

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**POROVNÁNÍ A OVĚŘENÍ SW
PRO TOPOLOGICKOU
OPTIMALIZACI ADITIVNĚ
VYRÁBĚNÝCH DÍLŮ**

2022

**VOJTĚCH
CERMÁNEK**



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cermánek** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **473455**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
 Studijní program: **Výrobní inženýrství**
 Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Porovnání a ověření SW pro topologickou optimalizaci aditivně vyráběných dílů

Název diplomové práce anglicky:

Comparison and verification of software for topology optimization of additively manufactured parts

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámení s problematikou aditivních technologií a topologické optimalizace
2. Rešerše využití topologické optimalizace v aditivní výrobě
3. Návrh metodiky testování SW pro topologickou optimalizaci a provedení experimentu
4. Shrnutí výsledků a závěrečné vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

CHOI, Wook-han, Jong-moon KIM a Gyung-Jin PARK. Comparison study of some commercial structural optimization software systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2016, 54(3), 685-699 [cit. 2020-11-22]. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-016-1429-y
 XIAO, Zefeng, Yongqiang YANG, Ran XIAO, Yuchao BAI, Changhui SONG a Di WANG. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2018, 143, 27-37 [cit. 2020-12-16]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.01.023
 SEABRA, Miguel, José AZEVEDO, Aurélio ARAÚJO, Luís REIS, Elodie PINTO, Nuno ALVES, Rui SANTOS a João PEDRO MORTÁGUA. Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016, 1, 289-296 [cit. 2021-01-29]. ISSN 24523216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2016.02.039

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vladislav Andronov ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

 Ing. Vladislav Andronov
 podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

 Datum převzetí zadání

 Podpis studenta

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Porovnání a ověření SW pro topologickou optimalizaci aditivně vyráběných dílů“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vladislava Andronova, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu Ing. Vladislavu Andronovovi za věnovaný čas, vstřícnost, cenné rady, připomínky a odborné vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítku Novákovi za provedení mechanických zkoušek a cenné rady a Ing. Lukáši Pelikánovi za pomoc při práci s tiskárnou. Velké poděkování patří také rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou využití topologické optimalizace v aditivní výrobě. Cílem je ověřit a porovnat několik softwarů na topologickou optimalizaci. Rešeršní část práce se zabývá aditivními technologiemi, je zde rozebrán kovový 3D tisk, rozdělení dle normy ISO/ASTM 52900, je popsána metoda Powder Bed Fusion a metoda Direct Metal Laser Melting. Dále je rešeršní část věnována problematice topologické optimalizace. Jsou popsány metody výpočtu, využití v průmyslu, a jsou rozebrány studie zabývající se topologickou optimalizací konkrétních dílů. V praktické části se práce zabývá testováním jak na SW úrovni, tak i reálnými zkouškami topologicky optimalizovaných těles z vybraných SW. Nejprve je popsána metodika optimalizace, poté vytištění vzorků, příprava pro mechanické zkoušky a samotné testování. Testovány byly vzorky napodobující zkoušku tříbodovým ohybem a zkoušku tlakem. Vyhodnocovaly se hodnoty posunutí při zatížení 5000 N. Zkoušky zatížení probíhaly na stroji LabTest 5.100SP1. Na závěr byly vzorky testovány na stroji Instron 3000kN SAPEC, kde se vyhodnocovalo maximální zatížení a posunutí. Závěrem jsou porovnány výsledky z reálných zkoušek s hodnotami získanými ze simulačních procesů.

Klíčová slova: Topologická optimalizace; Aditivní výroba; 3D tisk; L-PBF; DMLM

Abstract

This thesis deals with the use of topology optimization in additive manufacturing. The aim is to validate and compare several topological optimization software. The review part of the thesis deals with additive technologies, the metal 3D printing is discussed, the division according to ISO/ASTM 52900, the Powder Bed Fusion method and the Direct Metal Laser Melting method are described. Furthermore, the research part is devoted to topological optimization. Calculation methods, applications in industry, and studies dealing with topological optimization of specific parts are described. In the practical part, the thesis deals with testing at the SW level as well as real tests of topologically optimized solids from selected SW. First, the optimization methodology is described, followed by the printing of samples, preparation for mechanical testing and the actual testing. Samples simulating the three-point bending test and the compression test were tested. The displacement values were evaluated at a load of 5000 N. The load tests were performed on a LabTest 5.100SP1 machine. Finally, the specimens were tested on an Instron 3000kN SAPEC machine to evaluate the maximum load and displacement. Finally, the results from the real tests are compared with the values obtained from the simulation processes.

Keywords: Topology optimization; Additive manufacturing; 3D printing; L-PBF; DMLM

Obsah

1	Úvod	9
2	Seznámení s problematikou aditivních technologií a topologické optimalizace	10
2.1	Aditivní technologie	10
2.1.1	Postup vytvoření 3D tištěného dílu metodou kovového 3D tisku	12
2.1.2	Rozdělení aditivních technologií dle ISO/ASTM 52900	15
2.2	Topologická optimalizace	19
2.2.1	Postup topologické optimalizace	20
2.2.2	Výhody a nevýhody použití topologické optimalizace	21
2.2.3	Metody výpočtu topologické optimalizace	22
3	Rešerše využití topologické optimalizace v aditivní výrobě	25
3.1	Využití topologické optimalizace v průmyslu	25
3.2	Kritická literární rešerše ke zkoumané problematice porovnání SW	28
3.3	Shrnutí poznatků a definice cílů práce	48
4	Návrh metodiky testování SW pro topologickou optimalizaci a provedení experimentu ..	49
4.1	Ukázka postupu topologické optimalizace	50
5	Výroba topologicky optimalizovaných těles	55
5.1	Příprava tisku	55
5.2	Příprava staveb	55
5.2.1	Příprava tiskárny	58
5.2.2	Nastavení tisku	61
5.3	Průběh tisku	61
5.4	Postprocessing	61
5.4.1	Vyndání palety z tiskárny	62
5.4.2	Tepelné zpracování	63
5.4.3	Apretace, odstranění podpor a obrobení	64

5.5	Testování topologicky optimalizovaných těles	65
6	Shrnutí výsledků	68
6.1	Hmotnost	68
6.2	Tříbodový ohyb	68
6.3	Tlak	74
6.4	Diskuze	79
7	Závěr.....	80
	Seznam použité literatury	82
	Seznam obrázků	88
	Seznam tabulek	91

1 Úvod

Pojmu topologická optimalizace se dostává v posledních letech čím dál větší pozornosti. Jedná se o metodu optimalizace tvaru na základě výpočetních algoritmů, které se snaží rozložit hmotu v předem nastaveném prostoru na základě definovaných okrajových podmínek (působící síly, materiál, vazby atd.). Tento proces optimalizace nabízí možnost dostat ojedinělé geometrie dílů, které jsou funkční i při zachování co nejmenšího objemu materiálu. Tyto díly jsou nejen funkční, ale jsou také vzhledově atraktivní. Spojení optimalizace topologie s aditivní technologií výroby s sebou nese řadu výhod. Aditivní technologie funguje na principu tvorby výsledného modelu postupně vrstvu po vrstvě. Nejsou zde skoro žádná tvarové omezení, což jde ruku v ruce s optimalizací topologie, která generuje tvary, které by jinými výrobními technologiemi šlo jen těžce vyrobit. Avšak nabízí se otázka, zdali se dá vypočteným geometriím věřit v ohledu nastaveného zatížení a vypočteného posunutí při daném zatížení a maximálního napětí v dílu. Touto otázkou se zabývá praktická část této práce.

Teoretická část této diplomové práce slouží k seznámení s aditivními technologiemi, je zde rozebrán kovový 3D tisk, rozdělení dle normy ISO/ASTM 52900 a popsán postup tvorby dílu na kovové 3D tiskárně. Dále je rozebrána topologická optimalizace ve vztahu k aditivním technologiím. Je popsán postup optimalizace, využití v průmyslu, a je provedena literární rešerše na konkrétní využití topologické optimalizace daných dílů.

Cílem práce bylo porovnání a ověření šesti SW na topologickou optimalizaci. Konkrétně se jednalo o SW Creo 6, Creo 7, Inspire 2019, Inspire 2020, Inspire 2021 a NX. Byly vybrány tři zkušební vzorky, které jsou následně optimalizovány v každém SW. Optimalizace bude zvolena s cílem zachování co nejvyšší tuhosti při daném množství materiálu, který je v tomto případě 15 %, 30 % a 50 % původního objemu. Použitým materiálem byla maraging ocel 1.2709 (CL50WS) a zatížení bude 5000 N. Ve všech SW proběhla simulace zatížení a posunutí v optimalizovaném dílu. Proběhla také simulace posunutí a napětí v programu Ansys a Abaqus (jedná se o výpočtový software na metodu konečných prvků). Tyto hodnoty následně sloužily k porovnání s reálnými výsledky mechanických zkoušek. Všechny optimalizované díly byly poté vytištěny (před tiskem nejsou nijak upraveny) a byly provedeny mechanické zkoušky. Zkoušky zatížení 5000 N probíhaly na trhacím stroji LabTest a pomocí speciálního snímacího zařízení ARAMIS. Následně se vzorky na stroji Instron 3000kN SAPEC testovali na maximální zatížení a posunutí při maximálním zatížení.

2 Seznámení s problematikou aditivních technologií a topologické optimalizace

2.1 Aditivní technologie

Pojem aditivní technologie označuje proces, při němž dochází k vytváření objektů přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě podle předem vygenerovaných digitálních dat. Aditivní výroba reflektuje proces, který se diametrálně odlišuje od konvenčních metod výroby. Například namísto frézování, soustružení, vrtání atd., kde je z pevného bloku materiálu vytvářen finální výrobek odebráním materiálu, je zde výrobek tvořen vrstvu po vrstvě přidáváním materiálu s možností použití co nejmenšího množství přebytečného odpadu. Aditivní výroba bývá často označována také jako 3D tisk. [1]

Počátky 3D tisku se datují do 80. let 20. století do Japonska, kde v roce 1981 přichází Hideo Kodama s postupným vytvářením trojrozměrného objektu pomocí postupné polymerizace fotocitlivé pryskyřice UV světlem. Tuto technologii si ovšem nenechal patentovat. S prvním patentem v oblasti 3D tisku přišel Chuck Hall v roce 1986, který nechal patentovat technologii stereolitografie (SLA), a o pár let později sám založil společnost 3D Systems Corporation a zahájil výrobu komerčních 3D tiskáren. První tiskárnu, která pracovala s práškovým materiálem, nechal v roce 1988 patentovat Carl Deckard jako technologii SLS (selective laser sintering). Ve stejnou dobu byla též patentována technologie FDM, která je momentálně nejrozšířenější technologií. Od roku 2009 došlo k otevření patentů z 80. let a aditivní technologie se rozšířily do široké veřejnosti. [2]

Pojem aditivní technologie zastřešuje několik technologií. Tyto technologie se dají dělit především podle použitého materiálu na tisk z prášku, tekutiny anebo pevného kompaktního materiálu např. drátu. Mezi nejznámější technologie patří FDM (fused deposition modeling), kde je základní materiál polymer ve formě drátu vytlačován natavený tryskou a postupně se vytváří 3D model. Technologie, které zpracovávají kovový prášek jsou DMLS (direct metal laser sintering) a DMLM (direct metal laser melting), kde je kovový prášek postupně nanášen a spékán/taven vrstvu po vrstvě za pomoci laseru. Tekuté pryskyřice se tisknou například technologií SLA (stereolitografie), kde je materiál ve formě fotopolymeru vytvrzován zářením. [3], [4]

V dnešní době existuje celá řada tisknutelných materiálů. Materiály jsou dodávány v různých podobách, nejčastěji však v podobě drátu (v případě plastů) nebo prášku (u kovových materiálů). Nejběžnějším a široké veřejnosti nejdostupnějším materiálem je plast (polymer), který je nejlevnější a využívá se v těch nejlevnějších tiskárnách. Mezi neznámější polymerní materiály patří např. PLA, PET, PC a ABS. Polymerní materiály je možné zakoupit ve všech možných barvách. Dalším materiálem jsou kovové materiály, které jsou dodávány nejčastěji v podobě prášku nebo drátu (záleží na použité technologii). Mezi neznámější tisknutelné kovy patří ocel (nerezové oceli, maraging oceli atd.), hliníkové slitiny, slitiny titanu a slitiny niklu a kobaltu. Mezi speciální materiály, které lze také tisknout jsou keramika, kompozitní materiály, beton a živé tkáně. [4], [5]

Aditivní výroba má oproti subtraktivní metodě hned několik výhod. Jednou z nich je úspora materiálu. Základem 3D tisku je přidávání materiálu, dokud není dosaženo vytvoření celé geometrie dílu. Po dokončení tisku bude potřeba odebrat materiál v podobě podpór nebo různých otřepů, ale jinak je celkový materiálový odpad minimální ve srovnání s např. třískovým obráběním. S tím souvisí i úspora nákladů na energie. Další výhodou je rychlé prototypování (tzv. rapid prototyping). Výroba prototypů pomocí 3D tisku je daleko efektivnějším způsobem než jakákoli jiná technologie. Nespornou výhodou je i neomezená tvarová fantazie, kdy je člověk za pomoci 3D tisku vyrobit prakticky jakýkoli tvar, aniž by pociťoval výrazné zvýšení nákladů na jeho výrobu. Využití optimalizace topologie ve spojení s 3D tiskem nachází uplatnění v čím dál více průmyslových odvětvích. Pomocí 3D tisku se zjednodušil a zdokonalil proces výroby kloubních náhrad, implantátů, a také lidských orgánů. [6], [7]

Mezi nevýhody aditivní technologie výroby patří zejména cena dílů při zvyšujícím se počtu kusů v sérii. Cena zařízení hraje také velkou roli. Malé tiskárny na plastové materiály lze koupit za několik tisíc korun, zatímco cena tiskáren na kov se pohybuje řádově v desítkách milionů korun. Kromě nákladů na zařízení je potřeba zohlednit i cenu materiálu. Například materiál Ti6Al4V (jedná se o slitinu titanu) je v práškové podobě výrazně dražší než v tradiční nezpracované formě. Mezi další nevýhody patří například omezená přesnost výrobků, horší kvalita povrchu v porovnání s obráběním a horší mechanické vlastnosti. [7]

Uplatnění technologie aditivní výroby se v současné době stále víc a víc rozrůstá. Příklad 3D tisku zapříčinil posunutí hranice možností, co se tvaru, složitosti a váhy nových výrobků týká. Hlavním představitelem použití aditivní výroby je letecký průmysl. Letecké společnosti musí

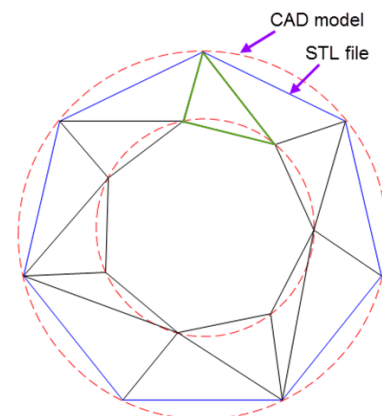
splňovat nejpřísnější normy a komponenty musí být vytvořeny z nevhodnějších materiálů bez ohledu na ceny. Pomocí aditivní technologie jsou schopni inženýři navrhovat díly s vysokou pevností a zároveň co nejvíce optimalizovat hmotnost použitím efektivnější geometrie. To vede ke snížení spotřeby paliva, snížení emisí a snížení nákladů. Dalším průmyslovým odvětvím, které se snaží své návrhy co nejvíce inovovat je dopravní průmysl. Zde zaujímá velkou část výroba nástrojů a forem, jelikož 3D tisk umožňuje tisk například konformního chlazení, které je běžnými metodami jen těžce vyrobitelné. Také lze vyrobit specializované nástroje s nižšími výrobními náklady. Aditivní výroba způsobila revoluci v lékařském průmyslu. Tato technologie přináší takřka neomezené možnosti od anatomických modelů, protetiky, až po kloubní náhrady, zubní implantáty apod. Jedním z nejaktuálnějších využití aditivní technologie je tisk embryonálních kmenových buněk. [7], [8]

2.1.1 Postup vytvoření 3D tištěného dílu metodou kovového 3D tisku

Celý proces výroby 3D tištěného dílu obsahuje několik po sobě jdoucích kroků, které je nutno dodržet, přičemž každý z nich má výrazný vliv na výslednou kvalitu výsledného dílu. Na počátku celého procesu stojí nápad (myšlenka), co se bude tisknout. Může se jednat o externí zakázku, vytvoření náhradního již na trhu nedostupného dílu, nebo pouze nějaký díl pro domácí potřeby. Následuje vytvoření CAD modelu, a přes několik dalších kroků, které jsou popsány v této kapitole, dojde k vytvoření finálního výrobku. [9], [10]

Vytvoření modelu

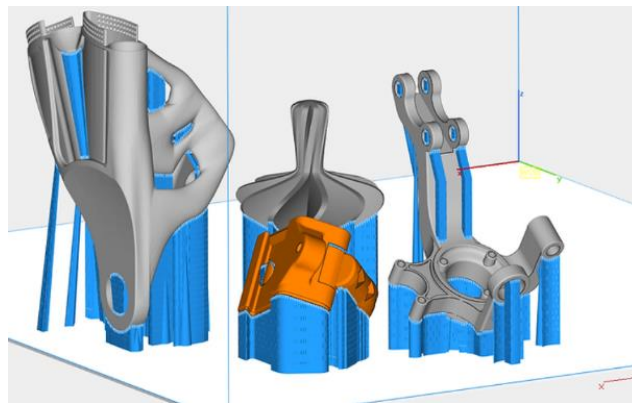
Vstupním prvkem pro aditivní výrobu je právě model. Ten bývá vytvořen v CAD softwaru, odkud je importován do formátu .stl, se kterým se dále pracuje. Model STL (neboli Standard Triangle Language) je tvořen sítí trojúhelníků, jejichž velikost ovlivňuje kvalitu finálního dílu. Na obr. č. 1 lze vidět porovnání CAD modelu a STL souboru, kde je patrná vliv velikosti trojúhelníkové sítě na výslednou kvalitu. [9], [10]



Obrázek 1: Porovnání CAD modelu a STL souboru [42]

Polohování modelu a vytvoření podpor

Napoložování modelu na stavební platformě tiskárny a vytvoření podpor je dalším neméně důležitým krokem. U kovového tisku je tento krok důležitější než u tisku plastového. Je zde potřeba nahlížet a dodržovat určitá pravidla a technologické zásady, které ovlivňují kvalitu tisku. Vytvoření podpor je důležité z hlediska zborcení součásti a také dobrého odvodu tepla při tiskovém procesu. Jsou-li podpory nezbytné, měly by být snadno odstranitelné. Vytvoření podpor je poloautomatickým krokem, kde software sám dokáže vyhodnotit a nabídnout, kde jsou podpory nutné a kde nikoli. Příklad vytvoření podpor lze vidět na obr. č. 2. [9], [10]



Obrázek 2: Ukázka napoložování a vytvoření podpor [43]

Nastavení tisku a vygenerování dat

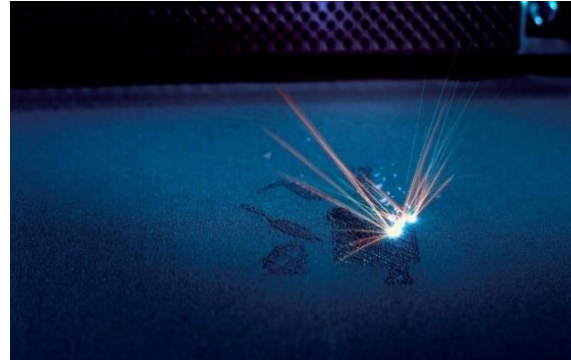
Po napoložování součásti a vytvoření podpor následuje krok vytvoření dat pro tiskárnu, podle kterých se bude výrobek tisknout. Většina průmyslových kovových 3D tiskáren má tyto parametry přednastavené výrobcem, ale uživatel je může v určité míře sám upravovat. Jedná se o nastavení například výšky vrstvy, výkonu laseru, rychlosti skenování laseru atd. Po vygenerování dat přichází na řadu příprava tiskárny. [9], [10]

Příprava tiskárny

Fáze přípravy tiskárny je fyzicky nejnáročnější činností celého procesu. Tiskárnu je potřeba pečlivě vyčistit, připravit pracovní komoru, zkontrolovat nanášecí zařízení (zda není nijak poškozené) a připravit prášek. Prášek by měl být v dostatečné míře upěchován v zásobníku, odkud se nanáší pomocí nanašeče na stavební platformu. Pokud není prášek připraven, je potřeba přešít prášek již použitý. Po dokončení přípravy se komora uzavře a dojde k vytvoření inertní atmosféry nejčastěji v podobě dusíku nebo argonu. Dále se nahrají data, která lze ještě přímo v tiskárně zkontrolovat a ověřit. Poté se spustí tisk. [9], [10]

Tisk

Proces tisku je plně automatický a není potřeba jakéhokoli zásahu operátora. Je-li ovšem potřeba v průběhu tisku editovat určitá nastavení (např. zrušit tisk jedné součást, tiskne-li se jich na jedné paletě víc), některé stroje tento zásah umožňují. V případě vzniku nějakého problému, jako je například ztráta inertní atmosféry, výpadek el. proudu apod. se stroj sám automaticky vypne. [9], [10]



Obrázek 3: Průběh tisku [44]

Vyjmutí z tiskárny

Po ukončení tiskového procesu je potřeba vyčistit platformu od prášku a přebytečný prášek nahnout do přeřadové komory. To nejprve probíhá skrze glove box, tudíž není nutné použití ochranných prostředků. Poté se pracovní prostor tiskárny otevře a dojde k důkladnějšímu vyčištění komory za pomoci štětce a vysavače s vodním filtrem. To už probíhá v ochranném obleku a dýchací masce. Stavební platforma drží v komoře na šroubech, které se odšroubují a platforma se může vyjmout.

Postprocessing

Po vyjmutí z tiskárny dojde k tepelnému zpracování, které se provádí takřka u všech kovových tištěných dílů. Po tepelném zpracování se z platformy odříznou všechny výtisky a následuje odstranění podpor a obrobení na požadovanou kvalitu. [9], [10]

2.1.2 Rozdělení aditivních technologií dle ISO/ASTM 52900

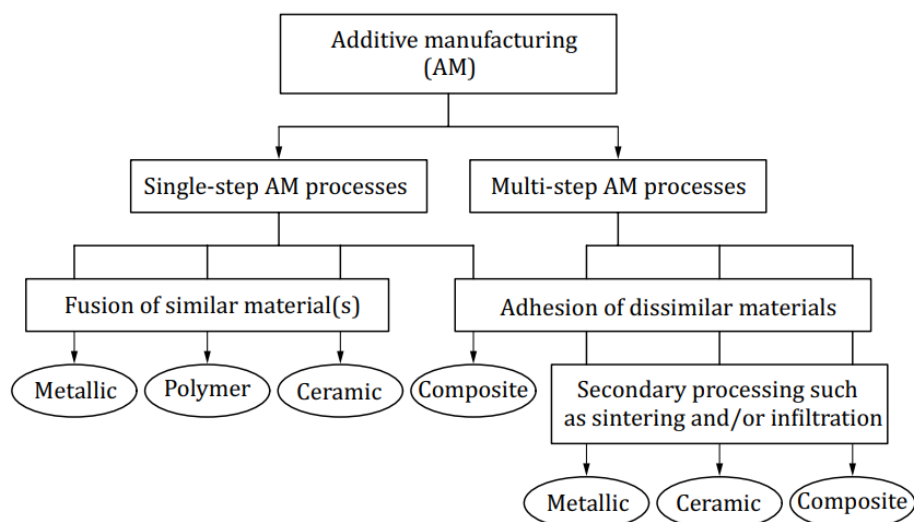
Norma ISO/ASTM 52900 definuje základní termíny a principy pro aditivní technologie. Aditivní technologie jsou podle této normy definované jako proces postupného nanášení a spojování materiálu po vrstvách za účelem vytvořit objekt z 3D vygenerovaných dat. [11]

Norma definuje základní termíny jako 3D printer (3D tiskárna), additive manufacturing (proces vytváření objekty z 3D dat přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě), powder bed fusion (proces, při kterém tepelná energie selektivně taví a spojuje práškový materiál), build platform (uzavřené místo, kde dochází k tvorbě objektů) atd. [11]

Norma uvádí, že pro aditivní výrobní proces jsou základní vlastnosti výrobků ovlivněny:

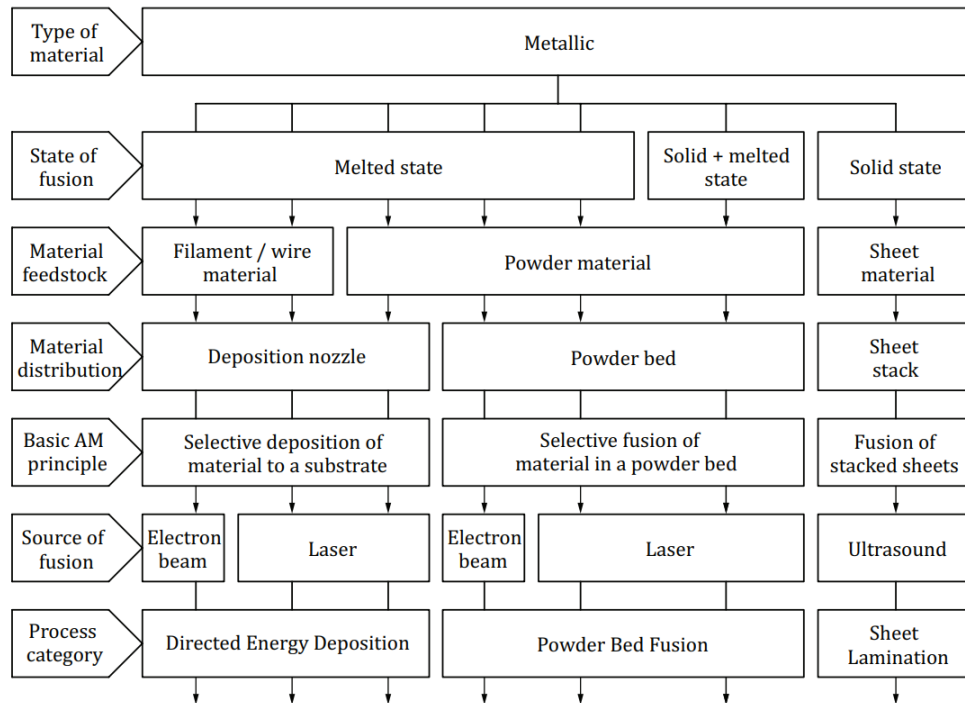
- Typem materiálu (polymer, kov, keramika nebo kompozit),
- technologií nanášení/spojování materiálu (sintrování, tavení, lepení, ...),
- skupenstvím a tvarem materiálu (kapalina, prášek, vlákno, ...),
- způsobem tvorby stavby (architektura stroje atd.). [11]

Norma rozděluje procesy aditivní technologie na single-step a multi-step. Toto rozdělení lze vidět na obr. č. 4. U single-step procesů získá objekt základní geometrii a požadované vlastnosti v jediném kroku. Získá-li v prvním kroku základní geometrii a ve druhém základní vlastnosti, jedná se o single-step proces. V závislosti na aplikaci mohou single i multi-step procesy vyžadovat jednu i více dodatečných operací, jako například tepelné zpracování, obrobení atd. [11]



Obrázek 4: Rozdělení single-step a multi-step procesů [11]

V případě této diplomové práce se jedná o single-step proces technologie Powder Bed Fusion. Na obr. č. 5 lze vidět přehled single-step procesů pro kovové materiály aditivních technologie. [11]



Obrázek 5: Přehled single-step procesů [11]

Powder Bed Fusion

Metoda Powder Bed Fusion (PBF) neboli spékání v práškovém loži funguje na principu natavení velice tenké vrstvy práškového materiálu za pomoci laseru nebo elektronového paprsku. Natavením v konkrétním místě dojde ke spojení částic materiálu a tím postupnému vzniku požadované geometrie. [12]

Powder Bed Fusion zastřešuje několik tiskových technik, které fungují principiálně velice podobně. Jedná se o DMLS (Direct Metal Laser Sintering), DMLM (Direct Metal Laser Melting), EBM (Electron Beam Melting), SHS (Selective Heat Sintering), SLM (Selective Laser Melting) a SLS (Selective Laser Sintering). Všechny tyto metody umožňují použití širokého spektra materiálů, kde mezi nejčastěji používané patří prášky železných kovů, titanové a hliníkové. Je možné použití také prášků niklových, kobalt-chromových a křemíkových slitin a také použití prášků polymerních. [12]

