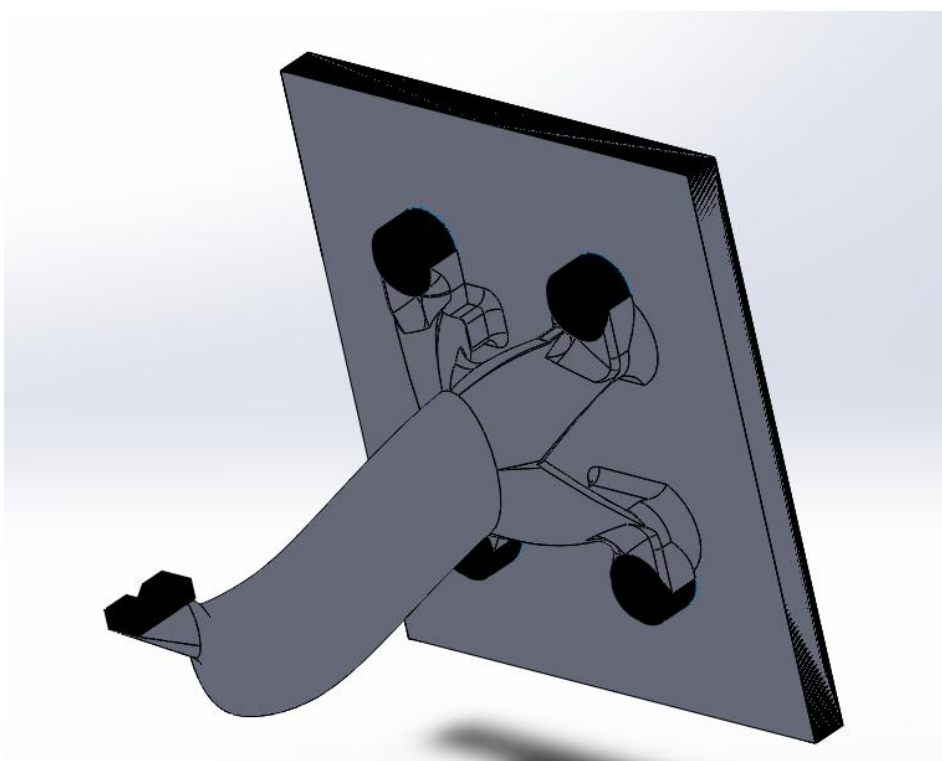
*Obr. 69 - Porovnání neoptimalizovaného nosníku (vlevo) a nosníku po topologické optimalizaci (vpravo)
(půdorys)*

6.3 Úprava součásti pro optimalizaci odlehčených struktur

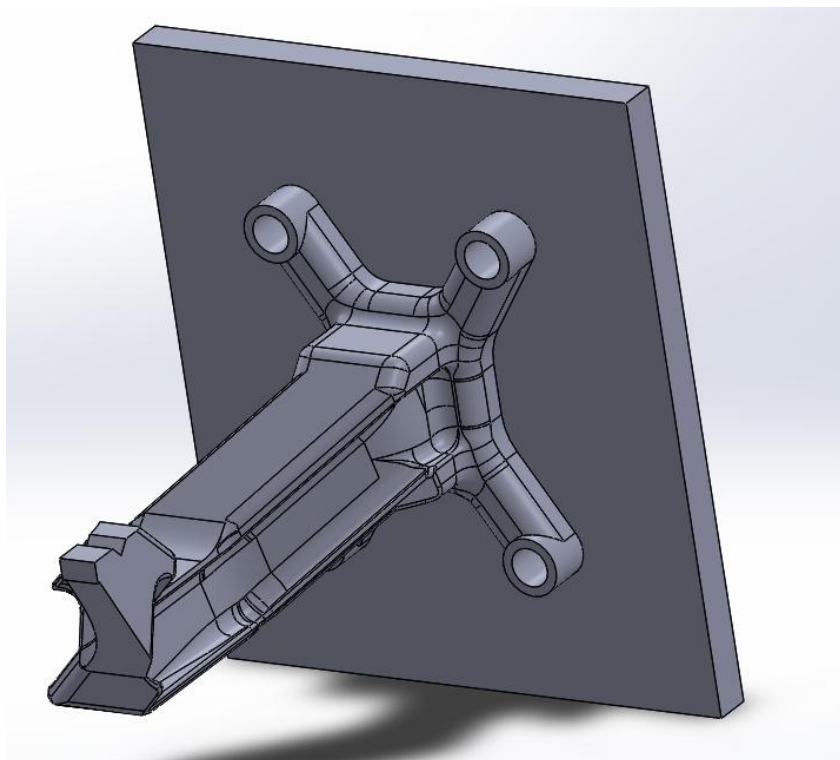
Jelikož topologická optimalizace poskytne konstrukci v bionické podobě, a tudíž obsahuje mnoho ostrých hran a nedostatků. V důsledku nedokonalého tvaru bylo potřeba součást upravit tak, aby byla možnost provést optimalizace odlehčených struktur, a proto byla součást vložena zpět do CAD softwaru SolidWorks, kde bylo vypracováno několik možností. Další možnou volbou pro úpravu nosníku byla konverze optimalizovaného nosníku ve formátu STL do grafických programů jako např. Blender či Mashmixer. Tato volba se následně nejevila jako vyhovující, jelikož software Altair Inspire nedokáže rozpoznat po úpravě formát STL a vložené těleso označí jako tenkostěnný prvek.



Obr. 70 - První úprava pro odlehčené struktury



Obr. 71 - Druhá úprava byla tvořena elipsou

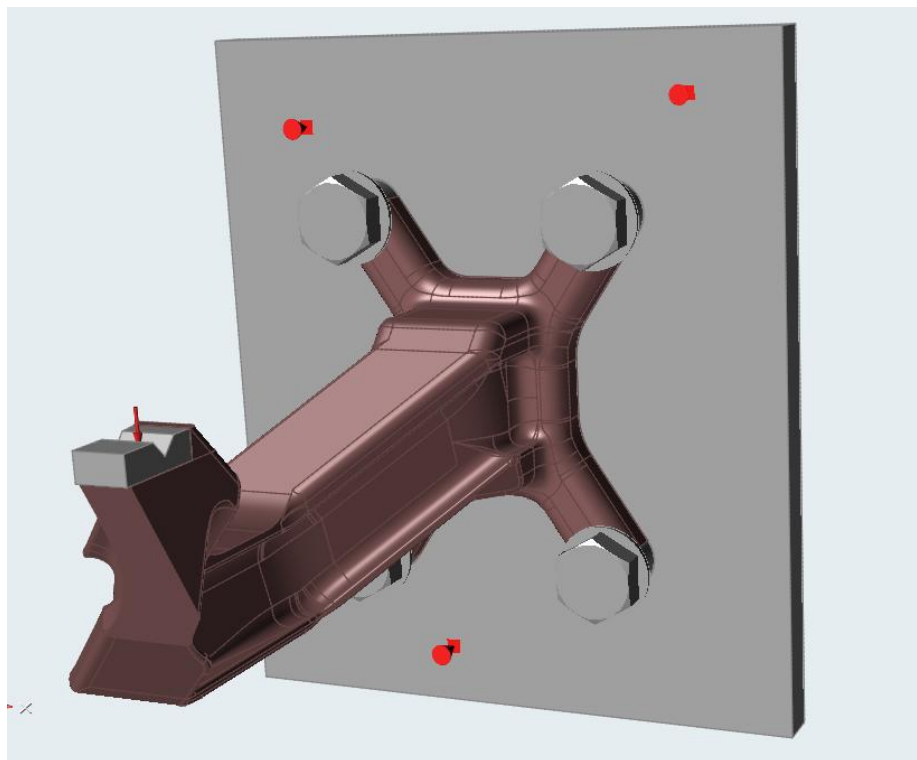


Obr. 72 - Třetí a finální úprava pro odlehčené struktury

Ze třech provedených úprav se poslední (obr. č 72) jevila jako nejvhodnější pro odlehčené struktury. Součást byla vymodelována do profilu I-nosníku, který v podstatě nabídl topologická optimalizace. Z hlediska odlišného typu optimalizace byly přidány zpět čtyři uchycení pro šrouby, aby si software mohl najít nejvhodnější variantu uchycení, a pro lepší zobrazení odlehčených struktur byl opět přidán materiál do prostoru mezi dírami pro šrouby a opěrnou deskou. Těmito kroky opět narostla váha součásti o 13g na 65g.

6.4 Nastavení a simulace optimalizace odlehčených struktur v programu Altair Inspire

Nastavení pro optimalizaci odlehčených struktur se skládalo ze stejných kroků jako před topologickou optimalizací, tzn. rozdělení součásti na několik částí, pro určení "design space", určení kontaktních ploch, nastavení podpor, síly, a šroubů do děr pro ně určených. Použité materiály zůstaly stejné jako při topologické optimalizaci.



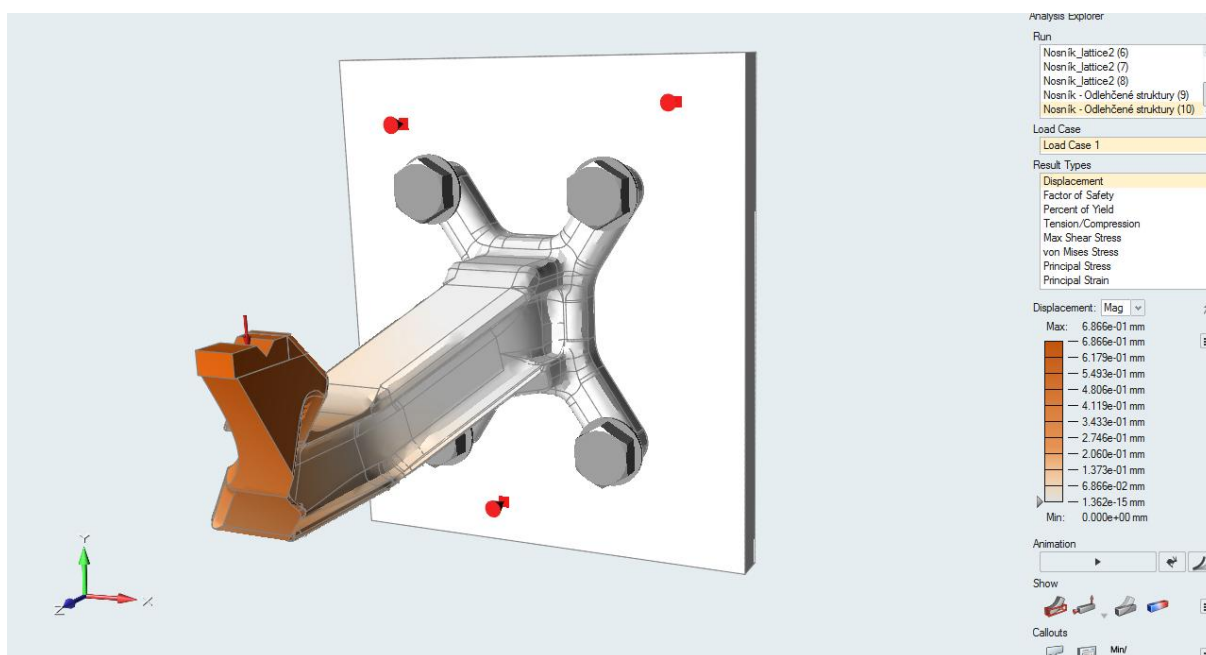
Obr. 73 - Přednastavený model pro optimalizaci odlehčených struktur

Před samotnou optimalizací byla provedena analýza na upraveném a zatím neoptimalizovaném nosníku. Součástí analyzujeme na průhyb, bezpečnostní koeficient, poměrné využití meze kluzu, napětí v tahu/tlaku a smykové napětí.

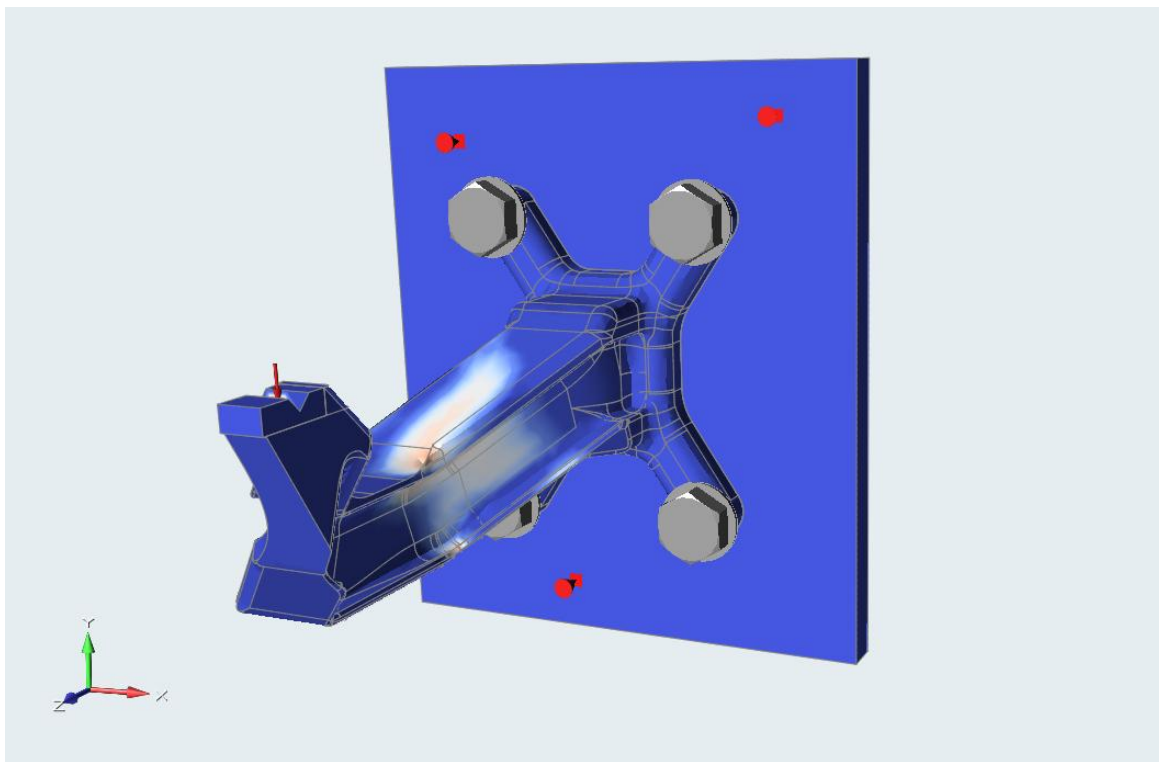
Tabulka 5 - Nastavení pro analýzu neoptimalizované součásti

Zatěžující síla	300N
Délka trámku v odlehčené struktuře	-
Maximální průměr trámku	-
Minimální průměr trámku	-

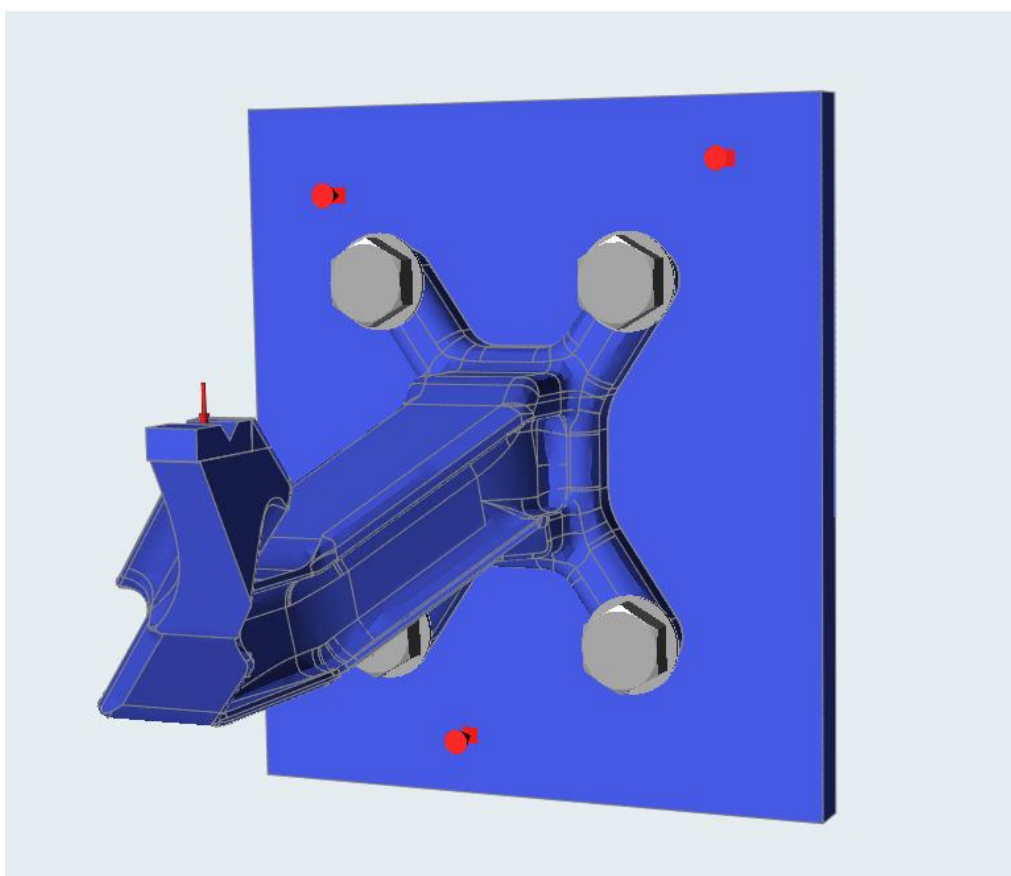
Maximální průhyb nosníku na konci zatíženém silou o velikosti 300N činí 0,68mm a na obrázku č. 74 je tento průhyb zobrazen oranžovou barvou. Koeficient bezpečnosti se ve větší míře pohybuje okolo čísla 6 (modře), jen v místech, kde je například zeslabená šířka nosníku, nebo je zde provedeno zahnutí nosníku, koeficient bezpečnosti klesne na hodnotu 1,5 - 2 (bílé až růžově), ale to je pro námi známé prostředí, kde by v případě výroby byl nosník umístěn, a materiál, který je pro výrobu nosníku určen, vyhovující, viz obr 74. Maximální napětí je opět v místě určeném pro sílu s hodnotou 6733MPa. Ve zbytku nosníku působí minimální napětí o hodnotě 0,00016MPa (obr. 76). Poměrné využití meze kluzu, které znázorňuje místa na součásti, kde dojde k překročení meze kluzu, se v případě topologicky optimalizovaného nosníku v některých částech pohybuje okolo 20%, viz obr 77.