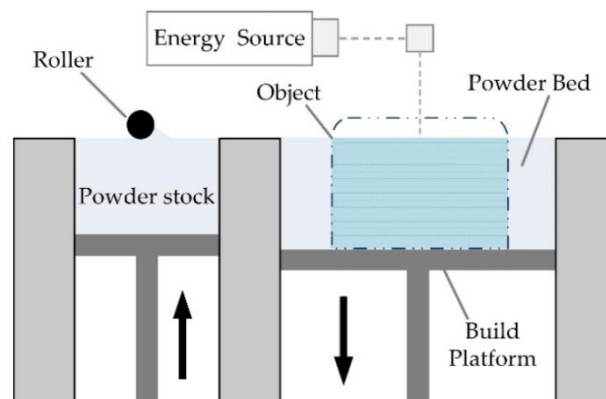
Výhody PBF jsou:

- možnost využití rychlého prototypování,
- možnost tisknout složité struktury nevyrobitelné jinými technologiemi
- široká škála tisknutelných materiálů,
- dobré mechanické vlastnosti tisknutých dílů,
- možnost recyklace prášku. [13]

Nevýhody jsou:

- nutnost bezpečnostních opatření z důvodu práce s jemným práškovým materiálem,
- nákladnější úklid prostředí tiskárny a materiálu včetně jeho uskladnění,
- limitace velikostí stavebním prostorem tiskárny,
- poměrně dlouhá doba tisku (v porovnání např. s obráběním na CNC stroji)
- výsledek je závislý na kvalitě prášku (velikost částic, chemické složení, ...)
- vysoká spotřeba energie. [13]

Tiskový proces Powder Bed Fusion lze rozdělit do několika na sebe navazujících kroků (viz obr. č. 6). Na obr. lze vidět schéma procesu spékání prášku, lze vidět zásobník prášku, komoru s objektem, nanášecí zařízení (tzv. recoater), zdroj energie. Na obr. č. 6 není znázorněna přepadová komora, kam se hrne přebytečný prášek. V prvním kroku je nanášena vrstva materiálu pomocí recoateru na stavební platformu. Následně je prášek pomocí zdroje energie (laser nebo elektronový svazek) na určitých místech nataven a tím dojde ke spojení nataveného prášku s předchozí vrstvou. Komora s objektem se posune o výšku jedné vrstvy dolů a komora s práškem o stejnou výšku nahoru, dojde k nanesení nové vrstvy a opětovnému natavení zdrojem energie. Celý tento proces se opakuje, dokud není vytvořena kompletní požadovaná geometrie. [12], [13]



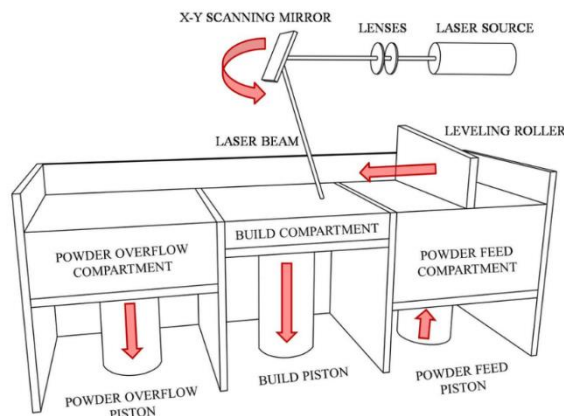
Obrázek 6: Schéma technologie Powder Bed Fusion [45]

Metoda DMLM

Metoda DMLM – Direct Metal Laser Melting je patentována firmou GE Additive, která má výhradní právo využití této technologie. Jedná se o obdobnou technologii jako DMLS s jediným rozdílem, že ke spojování prášku nedochází pomocí sintrování, ale pomocí tavení prášku (namísto sintering je melting). V případě sintrování nedojde k úplnému natavení a spojení materiálu a je tudíž patrná větší porozita výsledného výtisku. V případě natavení dojde k plnému splynutí materiálu a porozita je velmi nízká. To je jediný rozdíl těchto metod, které spadají do skupiny metod Powder Bed Fusion. [14], [15]

K fúzi (tavení) prášku je zde využit laserový CO₂ paprsek tavící materiál, který je nanesen ve velmi tenkých vrstvách (pohybujících se v rozmezí 20-80 μm) vygenerovaných příslušným SW z CAD modelu. Práškové materiály pro metodu DMLM jsou nejčastěji oceli (nerezová, maraging), např. nerezová ocel AISI 316L se především využívá k výrobě konformních chladících kanálů pro operace vstřikování. Dále se používají titanové slitiny (které odolávají vysokým tlakům a teplotním extrémům), které se uplatňují i díky své vysoké ceně především v leteckém průmyslu. Dalším zástupcem je hliník, který je využit v automobilovém, leteckém a potravinářském průmyslu. Metoda DMLM je schopna tisknout také superslitiny jako Alloy718, což je slitina na bázi niklu, která je schopna odolávat tlakům a teplotám v raketových a proudových motorech. Superslitina CoCR F75 (na bázi křemíku) se využívá při tisku turbín a dílů motorů. [16]

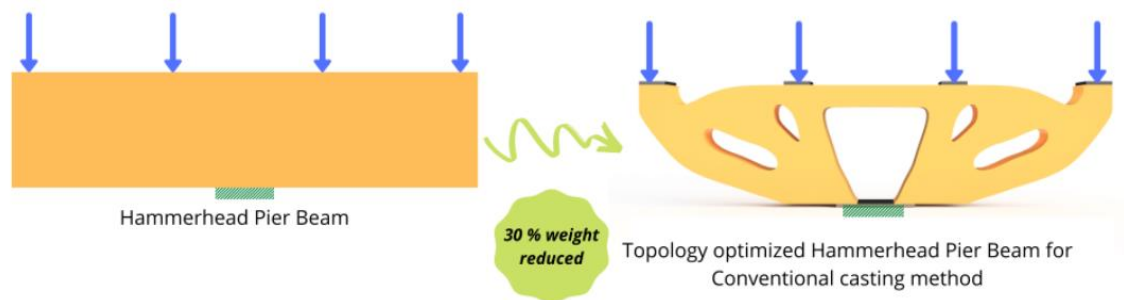
Mezi hlavní výhody DMLM, zobrazené na obr. č. 7, patří nízká porozita výrobků a kvalita povrchu. Díky možnosti výšky vrstvy 20 μm vykazují tisknuté předměty kvalitu hladkého povrchu, která redukuje postprocessingové úpravy. Procesem přímého tavení je možné dosáhnout téměř 100 % hustoty. [15], [16]



Obrázek 7: Schéma metody DMLM [46]

2.2 Topologická optimalizace

Optimalizace topologie je pokročilou metodou navrhování konstrukcí, pomocí které lze získat optimální návrh konstrukce tak, že dojde k optimálnímu rozložení materiálu na základě předem definovaných podmínek. Tyto podmínky jsou zatížení součásti a definovaný konstrukční prostor (tzv. design space). Proces topologické optimalizace spočívá v odstranění materiálu z určitých oblastí dané součásti, kde nepůsobí značné napětí a deformace, a tím dojde k úspoře materiálu při zachování funkčnosti dílu. Výpočtové metody topologické optimalizace využívají k výpočtu metodu konečných prvků. Existuje několik metod výpočtů, mezi nejpoužívanější patří ESO, BESO, SIMP, metoda homogenizace atd. Tyto metody jsou popsány níže. Na obr. č. 8 a č. 9 je znázorněna ukázka optimalizovaného dílu. [12], [17]



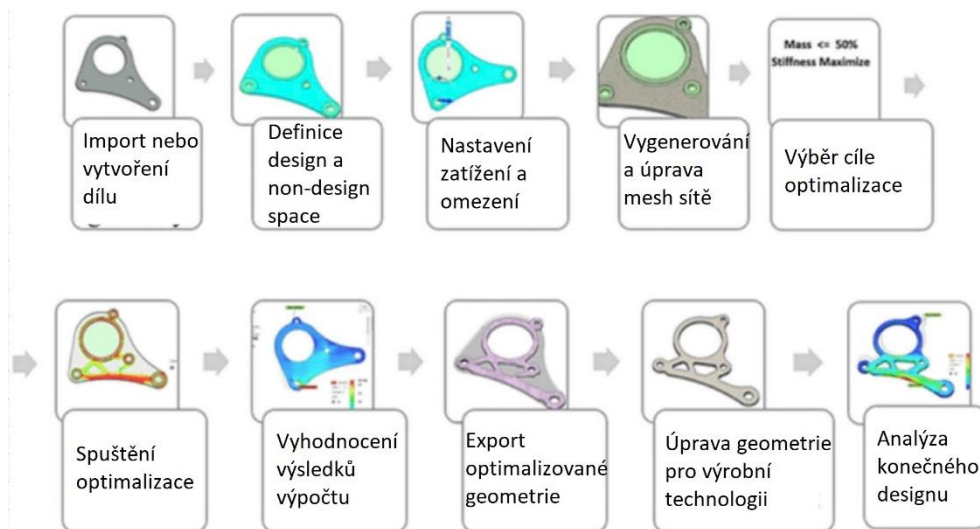
Obrázek 8: Součást před a po topologické optimalizace [29]



Obrázek 9: Ukázka topologické optimalizace [17]

2.2.1 Postup topologické optimalizace

Na obr. č. 10 je znázorněn typický postup pro provedení topologické optimalizace. Na počátku je potřeba mít model součásti, který chceme optimalizovat. Tento model se nahraje do příslušného SW, kde dojde k nadefinování kritických oblastí na modelu. Kritickými oblastmi se rozumí například díra pro šroub, otvor pro uchycení jiného předmětu a jiná místa, která by při změně geometrie znemožnila součásti být použita. Vše, co není takto definováno je považováno za tzv. design space, tj. prostor, ve kterém může dojít k odebrání materiálu, změně geometrie aj. Dalším krokem je nadefinování upnutí součásti a směru a velikosti zatížení. Součásti je určen materiál, ze kterého má být vyrobena. Software má v sobě databázi materiálů, aby mohl na základě jejich mechanických vlastností provést výpočet. Dále je provedeno zasiťování součásti (tzv. meshování) na hustou síť elementů o předem dané velikosti. Zde platí pravidlo, že čím menší velikost elementu konstruktér zvolí, tím zpřesní výpočet, ale zároveň prodlouží čas výpočtu. Je tudíž třeba volit velikost elementů uvážlivě. Následuje nastavení výpočtu optimalizace (např. zachování co největší tuhosti, požadovaný úběr materiálu atd.) a je spuštěn výpočet. Výpočet probíhá pomocí metody konečných prvků, kdy software otestuje každý konečný prvek na tuhost, deformaci, napětí a průhyb, aby zjistil, které elementy jsou nadbytečné a mohl je odstranit. Po dokončení této analýzy dojde k odstranění všech nepotřebných elementů pro zachování předem definovaných parametrů a je vytvořen finální díl. Software také nabídne údaje o rozložení napětí a deformaci optimalizovaného dílu. Některé softwary nabízí možnost tento model dále upravit, aby byl lépe vyrobitelný a aby lépe vypadal, jedná se například o vyhlazení povrchu, zaoblení ostrých hran apod. Pokud software tento typ úpravy nepodporuje, je potřeba model přemodelovat v nějakém CAD softwaru. Při úpravě modelu je zapotřebí brát v potaz výrobní technologii, kterou bude díl vyráběn. Po dokončení úprav modelu následuje většinou finální analýza modelu na maximální deformaci a napětí, aby se uživatel ujistil, zda díl vydrží předem požadované zatížení. [12], [18]



Obrázek 10: Schéma postupu topologické optimalizace [18]

2.2.2 Výhody a nevýhody použití topologické optimalizace

Mezi výhody patří:

- Optimalizovaný design (pomocí metody konečných prvků dojde k úběru nepotřebného materiálu),
- nižší spotřeba materiálu a nižší hmotnost,
- krátký cyklus vývoje produktu,
- kratší doba uvedení na trh,
- atraktivita návrhů. [18], [19]

Nevýhody jsou:

- Omezení vyrobitelnosti (optimalizované návrhy jsou vhodné především pro aditivní než pro subtraktivní výrobu. Při subtraktivní výrobě je potřeba odebírat materiál, a je zde tudíž velké množství odpadu a časová náročnost.),
- vyšší náklady (náklady na aditivní výrobu jsou stále o něco vyšší než pro tradiční výrobní metody),
- snížení sil součásti (v některých případech může dojít se snížením hmotnosti ke snížení pevnosti),
- nedostatek porozumění (ačkoli optimalizace topologie existuje již řadu let, přichází do popředí teprve nyní s čím dál větším zaváděním aditivních technologií). [18], [19]

2.2.3 Metody výpočtu topologické optimalizace

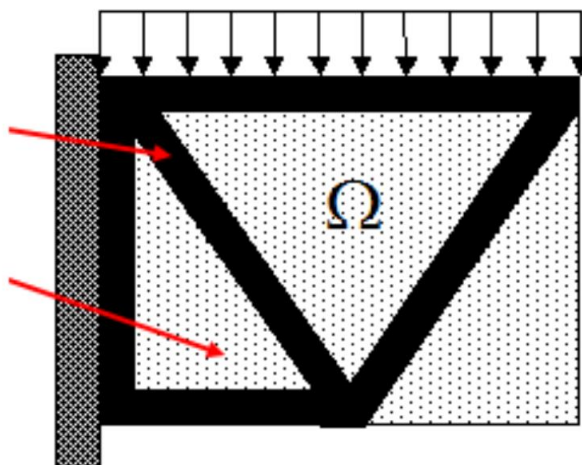
V dnešní době existuje několik možností výpočtu topologické optimalizace. Všechny tyto metody jsou založeny na výpočtu pomocí metody konečných prvků. Mezi neznámější a nejpoužívanější patří metody SIMP, ESO/BESO a metoda homogenizace.

SIMP

Solid Isotropic Material with Penalization (neboli SIMP) lze přeložit jako pevný izotropní materiál s penalizací. Tuto metodu definoval a popsal poprvé v roce 1989 M. P. Bendsoe a do dnešní doby je to nejpoužívanější metoda výpočtu topologické optimalizace. Metoda SIMP předpovídá optimální rozložení materiálu v daném „design space“ při zohlednění zatěžujících stavů, okrajových podmínek a požadavků na výkon. Bere též v úvahu výrobní technologii, kterou bude daná součást vyráběna. [20]

Při výpočtu je nejprve materiál rozdělen do sítě prvků a následně je každému tomuto bodu přiřazena jedna proměnná ρ_e , která značí virtuální hustotu materiálu v každém jednotlivém prvku, tj. poměr mezi reálným materiálem v prvku vzhledem k jeho objemu. Tato hodnota může nabývat hodnot v rozsahu 0-1. Pro $\rho_e = 0$ není v prvku žádný materiál, naopak pro $\rho_e = 1$ je v prvku 100 % hustota materiálu. [20]

Na obr. č. 11 lze vidět příklad optimalizace topologie nosníku zatíženého zázorněnou silou. Prvky se 100 % hustotou (tj. $\rho_e = 1$) jsou vyobrazeny černě, zatímco prvky s nulovou hustotou (tj. $\rho_e = 0$) bíle a jsou odstraněny. [20]



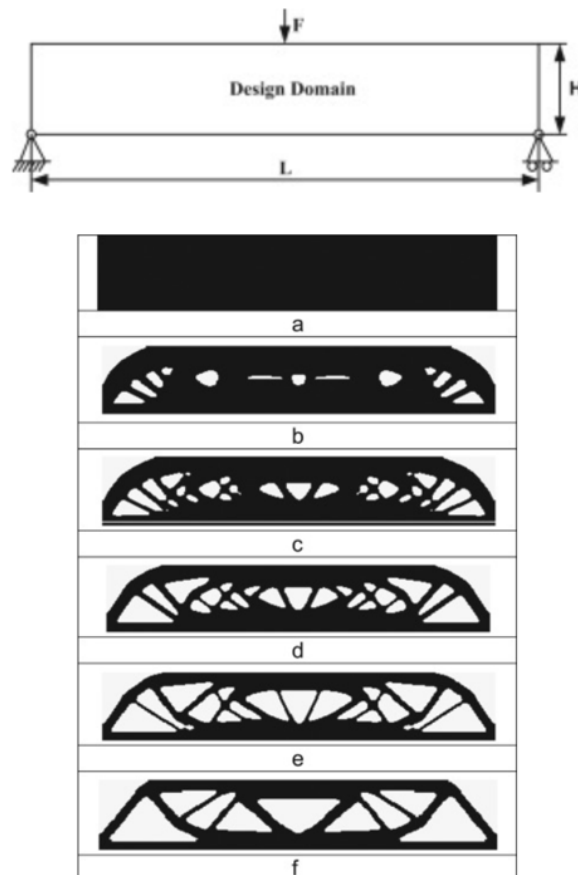
Obrázek 11: Metoda SIMP [20]

ESO/BESO

Metoda ESO neboli Evolutionary Structural Optimization (česky vyvíjející se optimalizovaná struktura). Základní myšlenkou této, poprvé představené v roce 1992, optimalizační metody je vývoj konstrukce směrem k optimu postupným odebíráním prvků podle kritéria určeného uživatelem, jako je například max. napětí, max. deformace nebo vlastní frekvence. Nevýhoda této metody je, že při výpočtu mohou být odstraněny prvky, které poté nelze vrátit zpět do struktury. [21], [22]

Naopak tomu metoda BESO (Bilinear Evolutionary Structural Optimization, česky obousměrně se vyvíjející optimalizovaná struktura) funguje na stejném principu jako metoda ESO s jediným rozdílem, a to je možnost zpětného vrácení důležitých prvků zpět do struktury. Vzhledem k možnosti obousměrného odebírání/přidávání materiálu není potřeba zahajovat výpočet s plným „design space“ prostorem, což může zkrátit čas výpočtu. [21], [22]

Na obr. č. 12 lze vidět postupné odebírání materiálu při třibodovém ohybu a jeho finální zoptimalizovanou podobu. [21], [22]

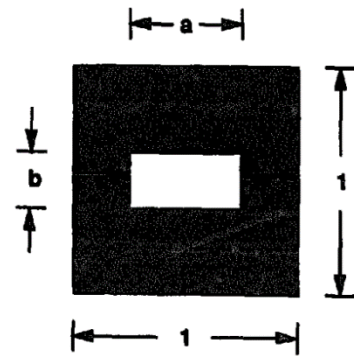


Obrázek 12: Metoda ESO/BESO [21]

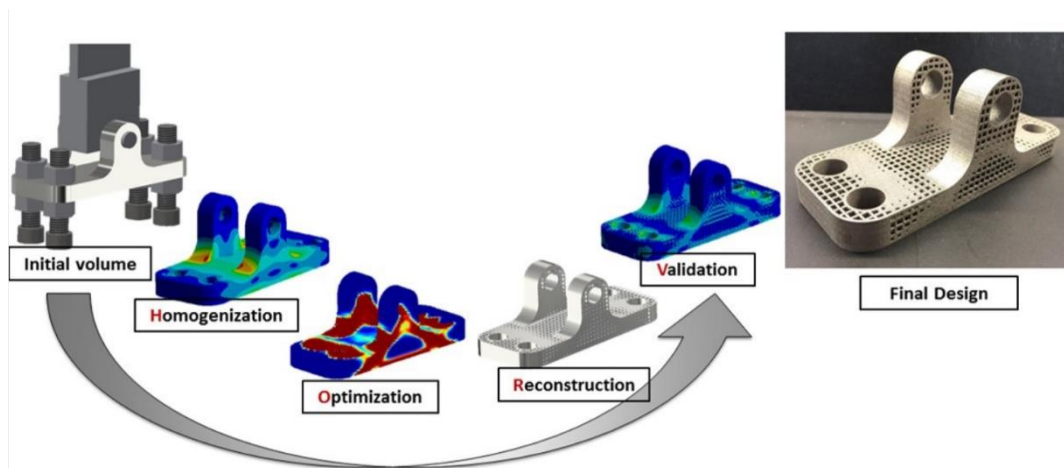
Metoda Homogenizace

Metoda homogenizace řeší nejenom topologickou, ale také tvarovou optimalizaci. Součást je vytvořena z nekonečného množství mikroductin a cílem je najít jejich ideální tvar a rozložení. Design space daného dílu se rozdělí na konečné množství prvků, dále jsou zadány okrajové podmínky (zátížení, deformace, vlastní frekvence apod.) a je zahájen výpočet. Při použití čtvercových prvků (jako je vidět na obr. č. 13), bude mít každá tato buňka stejný typ mikrostruktury, bude se jednat o izotropní materiál. Každý z těchto čtverců má v sobě dutinu. Pomocí výpočtu je každé dutině přiřazena velikost podle předem nastavených podmínek. [23]

Hodnoty velikosti dutiny „a“ a „b“ (viz obr. č. 13) mohou nabývat hodnot v intervalu $\langle 0,1 \rangle$. V případě, kdy se obě hodnoty rovnají 0 se jedná o materiál se o reálný materiál. Rovnají-li se tyto hodnoty 1, jedná se o mikroductinu. Pomocí metody homogenizace může vznikat zajímavě porézní materiál, který není možné vyrobít jinou než aditivní technologií. [23]



Obrázek 13: Velikost mikroductiny [23]



Obrázek 14: Ukázka použití metody homogenizace [47]

3 Rešerše využití topologické optimalizace v aditivní výrobě

3.1 Využití topologické optimalizace v průmyslu

Jednou z předností aditivních technologií je schopnost vytvářet složité struktury, což je ideálním přínosem pro použití optimalizace topologie právě v oblasti 3D tisku. Použití aditivních technologií zkracuje výrobní cyklus (a to hlavně při prototypování a kusové/malosériové výrobě). Potenciál této výrobní technologie podporuje také možnost tvorby integrálních struktur, které je možné použít v rámci optimalizace topologie. U optimalizovaných struktur umožňuje inženýrům použití 3D tisku zbavit se omezení, která s sebou nesou běžné konvenční způsoby výroby a mohou se naplno věnovat návrhu lehkých a zároveň výkonných konstrukcí. Existuje zde však řada omezení, které musí konstruktéři při návrhu zohledňovat, jako je například velikost stavebního prostoru stroje, prášek, který zůstane v uzavřených dutinách, rozměrová a tvarová přesnost a drsnost povrchu (toto lze ovšem odstranit následným postprocessingem ve formě obrobení). Vzájemná kooperace optimalizace topologie a 3D tisku je způsobem, jak dosáhnout sladění konstrukčního a výrobního návrhu výroby. [24]

Uplatnění topologické optimalizace lze najít v širokém spektru průmyslových odvětví. Jedním z nich je například letecký průmysl. Letecká doprava je velice nákladná, a proto jsou zde vysoké nároky na co nejvyšší snížení hmotnosti při zachování funkčnosti. Optimalizace topologie pomáhá analyzovat všechny části letadla za účelem snížení hmotnosti. Snížení hmotnosti vede k tomu, že může letadlo přepravit více nákladu, nebo snížit naopak spotřebu paliva a zvýšit dolet. To samé platí i v kosmickém průmyslu. [25]

Dalším odvětvím je automobilový průmysl. Někteří výrobci využívají topologickou optimalizaci pro optimalizaci některých konstrukčních (např. podvozků) a strojních součástí. Spojení optimalizace topologie a 3D tisku se využívá pro výrobu konformního chlazení u vstřikolisů a také pro výrobu speciálních nástrojů pro nástrojárny. [26]

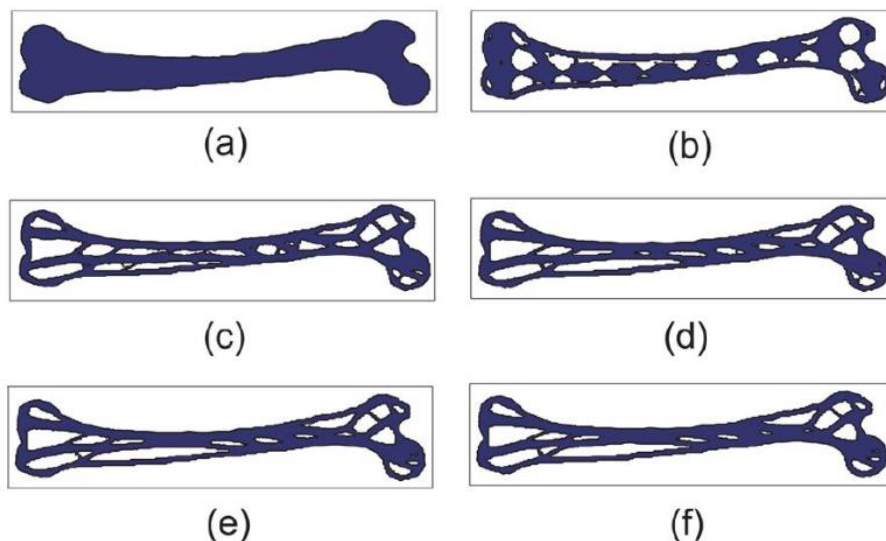
Společnost Airbus Group v roce 2016 přišla s první 3D tištěnou elektrickou motorkou. Rám této motorčky byl optimalizován a následně vytištěn. Díky použití technologie 3D tisku a optimalizaci došlo k úspoře 30 % hmotnosti běžných elektro motorek (tento rám váží pouhých 6 kg). Tento rám byl vyroben ze speciálního firmou vytvořeného materiálu Scalmalloy. Jedná se o korozi-vzdornou hliníkovou slitinu, která je prakticky stejně pevná jako titan. Tento materiál kombinuje vysokou pevnost s mimořádnou tužností, což z něj dělá velice zajímavý materiál pro

uplatnění v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. Rám této motorky je vidět na obr. č. 15. [27]



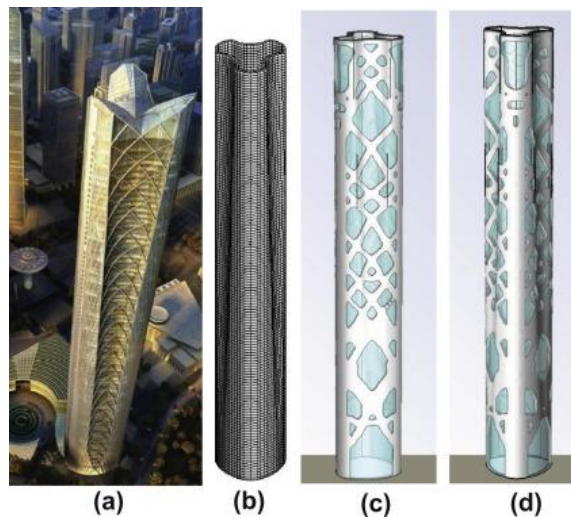
Obrázek 15: Elektrická motorka společnosti Airbus Group [27]

V oblasti lékařství nachází uplatnění optimalizace topologie za účelem výroby účinných implantátů a protetických pomůcek a náhrad. Pomocí softwaru jsme schopni vytvořit díly, které napodobují hustotu a tuhost kostí pacientů. Je zde možnost zohlednit přesnou anatomii pacienta a úroveň aktivity, kterou bude pacient vykonávat (toto souvisí s nastavením okrajových podmínek zatížení). Na obr. č. 16 lze vidět topologickou optimalizaci kostní náhrady femuru (kosti stehenní). Obr. znázorňuje postupné odebrání materiálu až do závěrečné podoby. Kost byla následně vytištěna na kovové 3D tiskárně z titanové slitiny. [28]



Obrázek 16: Postup optimalizace topologie kosti Femur [28]

Jedním z dalších odvětví, které neustále usiluje o optimalizaci svých konstrukčních řešení je stavební průmysl. Je zde úsilí o optimalizaci topologie za uchování bezpečnosti a minimalizace nákladů, aniž by utrpěla kvalita, udržitelnost a funkčnost. Vylepšený návrh pomáhá přinést lehčí a tužší tvar konstrukce, který zamezuje přebytké plýtvání a minimalizuje náklady. Navíc se jedná o velice atraktivní konstrukce, které neujdou níčí pozornosti. Na obr. č. 17 lze vidět návrh 84patrové budovy v čínském Wu-chanu. Obr. č. 17 (a) znázorňuje architektonický koncept, (b) síť konečných prvků, pomocí které byl proveden výpočet optimalizace a obr. č. 17 (c) a (d) ukazují finální výsledky topologické optimalizace. [29], [30]

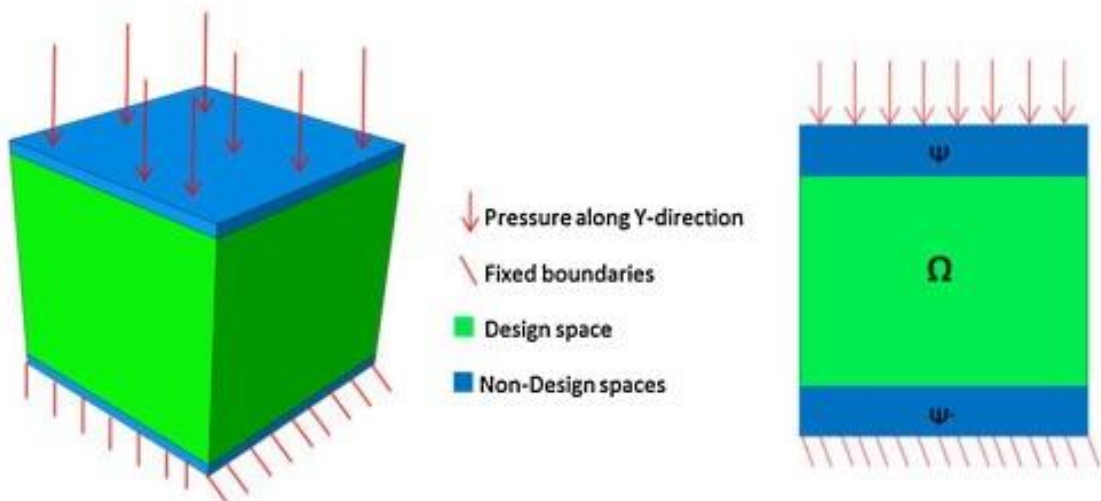


Obrázek 17: Optimalizace pláště budovy [30]

3.2 Kritická literární rešerše ke zkoumané problematice porovnání SW

Tato kapitola se zabývá literární rešerší studií využívající topologickou optimalizaci v aditivní výrobě ve snaze popsat problematiku testování a komparace SW pro topologickou optimalizaci.