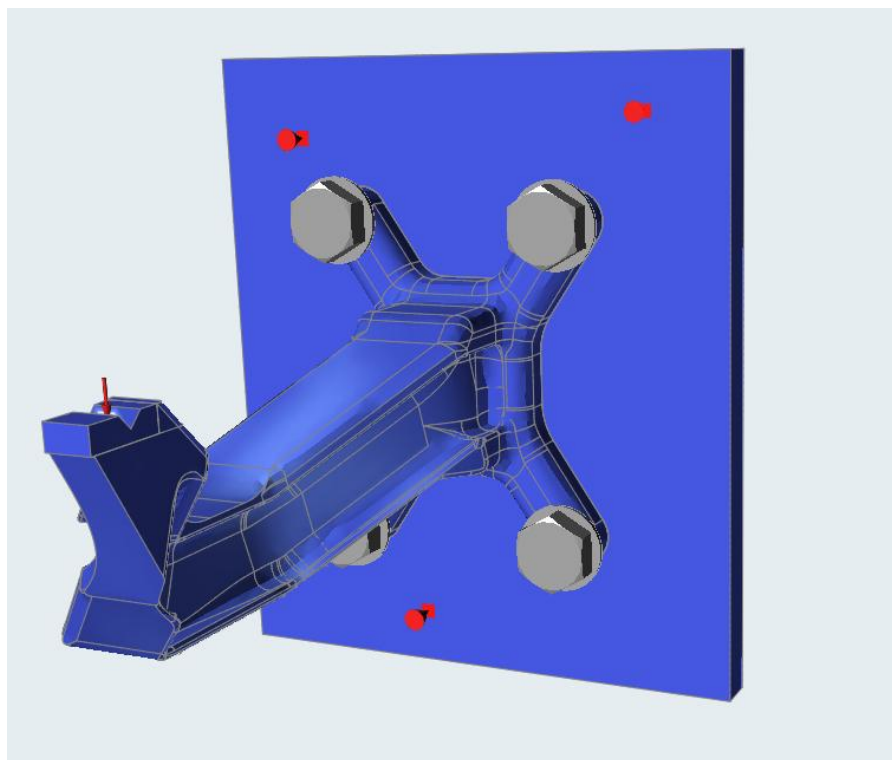
Obr. 74 - Průhyb neoptimalizovaného nosníku



Obr. 75 - Zobrazení koeficientu bezpečnosti



Obr. 76 - Zobrazení napětí v celém nosníku



Obr. 77 - Zobrazení míst s plastickou deformací (červeně), které zde nejsou přítomny

Z hlediska náročnosti výpočtů bylo rozhodnuto o zachování 80% hmotnosti z celkového objemu součásti, a tento zbylý objem vyplnit 50% odlehčenými strukturami. Pro první analýzy byla nastavena délka jednoho trámku v odlehčené struktuře (pórovitosti) na 3mm s minimálním průměrem 0,3mm a maximálním průměrem 0,6mm. Hlavní cíl byl opět pro zachování maximální tuhosti. Další omezení, jako např. vibrace součásti nebyly nastaveny.

Tabulka 6 - Nastavení pro výpočet odlehčených struktur

Run Optimization

Name: Nosník - Odlehčené struktury

Type: Lattice

Objective: Maximize Stiffness

Lattice

Target length: 3 mm

Minimum diameter: 0.3 mm

Maximum diameter: 0.6 mm

Fill with: 50% Lattice

Mass Targets: % of Total Design Space Volume

5 10 15 20 25 30 35 40 45 50%

80

Frequency Constraints

None

Maximize frequencies

Minimum: 20 Hz Apply to lowest 10 modes

Use supports from load case: No Supports

Speed/Accuracy

Contacts

Sliding only

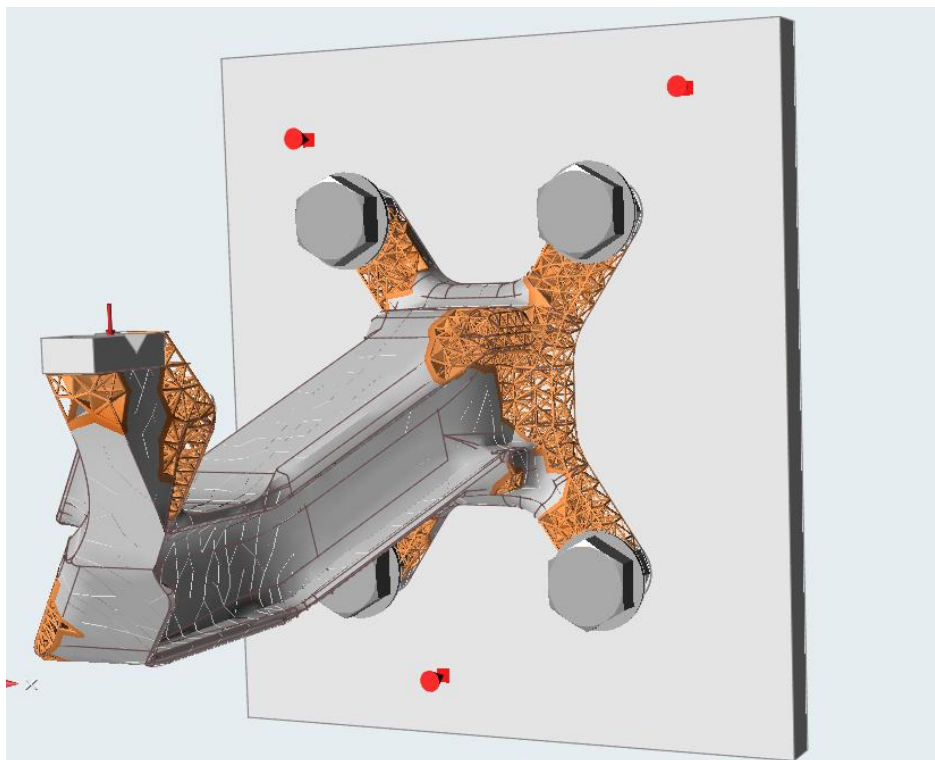
Sliding with separation

Gravity

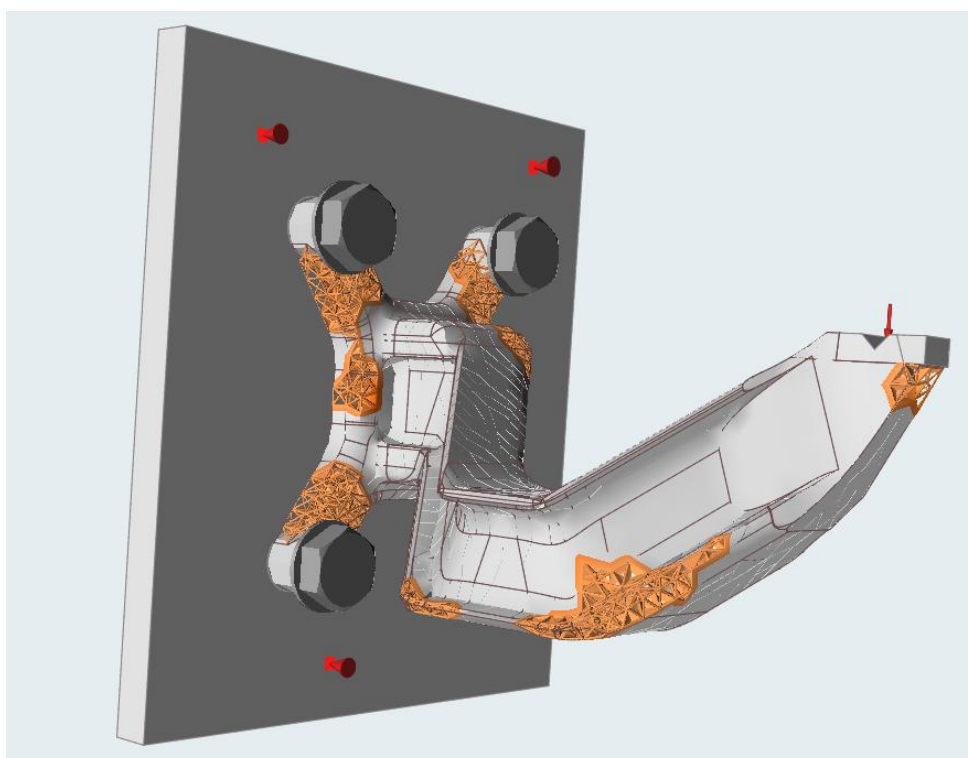
Load Cases

Restore Export Run Close

První simulace snížila hmotnost součásti z původních 65g opět na 52g tzn. 13g hmotnostní úspora. Jak je vidět na obr. 78,79, odlehčené struktury byly vytvořeny v místech, které vyhodnotil Altair Inspire i při topologické optimalizaci jako přebytečné, ale kvůli estetičnosti a výrobitelnosti součásti byl materiál přidán zpět.

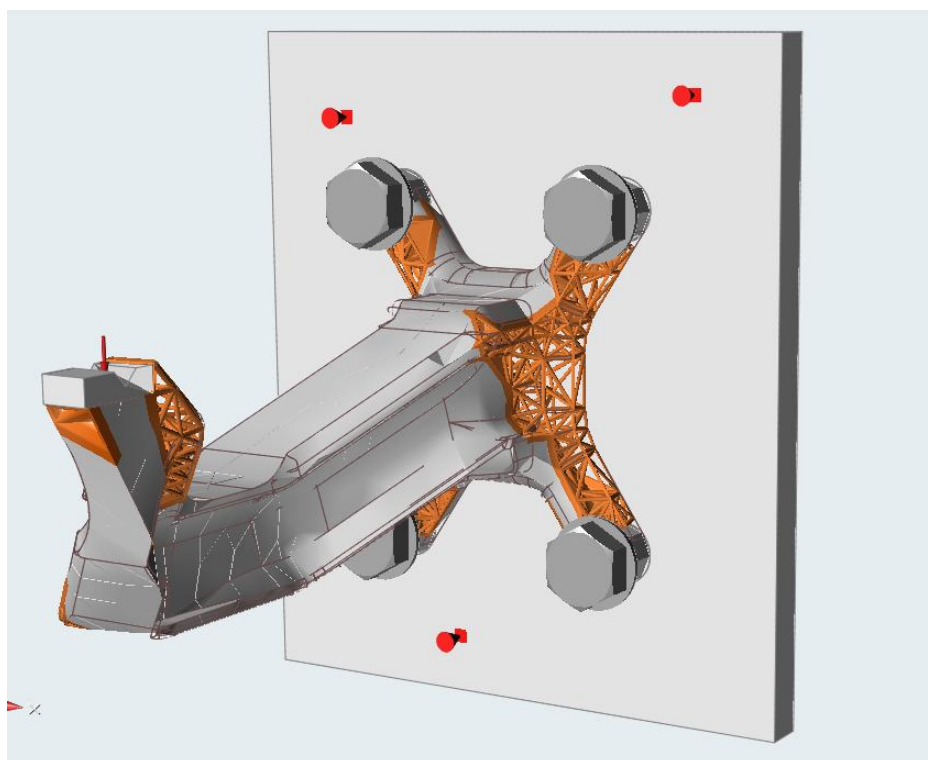


Obr. 78 - Zobrazení míst vytvoření odlehčené struktury v nosníku s pórovitostí 3mm (oranžově) (pohled a.)

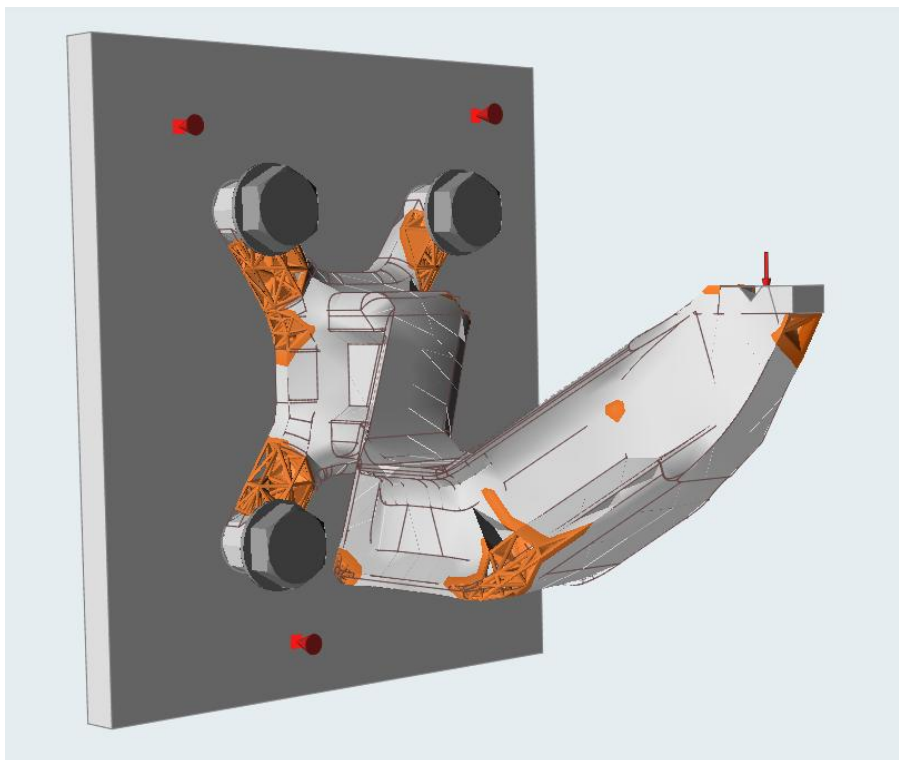


Obr. 79 - Zobrazení míst vytvoření odlehčené struktury v nosníku s pórovitostí 3 mm (oranžově) (pohled b.)

Pro případné realizování výroby nosníku byl pro lepší vyrobiteľnosť pomocí DMLS tiskárny optimalizován druhý typ nosníku, ale tentokrát s větší délkou trámku v optimalizované struktuře, tzn. pórovitostí. Po provedení mnoha simulací byla maximální přípustná délka trámku stanovena na 6mm s jeho maximálním průměrem 1,2mm a minimálním průměrem 0,6mm. Struktury byly vytvořeny téměř na stejných místech, jako tomu bylo u předešlé simulace, pouze s rozdílnou pórovitostí struktury (obr. 80,81). Hmotnost součásti se nijak výrazně nezměnila a zůstala na hodnotě 52g.



Obr. 80 - Zobrazení upravené struktury odlehčených struktur s pórovitostí 6mm (oranžově)(Pohled a.)



Obr. 81 - Zobrazení upravené struktury odlehčených struktur s pórovitostí 6mm (oranžově)(Pohled b.)

6.5 Analýza nosníku s odlehčenými strukturami

Analýza u optimalizovaného nosníku byla provedena na stejné hodnoty, jako při analýze neoptimalizovaného dílu. Analyzovány byly oba typy nosníku a jejich hodnoty byly následovně porovnány. Pro lepší orientace bude prvně optimalizovaný nosník s pórovitostí 3mm nazýván jako **Typ A**, a druhý optimalizovaný nosník s pórovitostí struktury 6mm bude nazýván jako **Typ B**.

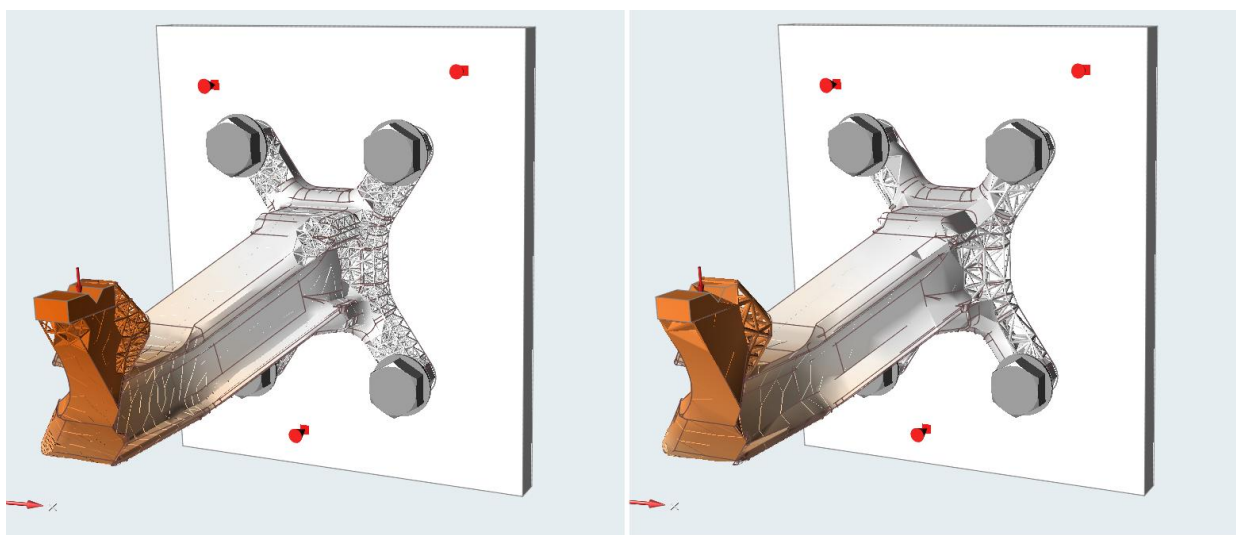
Tabulka 7 - Hodnoty nastavení před analýzou

	Typ A	Typ B
Zatěžující síla	300N	300N
Délka trámku v odlehčené struktuře (pórovitost)	3 mm	6 mm
Maximální průměr trámku	0,6 mm	1,2 mm
Minimální průměr trámku	0,3 mm	0,6 mm

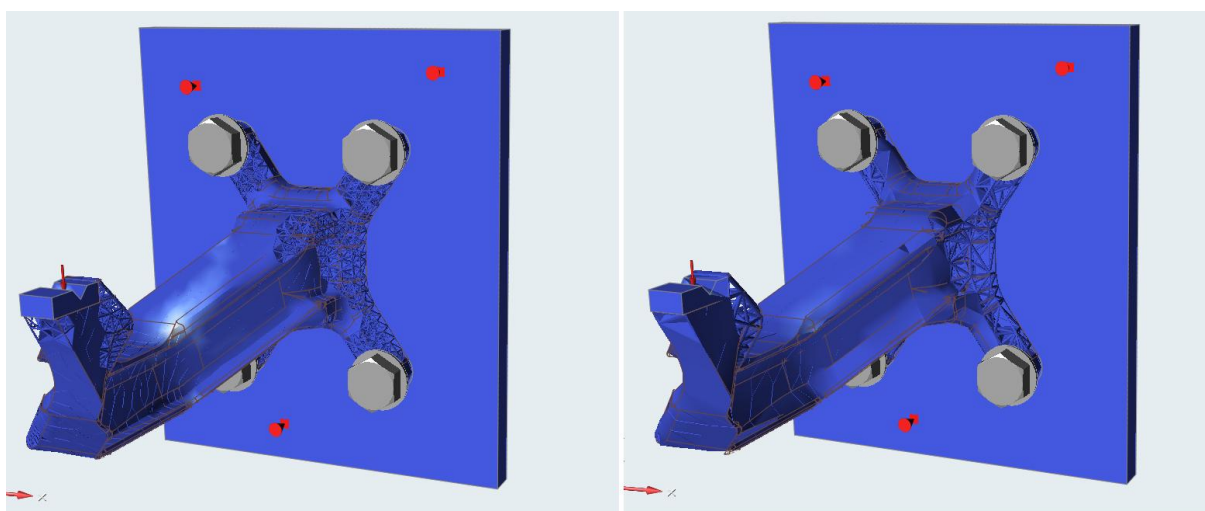
Kvůli lepší orientaci jsou hodnoty analýzy zapsány do tabulky č. 8, a následně jsou k některým z nich doplněny vizuální výsledky analýzy (obr. 82,83).