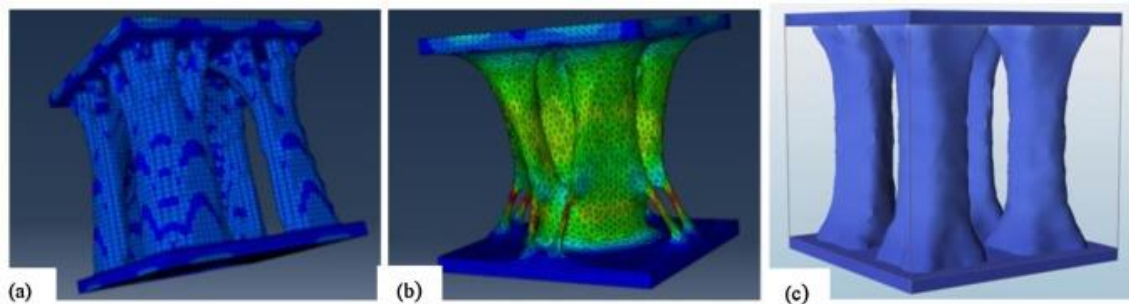
Cílem autorů [31] bylo analyzovat výhodu použití aditivní technologie SLM s topologickou optimalizací. Byly porovnávány dva SW (Abaqus a Optistruct). Topologická optimalizace byla prováděna na krychli (na obr. č. 18), kde spodní část krychle sloužila jako podpora, a na vrchní část působilo zatížení 30 MPa. Kostka měla hranu o délce 20 mm a byla z materiálu Inconel 718 (jedná se o slitinu titanu). Horní a spodní hrana, která zůstává nezměněna (jedná se o tzv. non design space) má tloušťku 1 mm a na obr. je znázorněna modrou barvou. Zeleně je znázorněna oblast „design-space“, která se optimalizovala. Zelená oblast byla síťována celkem do 64 000 prvků. Kostka je znázorněna na obr. č. 18. [31]



Obrázek 18: Znázornění zatížení [31]

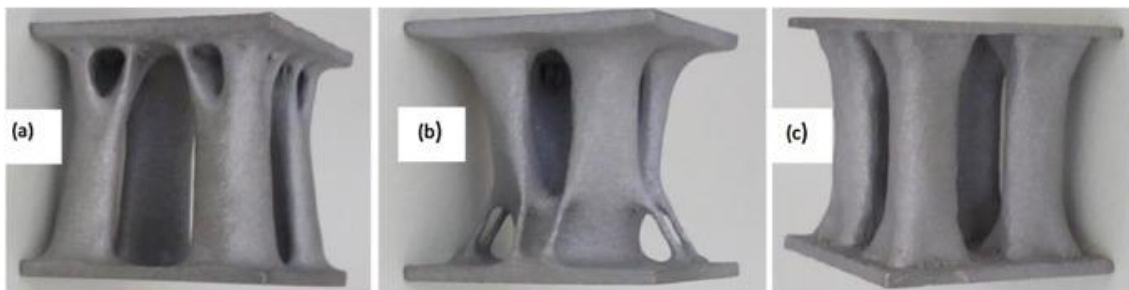
Ve výše jmenovaných softwarech byly řešeny tři problémy. V SW Abaqus SCO bylo cílem minimalizovat hmotnost a zároveň zajistit, aby maximální napětí dle Von Misese bylo menší nebo rovno podílu meze kluzu materiálu a bezpečnostního faktoru, který byl pro tento případ stanoven 1,9, viz vzorec: $\sigma_{VM} \leq \frac{\sigma_e}{f}$. Software Optistruct a metoda SIMP (CCO) byli využity ve druhém případě, kde bylo cílem minimalizovat velikost deformační energie při zachování daného objemu materiálu, který byl v rozmezí od 15 do 40 %. Poslední metoda Abaqus DCO spočívala ve stejném principu jako metoda v SW Optistruct co se objemu materiálu týče, jediná výjimka byla ve stanovení různých lokálních hustot materiálu. [31]

Na obr. č. 19 jsou znázorněny výsledky struktur topologické optimalizace pro všechny tři případy, zleva: (a) Abaqus DCO, (b) Abaqus SCO, (c) Optistruct CCO. [31]



Obrázek 19: Výsledky výpočtů topologické optimalizace [31]

Na níže přiloženém obr. č. 20 jsou zkušební vzorky po vytištění.

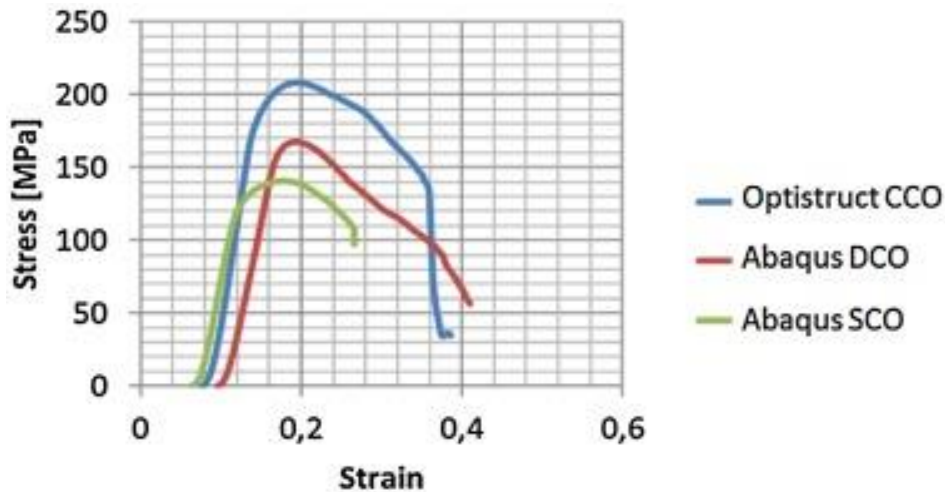


Obrázek 20: Reálně vytištěné díly [31]

Pro každou optimalizační metodu byly vytvořeny tři vzorky na 3D tiskárně Concept Laser M1. Testy na vytištěných tělesech byli provedeny postupným stlačováním vzorků až do jejich selhání. Použitým strojem byl trhací stroj Shimadzu AGX s maximální silou 100 kN a rychlostí zatěžování 2 mm/s. [31]

Obr. č. 22 ukazuje souhrn výsledků z provedených zkoušek. Z výsledků vyplývá, že všechny tři modely byly úspěšné, jelikož splňují bezpečnostní faktor. Napětí a deformace jsou ve všech třech případech podobné, ovšem liší se v množství materiálu. Největší úsporu materiálu přináší Abaqus SCO, který uspořil celkem 74 % původního materiálu. [31]

V grafu na obr. č. 21 jsou znázorněny křivky závislosti napětí na deformaci pro všechny tři vzorky. Z grafu je patrné, že nejlepších výsledků z této zkoušky dosáhl program Optistruct CCO. [31]



Obrázek 21: Graf závislosti napětí na deformaci pro různé SW [31]

Table 3
Numerical results obtained with the Abaqus SCO model.

Density threshold	Remaining volume [mm ³]	Savings in volume [%]	Maximum von Mises stress [MPa]	Inconel 718 elastic stress [MPa]	Safety coefficient	Maximum displacement [10 ⁻² mm]
0.4	1929	76	1014	980	0.96	5.2
0.3	2115	74	522	980	1.88	4.6
0.25	2238	72	447	980	2.1	4.3

Table 4
Numerical results obtained with the Optistruct CCO model.

Minimum volume to be conserved [%]	Remaining volume [mm ³]	Savings in volume [%]	Maximum von Mises stress [MPa]	Inconel 718 elastic yield stress [MPa]	Safety coefficient	Maximum displacement [10 ⁻² mm]
40	3789	52	311	980	3.15	1.7
30	2924	63	344	980	2.8	2.6
25	2479	69	503	980	1.9	3.1
20	2086	74	656	980	1.5	4.2
15	1759	78	896	980	1.1	6.3

Table 5
Numerical results obtained with the Abaqus DCO model.

Minimum volume to be conserved [%]	Remaining volume [mm ³]	Savings in volume [%]	Maximum von Mises stress [MPa]	Inconel 718 elastic yield stress [MPa]	Safety coefficient	Maximum displacement [10 ⁻² mm]
40	4605	43	170	980	5.7	1.7
30	3767	53	252	980	3.8	2.5
25	3148	61	503	980	1.9	3.9
20	2721	66	747	980	1.3	6.1
15	2091	74	1829	980	0.5	18.3

Table 6
Comparisons between the results obtained with the three topology optimization models.

	Minimum volume to be conserved [%]	Remaining volume [mm ³]	Savings in volume [%]	Maximum von Mises stress [MPa]	Inconel 718 elastic yield stress [MPa]	Safety coefficient	Maximum displacement [10 ⁻² mm]
Abaqus SCO	-	2115	74	522	980	1.88	4.6
Abaqus DCO	25	3148	61	503	980	1.9	3.9
Optistruct CCO	25	2497	69	503	980	1.9	3.1

Obrázek 22: Souhrn výsledků provedených zkoušek [31]

V další studii [32] se autoři zaměřili na porovnání třech SW (Genesis, MSC Nastran a Optistruct) v otázce strukturální optimalizace. Strukturální optimalizace je rozdělena do optimalizace tvaru, velikosti a topologie. Pro každou z těchto optimalizací jsou použity jiné příklady. Pro topologickou optimalizaci byli zvoleny kapota automobilu a držák motoru. Na obr. č. 23 je vidět soupis a porovnání možných nastavení optimalizace pro porovnávané softwary. [32]

Available optimization	MSC Nastran	Genesis	OptiStruct
Linear static response optimization	O	O	O
Linear transient dynamic response optimization	O	X	X
Nonlinear static response optimization	O	O	O
Nonlinear transient dynamic response optimization	X	O	O
Fatigue response optimization	O	X	O
Linear buckling response optimization	O	O	O
Frequency response optimization	O	O	O
Multi-body dynamics optimization	X	X	O
Heat transfer optimization	X	O	O
Multiple model optimization	O	X	O
Global optimization	O	X	O
Super-element optimization	O	O	X
Parts-element optimization	O	O	X
Aero-elastic optimization	O	X	X

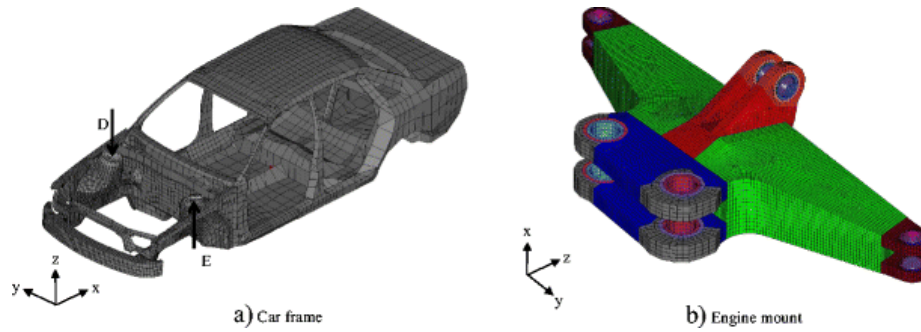
Obrázek 23: Možnosti optimalizace různých SW [32]

Autoři vytvořili tabulku (viz obr. č. 24), kde je vidět statistika počtu proměnných ve funkci, jaká jsou nastavena omezení pro výpočet optimalizace a jaké jsou podmínky zatížení. Lze vidět, že při optimalizaci topologie je počet proměnných zdaleka nejvyšší a pohybuje se v řádech několika desítek tisíc. [32]

Příklad	Počet proměnných návrhu	Objektivní funkce	Omezení	Podmínky zatížení	Poznámka
200 barový vazník	96	Hmotnost	Omezení napětí, vlastní frekvence a posunutí	Vícenásobné podmínky zatížení	Optimalizace velikosti
Šoková věž	15	Hmotnost	Stres a omezení vlastní frekvence	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace velikosti
Křídlo letadla	11	Hmotnost	Omezení indexu napětí, vzpěru a porušení	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace velikosti (kompozitní)
Rám jízdního kola	5	Hlasitost	Omezení posunutí	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace velikosti (kompozitní)
Klika	9	Hmotnost	Stres a omezení vlastní frekvence	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace tvaru
Kolejnicový spoj	4	Hmotnost	Stresové omezení	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace tvaru
Rám auta	15237	-Torzní tuhost	Hmotnostní omezení frakce	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace topologie
Držák motoru	57280	Dodržování	Hmotnostní omezení frakce	Vícenásobné podmínky zatížení	Optimalizace topologie
Talíř	3200	Dodržování	Omezení objemu	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace topometrie
Křídlo letadla	21090	Hmotnost	Omezení posunutí	Vícenásobné podmínky zatížení	Optimalizace topometrie (kompozitní)
Západka	13818	Dodržování	.	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace topografie
Kapota auta	2069	Dodržování	.	Stav jednorázového zatížení	Optimalizace topografie

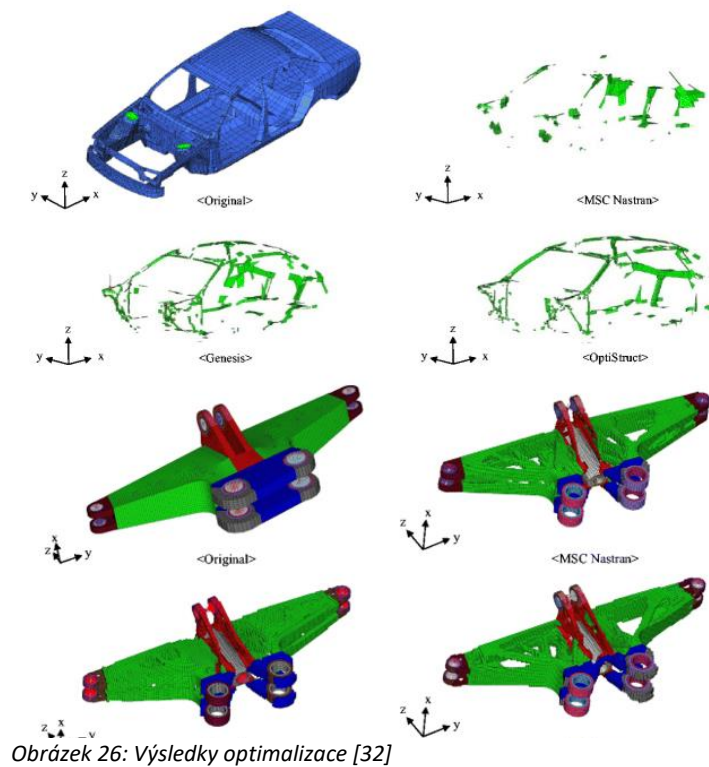
Obrázek 24: Tabulka počtu proměnných návrhu [32]

Jak je zmíněno výše, pro optimalizaci topologie vybrali autoři článku kapotu automobilu a držák motoru. Kapota motoru má pouze dvě podmínky zatížení, první působí v bodě D ve směru osy „z“ silou 265 N. Druhá v bodě E působí síla opačně silou 265 N. Síť konečných prvků je rozdělena na 15 237 prvků. Držák motoru má podmínek zatížení o několik více a jeho konečná síť má 63 045 prvků. Na obr. č. 25 jsou znázorněny non-design části a design space část (ta je vyobrazena zelenou barvou). [32]



Obrázek 25: Optimalizované díly [32]

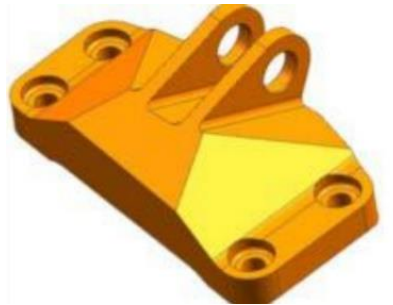
Na následujícím obr. č. 26 jsou vidět výsledky optimalizace topologie pro všechny tři zkoumané SW a obě studie. Ke každému výsledku je vidět i původní stav před spuštěním optimalizace pro porovnání. [32]



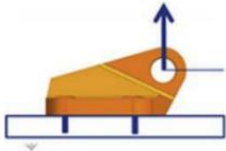
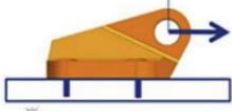
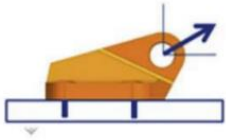

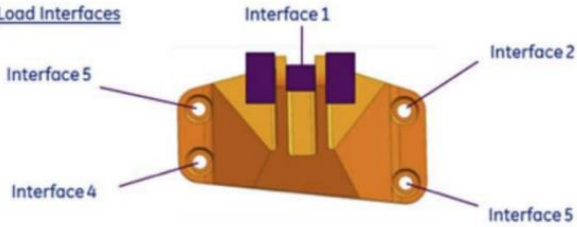
Obrázek 26: Výsledky optimalizace [32]

Závěrem došli autoři k tvrzení, že žádný z těchto třech softwarů není nejlepší ve všech případech a každý systém má tudíž výhody i nevýhody v závislosti na aplikaci. Obecně lze říct, že u SW Genesis je vynikající výpočetní čas, Optistruct poskytuje vynikající řešení optimalizace topologie a MSC Nastran v oblasti optimalizace tvaru a velikosti. [32]

Cílem autorů studie [33] bylo provést optimalizaci topologie konzole proudového motoru od společnosti GE. Konzole je znázorněna na obr. č. 27. Tento díl vychází z konstrukce společnosti a je navržen tak, aby odolal znázorněným zatížením. Na konzoli působí celkem 4 síly (všechny jsou statické) – vertikální, horizontální, vertikální pod úhlem 45° a torzní. Jejich velikost je napsána na obr. č. 28. Největší síla působí ve směru vertikálním pod úhlem 45° a je 42 750 N. [33]



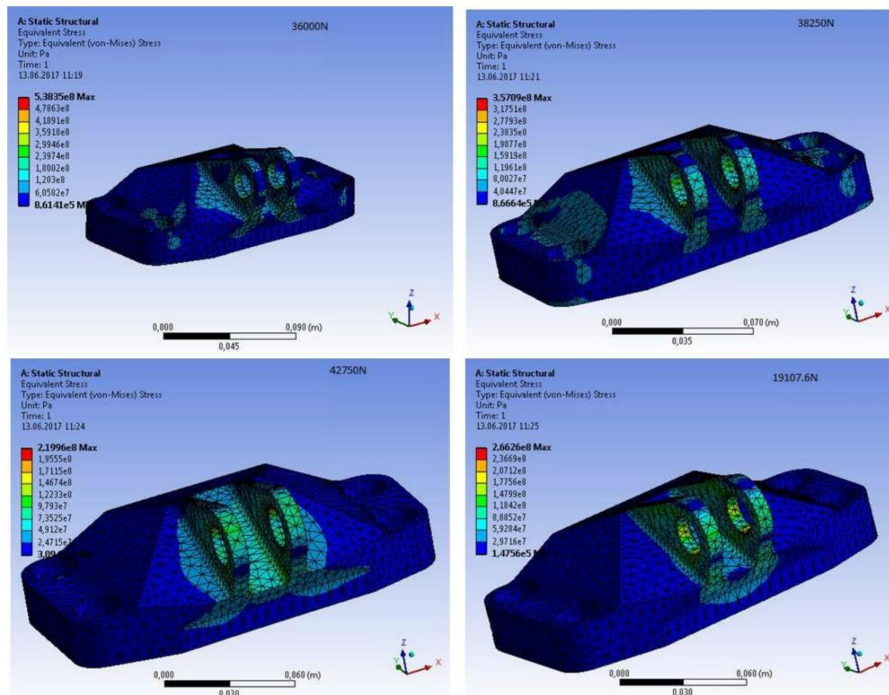
Obrázek 27: Optimalizovaný díl [33]

<p>Load Conditions 1</p> <p>Static</p> <p>Vertical</p> <p>36000N</p> 	<p>Load Conditions 2</p> <p>Static</p> <p>Horizontal</p> <p>38250N</p> 
<p>Load Condition 3</p> <p>Static</p> <p>42 degrees from Vertical.</p> <p>42750N</p> 	<p>Load Condition 4</p> <p>Static Torsional</p> <p>Horizontal plane at centerline of clevis.</p> <p>546Nm</p> 
<p><u>Load Interfaces</u></p> 	

Obrázek 28: Znáznornění zatížení v jednotlivých směrech [33]

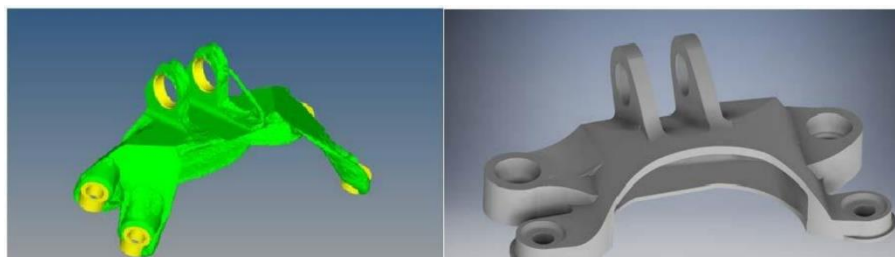
V této studii dochází k optimalizaci topologie této konzole za účelem snížení její hmotnosti při splnění požadavků na konstrukci. Pro optimalizaci je použit software Altair Hypermesh 14 Optistruct. Je zde řada podmínek a požadavků na optimalizovanou strukturu. Je použit materiál Ti6Al4V. Optimalizovaný díl se musí vejít do obálky dílu původního. Minimální tloušťka stěny je 1,13 mm. Cílem musí být maximalizace tuhosti při daném zatížení. [33]

V počáteční fázi byl analyzován původní díl, bylo zjištěno rozložení Von Misesova napětí. Z obr. č. 29 lze vidět modré části, které naznačují neefektivní využití materiálu. Je tudíž předpoklad, že by šly tyto části odstranit bez výrazného ovlivnění výkonnosti dílu. [33]



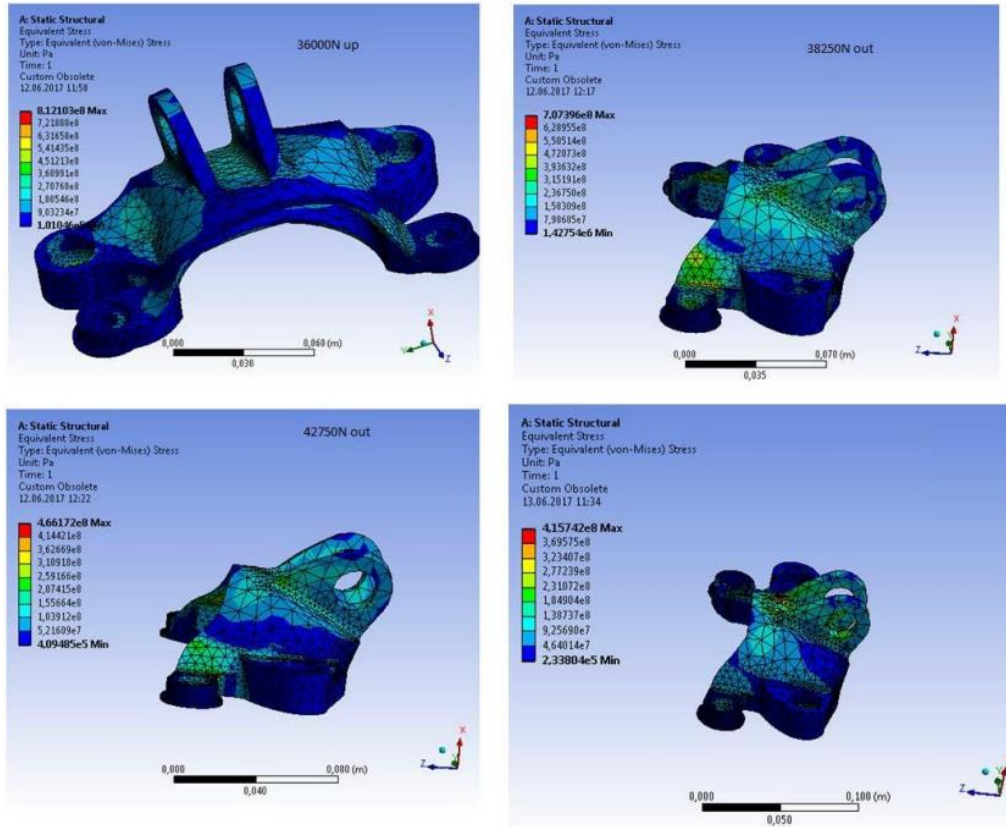
Obrázek 29: Analýza rozložení napětí [33]

Fáze optimalizace topologie začíná nadefinováním non-design a design-space prostoru. Non-design space je znázorněn žlutě, design-space zeleně na obr. č. 30. Součást se rozdělí na návrhový a nenávrhový prostor, poté dojde k vytvoření sítě prvků, kdy každý prvek má velikost 0,25 mm. [33]



Obrázek 30: Vizualizace dílu

Nově navržený, zoptimalizovaný díl, bude muset odolat stejnému mechanickému zatížení jako díl původní a musí splňovat konstrukční požadavky jako je upnutí atd. Je provedena ověřovací analýza pomocí programu ANSYS R17. Všechna Von Misesova napětí jsou nižší než mez kluzu materiálu a konstrukce splňuje podmínku bezpečnosti v mezi od 1,11 do 2,17 (viz obr. č. 31). [33]



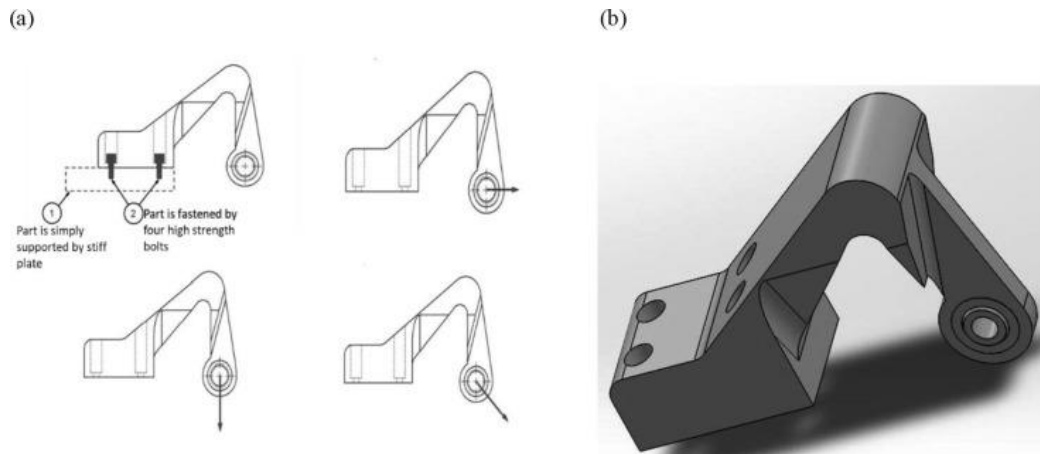
Obrázek 31: Rozložení napětí dle Von Misesa [33]

Došlo k celkové úspoře materiálu o 65 % z původních 2,067 kg na 0,72 kg. Součást byla na závěr vytištěna na FDM tiskárně Fortus 450 od společnosti Stratasys a je znázorněna na obr. č. 32. [33]