Tabulka 8 - Výsledky analýzy nosníku Typu A a Typu B při zatížení 300N

	Typ A	Typ B
Průhyb	0,47mm	0,45mm
Koeficient bezpečnosti	3	4,5
Poměrné využití meze kluzu	0 - 25 %	0 - 18 %
Maximální tahové napětí	5128 MPa	4739 MPa
Maximální smykové napětí	2768 MPa	2582 MPa



Obr. 82 - Porovnání průhybu nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo)



Obr. 83 - Porovnání koeficientu bezpečnosti nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo)

Z těchto výsledků je patrné, že lepší mechanické vlastnosti vykazuje nosník Typu B, tedy s nastavenou pórovitostí struktury 6 mm. I když se hodnoty liší minimálně, tak je vidět, že při nastavení vyšší zátěže bude vykazovat lepší mechanické vlastnosti právě nosník Typu B.

6.6 Porovnání obou typů nosníku při vyšším zatížení

Kvůli přesnějším informacím, jaký typ nosníku vybrat pro případnou výrobu, byly provedeny analýzy u obou součástí, a to při zachování stejných parametrů nastavení odlehčené struktury, ale s téměř tři a půl násobně navýšenou zatěžující silou 1000N.

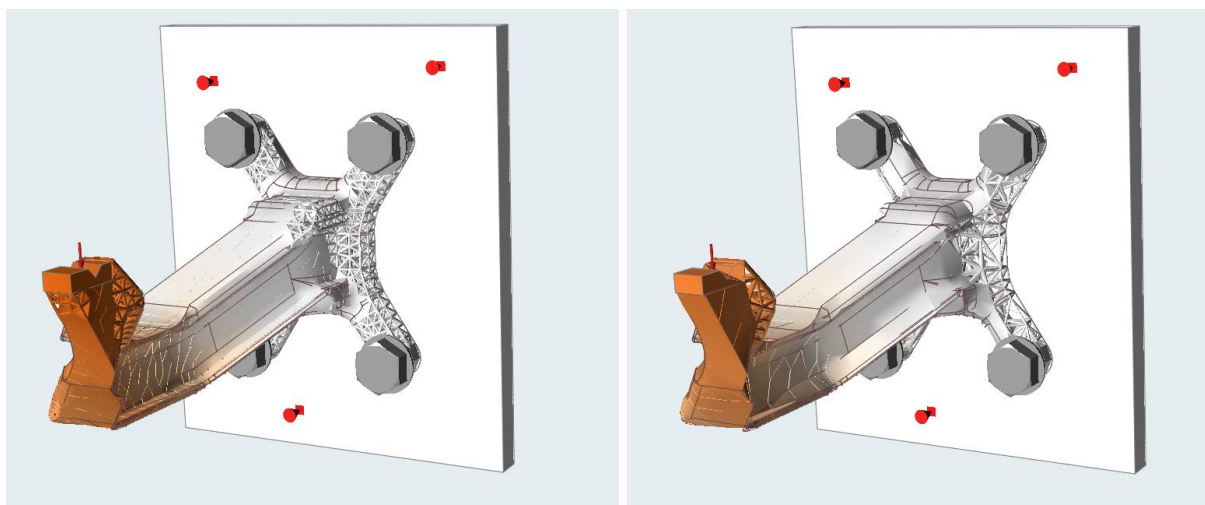
Tabulka 9 - Zobrazení nastavení pro analýzu při zátěži 1000N

	Typ A	Typ B
Zatěžující síla	1000N	1000N
Délka trámku v odlehčené struktuře (pórovitost)	3 mm	6 mm
Maximální průměr trámku	0,6 mm	1,2 mm
Minimální průměr trámku	0,3 mm	0,6 mm

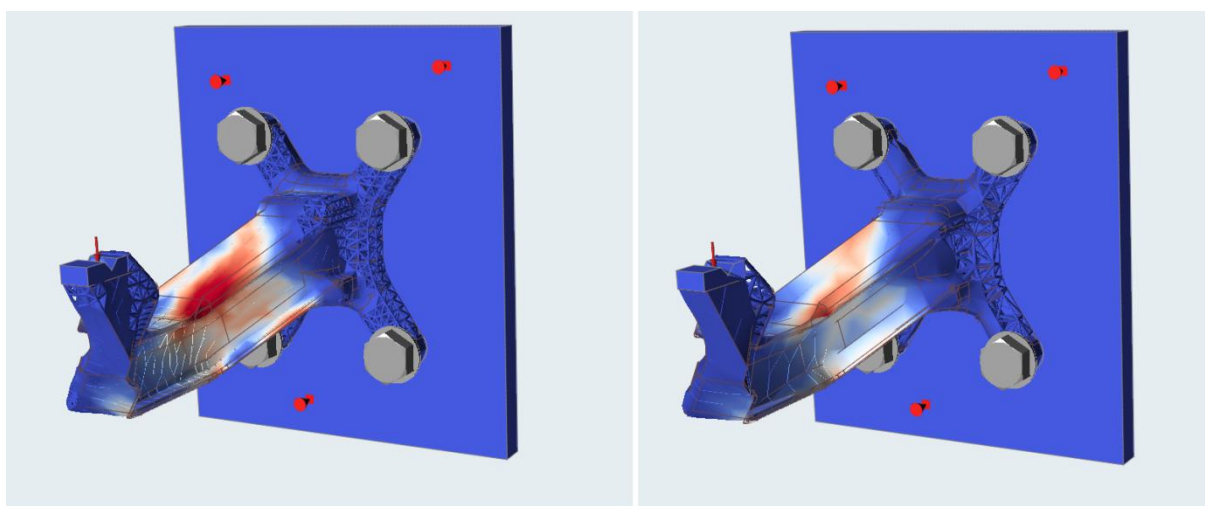
Z analýzy bylo patrné, že struktura s menší pórovitostí není vhodná pro zatěžování vyššími silami. Jak je vidět na obr. 85, při porovnání koeficientu bezpečnosti se u **Typu A** v místech záhybu nosníku sníží koeficient bezpečnosti na hodnotu jedna, načež u druhého **Typu B** zůstává v růžové barvě, tj. mezi hodnotou 2 - 2,5. Další značnou změnou byla změna poměrného využití meze kluzu (obr. 86), kdy opět u **Typu A**, v místech záhybu nosníku, hodnota dosáhla 100%, což znamená možné překročení meze kluzu a vznik trvalých deformací. U **Typu B** se tato hodnota pohybovala ve většině dílu pod 10%, jen v záhybu nosníku dosáhla hodnoty 70% v malé hraniční oblasti, což by se ale dalo považovat za možné varování před deformací součásti, a tudíž při stálém zatížení 1000N by bylo vhodné nosník v těchto místech upravit, pro předejití budoucích problémů. Výsledky analýzy jsou zobrazeny v tabulce č. 10.

Tabulka 10 - Zobrazení výsledku analýzy při zatížení 1000N

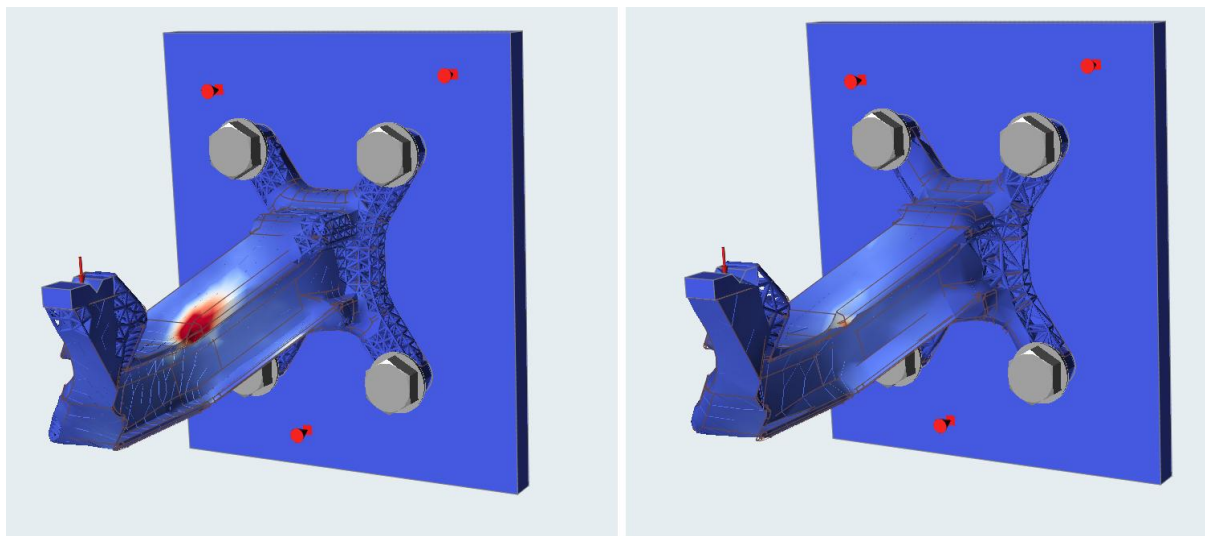
	Typ A	Typ B
Průhyb	1,4 mm	1,5 mm
Koeficient bezpečnosti	1	2
Poměrné využití meze kluzu	0 - 100 %	0 - 70 %
Maximální tahové napětí	17 090 MPa	15 800 MPa
Maximální smykové napětí	9225 MPa	8607 MPa