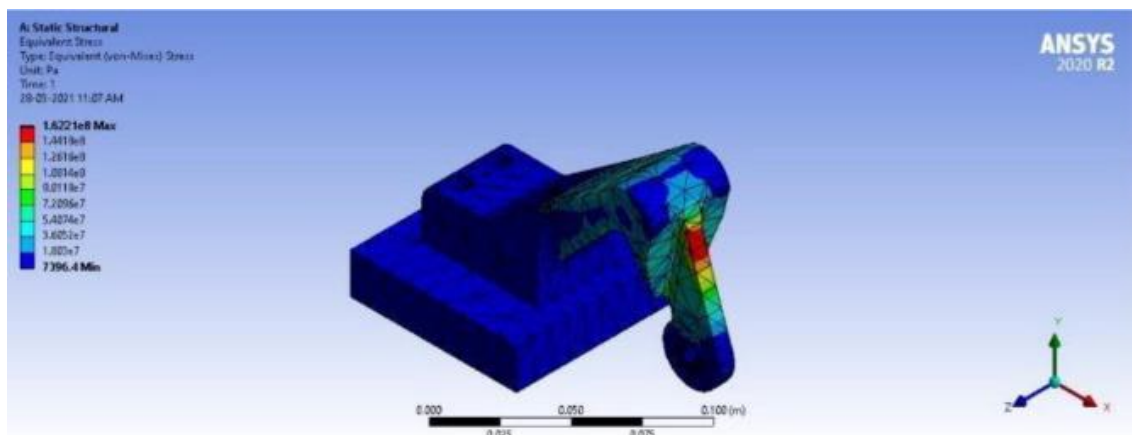
Obrázek 32: Výsledná součást vytištěná na 3D tiskárně [33]

V další studii [34] se autoři zaměřili na optimalizaci topologie nosné konzole letadla od společnosti Alcoa. Konzole je vyrobena z hliníkové slitiny AlSi12Mg. Optimalizace byla provedena za účelem snížení hmotnosti a tím zvýšení efektivity letadla. Při snížení hmotnosti dojde ke snížení emisí CO₂ a spotřeby paliva, což vede ke zvýšení doletu a snížení provozních nákladů. Optimalizace byla provedena v softwaru Ansys. Analyzovaný díl je vidět na obr. č. 33. Jsou zde také vidět stavy zatížení a místa uchycení součástí. Pro síťování design-space prostoru je použita čtvercová síť o velikosti každého prvku 2,9 mm. [34]



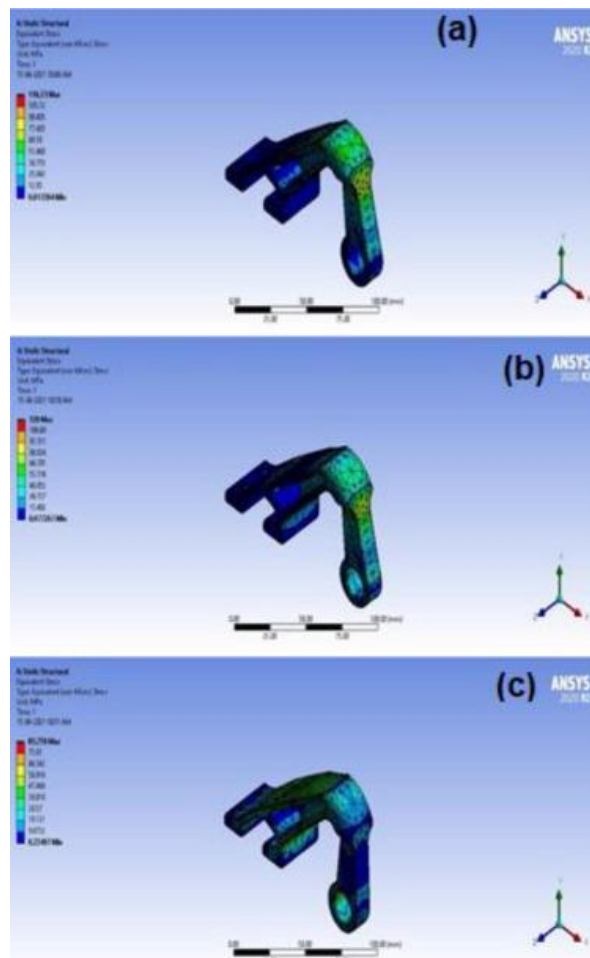
Obrázek 33: Model optimalizovaného dílu [34]

Obr. č. 34 ukazuje výsledky analýzy napětí dle Von Mises neoptimalizované součásti. Maximální indikované napětí je znázorněno červeně. Maximální napětí je při prvním stavu zatížení 162,2 MPa, což je menší hodnota, než je hodnota meze kluzu materiálu, která je 270 MPa. Při druhém a třetím stavu napjatosti bylo indikováno největší napětí 79,04 MPa a 58,92 MPa. [34]



Obrázek 34: Rozložení napětí dle Von Mises [34]

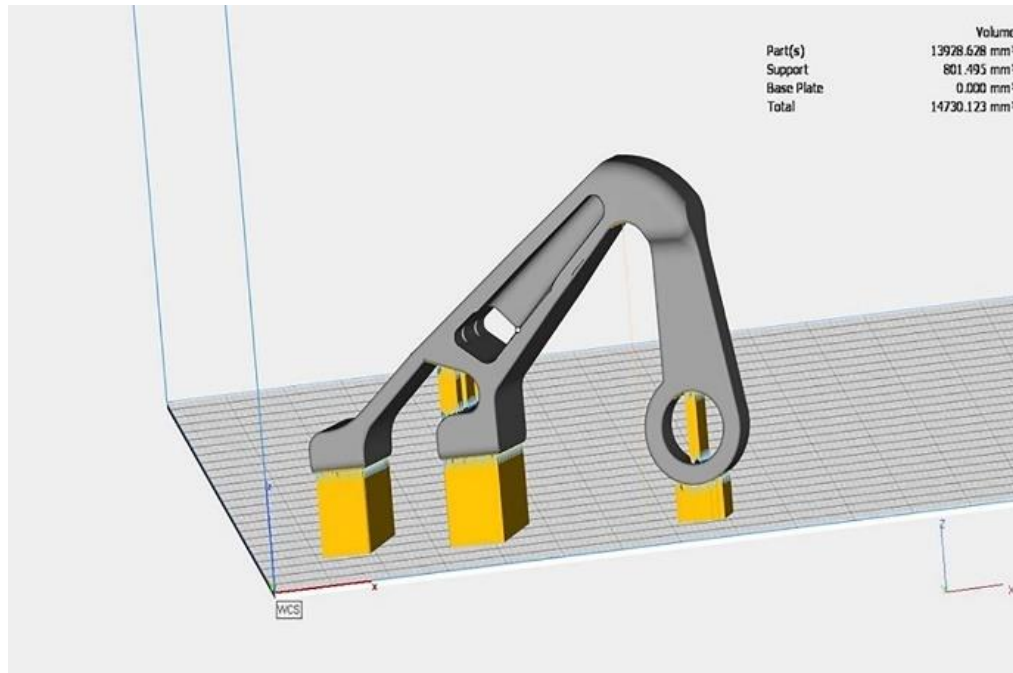
Po ukončení optimalizace byl optimalizovaný díl také analyzován stejně jako díl neoptimalizovaný (viz obr. č. 35). Největší indikované napětí je pro stav horizontálního zatížení a je 116,3 MPa (což je menší než mez kluzu hliníkové slitiny, která je již zmiňovaných 270 MPa). Pro další stavy zatížení byli pozorovány hodnoty napětí 120 MPa a 85,25 MPa. Faktor bezpečnosti je u optimalizovaného dílu 2,25 oproti původním 2,23 u původního dílu. Úspora hmotnosti činila 44,8 %. Zvýšení faktoru bezpečnosti je způsobeno zvětšením tloušťky materiálu v oblasti největšího napětí. [34]



Obrázek 35: Analýza rozložení napětí [34]

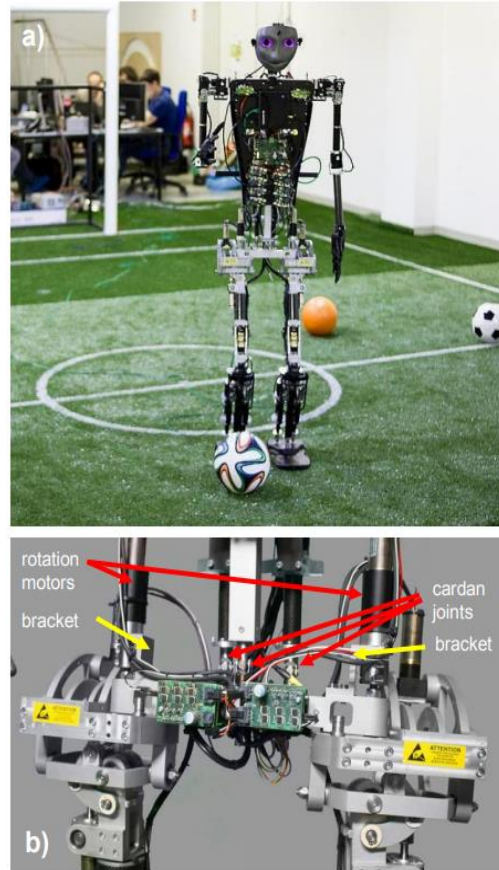
Optimalizovaný díl byl následně numericky simulován v programu Ansys Additive, kde je možnost zjistit nejlepší podmínky pro tisk dílu. Rozsah procesních parametrů se pohyboval mezi 900 mm/s až 1000 mm/s pro rychlosti skenování, rozsah šraf od 70 μm do 92 μm , rozteč šraf 10 μm a výkon laseru se pohyboval mezi 80 a 100 W. [34]

Orientace optimalizované součásti a nastavení pro 3D tisk byly provedeny v SW Magics 22.03. Orientace a poloha součásti byla volena s ohledem na bezproblémový proces tisku s použitím co nejmenšího množství podpor. Napolohování dílu a podpory jsou vidět a obr. č. 36. Hmotnost vytištěného dílu bude přibližně 0,4 kg. [34]



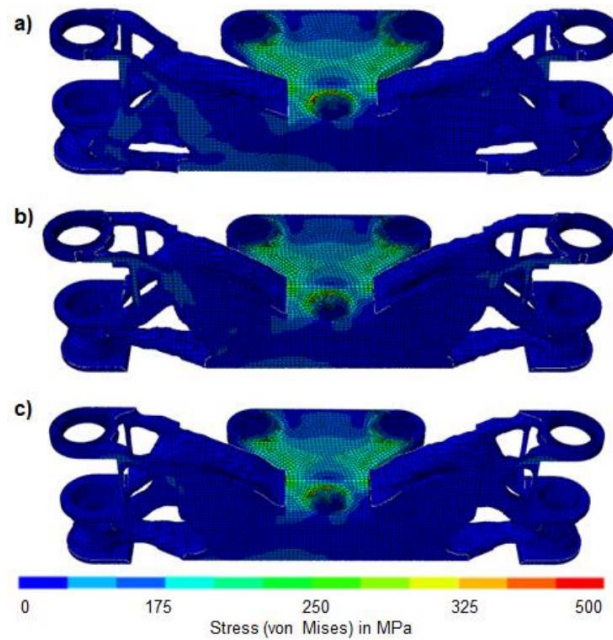
Obrázek 36: Napolohování dílu na platformě a vytváření podpor [34]

Sweat je jméno 172 cm vysokého humanoidního robota, který hraje fotbal, a právě ním se zabývá další studie [35]. Jeho tým se umístil na druhých místech „RoboCupu“ v letech 2017 a 2018. Cílem tohoto projektu je dokázat vytvořit humanoidního robota, který bude schopen konkurovat a soutěžit s lidskými fotbalisty. Tato studie se věnuje snížení hmotnosti pomocí optimalizace topologie „pánevní“ oblasti robota, jak je vidět na obr. č. 37. Zadní vzpěry jsou pevně upevněny v horní oblasti, přední vzpěra lze díky přenášení napětí měnit a tím dojde k ohýbání. Vzpěry jsou spojeny kardanovým kloubem, který umožňuje jejich vzájemný pohyb. Na levé i pravé straně jsou upevněny konzole a k nim motory, které umožňují otáčení nohou. Celá tato oblast pánve se skládá celkem ze čtyř samostatných částí sešroubovaných dohromady – tělo, dva držáky a spojovací deska. [35]



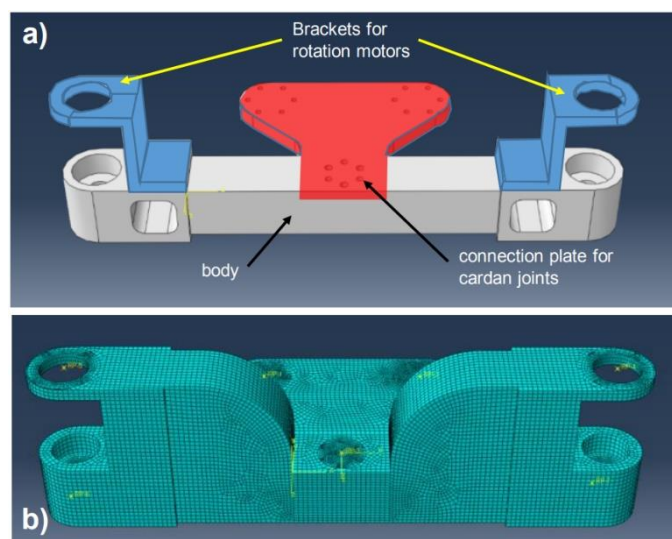
Obrázek 37: Huamoidní robot Sweat [35]

Optimalizace topologie byla provedena v programu od společnosti Tosca. Byly nadefinovány síly, jejíž hodnoty jsou v místech uchycení, které jsou na obr. č.39 vlevo a vpravo, 2500 N a 250 N. Při zatížení na jedné straně silou 2500 N (například při kopnutí) musí být model schopen přenést toto zatížení a vydržet. Na horní straně držáku působí kroutící moment 15 Nm. Na obr. č. 39 lze vidět model součásti jako celku ve zmíněném programu. Zprvu byla velikost prvků nastavena na 7 mm, ale postupně se na určitých místech velikost lokálně zmenšovala kvůli přesnějším výpočtům až na 2 mm a v oblastech otvorů dokonce na 0,7 mm aby se při následném vytištění nevyskytovali v dírách žádné šikmé plochy. Všechny ložiska a dírky pro šrouby a funkční plochy jsou nastaveny jako non-design space, zbytek je nastaven jako design space a právě ten je optimalizován. [35]



Obrázek 39: Rozložení Von Misesova napětí [35]

Topologická optimalizace proběhne celkem třikrát a pokaždé pro jiný uvažovaný materiál – titan, hliník a ocel. Aby bylo možné tyto materiály porovnat, je potřeba provést nejprve analýzu stávajícího, konvenčně vyrobeného, dílu. Ten byl vyroben z vysokopevnostní hliníkové slitiny AlZnMgCu1,5 s mezí kluzu 450 MPa (jedná se o jednu z nejvyšších mezí kluzů u hliníkových slitin). Analýza na obr. 38 ukazuje, že v zadní části součásti dochází k deformaci až 3,66 %. Simulovaný objem této součásti je 217 cm³ o hmotnosti 60,1 g. Tato hmotnost se vztahuje pouze na část modulu, nejsou zde započítány šrouby. Deformační energie tohoto původního dílu je při zatížení maximálně 4,25 mJ. [35]



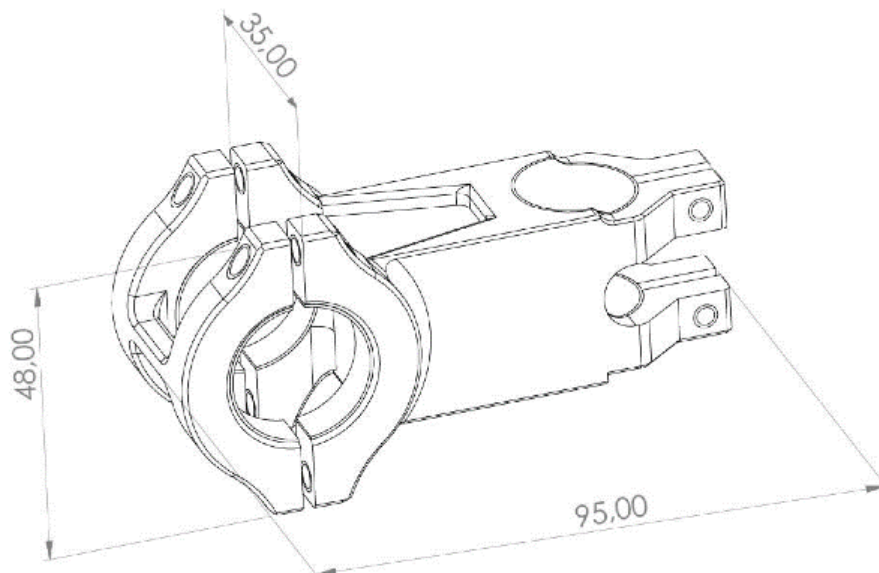
Obrázek 38: Původní stav a stav určený pro optimalizaci [35]

V rámci topologické optimalizace byli porovnávány celkem tři materiály. Prvním byla titanová slitina Ti6Al4V, druhým vysokopevnostní slitina hliníku AlMgSc známá též jako Scalmalloy. Posledním materiálem byla zvolena nástrojová ocel 1.2709. Výsledky analýz všech optimalizovaných materiálů jsou znázorněny v tabulce na obr. č. 40. Lze vidět, že nejlepších výsledků, co se pevnosti týče dosahuje ocel, ovšem co se hmotnosti týče je bezkonkurenční hliníková slitina. Nákladově vyjde nejlevněji způsob konvenční výroby z důvodu ceny aditivně vyráběných dílů a práškových materiálů. [35]

Material	Yield stress [MPa]	Density [g/cm ³]	Volume [cm ³]	Weight [g]	Energy [mJ]	Costs [%]
AlZnMgCu1.5	450	2.78	217.0	99.2	4.3	100
AlMgSc	469	2.67	198.9	53.1	3.5	266
Ti6Al4V	945	4.45	185.1	82.3	2.3	398
Steel 1.2709	1000	8.04	208.6	167.7	1.4	305

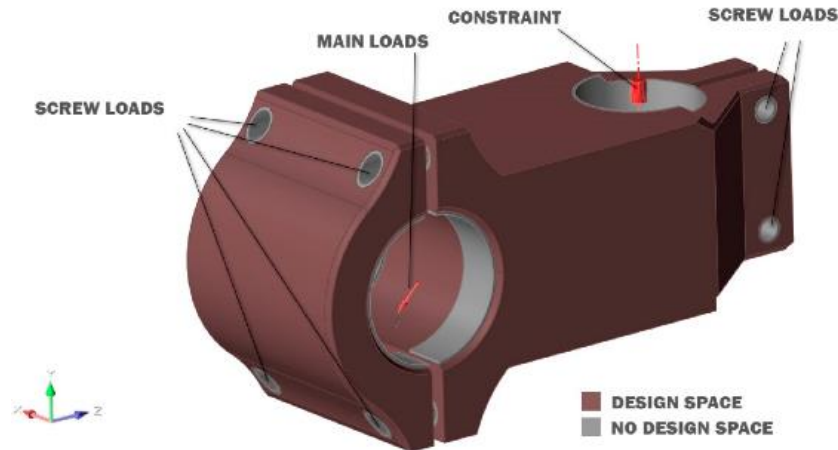
Obrázek 40: Vlastnosti materiálů [35]

Studie [36] se zabývá optimalizací topologie představce jízdního kola, který lze vidět na obr. č. 41. Počáteční model byl vymodelován v programu SolidWorks, kde byl následně vyexportován jako STEP model. Model byl následně naimportován do SW Inspire Altair, ve kterém byla provedena optimalizace topologie. Řešičem tohoto SW je OptiStruct. [36]



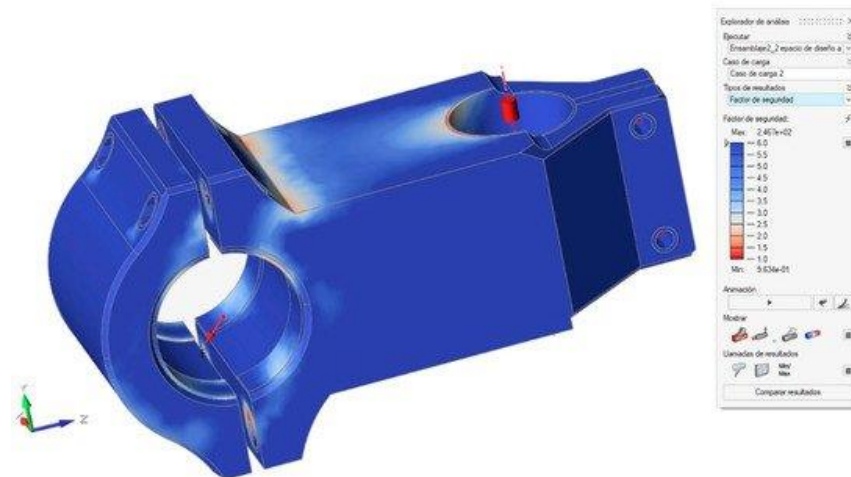
Obrázek 41: Představec jízdního kola [36]

Představec je zatížen dvěma hlavními silami, jejichž velikost je 1 500 N u každé z nich. Další zatěžující síly jsou v otvorech pro šrouby, které simulují zatížení při provozu (tlak ze strany šroubů na představec). Tyto síly mají hodnotu 100 N každá. Na obr. č. 42 lze vidět části, které byly vybrány jako non-design space (jsou znázorněny šedou barvou) a design space prostor, který je zbarven červeně. Jako materiál byl zvolen polyamid6 neboli nylon, a to díky své pevnosti, tuhosti, dobré houževnatosti, a odolnosti proti únavě a opotřebení. [36]



Obrázek 42: Nadefinování design-space a zatížení [36]

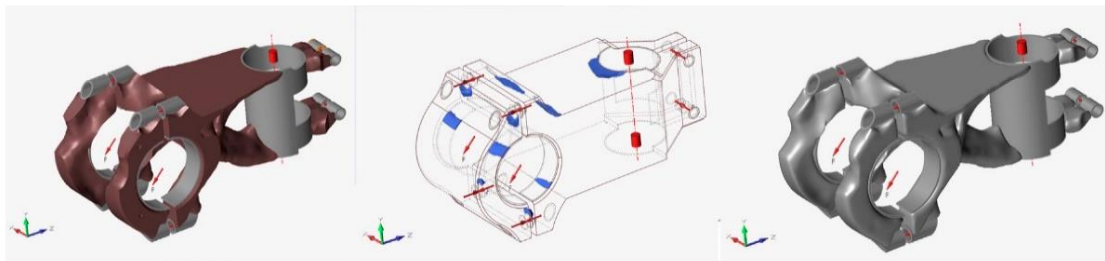
V první řadě po nadefinování upnutí a zatížení byla provedena analýza výpočtu zatížení, zda model součásti splňuje požadavky na koeficient bezpečnosti (obr. č. 43). [36]



Obrázek 43: Analýza výpočtu zatížení [36]

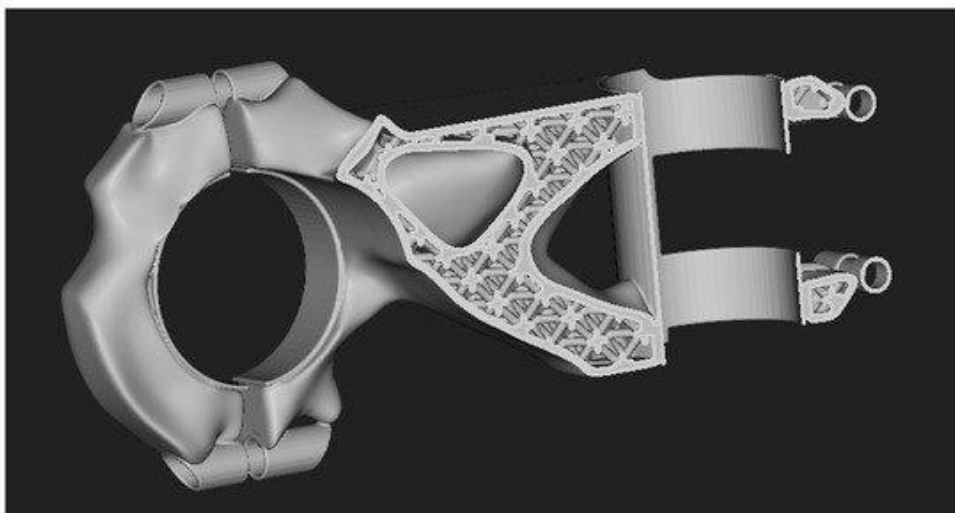
Jak lze vyčíst z obr. č. 43, faktor bezpečnosti nepřekračuje hodnotu 1,2. Tato hodnota byla zvolena jako minimální hodnota faktoru bezpečnosti pro výpočet topologické optimalizace. Cílem optimalizace je zajistit co nejvyšší tuhost a zároveň minimalizovat hmotnost. [36]

Po ukončení výpočtu optimalizace byla struktura vyhlazena pomocí nástroje NURBS. Výsledná struktura lze vidět na obr. č. 44 úplně vpravo. Z počáteční hmotnosti 46,36 g došlo k jejímu snížení na 24,93 g, což činí úsporu 53,8 % hmotnosti při zachování funkčnosti a bezpečnosti. [36]



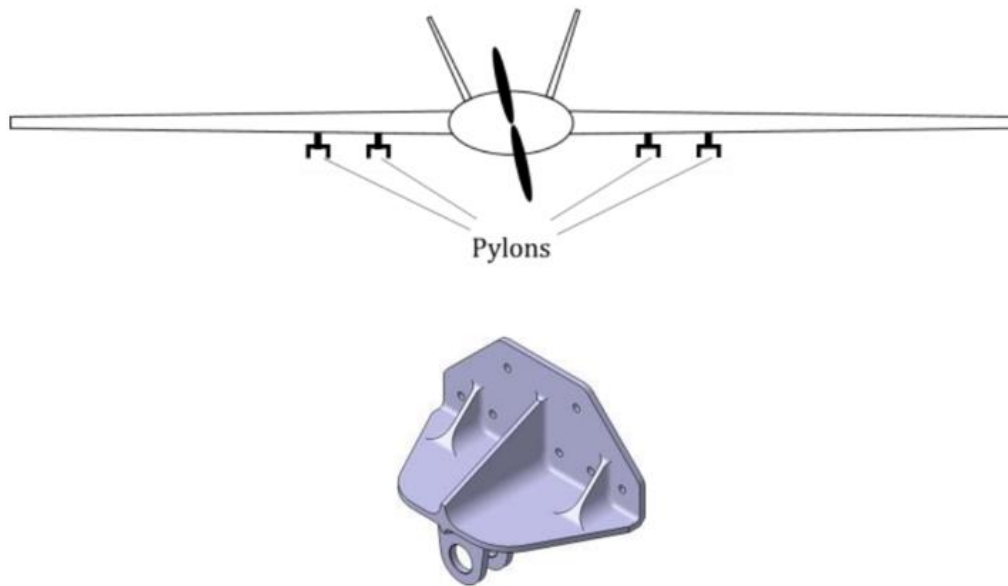
Obrázek 44: Použití funkce NURBS pro vyhlazení povrchu [36]

Dále bylo pomocí nástroje Ntop dosaženo mřížkové struktury za účelem další úspory materiálu. V tomto případě byla použita oktaedrická struktura, která je vidět na obr. č. 45. Bohužel autoři nezmiňují, k jak veliké úspoře materiálu došlo při použití této struktury. [36]



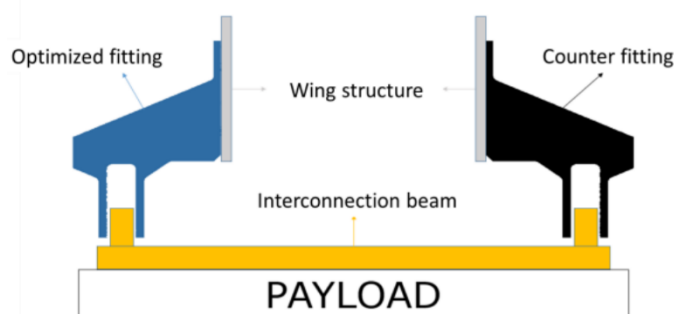
Obrázek 45: výsledná struktura a tvar [36]