Obr. 84 - Porovnání průhybu nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo) při zatížení 1000N



Obr. 85 - Porovnání koeficientu bezpečnosti nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo) při zatížení 1000N



Obr. 86 - Porovnání poměrného využití meze kluzu při zatížení 1000N

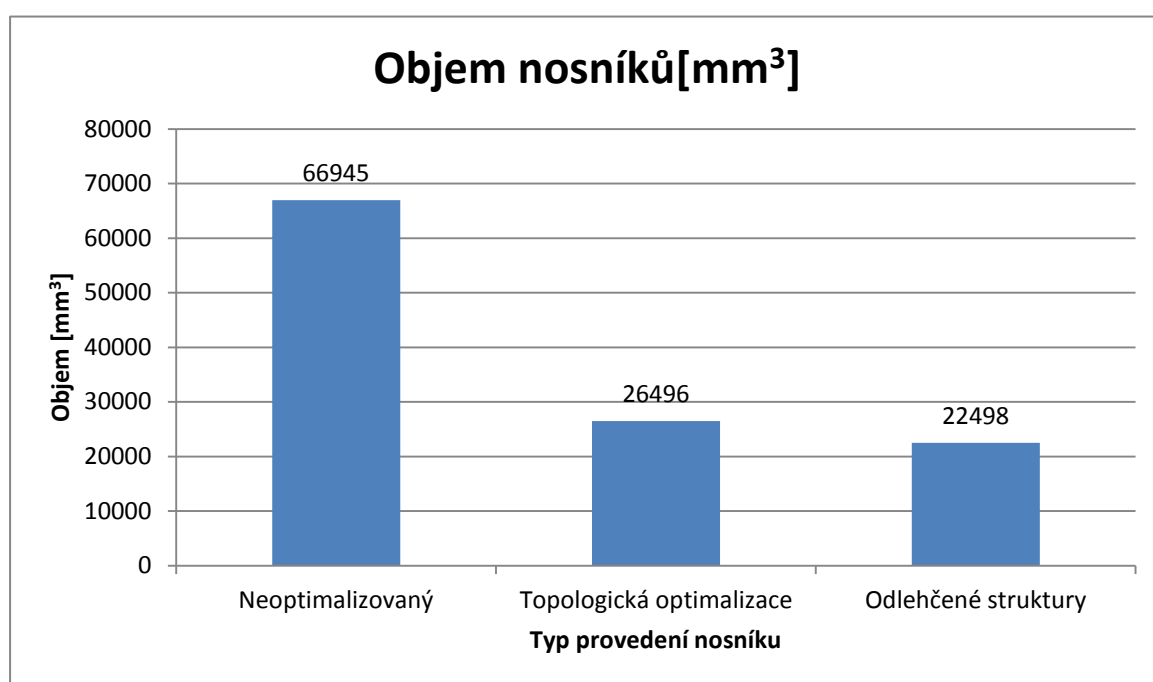
7 Porovnání a zhodnocení

Po předešlých analýzách bylo nasbíráno mnoho dat, podle kterých bylo možné udělat úsudek, jestli se optimalizace součásti vyplatí. Výsledkem bylo, že pro zatížení 300N, pro které byl experiment navrhnout, je optimalizace výhodná jak po stránce úspory materiálu, a tím pádem i financí, ale i po stránce zachování mechanických vlastností, které vykazuje nosník s odlehčenými strukturami s pórovitostí 6mm lepší, než nosník pouze topologicky optimalizován.

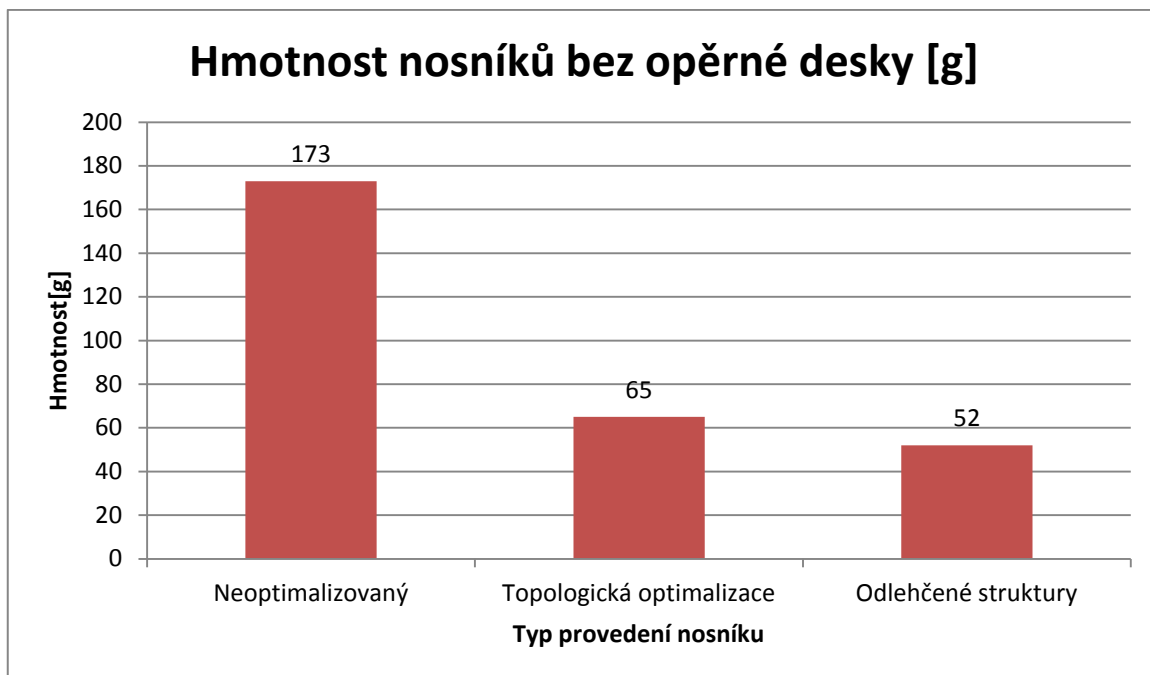
Tabulka 11 - Porovnání výsledků optimalizace pro základní zatížení 300N

	Neoptimalizovaný	Topologická optimalizace	Odlehčené struktury (pórovitost 6mm)
Průhyb	0,17 mm	0,68 mm	0,45 mm
Koeficient bezpečnosti	6	2	4,5
Poměrné využití meze kluzu	0 - 10 %	0 - 20 %	0 - 18 %
Maximální tahové napětí	5580 MPa	6733 MPa	4739 MPa
Maximální smykové napětí	3220 MPa	3591 MPa	2582 MPa
Hmotnost dílu (bez opěrné desky)	173 g	65 g	52 g

V přiložených grafech č. 2 a 3 je vidět, že materiálová úspora pouze nosníku bez opěrné desky činí mezi dílem neoptimalizovaným a dílem s odlehčenými strukturami téměř 70%, tzn. ušetření 44 447 mm³ objemu materiálu a 121g hmotnosti. Po mechanické stránce dokonce optimalizovaný nosník vykazoval nižší maximální napětí v tahu i ve smyku (tab. 11), ale tuto skutečnost bych spíše přiřazoval k ovlivnění zatěžující síly mnou přidanou ploškou do drážky pro zátěž, a neschopností si softwaru s takto malým elementem poradit, tudíž bych výsledky těchto parametrů bral jako zavádějící. Naopak, při analýze průhybu se optimalizovaná součást vychyluje ve větším rozsahu, než součást neoptimalizovaná, a tudíž z těchto výsledků je patrný i vyšší koeficient bezpečnosti u původního nosníku, nežli u optimalizovaných nosníků, což považuji za relevantní výsledek. Při realizování výroby nosníku pomocí aditivní technologie DMLS, a při zachování původních podmínek experimentu je nejvhodnější volbou nosník s optimalizací odlehčených struktur s pórovitostí struktury 6mm.



Graf č. 2 - Porovnání objemů vybraných nosníků



Graf č. 3 - Porovnání hmotností vybraných nosníků

8 Závěr

Teoretická část slouží k přiblížení aditivních technologií, a to především 3D tisku kovových součástí. Na samém začátku je zobrazen historický vývoj 3D tisku a také všechny metody aditivních technologií používaných v různém odvětví průmyslu. Další část je zaměřena na kovový tisk, kdy nejvíce pozornosti bylo soustředěno na metodu DMLS, která měla být využita k provedení následného experimentu v praktické části. U této technologie byl popsán podrobný princip, výhody a nevýhody, typy používaných laserů a materiálů u této metody. Závěr teoretické části je věnován topologické optimalizaci, ale především její následné optimalizaci odlehčených struktur, kde je podrobně popsána vyrobitelnost, metody návrhu designu, kritéria pro volbu designu a typy těchto odlehčených struktur.