Optimalizací topologie držáku pylonu bezpilotního letounu (UAV) se zabývají autoři studie [37]. Optimalizace byla provedena pomocí SW Altair HyperWorks 2019. Bepilotní letoun má celkem 4 pylony, 2 na každém křídle. Pro simulaci se využijí tři různé případy zatížení – pro start, pro let, a pro přistání. Vybere se nejnáročnější zatížení z každé z těchto třech skupin a pomocí něj bude provedena optimalizace. Schéma umístění pylonů a samotný model držáku pylonu jsou vidět na obr. č. 46. [37]



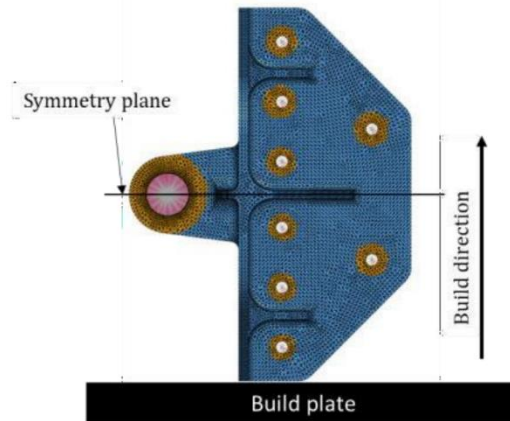
Obrázek 46: Umístění pylonů a jejich tvar [37]

Cílem je optimalizovat topologii jednoho z těchto držáků. Prvním krokem snížení hmotnosti je vytvoření přesného 3D modelu držáku. Držák je vyroben z hliníkové slitiny vybrané z příručky MMPDS (Metallic Material Properties Development and Standardization). Tato příručka je mezinárodně uznávanou příručkou pro výběr leteckých materiálů. Montáž držáků je znázorněn na obr. č. 47. [37]



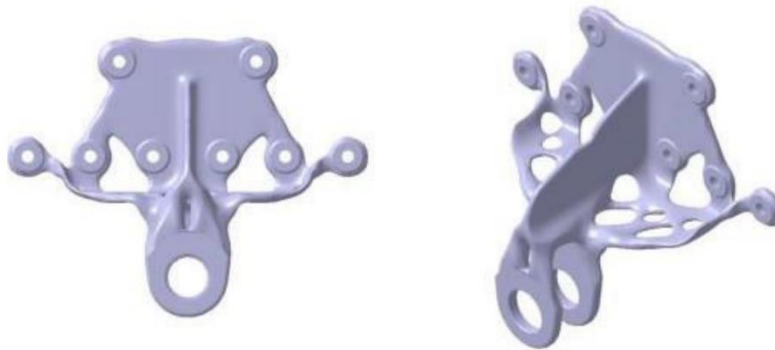
Obrázek 47: Schéma pylonu [37]

V původním modelu je držák vyroben z hliníkové slitiny, ale jelikož bude optimalizovaný díl vyráběn metodou EBM, byl materiál změněn na slitinu titanu Ti6Al4V. Na obr. č. 48 lze vidět polohu dílu na stavební paletě pro tisk a zároveň design a non-design space. Hodnota převisu je 60 stupňů, což by nemělo způsobit žádné problémy při tisku i bez použití podpor. [37]



Obrázek 48: Nastavení pylonu na platformě [37]

Po ukončení výpočtu nemá výsledný model vhodnou geometrii, je hrubý, má ostré hrany a je tudíž nevhodný pro tisk. Je potřeba model vyhladit. Finální geometrie tělesa je vidět na obr. č. 49. [37]



Obrázek 49: Výsledky optimalizace topologie [37]

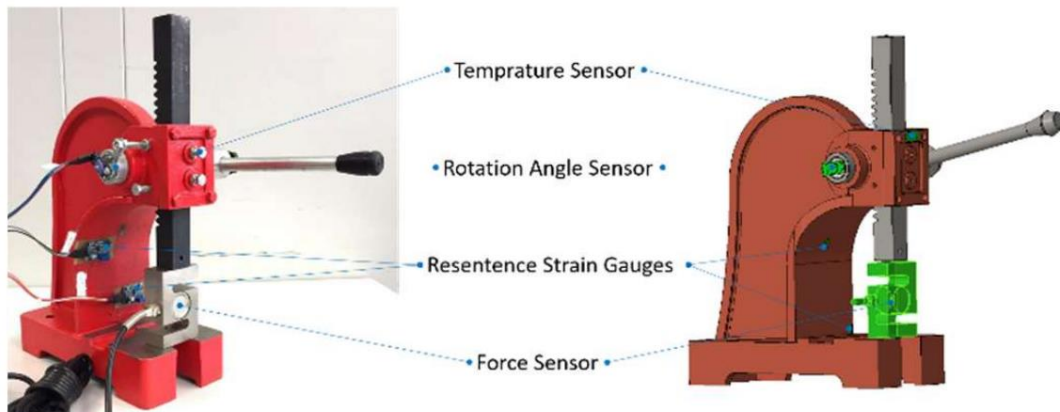
Maximální hodnota napětí dle Von Misesa je 278 MPa, což je nižší hodnota, než je mez pevnosti dané titanové slitiny. Přestože je tento model navržen z těžší slitiny, je uspořeno 31 % původní hmotnosti, Hliníkový díl vážil 544 g, nově navržený díl z titanu má pouhých 376 g. Po ověření metodou konečných prvků (MKP) se držák vyrobí na 3D tiskárně technologií EBM (Electron Beam Melting). [37]

Autoři další studie [38] se zabývají optimalizací topologie trnového ručního lisu. Lis je vyroben z kvalitní šedé litiny GG-30 a má velice robustní konstrukci. Tento lis znázorněný na obr. č. 50 se hodí především na lisování a montáž ložisek a pouzder, dále jej lze také použít pro lehké děrování, rovnání a ohýbání. Lis lze zatížit hmotností až 1000 kg. Pomocí analýzy konečných prvků byla provedena simulace, z nichž vyšlo najevo značné předdimenzování a přebytečné využití materiálu. Koeficient využití materiál byl vypočítán na $A = 0,06$, což odpovídá 6 %. Za účelem zvýšení tohoto koeficientu byla provedena optimalizace topologie pomocí předem definovaných provozních údajů a zatížení. [38]



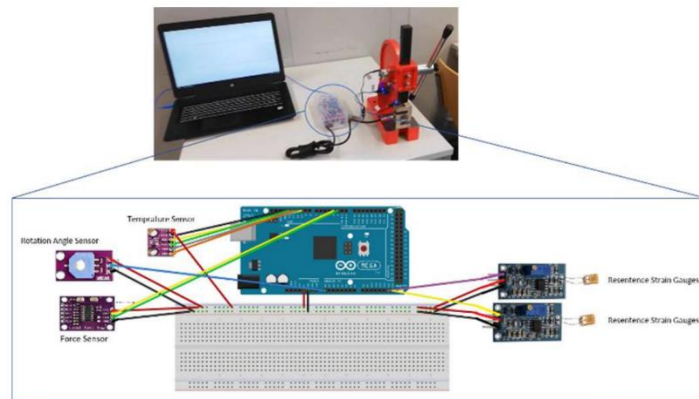
Obrázek 50: ruční lis [38]

V první řadě byl vymodelován 3D CAD model trnového lisu, který byl vytvořen v SW Creo Parametric. Model byl vytvořen se všemi díly. Reálný model je vybaven několika senzory, které snímají charakteristiky zatížení, napěťové stavy atd. Stejnými senzory je vybaveno i digitální dvojče v SW Creo. Snímače jsou pro působící sílu v místě zatížení dílu, dále snímač úhlu natočení, snímač teploty a senzor měření deformace obrobku. Umístění snímačů lze vidět na obr. č. 51. [38]



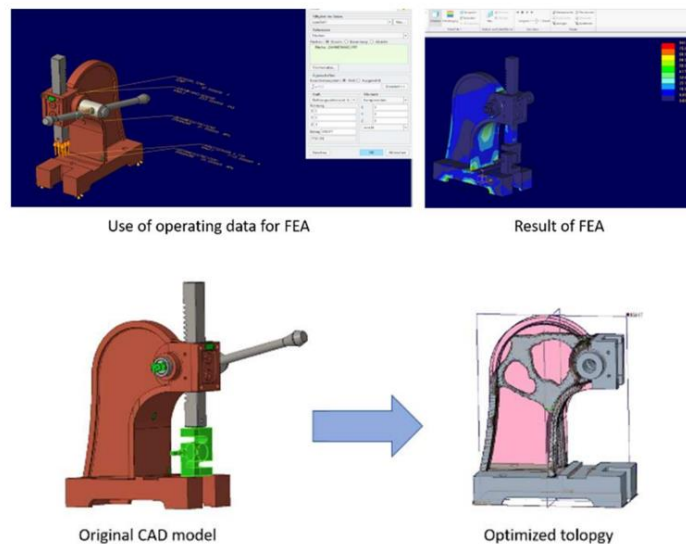
Obrázek 51: Převod reálného modelu do CAD modelu

Pro přenos dat mezi reálným a digitálním modelem byl použit mikrokontrolér Arduino MEGA. Právě díky němu byla shromažďována data z reálných snímačů a připravována pro přenos a uložení do digitálního prostředí, jak je znázorněno na obr. č. 53. [38]



Obrázek 53: Schéma přenosu dat mezi reálným a CAD modelem [38]

Proběhl import dat do SW Creo a následně bylo možné pracovat s CAD modelem, který v sobě nese provozní data potřebná pro analýzy a optimalizaci. K optimalizaci topologie byl zvolen SW Creo FEA Creo Simulate. Při použití tohoto modulu SW Creo se využívají pro optimalizaci data přímo z digitálního dvojčete a nemusí být zadávána ručně. Pomocí metody konečných prvků se došlo k závěru, že při zatížení přibližně 8000 N je využití materiálu stávajícího neoptimalizovaného modelu pouhých 6 %. Výsledky byly zadány a modul vypočítal optimalizaci topologie, v které došlo k úspoře okolo 60 % materiálu. Nově vypočtenou topologií mohou následně konstruktéři využít v návrhu nové konstrukce. [38]



Obrázek 52: Analýzy a výsledný model [38]

Výsledný model trnového lisu s optimalizovanou topologií lze vidět na obr. č. 52. Tento tvar topologie byl vypočten na základě zatížení 8000 N, což je zatížení přibližně odpovídající 800 kg. [38]

3.3 Shrnutí poznatků a definice cílů práce

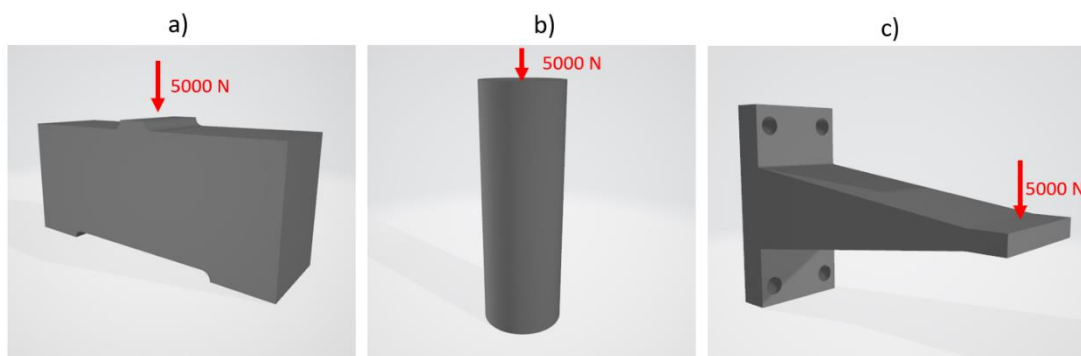
Tato část diplomové práce se zabírala topologickou optimalizací a jejím využitím v aditivní výrobě. Hlavní výhodou použití topologické optimalizace je úspora hmotnosti a tím zvýšení efektivity využití optimalizovaných dílů. Navíc v kombinaci s aditivní technologií výroby mohou konstruktéři navrhovat dosud nevídané tvary, což zvyšuje i atraktivitu dílů se zachováním požadavků na mechanické vlastnosti. Využití tohoto způsobu výroby ve spojení s topologickou optimalizací lze využít v mnoha průmyslových odvětvích. Mezi nejznámější patří letecký, kosmický a automobilový průmysl. Díky atraktivitě a jedinečnosti vzhledu výsledných struktur lze využít optimalizaci topologie i ve stavebním průmyslu.

V další části byla provedena rešerše týkající se využití topologické optimalizace v aditivní technologii na konkrétních příkladech. Všechny studie se zabývají optimalizací topologie dílů s různým využitím, avšak žádná se nezabývá důvěryhodností použitých SW co se týče uváděné deformace a napětí při daném zatížení. Studie [31] se zabývá porovnáním dvou SW z hlediska různých cílů (minimalizace hmotnosti a minimalizace deformační energie při daném objemu materiálu). Vzorky se následně vytiskly a byly na nich provedeny mechanické zkoušky. Studie [32] porovnává tři SW, avšak pouze ve virtuální podobě, tj. nedošlo k reálnému vytištění vzorků. Autoři došli k závěru, že ani jeden z porovnávaných SW (Genesis, MSC Nastran a Optistruct) nelze prohlásit za nejlepší, protože má každý řadu výhod i nevýhod. Další studie [33], [34], [36], [37] a [38] se zabývají optimalizací topologie konkrétního dílu v jednom SW s jedinou podmínkou. Touto podmínkou je úspora hmotnosti při zachování mechanických vlastností, resp. koeficientu bezpečnosti. Vzorky se poté sice vytiskly, ale případné porovnání s jinými SW nebo metodami se již nekonalo. Autoři studie [35] se zabývají nejen optimalizací topologie, ale i zvolením vhodného materiálu. Bohužel se všechna porovnání konala pouze v teoretické rovině pomocí SW nikoli skutečných zkoušek.

Všechny nalezené studie se zabývají optimalizací dílů s různým průmyslovým využitím. Všechny studie provádějí optimalizaci topologie vybraných dílů v nějakém SW, ale žádná studie se nezabývá důvěryhodností a porovnáním těchto SW. Při optimalizaci dílu je schopen SW sám vypočítat např. posunutí při zatížení, maximální napětí atd. Nabízí se tedy pro provedení optimalizace díl nechat vyrobit a provést mechanické zkoušky (zkouška tahem, tlakem, ohybem atd.) pro ověření, zda se dá optimalizovaný díl výdrží definované zatížení či nikoliv. Tento problém byl zkoumán v rámci praktické části diplomové práce.

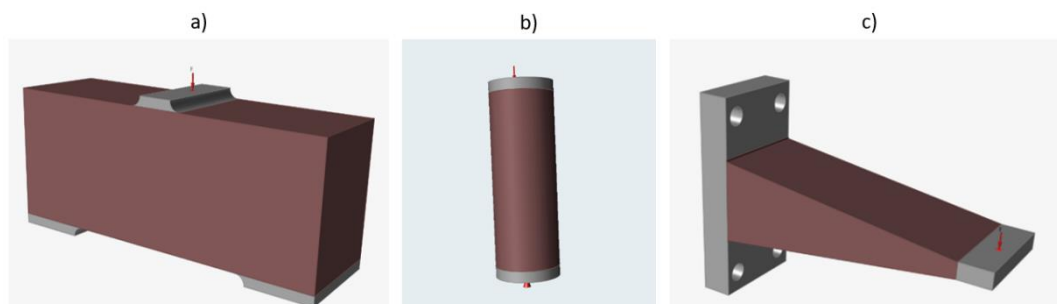
4 Návrh metodiky testování SW pro topologickou optimalizaci a provedení experimentu

Cílem praktické části bylo porovnat a ověřit SW pro topologickou optimalizaci aditivně vyráběných dílů. Porovnávanými SW byly Creo 6, Creo 7, Inspire 2019, Inspire 2020, Inspire 2021 a NX, které byly k dispozici v rámci studentských licencí během studia. Pro zkoušení daných SW byla vybrána tělesa znázorněna na obr. č. 54. Jedná se o tělesa napodobující vetknutý nosník, zkoušku tříbodým ohybem a zkoušku tlakem. Tato tělesa byla zvolena z důvodu své jednoduchosti a nízké náročnosti provedení reálných zkoušek. Nejprve byla provedena optimalizace topologie vzorků, kde u všech vzorků proběhne analýza posunutí a maximálního napětí při stanoveném zatížení. Následně proběhl výběr vzorků, jejich tisk a podrobení mechanickým zkouškám. Samotný výběr jednotlivých vzorků určených k tisku byl proveden v závislosti na časové a finanční náročnosti.



Obrázek 54: Optimalizované díly. a) těleso pro tříbodý ohyb, b) těleso pro zkoušku tlakem, c) těleso pro zkoušku vetknutého nosníku

Při procesu topologické optimalizace byly v každém SW nastaveny stejné parametry a okrajové podmínky optimalizace. Hned na začátku bylo potřeba definovat design a non-design space, místa ukotvení/podpor a umístění, velikost a směr zatěžující síly, jak lze vidět na obr. č. 55.



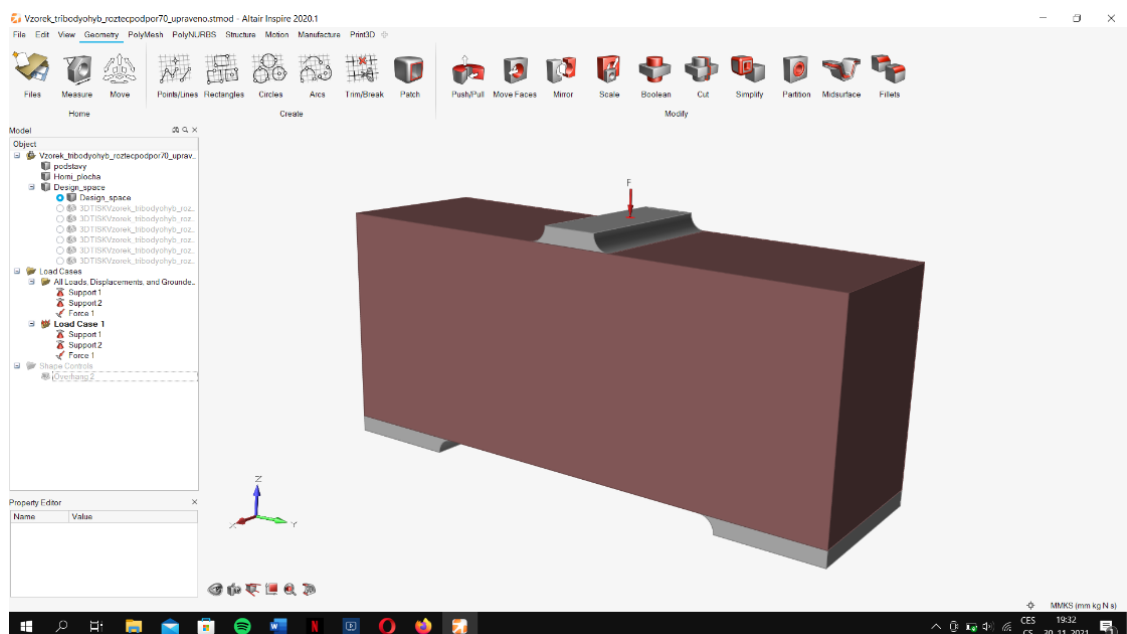
Obrázek 55: Nastavení design a non-design space, a) těleso pro tříbodý ohyb, b) těleso pro zkoušku tlakem,

Hlavní podmínkou pro výpočet optimalizace byla maximalizace tuhosti na základě cílové hmotnosti, která byla zredukována na 15 %, 30 % a 50 % původního objemu. Nejmenší velikost prvku, tzv. minimal geometry/member size, byla určena 4 mm (a to z důvodů následné možnosti vzorek co nejkvalitněji vytisknout). Materiálem byl ve všech případech zvolen Maraging ocel 1.2709 (CL50WS).

Po dokončení výpočtu optimalizace došlo k simulaci zatížení optimalizovaného dílu předem stanovenou silou, která vyhodnotila posunutí a napětí v dílu.

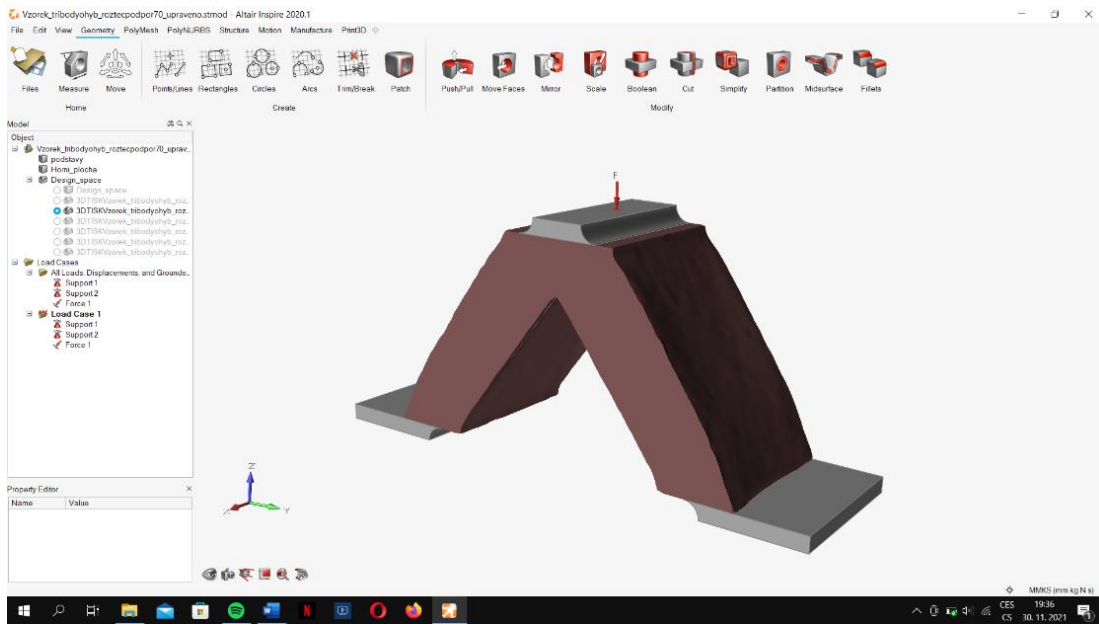
4.1 Ukázka postupu topologické optimalizace

Ukázka postupu optimalizace topologie je znázorněna v programu Altair Inspire. Sejný postup je poté aplikován pro všechny vzorky ve všech příslušných SW. Jako první bylo potřeba naimportovat STL model součásti, se kterým se dále pracovalo. Po naimportování modelu bylo třeba provést několik operací. Nejprve bylo nutné si nadefinovat materiál, který byl v tomto případě maraging ocel CL50WS. Dále bylo třeba součást rozdělit pomocí funkce „cut“ na design a non-design space. Znázornění design a non-design space je na obr. č. 56 (design-space je znázorněnou vínovou barvou, non-design space je šedý). Byli nadefinovány podpory, které byly v tomto případě na dvou spodních šedých plochách. Zatěžující síla působí kolmo shora dolů a její velikost je 5000 N.



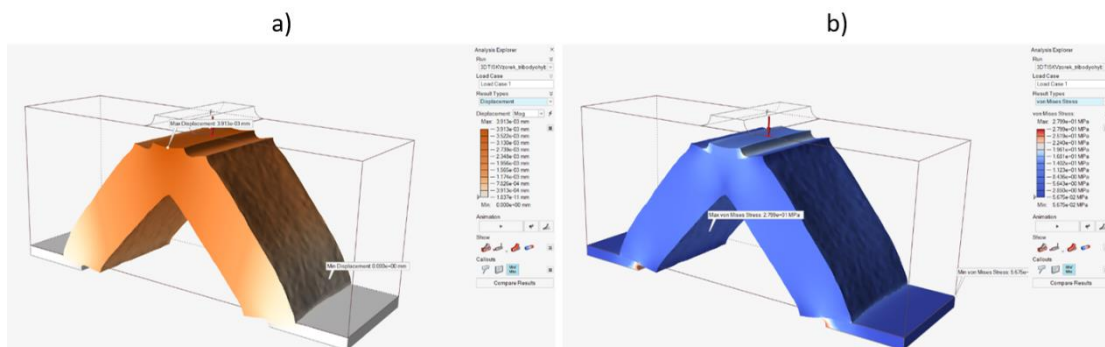
Obrázek 56: Definice design-space, ukotvení a zatížení

Po nadefinování prostorů, podpor a síly šlo přejít k optimalizaci. Pro její výpočet bylo třeba nejprve zvolit určitý typ, kterým byl v tomto případě topologická optimalizace (dále byly na výběr optimalizace topografická, strukturální, lattice a další). Následně bylo třeba zvolit cíl optimalizace, který byl v tomto případě maximalizace tuhosti pro daný objem design-space prostoru, který byl zvolen na 30 %. Minimální velikost prvku byla nastavena 4 mm došlo ke spuštění optimalizace. Optimalizovaný díl je vidět na obr. č. 57.



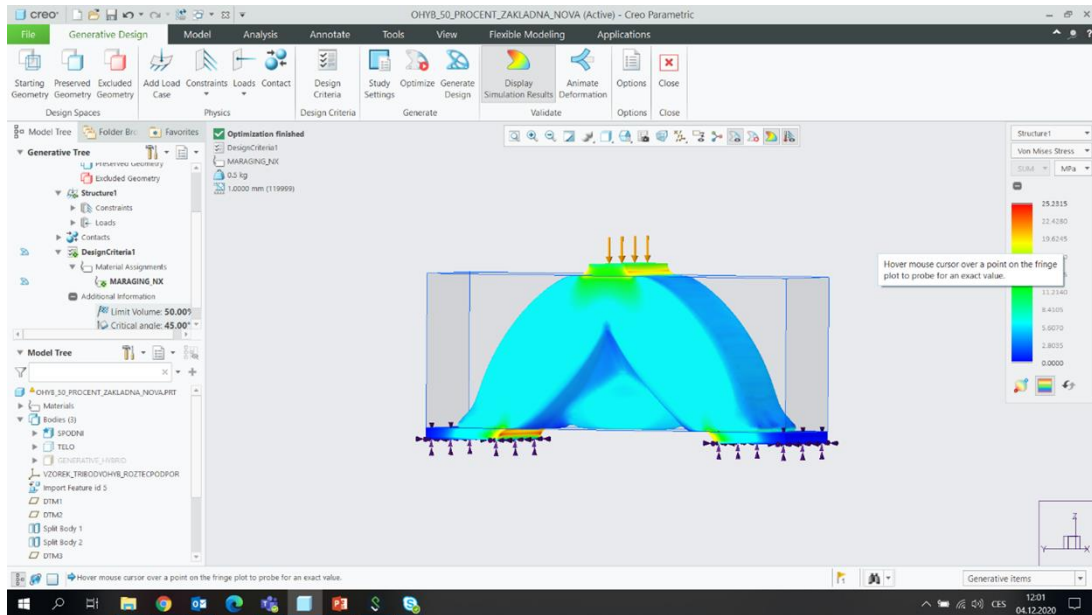
Obrázek 57: Optimalizovaný díl

Po dokončení výpočtu se zobrazil optimalizovaný díl (viz obr. č. 57), se kterým se dále pracuje. Z výsledné geometrie lze určit, že největší napětí se nachází pod zatěžovanou plochou, a dále se rozkládá do obou podpor. Nejvíce materiálu bylo odebráno z horních rohů původního kvádru. Důvodem je fakt, že při takto nadefinovaném zatížení nepůsobí v rozích žádné napětí, a je tudíž možné materiál odebrat. Následující simulace výpočtu napětí a posunutí je vidět na obr. č. 58. Maximální posunutí je 0,0039 mm a maximální napětí v dílu je 28,32 MPa.

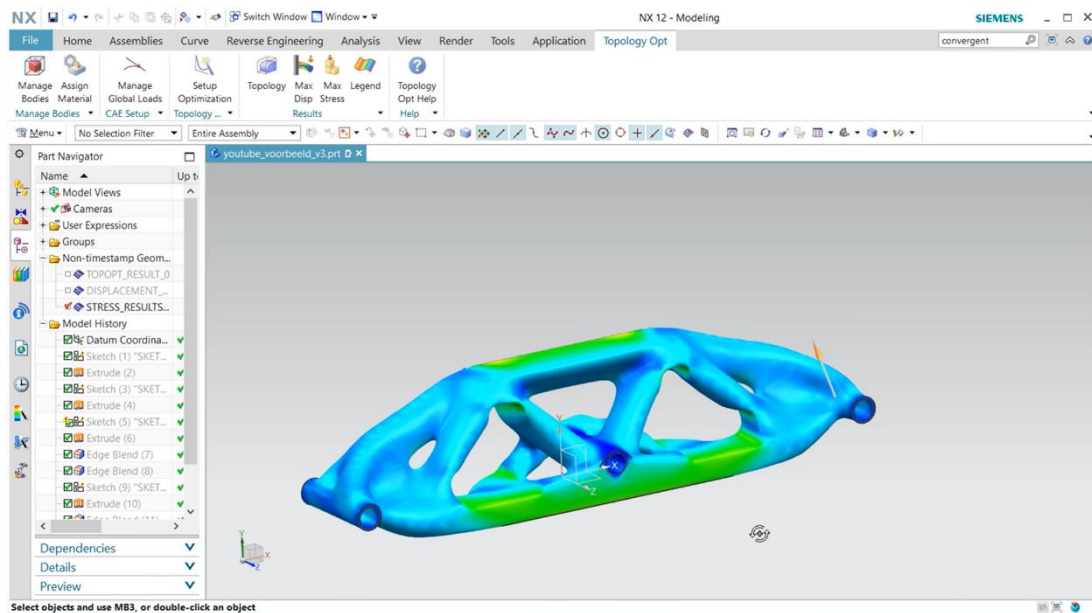


Obrázek 58: Ukázka výsledku simulace a) posunutí, b) napětí

Stejný postup optimalizace a vyhodnocení byl využit pro všechny díly ve všech porovnávaných SW. Všechny optimalizované díly nebyly nijak upravovány z důvodu co nejobjektivnějšího porovnání a neovlivnění výsledků. Na následujících obrázcích jsou znázorněny ukázky prostředí ze SW Creo (obr. č. 59) a Siemens NX (obr. č. 60).

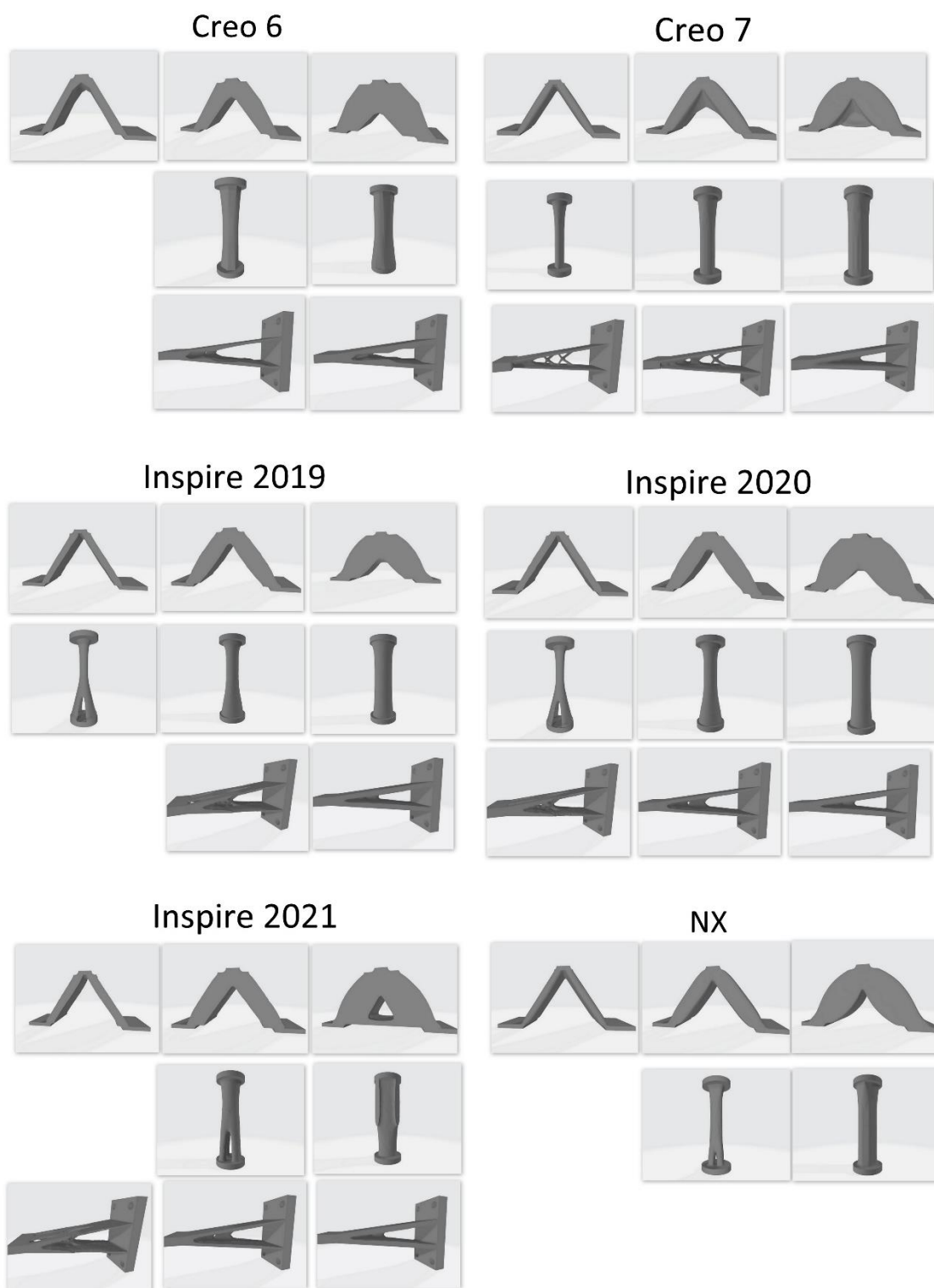


Obrázek 59: Ukázka prostředí SW Creo



Obrázek 60: Ukázka prostředí Siemens NX [49]

Na obr. č. 61 jsou znázorněny optimalizované modely.



Obrázek 61: Výsledné geometrie optimalizovaných dílů

Ze všech porovnávaných SW se všechny díly podrobily simulaci napětí a posunutí při definovaném zatížení 5000 N. Žádný z dílů nebyl nijak ručně upravován pro potřeby tisku nebo zlepšení mechanických vlastností. Na obr. č. 61 jsou znázorněny všechny tištěné díly.

Tabulka 1: Porovnání hodnot posunutí a max. napětí ve zkoumaných SW

Inspire 2019				Inspire 2020			
		Max. napětí [N/mm ²]	Posunutí [mm]			Max. napětí [N/mm ²]	Posunutí [mm]
Nosník	15%	377,70	0,8188	Nosník	15%	359,50	0,7341
	30%	189,50	0,4752		30%	189,00	0,4752
	50%	113,50	0,3525		50%	113,40	0,3525
3-bodový ohyb	15%	42,26	0,0067	3-bodový ohyb	15%	41,58	0,0067
	30%	28,32	0,0039		30%	28,32	0,0039
	50%	22,64	0,0031		50%	22,50	0,0031
Váleček	15%	119,20	0,0316	Váleček	15%	121,60	0,0311
	30%	50,83	0,0131		30%	50,68	0,0129
	50%	22,36	0,0072		50%	22,56	0,0070
Inspire 2021				Creo 6			
		Max. napětí [N/mm ²]	Posunutí [mm]			Max. napětí [N/mm ²]	Posunutí [mm]
Nosník	15%	336,50	0,6804	Nosník	15%	665,62	1,8000
	30%	172,50	0,4753		30%	250,29	0,6700
	50%	113,70	0,3525		50%	141,95	0,3900
3-bodový ohyb	15%	44,85	0,0074	3-bodový ohyb	15%	52,59	0,0099
	30%	28,10	0,0039		30%	35,77	0,0044
	50%	22,74	0,0031		50%	27,59	0,0031
Váleček	15%	139,30	0,0424	Váleček	15%		
	30%	55,27	0,0124		30%	47,55	0,0200
	50%	29,09	0,0071		50%	26,88	0,0093
Creo 7				NX			
		Max. napětí [N/mm ²]	Posunutí [mm]			Max. napětí [N/mm ²]	Posunutí [mm]
Nosník	15%	362,48	0,9151	Nosník	15%		
	30%	183,24	0,4739		30%		
	50%	109,32	0,3571		50%		
3-bodový ohyb	15%	44,79	0,0064	3-bodový ohyb	15%	42,42	0,0076
	30%	32,37	0,0039		30%	28,57	0,0040
	50%	25,25	0,0030		50%	22,56	0,0031
Váleček	15%	80,61	0,0224	Váleček	15%		
	30%	41,20	0,0111		30%	41,68	0,0189
	50%	24,23	0,0061		50%	19,52	0,0086

V tabulce č. 1 jsou shrnuty výsledky posunutí a maximálního napětí všech dostupných optimalizovaných dílů. V případě, že buňky neobsahují hodnoty, tak došlo k tomu, že při daných podmínkách daný SW nedokázal zoptimalizovat daný díl a vytvořit požadovaný model.

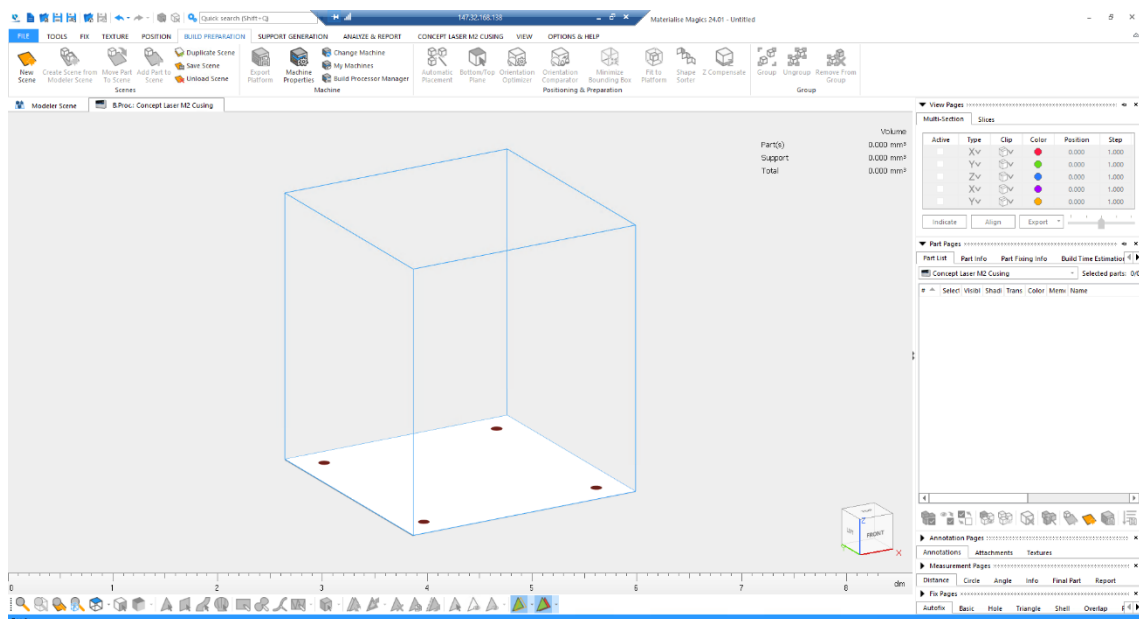
5 Výroba topologicky optimalizovaných těles

5.1 Příprava tisku

Před samotnou přípravou dat došlo nejprve k ekonomickému zhodnocení celého projektu s ohledem na cenu tisku, což zahrnovalo v první řadě cenu prášku a provozu stroje (a jeho vybavení). Po uváženém rozhodnutí se došlo k závěru, že se nebudou tisknout vetknuté nosníky, jelikož by se celý projekt jak peněžítě, tak i časově několikanásobně prodražil. K tisku a reálným zkouškám půjdou dále jen vzorky na tříbodový ohyb a válečky na zkoušky tlakem.

5.2 Příprava staveb

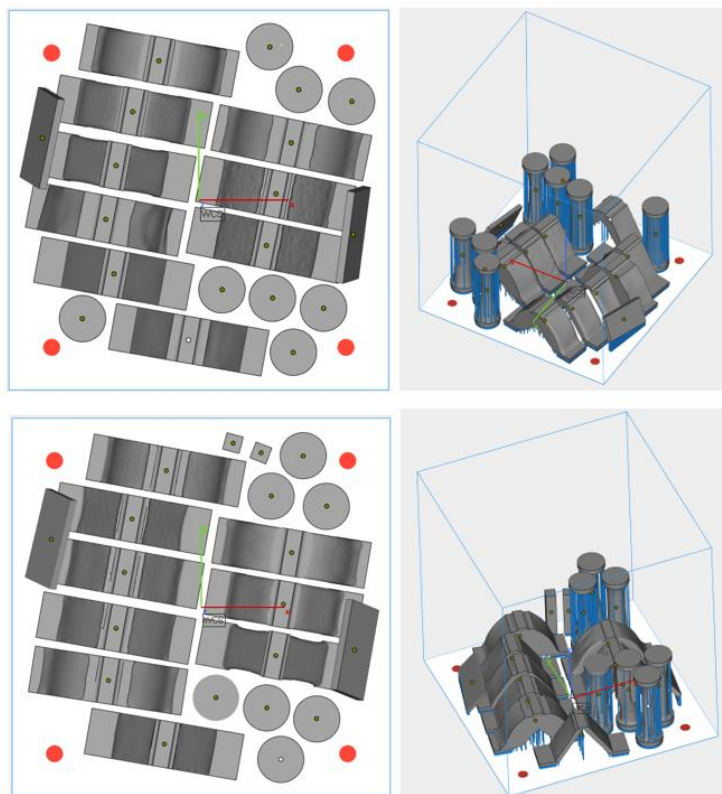
Stavby pro tisk byly připravovány v programu Materialise Magics v24.01. Po spuštění programu bylo nejprve nutné vybrat stroj (tiskárnu), na kterém bude tisk probíhat, v našem případě tedy tiskárnu Concept Laser M2 Cusing. Po potvrzení se objevil pracovní prostředí tiskárny (viz obr. č. 62), ve kterém se dále pracovalo (250x250x280mm).



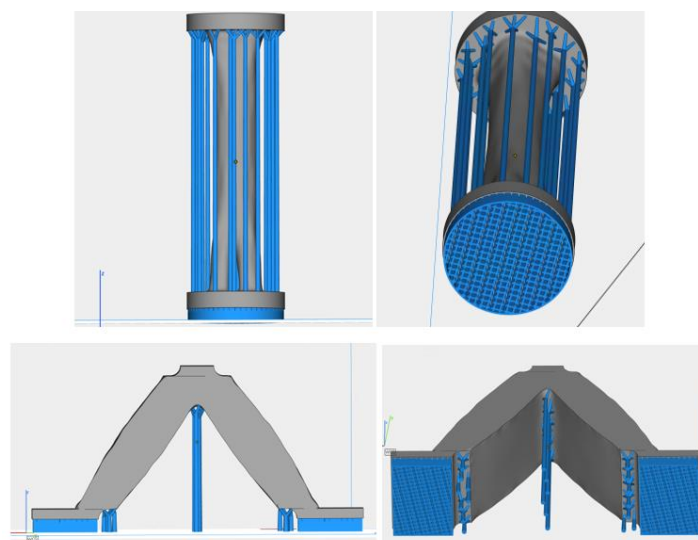
Obrázek 62: Stavební paleta v SW Magics

Dalším krokem bylo nahrání modelů, které chceme tisknout, jejich napolohování na pracovní paletě a vytvoření podpor. V našem případě se připravovaly dvě palety o celkovém množství třicet tři vzorků. Na obr. č. 63 lze vidět napolohování všech modelů na obou paletách i s vytvořenými podporami. Polohování a tvorba podpor proběhly dle technologických zásad pro metodu DMLM.

Všechny modely byly zvednuty do výšky 4 mm od povrchu palety. Je to z důvodu následného snazšího odříznutí vzorků. Na všech modelech jsou použity podpory typu „Block“ a „Tree Support“. Na obr. č. 64 jsou vidět příklady vytvořených podpor.

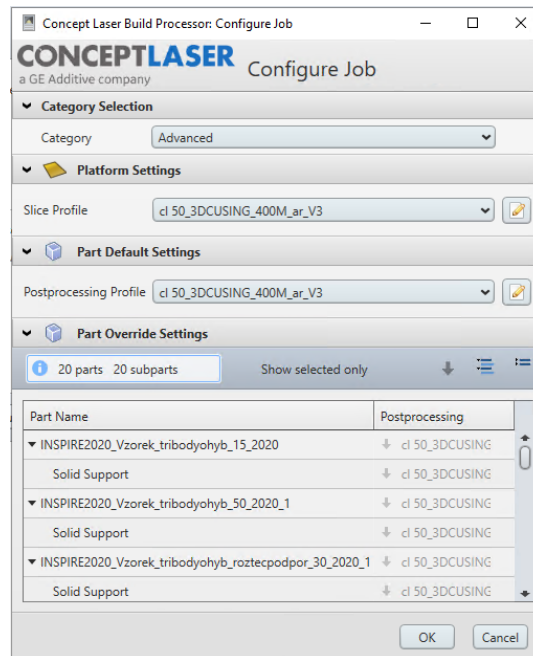


Obrázek 64: Ukázka podpor vytvořených v SW Magics



Obrázek 63: Příprava palet v SW Magics

Po kontrole obou staveb došlo k vytvoření CL dat, která se nahrála přímo do tiskárny. Před samotným vygenerováním dat musel být zvolen tisknutý materiál, což byl v tomto případě materiál CL50WS (1.2709), viz obr. č. 65.



Obrázek 65: Volba materiálu

5.2.1 Příprava tiskárny

Bezpečnost práce

Bezpečnost práce je nedílnou součástí kovového 3D tisku. Jelikož se zde pracuje s kovovými prášky, které mají velikost částic jen několik desítek mikrometrů, je třeba dbát zvýšené opatrnosti a dodržovat určitá bezpečnostní pravidla. Částice prášku jsou zdraví škodlivé, mohou být karcinogenní, a do těla se nedostávají jen vdechnutím, ale díky své velikosti i póry v kůži. Každý, kdo s tiskárnou pracuje, by se měl držet zásad, které jsou pro práci s tiskárnou doporučovány. Mezi základní ochranné pomůcky patří:

- dýchací maska,
- ochranný oblek,
- rukavice,
- pevná uzavřená obuv,
- antistatický ESD náramek. [39]

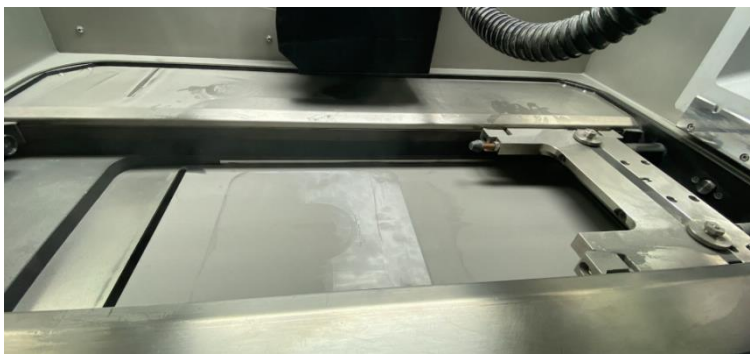


Obrázek 66: Ochranné prostředky

Příprava před tiskem

Před zahájením tisku je velice důležitá pečlivá příprava tiskárny. Bylo potřeba vyčistit pracovní komoru od zbylého prášku (za pomoci štětce, hadru, vysavače s vodním filtrem), připravit paletu (obrobit do roviny, otryskat, demagnetizovat), zkontrolovat nanášecí zařízení (jestli není guma nanášeče nijak poškozena), vyrovnat nanašeč vůči paletě (aby byly vůči sobě, pokud možno, co nejdokonalěji rovnoběžné), přesít prášek do zásobovacího válce (nezapomenout zhutňovat) a vyrovnat prášek (aby se netvořila na vrchu válce „boule“ z prášku).

Následovalo postupné zaplnění všech otvorů práškem a nanesení první referenční vrstvy, která je na obr. č. 67.



Obrázek 67: Stavební prostor tiskárny M2 Cusing Laser

Charakteristika prášku

Jedná se o vysoce pevný, martenzitický vytvrditelný materiál, který lze použít k výrobě nástrojových vložek s konformním chlazením v oblasti vstřikování a lisování plastů při technologii tlakového lití. [40]

Velikost použitého prášku je $45 \pm 10 \mu\text{m}$ a jeho vlastnosti jsou znázorněny v tabulkách č. 2 a 3.

Tabulka 2: Chemické složení 1.2709 [48]

Chemické složení oceli 1.2709 (CL50WS)									
C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Ti [%]	Co [%]
≤ 0,03	≤ 0,1	≤ 0,15	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,25	4,5-5,2	17-19	0,8-1,2	8,5-10

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti materiálu 1.2709 [40]

Parametry 1.2709 (CL50WS)	
Mez kluzu [N/mm ²]	1 550
Pevnost v tahu [N/mm ²]	1 650
Prodloužení [%]	2-3
Youngův modul [N/mm ²]	200 000
Tepelná vodivost [W/mK]	20
Tvrdost	až 52

Charakteristika tiskárny

Stroj Concept Laser M2 Cusing je primárně určen pro prototypovou výrobu z ocelí, titanových a hliníkových slitin v automobilovém, leteckém a lékařském odvětví. Má stavební komoru o velikosti palety 250 x 250 mm a je schopen tisknout do výšky až 300 mm (s odečtením tloušťky palety). Proces tisku probíhá v inertní atmosféře nejčastěji z argonu nebo dusíku (v tomto případě byl použit dusík). Další parametry jsou uvedeny v tabulce č. 4. [41]

Tabulka 4: Parametry tiskárny [41]

Stavební paleta [mm]	250 x 250 x 300
Tisknutelné materiály	- Ušlechtilá ocel (1.4404) - Ocel pro práci za tepla (1.2709, CL 91RW, CL 92PH) - Nikl (Inconel 718, Inconel 625) - Hliník (CL 30AL, CL 31AL) - Titan (C L41TI ELI, CL 42Ti, Rematitan CL) - Kobalt-chrom slitiny (Remanium star CL)
Rychlost stavby [cm ³ /h]	2 - 35
Tloušťka vrstvy [μm]	20 - 80
Laserový zdroj [W]	200
Průměr ohniska [μm]	50
Koncentrace O ₂ [%]	0,3
Vykreslovací rychlost [m/s]	7 (4,5 při změně ohniska)
Ochranná atmosféra	Dusík, argon
Rozměry stroje [mm]	2542 x 1818 x 1985
Váha stroje [kg]	2400



Obrázek 68: Tiskárna M2 Cusing Laser [41]

5.2.2 Nastavení tisku

V tabulce č. 5 je uvedeno základní nastavení skenování pro podpory, obrysy a výplň tištěných modelů. Jak lze vyčíst z tabulky, nejrychlejší skenovací rychlost je u podpor (2800 mm/s), zatímco při skenování obrysu modelu se pohybuje laser nejpomaleji (150 mm/s) a má zároveň i nejnižší výkon (90 W).

Tabulka 5: Parametry skenování

Part parameter			
	General	Lattice support	Surface area
Power [W]	90	280	295
Spot size [μm]	50	50	175
Speed [mm/s]	150	2800	950
Offset to original [mm]	0,1	0,1	0,135
Trace spacing [mm]			0,11

5.3 Průběh tisku

Tiskový proces probíhal v inertní atmosféře, která byla tvořena dusíkem, a obsah kyslíku musel být nižší než 0,3 %. Na tlakovou nádobu s dusíkem byla tiskárna připojena po celou dobu tisku kvůli nepřetržitému udržování inertní atmosféry v pracovní komoře. Při jakémkoli výpadku elektrického proudu nebo ztráty inertní atmosféry je tisk okamžitě automaticky přerušen. V případě přerušení se tiskárna zastaví, a je možné jí znovu spustit, aby pokračovala v tisku. Není tedy třeba celý tisk pouštět „od nuly“. Technologie tisku (metodou DMLM) je popsána v teoretické části této práce.

5.4 Postprocessing

Součástí každého tiskového procesu je postprocessing, který obsahuje hned několik činností. V první řadě bylo nutné vyndat paletu z tiskárny, což obnáší, pokud možno co nejdokonalejší odstranění prášku z pracovní komory do přeřadu (prášek se recykluje, je tedy žádoucí, aby se ho zachovalo co nejvíce). Následovalo důkladné omytí a osušení palety, odříznutí dílů z palety a obrobení.

5.4.1 Vyndání palety z tiskárny

Po ukončení tisku byla paleta s vytištěnými díly zcela ponořena v prášku (viz obr. 69.). Bylo potřeba s paletou vyjet nahoru a prášek pomocí štětce nahrnout do přepadové komory, která je vidět na obr. č. 69 vpravo.



Obrázek 69: Ukončení tisku a odstraňování prášku

Celý tento proces probíhá při uzavřené tiskárně skrze GloveBox, tudíž ochranný oblek a dýchací maska nejsou prozatím nutné. Po tom, co je co největší množství prášku nahrnuto do přepadu, se tiskárna otevře a dojde k důkladnějšímu očištění míst, kam se nebylo možné předtím dostat. Zde už je potřeba použití ochranných prostředků, které jsou zmíněny v sekci „Bezpečnost práce“. Dojde k vysátí celé pracovní komory a vysáta je také paleta. Mezi podporami je stále velké množství prášku a za pomoci vodního vysavače je třeba pokusit se ho co nejvíce odstranit.

Po vyndání se paleta odnesla na mycí stůl, kde byla za pomoci speciálního vodního roztoku omyta (obr. č. 70). Následuje osušení palety a tepelné zpracování.

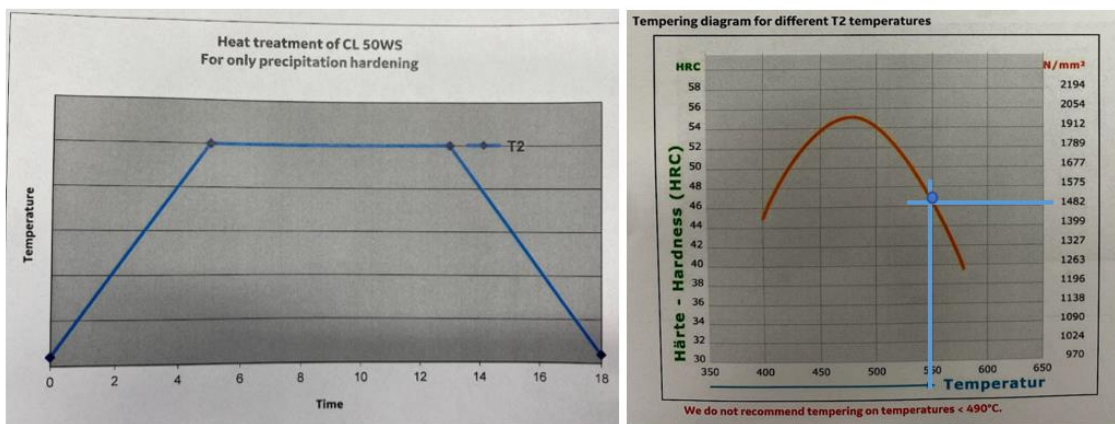


Obrázek 70: Omytí vzorků na paletě

5.4.2 Tepelné zpracování

Při aditivní výrobě kovových dílů dochází k vytváření jednotlivých vrstev natavováním prášku pomocí laseru. V celém dílu se proto tvoří velká pnutí způsobená vnášeným teplem, která by mohla způsobit zkroucení dílů, odtržení dílů od palety apod. Je nutné tedy ještě před odříznutím vzorků od palety provést tepelné zpracování na snížení vnitřního pnutí.

Tepelné zpracování obou palet proběhlo v elektrické peci. Postupný ohřev o 100 °C za hodinu až na teplotu 550 °C. Výdrž na této teplotě po dobu 6 hodin a ochlazení v peci na pokojovou teplotu (viz obr. č. 71).



Obrázek 71: Tepelné zpracování

Toto tepelné zpracování proběhlo za účelem snížení vnitřního pnutí a dosažení houževnaté struktury na úkor nižší tvrdosti, jak lze vyčíst z grafu na obr. č. 71. Na obr. č. 72 jsou vidět vzorky po tepelném zpracování na pracovní paletě.



Obrázek 72: Vzorky po tepelném zpracování

5.4.3 Apretace, odstranění podpor a obrobení

Odstranění podpor a příprava vzorků ke zkouškám proběhly v halách Fakulty strojní ČVUT. Podpory byly odstraňovány mechanicky za pomoci kleští, kladiv, klínků, pilníků a brusky. Na obr. č. 74 jsou vidět součásti s podpory a na obr. č. 73 díly již bez podpor a omyté.



Obrázek 73: Podpory



Obrázek 74: Díly na mycím stole

5.5 Testování topologicky optimalizovaných těles

Zkoušky probíhaly na Fakultě strojní ČVUT v Praze na trhacím stroji LabTest 5.100SP1. s jmenovitým zatížením 100 kN a stroji Instron 3000kN SAPEC na VŠCHT.