Cílem praktické části bylo navrhnout součást, na které se dají zobrazit výhody nebo nevýhody výše zmíněných optimalizací, a proto byl zvolen vyosený, na jednom konci vetknutý hliníkový nosník, který je na druhém konci zatěžován silou o velikosti 300N. Nosník byl vymodelován pomocí softwaru SolidWorks a jeho hmotnost činila 173g. Po analýze v programu Altair Inspire se jevil spíše jako naddimenzovaná součást, jelikož koeficient bezpečnosti nikde neklesl pod hodnotu 6 a maximální průhyb zatížené strany činil 0,17mm. Po nastavení všech potřebných parametrů mohla proběhnout topologická optimalizace, která nosník odlehčila o 108g a jeho tvar přizpůsobila do profilu I-nosníku. Analýza ukázala čtyřnásobné zvětšení průhybu, tzn. 0,68mm, a také zvýšení maximálního tahového napětí z hodnoty 5580MPa na 6733MPa. Koeficient bezpečnosti poklesl na hodnotu 2, která je dostačující vzhledem k nám známému prostředí a materiálu nosníku. Jelikož po topologické analýze obsahuje nosník značné množství ostrých hran, bylo nutné přemodelování tohoto dílu, kvůli vhodnému provedení optimalizace odlehčených struktur. Po úpravě a vybrání nejvhodnější varianty z nabízených možností byla provedena optimalizace odlehčených struktur a následná analýza. Optimalizace provedla dva různé typy struktur, a to s nejmenší dovolenou pórovitostí 3mm a nejvyšší dovolenou pórovitostí 6mm, ze kterých bylo již sice patrné, že nosník s větší pórovitostí, tzn. 6mm, vykazuje lepší mechanické vlastnosti, ale byla provedena analýza při zatížení 1000N, kde se tyto předpoklady potvrdily. Tudíž při použití nejvyšší dovolené pórovitosti 6mm byla celková hmotnost součásti redukována na 52g, při maximálním průhybu 0,45mm a minimálním koeficientu bezpečnosti 4,5. Maximální tahové napětí kleslo oproti originálnímu nosníku

na hodnotu 4749MPa, ale tuto skutečnost přiřazuji spíše k faktu, že kvůli provedení optimalizací byla do prostoru pro sílu přidána malá ploška pro ustavení síly, která negativně ovlivnila následnou analýzu součástí. Optimalizace podle provedených analýz hodnotím kladně, zejména optimalizaci odlehčených struktur, která po provedení vykazuje lepší mechanické vlastnosti při snížení hmotnosti, oproti dílu pouze topologicky optimalizovanému.

Seznam použitých zkratk:

ABS	Akrylonil Butadien Styren
CAD	Computer-aided design
CDLP	Continuous digital light processing
DED	Direc Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop on Demand
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
LOM	Laminated Object Manufacturing
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJ	Material Jetting
NPJ	Nano Practice Jetting
STL	Standard Tessellation Language
SLA	Stereolitography
SLS	Selective Laser Sintering
RP	Rapid prototyping
UAM	Ultrasonic additive manufacturing

Seznam použité literatury:

- [1] The 7 categories of Additive Manufacturing, Additive Manufacturing Research Group, Loughborough University. Fifth Best University in the UK, Loughborough University [online]. Copyright © 2020 Loughborough University. All rights reserved. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z:
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [2] REDWOOD, Ben. Additive manufacturing technologies [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>
- [3] DEGHANGHADIKOLAEI, A., NAMDARI N., MOHAMMADIAN B. Additive Manufacturing Methods [online]. Codein, USA, 2018, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/327701079_Additive_Manufacturing_Methods_A_Brief_Overview
- [4] HERZOG, D., SEYDA, V., WYCISK, E., EMMELMANN, C. Additive manufacturing of metals [online]. Hamburg, Germany, 2016, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645416305158#fig3>
- [5] RAHMATI, S., Direct Rapid Tooling [online]. Isfahan Iran, 2014, [cit. 2020-04-20] Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008096532101013X>
- [6] NANDY, J., SARANGI, H. & SAHOO, S. A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling. [online]. 2019, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40516-019-00094-y>

- [7] NING, Yu, Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering [online]. Singapore, 2005, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/48628004.pdf>
- [8] Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering – Konstrukter.cz. Konstrukter.cz – CAD/CAM, 3D tisk a konstruování výrobků [online]. Copyright © 2019 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [9] SHELLABEAR, M., NYRHILA, O., DMLS – Development history and state of the art [online]. Germany, Finland, 2004, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.i3dmfg.com/wp-content/uploads/2015/07/History-of-DMLS.pdf>
- [10] Metal Materials for 3D printing | EOS GmbH. Redirecting to /en [online]. Copyright © EOS [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.eos.info/material-m>
- [11] DMLS Materials. DMLS Technology [online]. Copyright © 2019 DMLS Technology. All rights reserved. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://dmlstechnology.com/dmls-materials>
- [12] GARDAN, N., SCHNEIDER, A., Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing [online]. Charleville-Mézières France, 2014, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612514000831>
- [13] Začínáme s 3D tiskem kovů #3: Předvýrobní etapa (topologická optimalizace) – Konstrukter.cz. Konstrukter.cz – CAD/CAM, 3D tisk a konstruování výrobků [online]. Copyright © 2019 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobni-etapa-topologicka-optimalizace/>
- [14] Regionální technologický institut - Nabízíme. Západočeská univerzita v Plzni [online]. Copyright © 1991 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://rti.zcu.cz/laboratore/vip/nabizime_vip.html

- [15] KANTAREDDY, S.N.R., ROH, B.M., SIMPSON, T.W., JOSHI, S., DICKMAN, C., LEIHTIHET, E.A., Saving weight with metallic lattice structures: Design challenges with a real-world example [online]. Pennsylvania USA, 2016, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/171-Kantareddy.pdf>
- [16] WENJIN, Tao, MING, C., Leu, Design of lattice structure for additive manufacturing [online]. 2016, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/311756044_Design_of_lattice_structure_for_additive_manufacturing
- [17] WAUTHLE, R., VRANCKEN, B., BEYNAERTS, B., JORISSEN, K., SCHROOTEN, J., KRUTH, J.P., HUMBEECK, J.V, Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures [online]. Leuven, Belgium, 2014, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://www.academia.edu/27747218/Effects_of_build_orientation_and_heat_treatment_on_the_microstructure_and_mechanical_properties_of_selective_laser_melted_Ti6Al4V_lattice_structures
- [18] GORNY, B., NIENDORF, T., LACKMANN, J., THOENE, M., TROESTER, T., MAIER, H.J, In situ characterization of the deformation and failure behavior of non-stochastic porous structures processed by selective laser melting [online]. Paderborn, Germany, 2011, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509311008057>
- [19] MACONACHIE, T., LEARY, M., LOZANOVSKI, B., ZHANG, X., MA QIAN, FARUQUE, O., BRANDT, M., SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges [online]. Melbourne, Australia, 2019, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519305751>

- [20] BICI, M., BRISCHETTO, S., CAMPANA, F., FERRO, C.G, SECLI, C., VARETTI, S., MAGGIORE, P., MAZZA, A., Development of a multifunctional panel for aerospace use through SLM additive manufacturing [online]. Toriono, Roma, 2018, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117311460>
- [21] Filter Discs, Additive Filter Discs, DFAM, Design For Additive Manufacturing [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://www.croftam.co.uk/project/additive-filter-discs/>
- [22] A Novel Just-In-Time Concept, Materialise - Innovators you can count on. Redirecting to <https://www.materialise.com/en> [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://www.materialise.com/en/blog/3D-prosthetic-design>
- [23] KNOTEK, Václav, Technologické možnosti aditivních technologií [online]. Praha, ČR, 2018, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79973/F2-BP-2018-Knotek-Vaclav-Bakalarska%20prace%20Knotek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [24] 3DSourced, The Best 3D Printer Buyer's Guide Resource & 3D Printer Reviews [online]. 2020, [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
https://3dsourced.com/guides/direct-metal-laser-sintering-dmls/#DMLS_Advantages
- [25] Additive Manufacturing Magazine [online]. Copyright © [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
https://www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/7_families_print_version.pdf
- [26] Pick 3D printer, 3D Printer Types: The Complete List [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
<https://pick3dprinter.com/3d-printer-types/#6--electronic-beam-melting-ebm>
- [27] Schematic diagram of DMLS process [online]. Copyright © 2008 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-direct-metal-laser-sintering-DMLS-process-6_fig1_334114846/download

- [28] Springernature, springer-static [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z:
https://media.springernature.com/original/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs40516-019-00094-y/MediaObjects/40516_2019_94_Fig5_HTML.jpg