Vzorky byly umístěny mezi čelisti a postupně zatěžovány. Zaznamenávány byli posunutí a zatěžující síla. V případě válečků (tedy zkoušky tlakem) byly použity rovné čelisti bez mazání. V případě tříbodového ohybu byly použity speciální čelisti se třemi válci, při čemž se o dva válce vzorek zapřel a třetí válec tlačil shora zatěžující silou (jak lze vidět na obr. č. 78). Rychlost posuvu čelistí byla při zkoušce tříbodovým ohybem 2 mm/s, při zkoušce tlakem 5 mm/s.

Vyhodnocovalo se posunutí vzorků při zatížení 5 kN, což je zatížení, pro které jsou všechny vzorky topologicky optimalizovány. Dále se zkoumala maximální síla pro deformaci vzorků. Na obr. č. 75 je vidět příprava vzorků před nanesením barevného rastru.



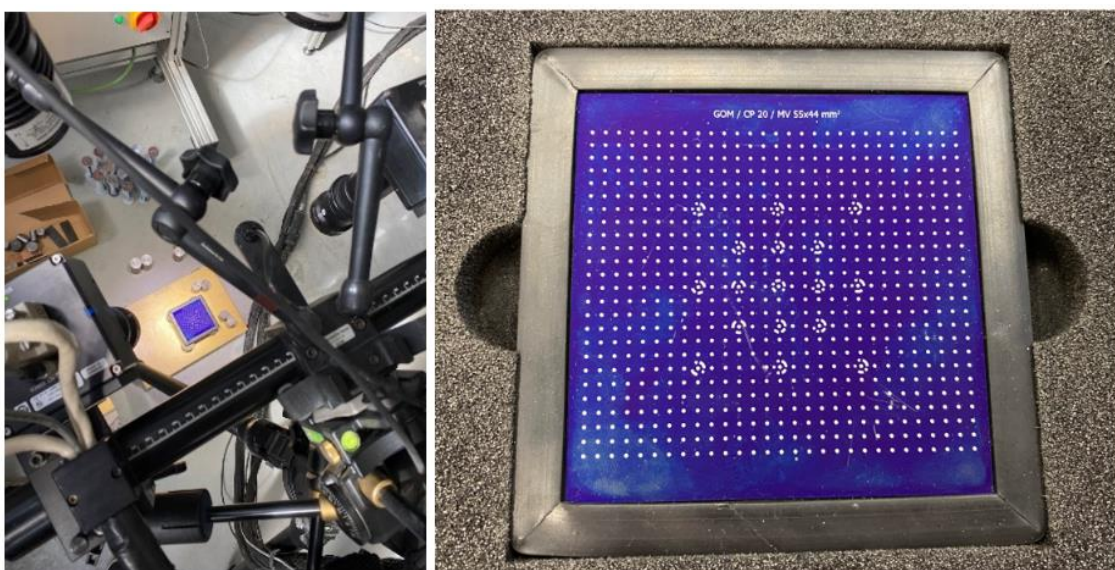
Obrázek 75: Příprava vzorků před zkouškami

Pro zpřesnění měření byl použit trhací stroj a zároveň zařízení ARAMIS. Toto zařízení poskytuje možnost sledování přesných 3D souřadnic a 3D posunutí. Dále na tomto zařízení lze sledovat rychlost, zrychlení a deformace pro dynamicky nebo staticky namáhané vzorky a díly. Jedná se o bezkontaktní měřicí systém, který je založený na principu digitální korelace obrazů. Pomocí vysokorychlostních kamer jsou pořizovány snímky, které jsou následně vyhodnocovány pomocí softwaru. Vyhodnocení a samotné snímání spočívá v rozlišování stupňů šedé nanesené na vzorku (v tomto případě se jedná o bílé pozadí a černou mapu, jak lze vidět na obr. č. 76). Je potřeba na zkoumaný vzorek nanést tzv. barevnou mapu, aby mohl software rozlišit a zaznamenat jednotlivé body. Před použitím bylo třeba celý snímací kamerový systém kalibrovat pomocí speciální kalibrovací destičky (obr. č. 77).

Vzorky byly umístěny do trhacího stroje a na ně byly namířeny kamery zařízení ARAMIS, které celý proces zatěžování až do síly 5 kN zaznamenávaly. Tento záznam byl následně v SW vyhodnocen a byly zjištěny hodnoty posunutí.



Obrázek 76: Nanesení rastru černé a bílé barvy



Obrázek 77: Kalibrace zařízení ARAMIS



Obrázek 78: umístění vzorků do stroje pro snímání kamer

Na závěr byly všechny zbylé vzorky externě na VŠCHT testovány na maximální zatížení, které je potřeba pro jejich deformaci.

6 Shrnutí výsledků

6.1 Hmotnost

Jako první došlo ke zvážení všech vytištěných vzorků. Hmotnosti vzorků lze vidět v tabulce č.6. Z tabulky vyplývá, že všechny vytištěné vzorky mají podobnou hmotnost lišící se řádově o jednotky procent. Mírné hmotnostní rozdíly mohou být způsobeny například zbylým práškem uvnitř některých dílů, nebo mohlo dojít k odlomení kusu dílu při apretaci podpor při postprocessingu. Následně byly hodnoty hmotnosti použity pro určení poměru maximálního zatížení ku hmotnosti.

Tabulka 6: Hmotnost všech vytištěných vzorků

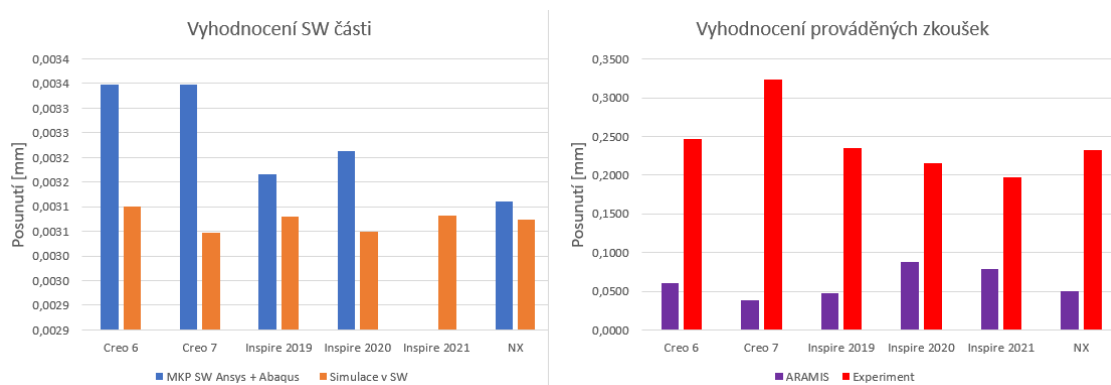
	Tříbodový ohyb			Tlak		
	Hmotnost [g]			Hmotnost [g]		
	15%	30%	50%	15%	30%	50%
Creo 6	165	331	527	x	200	315
Creo 7	158	335	526	142	211	297
Inspire 2019	163	322	542	119	203	279
Inspire 2020	152	321	534	115	198	275
Inspire 2021	154	319	519	x	191	364
NX	149	310	512	x	145	243

6.2 Tříbodový ohyb

Tabulka č. 7 a graf na obr. č. 79 ukazují souhrn výsledků posunutí při zatížení 5000 N pro díly s 50 % původního objemu pro zkoušku tříbodovým ohybem. Jsou zde porovnány hodnoty získané z MKP SW, hodnoty ze simulací příslušných SW pro topologickou optimalizaci, hodnoty ze zařízení ARAMIS a hodnoty odečtené z trhacího stroje (v tabulce a na obr. č. 79 značeno jako „experiment“). Z výsledků vyplývá, že rozdíl mezi naměřenými hodnotami na trhacím stroji a mezi hodnotami ze simulace se pohybuje v oblasti rozdílu dvou řádů. Rozdíl mezi hodnotami ze SW a zařízením ARAMIS se liší o jeden řád. Hodnoty získané výpočetním SW na metodu konečných prvků se od hodnot ze SW takřka neliší. Nejvyšší hodnotu posunutí při experimentu vykazuje vzorek ze SW Creo 7. Hodnota posunutí je zde 0,3239 mm. Naopak nejnižší posunutí je u vzorku ze SW Inspire 2021, a to 0,1972 mm. U zařízení ARAMIS dosáhl nejvyšší hodnoty posunutí vzorek ze SW Inspire 2020, konkrétně 0,0880 mm. Nejnižší hodnoty posunutí 0,0380 mm dosáhl vzorek ze SW Creo 7.

Tabulka 7: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu

Tříbodý ohyb				
50%	Posunutí [mm]			
	MKP SW Ansys + Abaqus	Simulace v SW	ARAMIS	Experiment
Creo 6	0,0033	0,0031	0,0610	0,2468
Creo 7	0,0033	0,0030	0,0380	0,3239
Inspire 2019	0,0032	0,0031	0,0480	0,2351
Inspire 2020	0,0032	0,0031	0,0880	0,2150
Inspire 2021		0,0031	0,0790	0,1972
NX	0,0031	0,0031	0,0500	0,2322

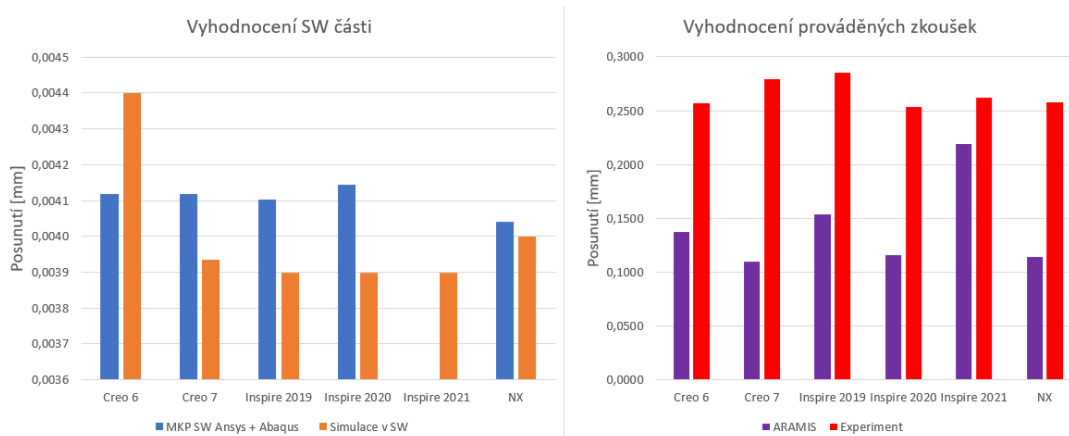


Obrázek 79: Graf posunutí pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu

Vyhodnocení posunutí při zatížení 5000 N tělesa pro tříbodový ohyb s 30 % původního objemu se věnuje tabulka č. 8 a obr. č. 80. Z tabulky je patrný rozdíl mezi hodnotami ze SW na topologickou optimalizaci a SW na metodu konečných prvků v porovnání s hodnotami získanými zařízením ARAMIS a hodnotami z trhacího přístroje. Tento rozdíl se pohybuje v oblasti dvou řádů u hodnot z trhacího zařízení a jednoho řádu u zařízení ARAMIS. Nejvyšší hodnoty posunutí je dosaženo v experimentu u dílu ze SW Inspire 2019, a to 0,2849 mm. Naopak nejnižší hodnotu posunutí 0,2535 mm ukazuje SW Inspire 2020. U zařízení ARAMIS dosáhl nejvyšší hodnoty posunutí vzorek ze SW Inspire 2021, konkrétně 0,2190 mm. Nejnižší hodnoty posunutí 0,1100 mm dosáhl vzorek ze SW Creo 7.

Tabulka 8: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu

Tříbodý ohyb				
30%	Posunutí [mm]			
	MKP SW Ansys + Abaqus	Simulace v SW	ARAMIS	Experiment
Creo 6	0,0041	0,0044	0,1370	0,2572
Creo 7	0,0041	0,0039	0,1100	0,2793
Inspire 2019	0,0041	0,0039	0,1540	0,2849
Inspire 2020	0,0041	0,0039	0,1160	0,2535
Inspire 2021		0,0039	0,2190	0,2624
NX	0,0040	0,0040	0,1140	0,2577

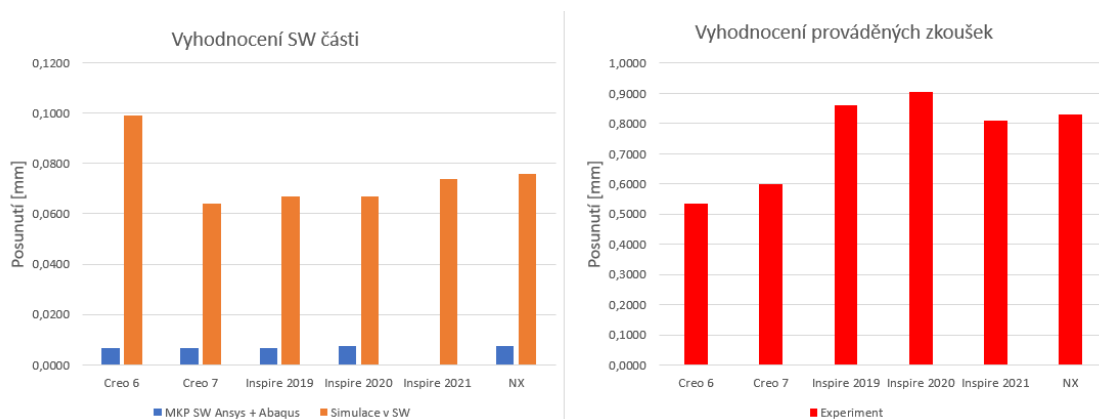


Obrázek 80: Graf posunutí pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu

Tabulka č. 9 a obr. č. 81 znázorňují výsledky posunutí při definovaném zatížení 5000 N pro tělesa tříbodového ohybu při zachování 15 % původního objemu. Rozdíly mezi hodnotami ze SW a hodnotami naměřenými během experimentu se liší opět o jeden až dva řády. Nejvyššího posunutí bylo v experimentu dosaženo u vzorku ze SW Inspire 2020, a to 0,9053 mm. Nejmenšího posunutí dosáhl vzorek ze SW Creo 6, konkrétně 0,5347 mm. Při tomto měření chybí hodnoty naměřené na zařízení ARAMIS, jelikož tento experiment probíhal v následující den a zařízení nebylo náležitě zkalibrováno. Proto hodnoty, ač byly získané, tak je nelze použít pro vyhodnocení.

Tabulka 9: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu

Tříbodový ohyb				
15%	Posunutí [mm]			
	MKP SW Ansys + Abaqus	Simulace v SW	ARAMIS	Experiment
Creo 6	0,0068	0,0990		0,5347
Creo 7	0,0068	0,0640		0,6000
Inspire 2019	0,0068	0,0670		0,8598
Inspire 2020	0,0076	0,0670		0,9053
Inspire 2021		0,0740		0,8109
NX	0,0075	0,0760		0,8294

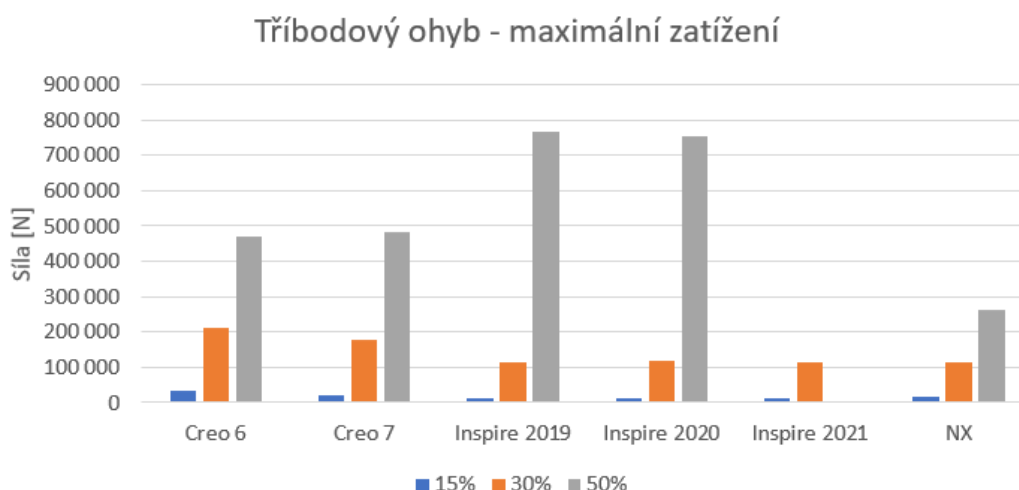


Obrázek 81: Graf posunutí pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu

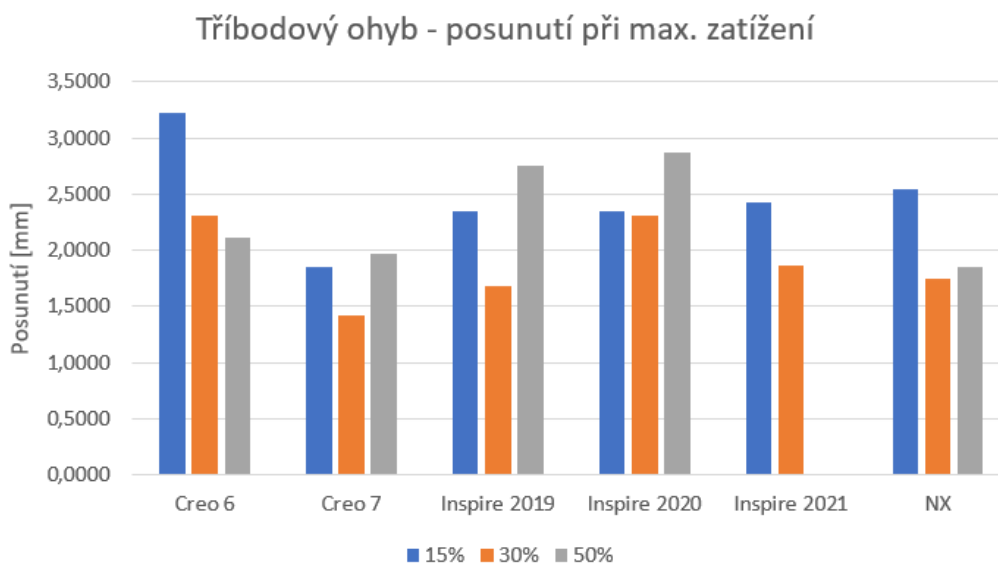
Jako poslední došlo k zatížení vzorků silou, která způsobila jejich deformaci. Vzorky byly upnuty a postupně stlačovány až do jejich selhání. Pozorovanými proměnnými byly maximální dosažené zatížení a posunutí při tomto zatížení (ještě před destrukcí). V tabulce č. 10 jsou sepsány hodnoty maximální dosažené síly a posunutí. Na obr. č. 82 a 83 jsou vidět grafy znázorňující porovnání všech hodnot maximálního zatížení a posunutí. Z výsledků vyplývá, že největší zatížení při zachování 50 % původního materiálu vydržel vzorek ze SW Inspire 2019, a to 765 552 N při posunutí 2,7495 mm. Naopak nejméně odolným vzorkem je vzorek ze SW NX, který odolal zatížení pouze 262 774 N při posunutí 1,8542 mm. Při objemu 30 % původního materiálu si vedl nejlépe vzorek z Creo 6, který vydržel zatížení 213 199 N při posunutí 2,3114 mm. Nejméně vzorek z Inspire 2021, který odolal síle 115 568 N při posunutí 1,8606 mm. Mezi nejmenšími vzorky, tj. pro 15 % původního objemu materiálu obstál nejlépe vzorek ze SW Creo 6 s maximálním zatížením 35 548 N a posunutí 3,2288 mm. Naopak nejmenší zatížení působilo deformaci vzorku z Inspire 2020, a to 11 662 N při posunutí 2,3487 mm.

Tabulka 10: Hodnoty maximálního zatížení a posunutí pro třibodový ohyb

Třibodový ohyb						
	Síla [N]			Posunutí [mm]		
	15%	30%	50%	15%	30%	50%
Creo 6	35 548	213 199	470 749	3,2288	2,3114	2,1082
Creo 7	21 143	178 953	483 585	1,8565	1,4161	1,9622
Inspire 2019	13 372	116 440	765 552	2,3446	1,6764	2,7495
Inspire 2020	11 662	116 743	752 418	2,3487	2,3051	2,8702
Inspire 2021	14 336	115 568	x	2,4289	1,8606	x
NX	16 771	115 636	262 774	2,5470	1,7463	1,8542



Obrázek 82: Znázornění maximálního zatížení pro třibodový ohyb



Obrázek 83: Znárodnění posunutí při maximálním zatížení pro tříbodový ohyb

Tabulka č. 11 ukazuje hodnoty poměrů maximálních dosažených zatížení ku hmotnosti jednotlivých dílů. Výsledky ukazují, kolik síly se vztahuje na jeden gram daného dílu. Největší zatížení vztažené na jeden gram je u vzorku ze SW Inspire 2019 s 50 % objemu původního tělesa, a to konkrétně 1 412 N/g. Nejnižší hodnotu u vzorků s 50 % původního objemu ukazuje SW NX o hodnotě 513 N/g. U vzorků s 30 % původního objemu vykazuje největší přenos zatížení na jeden gram vzorek ze SW Creo 6, konkrétně 644 N/g. Naopak nejmenší zatížení vykazují SW Inspire 2019 a Inspire 2021, a to shodně 362 N/g. U vzorků s 15 % původního objemu vykazuje největší přenos zatížení vzorek ze SW Creo 6, a to 215 N/g. Naopak nejméně vzorek ze SW Inspire 2020, který přenáší zatížení 77 N/g.

Tabulka 11: Poměr maximálního zatížení ku hmotnosti

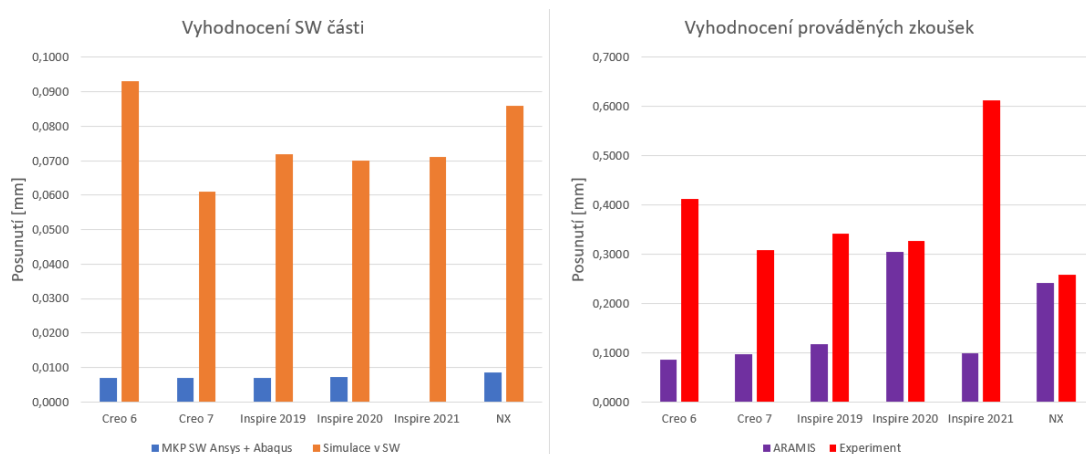
	Tříbodový ohyb		
	Max. zatížení / hmotnost [N/g]		
	15%	30%	50%
Creo 6	215	644	893
Creo 7	134	534	919
Inspire 2019	82	362	1 412
Inspire 2020	77	364	1 409
Inspire 2021	93	362	x
NX	113	373	513

6.3 Tlak

Shrnutí výsledků pro definované zatížení 5000 N u vzorků na zkoušku tlakem pro 50 % původního objemu je znázorněno v tabulce č. 12 a na obr. č. 84. Jsou zde shrnuty hodnoty z MKP SW, SW pro topologickou optimalizaci, ze zařízení ARAMIS a z reálných zkoušek (tyto hodnoty byly, jak je již zmíněno výše, odečteny přímo z trhacího stroje, na kterém se zkoušky prováděly). Řádově se hodnoty ze zařízení ARAMIS a hodnoty z trhacího stroje liší oproti hodnotám ze SW na topologickou optimalizaci a výpočetního SW na metodu konečných prvků o jeden až dva řády. V experimentu dosáhl největšího posunutí (0,6134 mm) vzorek ze SW Inspire 2021. Nejmenší hodnota byla odečtena u vzorku ze SW Creo 7, a to 0,3089 mm. U zařízení ARAMIS dosáhl nejvyšší hodnoty posunutí vzorek ze SW Inspire 2020, konkrétně 0,3040 mm. Nejnižší hodnoty posunutí 0,0850 mm dosáhl vzorek ze SW Creo 6.

Tabulka 12: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu

Tlak				
50%	Posunutí [mm]			
	MKP SW Ansys + Abaqus	Simulace v SW	ARAMIS	Experiment
Creo 6	0,0069	0,0930	0,0850	0,4118
Creo 7	0,0069	0,0610	0,0970	0,3089
Inspire 2019	0,0069	0,0720	0,1170	0,3416
Inspire 2020	0,0071	0,0700	0,3040	0,3274
Inspire 2021		0,0710	0,0980	0,6134
NX	0,0086	0,0860	0,2410	0,2591

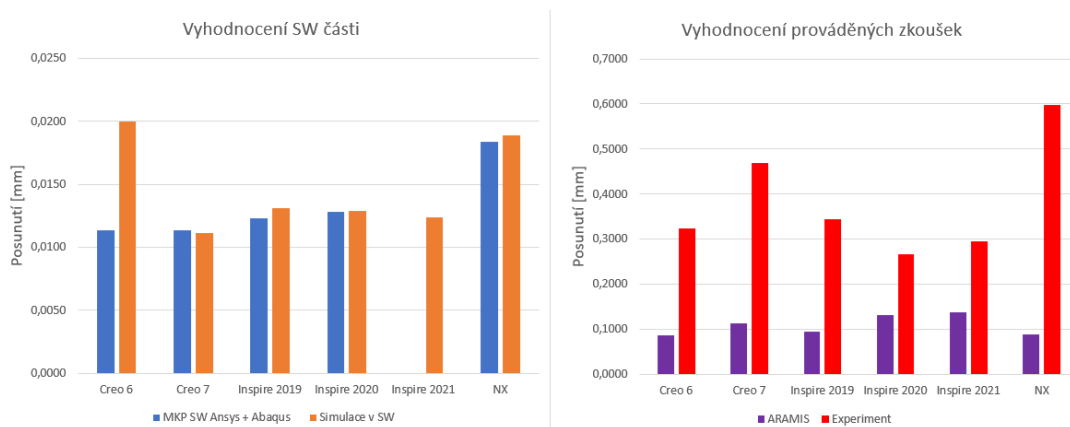


Obrázek 84: Graf posunutí pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu

Hodnoty posunutí pro vzorky na zkoušku tlakem, u kterých bylo zachováno 30 % původního objemu, jsou sepsány v tabulce č. 13 a graficky znázorněny na obr. č. 85. Rozdíly mezi naměřenými hodnotami na trhacím stroji se oproti hodnotám ze SW liší o jeden řád. Oproti tomu hodnoty získané zařízením ARAMIS se liší od hodnot ze SW maximálně o jeden řád, některé hodnoty jsou dokonce řádu stejného (například hodnota ze SW Creo 6 je 0,0200 mm a hodnota ze zařízení ARAMIS je 0,0860 mm). Při experimentu bylo z trhacího zařízení odečteno největší posunutí u vzorku ze SW NX 0,5969 mm. Naopak nejmenší posunutí bylo 0,2659 mm u vzorku ze SW Inspire 2020. U zařízení ARAMIS dosáhl nejvyšší hodnoty posunutí vzorek ze SW Inspire 2021, konkrétně 0,1370 mm. Nejnižší hodnoty posunutí 0,0860 mm dosáhl vzorek ze SW Creo 6.