Seznam použitých obrázků

<i>Obr. 1 - Tiskárna SLA- 1[23]</i>	10
<i>Obr. 2 - RepRap Darwin tiskárna [23]</i>	11
<i>Obr. 3 - Schématické zobrazení metody Fotopolymerizace [25]</i>	12
<i>Obr. 4 - Schématické zobrazení metody Material jetting [25]</i>	13
<i>Obr. 5 - Schématické zobrazení metody Binder jetting [25]</i>	13
<i>Obr. 6 - Schématické zobrazení metody Extruze [25]</i>	14
<i>Obr. 7 - Schématické zobrazení metody Slinování prášku[25]</i>	14
<i>Obr. 8 - Schématické zobrazení metody Laminování plechů [25]</i>	15
<i>Obr. 9 - Schématické zobrazení metody DED [25]</i>	15
<i>Obr. 10 - Schématické zobrazení DMLS metody [27]</i>	17
<i>Obr. 11 - Možnosti využití DMLS metody [28]</i>	18
<i>Obr. 12 - Schéma metody LENS [3]</i>	23
<i>Obr. 13 - Schéma EBM metody [26]</i>	24
<i>Obr. 14 - Schématický postup topologické optimalizace [12]</i>	25
<i>Obr. 15 - Porovnání součásti před a po Topologické optimalizaci [12]</i>	26
<i>Obr. 16 - Uložení součásti s bionickou strukturou ve svislé (vlevo) a vodorovné poloze (vpravo) [13]</i>	26
<i>Obr. 17 - Rozdělení buněčných struktur[16]</i>	27
<i>Obr. 18 - Příklady odlehčených struktur vyrobených odlišnými metodami aditivních technologií. (a) FDM, (b) SLA, (c) SLS, (d) SLM, (e) EBM, (f) FEF [16]</i>	29
<i>Obr. 19 - Schéma Primitivní metody [16]</i>	30
<i>Obr. 20 - Buněčná struktura generována užitím Implicitní povrchové metody[16]</i>	31
<i>Obr. 21 - Geometrické změny při úpravě hodnot v rovnici [16]</i>	31

<i>Obr. 22 - Schéma přímého vzorování</i>	32
<i>Obr. 23 - Odlehčená struktura bez gradientu pórovitosti [16]</i>	33
<i>Obr. 24 - Odlehčená struktura s gradientem pórovitosti [16]</i>	33
<i>Obr. 25 Srovnání přímého vzorování (vlevo) a konformního vzorování (vpravo)[16]</i>	34
<i>Obr. 26 - Odlehčená struktura získána mapováním hustoty pomocí metody SIMP[16]</i>	34
<i>Obr. 27 - Odlehčená struktura získána z informace o hustotě [16]</i>	35
<i>Obr. 28 - Typy prutových struktur: BCC(a), BCCZ(b), FCC(c), FCCZ(d), Krychlová(e), Hvězdicová(f), diamantová(g) [19]</i>	36
<i>Obr. 29 - Postup při topologické optimalizaci prutové struktury [19]</i>	37
<i>Obr. 30 - TPMS odlehčená struktura: Gyroid(a), diamant(b), neovius(c) [19]</i>	38
<i>Obr. 31 - Skořepinové odlehčené struktury: SC-BCC(a), SC-BCC-FCC(b), SC-FCC(c) [19]</i>	39
<i>Obr. 32- Součást z nerezové oceli 316L s odlehčenými strukturami používána v leteckém průmyslu [16]</i>	40
<i>Obr. 33 - Odlehčená součást systému odpružení u závodního auta [16]</i>	40
<i>Obr. 34 - Hlava válců s odlehčenými strukturami [16]</i>	41
<i>Obr. 35 - Filtry používané ve farmaceutickém (a) a automobilovém průmyslu (b) [16][21]</i>	42
<i>Obr. 36 - Kontury získané z CT (a), zobrazení hustoty odlehčených struktur v místech s vyšším zatížením (b), nutnost plného materiálu v místech fixace šrouby (c) [22]</i>	43
<i>Obr. 37 - Počáteční návrh (280g)(a), odlehčená struktura s nejlepšími vlastnostmi (89,4g)(b), vyrobený implantát vycházející z předchozího návrhu (c) [22]</i>	43
<i>Obr. 38 - Implantát hrudního koše vyrobený pomocí 3D tisku s odlehčenými strukturami [16]</i>	44
<i>Obr. 39 - Zobrazení edukativního modelu před optimalizací (ISO)</i>	45
<i>Obr. 40 - Zobrazení edukativního modelu před optimalizací (a)</i>	46
<i>Obr. 41 - Zobrazení edukativního modelu před optimalizací (b)</i>	46
<i>Obr. 42 - Zobrazení výsledné optimalizace (ISO)</i>	47
<i>Obr. 43 - Zobrazení výsledné optimalizace</i>	48
<i>Obr. 44 - Zobrazení výsledné optimalizace</i>	48
<i>Obr. 45 - Grafické zobrazení návrhu nosníku</i>	49
<i>Obr. 46 - Grafické zobrazení návrhu nosníku</i>	50
<i>Obr. 47 - Grafické zobrazení návrhu nosníku</i>	50

<i>Obr. 48 - Počáteční návrh nosníku bez úprav</i>	51
<i>Obr. 49 - Detail drážky pro zatížení nosníku</i>	52
<i>Obr. 50 - Zmenšený model nosníku (ISO)</i>	53
<i>Obr. 51- Zmenšený model nosníku (bokorys)</i>	53
<i>Obr. 52 - - Zmenšený model nosníku</i>	54
<i>Obr. 53 - Zmenšený model nosníku (Půdorys)</i>	54
<i>Obr. 54 - Detail plošky pro sílu a výstupku na čele nosníku</i>	55
<i>Obr. 55 - Převedení součásti ze SolidWorksu do Altair Inspire</i>	56
<i>Obr. 56 - Zobrazení rozdělených částí</i>	56
<i>Obr. 57 - Použití Booleovských operací pro sloučení</i>	57
<i>Obr. 58 - Použití funkce Partition</i>	58
<i>Obr. 59 - Zobrazení kontaktních částí (zelená) a částí napevno (modrá)</i>	59
<i>Obr. 60 - Uchycení nosníku šrouby</i>	59
<i>Obr. 61 - Zobrazení umístění podpor</i>	60
<i>Obr. 62 - Zobrazení umístění síly</i>	61
<i>Obr. 63 - Zobrazení průhybu neoptimalizovaného nosníku</i>	62
<i>Obr. 64 - Koeficient bezpečnosti</i>	63
<i>Obr. 65 - Maximální napětí</i>	64
<i>Obr. 66 - Zobrazení překročení meze kluzu (červeně), které se zde nevyskytuje</i>	64
<i>Obr. 67 - Porovnání neoptimalizovaného nosníku (vlevo) a nosníku po topologické optimalizaci (vpravo)</i>	66
<i>Obr. 68 - Porovnání neoptimalizovaného nosníku (vlevo) a nosníku po topologické optimalizaci (vpravo)</i>	66
<i>Obr. 69 - Porovnání neoptimalizovaného nosníku (vlevo) a nosníku po topologické optimalizaci (vpravo)</i>	67
<i>Obr. 70 - První úprava pro odlehčené struktury</i>	68
<i>Obr. 71 - Druhá úprava byla tvořena elipsou</i>	68
<i>Obr. 72 - Třetí a finální úprava pro odlehčené struktury</i>	69
<i>Obr. 73 - Přednastavený model pro optimalizaci odlehčených struktur</i>	70
<i>Obr. 74 - Průhyb neoptimalizovaného nosníku</i>	71
<i>Obr. 75 - Zobrazení koeficientu bezpečnosti</i>	72
<i>Obr. 76 - Zobrazení napětí v celém nosníku</i>	72
<i>Obr. 77 - Zobrazení míst s plastickou deformací (červeně), které zde nejsou přítomny</i>	73

<i>Obr. 78 - Zobrazení míst vytvoření odlehčené struktury v nosníku s pórovitostí 3mm (oranžově) (pohled a.)</i>	75
<i>Obr. 79 - Zobrazení míst vytvoření odlehčené struktury v nosníku s pórovitostí 3 mm (oranžově) (pohled b.)</i>	75
<i>Obr. 80 - Zobrazení upravené struktury odlehčených struktur s pórovitostí 6mm (oranžově)(Pohled a.)</i>	76
<i>Obr. 81 - Zobrazení upravené struktury odlehčených struktur s pórovitostí 6mm (oranžově)(Pohled b.)</i>	77
<i>Obr. 82 - Porovnání průhybu nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo)</i>	78
<i>Obr. 83 - Porovnání koeficientu bezpečnosti nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo)</i>	78
<i>Obr. 84 - Porovnání průhybu nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo)při zatížení 1000N</i>	80
<i>Obr. 85 - Porovnání koeficientu bezpečnosti nosníku Typu A (vlevo) a Typu B (vpravo) při zatížení 1000N</i>	80
<i>Obr. 86 - Porovnání poměrného využití meze kluzu při zatížení 1000N</i>	81

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Seznam výhod a nevýhod metody DMLS [24]</i>	19
<i>Tabulka 2 - Porovnání mechanických vlastností předem zmíněných materiálů [11]</i>	22
<i>Tabulka 3 - Přehled částí a použitých materiálů</i>	62
<i>Tabulka 4 - Nastavení pro topologickou optimalizaci</i>	65
<i>Tabulka 5 - Nastavení pro analýzu neoptimalizované součásti</i>	70
<i>Tabulka 6 - Nastavení pro výpočet odlehčených struktur</i>	74
<i>Tabulka 7 - Hodnoty nastavení před analýzou</i>	77
<i>Tabulka 8 - Výsledky analýzy nosníku Typu A a Typu B při zatížení 300N</i>	78
<i>Tabulka 9 - Zobrazení nastavení pro analýzu při zátěži 1000N</i>	79
<i>Tabulka 10 - Zobrazení výsledku analýzy při zatížení 1000N</i>	80
<i>Tabulka 11 - Porovnání výsledků optimalizace pro základní zatížení 300N</i>	81

Seznam grafů

<i>Graf č. 1 - Využití Aditivních technologií v průmyslu [23]</i>	9
<i>Graf č. 3 - Porovnání hmotností vybraných nosníků</i>	83
<i>Graf č. 2 - Porovnání objemů vybraných nosníků</i>	82

Seznam rovnic

<i>Rovnice č. 1 - Maxwellovo číslo</i>	37
--	----