Tabulka 13: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu

Tlak				
30%	Posunutí [mm]			
	MKP SW Ansys + Abaqus	Simulace v SW	ARAMIS	Experiment
Creo 6	0,0113	0,0200	0,0860	0,3242
Creo 7	0,0113	0,0111	0,1130	0,4686
Inspire 2019	0,0123	0,0131	0,0940	0,3438
Inspire 2020	0,0128	0,0129	0,1320	0,2659
Inspire 2021		0,0124	0,1370	0,2953
NX	0,0183	0,0189	0,0890	0,5969

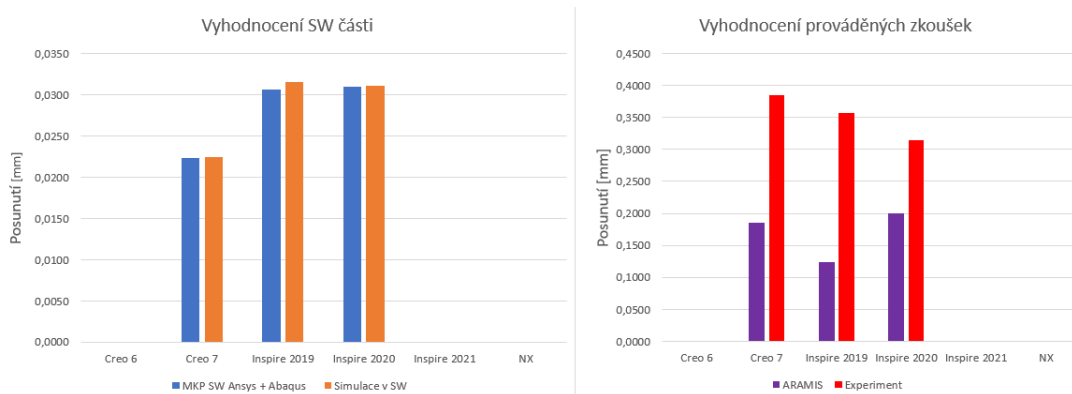


Obrázek 85: Graf posunutí pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu

U vzorků na zkoušku tlakem při zachování 15 % původního objemu se testovali pouze 3 vzorky. Bylo to z důvodu nedostatečného množství materiálu u vzorků optimalizovaných v SW Creo 6, Inspire 2021 a NX. Vzorky nebylo po optimalizaci možné vytisknout. Tabulka č. 14 a obr. č. 86 tedy ukazují porovnání hodnot posunutí u vzorků ze SW Creo 7, Inspire 2019 a Inspire 2020. Hodnoty získané při měření na trhacím stroji se od hodnot ze SW liší o jeden řád, jak lze vidět v tabulce č. 14. Experimentem byla získána největší hodnota posunu 0,3854 mm u vzorku ze SW Creo 7. Naopak nejmenší hodnota posunu 0,3139 mm byla naměřena u vzorku ze SW Inspire 2021. U zařízení ARAMIS dosáhl nejvyšší hodnoty posunutí vzorek ze SW Inspire 2020, konkrétně 0,2000 mm. Nejnižší hodnoty posunutí 0,1860 mm dosáhl vzorek ze SW Inspire 2019.

Tabulka 14: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu

15%	Tlak			
	Posunutí [mm]			
	MKP SW Ansys + Abaqus	Simulace v SW	ARAMIS	Experiment
Creo 6				
Creo 7	0,0223	0,0224	0,1860	0,3854
Inspire 2019	0,0307	0,0316	0,1240	0,3565
Inspire 2020	0,0310	0,0311	0,2000	0,3139
Inspire 2021				
NX				

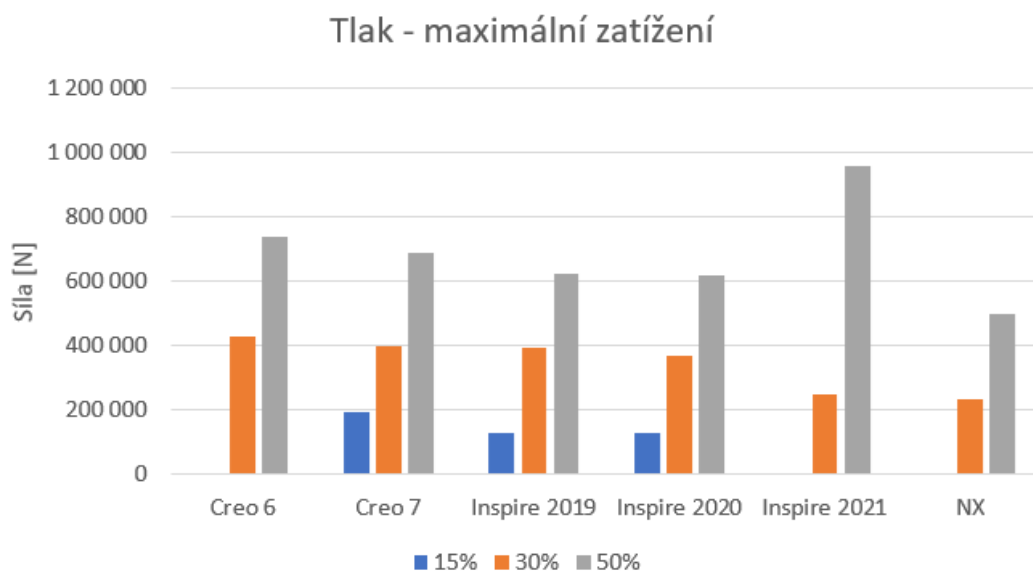


Obrázek 86: Graf posunutí pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu

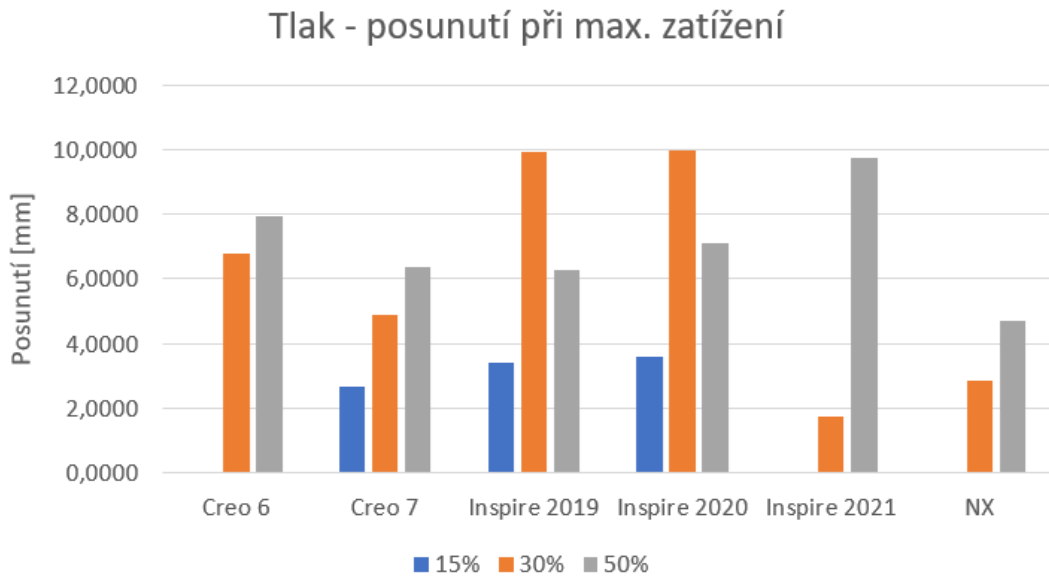
Stejně jako u tříbodového ohybu došlo jako poslední k otestování všech vtištěných vzorků na maximální sílu, které jsou schopni odolat. Souhrn výsledků včetně posunutí při maximální síle je vidět v tabulce. Při zachování 50 % původního objemu vydržel největší zatížení vzorek ze SW Creo 6 a to 740 209 N při posunutí 7,9566 mm. Při 30 % původního objemu si vedl nejlépe vzorek opět ze SW Creo 6 při maximální zatížení 426 635 N. Při tomto zatížení bylo posunutí 6,7691 mm. Pro 15 % původního objemu obstál nejlépe vzorek ze SW Creo 7 při zatížení 192 883 N a posunutí 2,6902 mm. Nejmenšímu zatížení odolal vzorek z Inspire 2020, který odolal síle 127 185 N při posunutí 3,6008 mm.

Tabulka 15: Hodnoty maximálního zatížení a posunutí pro zkoušku tlakem

	Tlak					
	Síla [N]			Posunutí [mm]		
	15%	30%	50%	15%	30%	50%
Creo 6	x	426 635	740 209	x	6,7691	7,9566
Creo 7	192 883	396 526	686 505	2,6902	4,8705	6,3627
Inspire 2019	127 816	392 628	623 168	3,3882	9,9187	6,2865
Inspire 2020	127 185	367 899	619 827	3,6008	9,9759	7,1185
Inspire 2021	x	248 246	959 508	x	1,7272	9,7599
NX	x	233 413	499 109	x	2,8671	4,7244



Obrázek 87: Znárodnění maximálního zatížení pro zkoušku tlakem



Obrázek 88: Znárodnění posunutí při maximálním zatížení pro třibodový ohyb

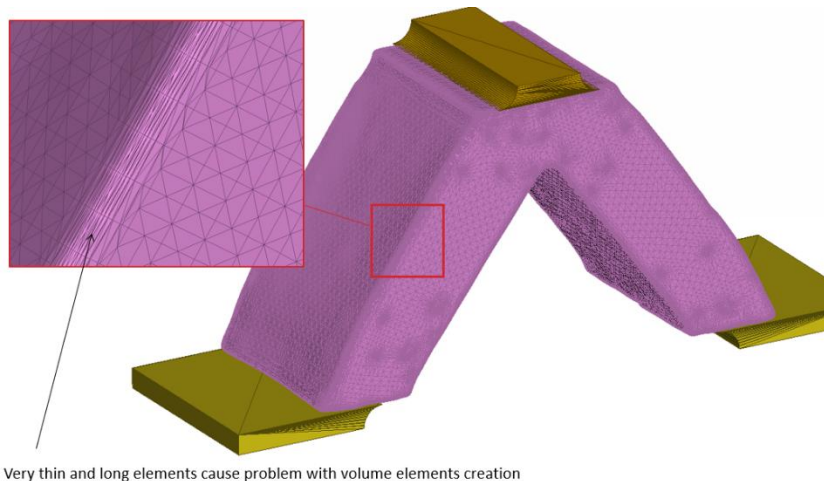
V tabulce č. 15 jsou znázorněny hodnoty poměrů maximálních dosažených zatížení ku hmotnosti jednotlivých dílů. Nejvyšší hodnoty vzorků s 50 % původního objemu dosáhl vzorek ze SW Inspire 2021, a to 2 636 N/g. Nejnižší hodnoty dosáhl vzorek ze SW NX 2 054 N/g. Nejvyšší hodnotu zatížení u vzorků s 30 % původního objemu přenesl vzorek ze SW Creo 6, konkrétně 2 133 N/g. Nejnižší hodnotu vzorek ze SW Inspire 2021, a to 1 300 N/g. Vzorek s 15 % původního objemu ze SW Creo 7 přenesl největší zatížení 1358 N/g, nejmenší naopak vzorek ze SW Inspire 2019, konkrétně 1 074 N/g.

Tabulka 16: Poměr maximálního zatížení ku hmotnosti

	Tlak		
	Max. zatížení / hmotnost [N/g]		
	15%	30%	50%
Creo 6	x	2 133	2 350
Creo 7	1 358	1 879	2 311
Inspire 2019	1 074	1 934	2 234
Inspire 2020	1 106	1 858	2 254
Inspire 2021	x	1 300	2 636
NX	x	1 610	2 054

6.4 Diskuze

Po provedení experimentu došlo ke shrnutí a vyhodnocení výsledků. Z výsledků vyplývá, že všechny zkoušené vzorky vydržely definované zatížení 5000 N. Rozdíly ve výsledných hodnotách mohou být způsobeny několika faktory. Například každý vzorek byl optimalizován v jiném SW s jiným řešičem metody konečných prvků, což vedlo k jiným výpočtům ideální struktury každého optimalizovaného dílu. Dále mohlo dojít k narušení struktury při odstraňování podpor (při práci mohlo dojít k vytvoření iniciační trhliny, která způsobila nižší maximální zatížení vzorku). Dalším faktorem může být rozdílné meshování (tj. vytváření trojúhelníkové sítě) při optimalizaci, kdy velmi tenké a dlouhé trojúhelníkové otvory způsobují problémy s vytvářením objemových prvků (viz obr. č. 89). V neposlední řadě může mít vliv na výsledky i samotná technologie 3D tisku, která má svá úskalí jako je například neznámá porozita dílů.



Obrázek 89: Ukázka tvorby meshe

Pro získání objektivnějších výsledků by bylo zapotřebí vytisknout celkem alespoň tři až pět kusů každého vzorku, aby bylo možné udělat statistické šetření. To nebylo z finančních a časových důvodů možné. Všechny reálné výsledky tedy vychází pouze z jednoho měření na trhačím stroji a snímání pomocí zařízení ARAMIS. Dále by bylo možné doporučit navrhnout pro optimalizaci větší zatížení než 5000 N. Při takto zvoleným zatížení je možné, že nebyla překročena mez plastické deformace a vzorek byl zatěžován pouze elasticky.

7 Závěr

Předmětem této diplomové práce byla snaha o porovnání a ověření vybraných SW pro topologickou optimalizaci aditivně vyráběných dílů.

Rešeršní část této diplomové práce se věnovala seznámení s problematikou aditivních technologií a topologické optimalizace. Byl popsán proces vzniku 3D tištěného dílu, tedy byly popsány kroky od vytvoření modelu, přes napolohování na stavební paletě, až po samotný tiskový proces a následný postprocessing. Bylo popsáno rozdělení dle normy ISO/ASTM 52900. Dle této normy byla popsána kategorie Laser Powder Bed Fusion (neboli spékání v práškovém loži pomocí laseru) a technologie Direct Metal Laser Melting (DMLM). Dále se rešeršní část věnovala problematice topologické optimalizace. Došlo k jejímu obecnému představení, popsání metod výpočtu metody konečných prvků, shrnutí výhod a nevýhod jejího použití.

Druhá část rešeršní části se věnovala kritické literární rešerši využití topologické optimalizace v průmyslu. Bylo nalezeno několik studií, které se zabývaly optimalizací topologie různých typů dílů a jejich ověřováním. Všechny studie se ovšem zabývaly pouze ověřováním na SW úrovni simulace, což znamená, že téměř žádná studie vytištěný díl reálně neotestovala na dané zatížení a neporovnávala reálná data s těmi softwarovými.

Začátek praktické části zahrnoval návrh experimentu na porovnání a ověření šesti SW na topologickou optimalizaci (Creo 6, Creo 7, Inspire 2019, Inspire 2020, Inspire 2021 a NX). Byla vybrána 3 zkušební tělesa, která byla optimalizována (jednalo se o tělesa imitace zkoušky tříbodým ohybem, zkoušky tlakem a vetknutého nosníku). Bylo definováno zatížení (tj. místo, směr a velikost zatěžující síly, která byla v případě této práce 5 000 N), místa uchycení dílů a zvolen materiál maraging ocel CL50WS (1.2709). Následovalo nadefinování cíle optimalizace, v tomto případě zachování co nejvyšší tuhosti při daném objemu materiálu původního tělesa (který byl 15 %, 30 % a 50 %). Po dokončení optimalizace došlo k simulaci zatížení a byly odečteny hodnoty posunutí a napětí při zatížení 5000 N. Před tiskem se optimalizované díly nijak neupravovaly, aby nedošlo k jakémukoli ovlivnění výsledků. Optimalizované díly byly vytištěny na tiskárně Concept Laser M2 Cusing. Po vytištění následovalo tepelné zpracování na snížení vnitřního pnutí, odříznutí vzorků ze stavební palety a odstranění podpor.

Následovalo testování vzorků, které probíhalo na stroji LabTest 5.100SP1 a pomocí speciálního snímacího zařízení ARAMIS. Snímáno bylo posunutí při zatížení již zmíněných 5000 N. Nakonec byly vzorky testovány na maximální zatížení na stroji Instron 3000kN SAPEC, které jsou schopny vydržet.

Každá vytvořená geometrie **vydržela** definované zatížení. Z výsledků zatížení optimalizovaných těles na 5000 N jsou zřetelné velké rozdíly v hodnotách posunutí. Hodnoty ze SW pro topologickou optimalizaci a SW po výpočet metody konečných prvků jsou oproti hodnotám ze zařízení ARAMIS **o jeden řád** a hodnotám odečtených přímo z trhacího stroje **o dva řády** odlišné. Tento fakt může být způsoben například špatným navržením experimentu, kdy je zatížení 5000 N velmi nízké. Doporučením by mohlo být zatížení několikanásobně zvýšit a experiment předimenzovat.

Při testování vzorků na maximální zatížení se došlo k závěru, že největší zatížení jsou schopny pojmout vzorky se zachováním 50 % původního objemu materiálu (u zkoušky tříbodovým ohybem snesl největší zatížení **765 552 N vzorek ze SW Inspire 2019** a u zkoušky tlakem snesl největší zatížení **959 508 N vzorek ze SW Inspire 2021**). A naopak nejmenší hodnoty zatížení snesou vzorky s 15 % původního objemu, kdy nejlépe obstál vzorek ze SW Inspire 2020 pro zkoušku tříbodovým ohybem se zatížením 11 662 N. U zkoušky tlakem vydržel nejmenší zatížení vzorek ze SW Inspire 2020, konkrétně 127 185 N.

Na závěr došlo k vyhodnocení maximálního zatížení vztaheného na 1 gram vzorku. Všechny vzorky byly před začátkem testování zváženy a poté došlo k vyhodnocení poměru maximální zatěžující síly ku jejich hmotnosti. V tomto ohledu si vedly nejlépe vzorky se zachováním 50 % původního objemu jak u zkoušky tlakem, tak zkoušky tříbodovým ohybem, kdy u tříbodového ohybu obstál nejlépe vzorek ze **SW Inspire 2019, který snesl zatížení 1 412 N/g**. U zkoušky tlakem snese největší zatížení vztahené na jeden gram hmotnosti vzorek ze **SW Inspire 2021, který snesl zatížení 2 636 N/g**. Naopak nejmenší vztahené zatížení ku hmotnosti snesou vzorky s 15 % původního objemu. Nejmenší hodnotou zatížení na jeden gram nalezneme u zkoušky tříbodovým ohybem u vzorku ze SW Inspire 2020, který má hodnotu 77 N/g. U zkoušky tlakem má nejmenší hodnotu 1 074 N/g vzorek ze SW Inspire 2019.

Veškeré cíle diplomové práce byly splněny.

Seznam použité literatury

- [1] What is additive manufacturing?. *General Electric* [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [2] SCHOTTE, Greg. A Brief History of Additive Manufacturing. In: *TRIMECH* [online]. 2019 [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://blog.trimech.com/a-brief-history-of-additive-manufacturing>
- [3] FRAIZER, William E. *Metal Additive Manufacturing: A Review* [online]. 2014, 12 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [4] Additive Manufacturing Materials. In: *ADDITIVE MANUFACTURING* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/am-materials>
- [5] What is Additive Manufacturing?. In: *EOS* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works>
- [6] GAYETTE, Mike. Top Ten Advantages of Additive Manufacturing. In: *Ptc* [online]. 2021 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/10-additive-manufacturing-advantages>
- [7] 12 Benefits of Additive Manufacturing and 5 Disadvantages. In: *UNLEASHED* [online]. 2021 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.unleashedsoftware.com/blog/12-benefits-of-additive-manufacturing-and-5-disadvantages#:~:text=%205%20disadvantages%20of%20additive%20manufacturing%20%201,types%20of%20materials%20that%20can%20be...%20More%20>
- [8] Types of Additive Manufacturing and Applications. In: *Duncan Parnell* [online]. 2019 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.duncan-parnell.com/blog/types-of-additive-manufacturing-and-applications#:~:text=%20Additive%20Manufacturing%20Applications%20%201%20Spor>

- ts%3A%20For,which%20engineers%20can%20produce%20through%20AM.%20More%20
- [9] How to 3D print? The Beginner's Guide to 3D Printing. In: *BCN3D* [online]. 2020 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/the-beginners-guide-to-3d-printing-6-steps/>
- [10] How to 3D Print: A Step-By-Step Guide of 3D Printing. In: *RAISE3D* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.raise3d.com/academy/how-to-3d-print-a-step-by-step-guide-of-3d-printing/>
- [11] ČSN EN ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing — General principles — Terminology. 2022.
- [12] LEARY, Martin. *Design for Additive Manufacturing*. Elsevier Inc., 2020. ISBN 978-0-12-816721-2.
- [13] CAVALLO, Christian. All About Powder Bed Fusion 3D Printing. In: *THOMAS* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/powder-bed-fusion-3d-printing/>
- [14] Direct Metal Laser Melting. In: *GE* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/direct-metal-laser-melting>
- [15] Sintering vs Melting: What's the Difference?. In: *MARLIN STEEL* [online]. 2020 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.marlinwire.com/blog/metal-forming-faqs-whats-the-difference-of-sintering-vs-melting>
- [16] DMLM vs. DMLS – What's the Difference?. In: *Stratasys* [online]. 2020 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/articles/dmlm-vs-dmls>
- [17] Topology Optimization. In: *Cenvergence consulting* [online]. 2020 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://convercon.com/topology-optimization/>

- [18] Introduction to Topology Optimization. In: *Engineering PRODUCT design* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>
- [19] VELLING, Andreas. Topology Optimization. In: *Fractory* [online]. 2020 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://fractory.com/topology-optimisation/>
- [20] SIMP Method for Topology Optimization. In: *DASSAULT SYSTEMeS* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm
- [21] DOLBOW, John E., ed. *Finite Elements in Analysis and Design* [online]. 2020 [cit. 2022-06-30]. 0168-874X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/journal/finite-elements-in-analysis-and-design>
- [22] HUANG, Xiaodong a Yi-Min XIE. A further review of ESO type methods for topology optimization. In: *SpringerLink* [online]. 2010 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-010-0487-9>
- [23] SUZUKI, Katsuyuki a Noboru KIKUCHI. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. ELSEVIER, 2008 [cit. 2022-06-30]. 0045-7825. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/journal/computer-methods-in-applied-mechanics-and-engineering>
- [24] J., Michelle. Topology optimization for 3D printing. In: *3Dnatives* [online]. 2020 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/topology-optimisation140820184/#!>
- [25] BERROCAL, Laura, Rosario FERNÁNDEZ a Sergio GONZÁLEZ. Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components. *SpringerLink* [online]. 2018, 13 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-018-0061-3>

-
- [26] YANG, R. J. a A I. CHAHANDE. *Automotive applications of topology optimization* [online]. 1994, 5 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01743977>
- [27] YUSUF, Bulent. Light Rider: World's First 3D Printed Motorcycle. In: *All3DP* [online]. [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/3d-printed-motorcycle/>
- [28] DENG, Xiaowei, Yingjun WANG, Jinhui YAN, Tao LIU a Shuting WANG. Topology optimization of total femur structure: application of parameterized level set method under geometric constraints. In: *Yingjun Wang* [online]. 2016 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.yingjun.group/214>
- [29] Topology Optimized Digital Fabrication in Construction Industry. In: *CHRONICLE* [online]. 2021 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.amchronicle.com/insights/topology-optimized-digital-fabrication-in-construction-industry/>
- [30] DYKE, S.J., G. MESCHKE a C. T. NG, ed. *Engineering Structures* [online]. [cit. 2022-07-01]. 0141-0296. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/journal/engineering-structures>
- [31] SAADLAOUI, Yassine, Jean-Louis MILAN, Jean-Marie ROSSI a Patrick CHABRAND. Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. *Science Direct* [online]. 2017, 9 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612517300353?casa_token=Mzfkjtj-hA_cAAAAA:3XLk5YgpGjp9Or0Q2qtPPIJNNIxkEJ4uB5bQtc0skITCTPofviYapPngx-l1zCtCtVF1REydLsl
- [32] CHOI, Wook-han, Jing-moon KIM a Gyung-Jin PARK. Comparison study of some commercial structural optimization software systems. *SpringerLink* [online]. 2016, 15 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-016-1429-y>
- [33] GEBISA, A. W. a H. G. LEMU. *A case study on topology optimized design for additive manufacturing* [online]. 2017, 12 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/276/1/012026/meta>
-

-
- [34] SATYA HANUSH, S. a M. MANJIAH. *Topology optimization of aerospace part to enhance the performance by additive manufacturing process* [online]. 2022, 6 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322006460>
- [35] JUNK, Stefan, Benjamin KLERCH, Lutz NASDALA a Ulrich HOCHBERG. *Topology optimization for additive manufacturing using a component of a humanoid robot* [online]. 2018, 6 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118304438>
- [36] MORENO NIETO, Daniel. *Design for Additive Manufacturing: Tool Review and a Case Study* [online]. 12 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1571/htm>
- [37] YILMAZ, F., M. SAHIN a E. GÜRSES. *Weight reduction of an unmanned aerial vehicle pylon fitting by topology optimization and additive manufacturing with electron beam melting* [online]. 2021, 6 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://journals.infinite-science.de/index.php/jamtech/article/view/553>
- [38] BELLALOUNA, Fahmi. *Case Study for an Operation-based Topology Optimization Using the Digital Twin Approach* [online]. 2021, 6 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712100144X>
- [39] *Concept Laser M2 Cusing metal laser melting system.*
- [40] NÁSTROJOVÉ A RYCHLOŘEZNÉ OCELI. In: *BÖHLER* [online]. [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: https://www.bohler.cz/app/uploads/sites/109/2019/08/katalog_bohler_vyroba.pdf
- [41] Concept Laser M2. In: *Misan s.r.o.* [online]. [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/concept-laser/katalog-detail/m2-concept-laser-m2/>
- [42] STL versus CAD file. In: <https://www.researchgate.net/> [online]. 2019 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: Analytical Modeling and Experimental Investigation of Product Quality and Mechanical Properties in FDM Additive Manufacturing
-

- [43] Materialise Magics. In: *Middle-east: printing the future* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.3d-me.com/materialise-magics>
- [44] Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. In: *All3DP* [online]. 2021 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [45] BAI, Long a Cheng GONG. Schematic of Powder Bed Fusion process. In: *ResearchGate* [online]. 2019 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-Powder-Bed-Fusion-process_fig2_335778487
- [46] Schematic of the DMLM process. In: *ResearchGate* [online]. 2016 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-DMLM-process-10-reproduced-with-the-permission-of-the-Verein_fig1_346477902
- [47] *TOPOLOGY OPTIMIZATION OF AM CELLULAR & LATTICE STRUCTURES* [online]. In: . [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.engineering.pitt.edu/subsites/consortiums/most-am/research-facilities/projects/>
- [48] HARD TOOL STEEL 1.2709 CL50WS. In: *Landré* [online]. [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.landre-webshop.nl/en/concept-laser-hard-tool-steel.html>
- [49] How to use topology optimization designer, NX12 Siemens. In: *YouTube* [online]. [cit. 2022-07-29]. Dostupné z: <https://youtu.be/byl0TI67Koi>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Porovnání CAD modelu a STL souboru [42].....	12
Obrázek 2: Ukázka napolohování a vytvoření podpor [43].....	13
Obrázek 3: Průběh tisku [44].....	14
Obrázek 4: Rozdělení single-step a multi-step procesů [11]	15
Obrázek 5: Přehled single-step procesů [11]	16
Obrázek 6: Schéma technologie Powder Bed Fusion [45]	17
Obrázek 7: Schéma metody DMLM [46]	18
Obrázek 8: Součást před a po topologické optimalizace [29].....	19
Obrázek 9: Ukázka topologické optimalizace [17]	19
Obrázek 10: Schéma postupu topologické optimalizace [18].....	21
Obrázek 11: Metoda SIMP [20].....	22
Obrázek 12: Metoda ESO/BESO [21].....	23
Obrázek 13: Velikost mikrodutiny [23]	24
Obrázek 14: Ukázka použití metody homogenizace [47].....	24
Obrázek 15: Elektrická motorka společnosti Airbus Group [27]	26
Obrázek 16: Postup optimalizace topologie kosti Femur [28].....	26
Obrázek 17: Optimalizace pláště budovy [30]	27
Obrázek 18: Znázornění zatížení [31].....	28
Obrázek 19: Výsledky výpočtů topologické optimalizace [31].....	29
Obrázek 20: Reálně vytištěné díly [31]	29
Obrázek 21: Graf závislosti napětí na deformaci pro různé SW [31]	30
Obrázek 22: Souhrn výsledků provedených zkoušek [31]	30
Obrázek 23: Možnosti optimalizace různých SW [32]	31
Obrázek 24: Tabulka počtu proměnných návrhu [32]	31
Obrázek 25: Optimalizované díly [32].....	32
Obrázek 26: Výsledky optimalizace [32]	32
Obrázek 27: Optimalizovaný díl [33].....	33
Obrázek 28: Znázornění zatížení v jednotlivých směrech [33]	33
Obrázek 29: Analýza rozložení napětí [33].....	34
Obrázek 30: Vizualizace dílu.....	34

Obrázek 31: Rozložení napětí dle Von Misesa [33].....	35
Obrázek 32: Výsledná součást vytištěná na 3D tiskárně [33]	35
Obrázek 33: Model optimalizovaného dílu [34].....	36
Obrázek 34: Rozložení napětí dle Von Misesa [34].....	36
Obrázek 35: Analýza rozložení napětí [34].....	37
Obrázek 36: Napolohování dílu na platformě a vytváření podpor [34].....	38
Obrázek 37: Huamoidní robot Sweat [35]	39
Obrázek 38: Rozložení Von Misesova napětí [35].....	40
Obrázek 39: Původní stav a stav určený pro optimalizaci [35]	40
Obrázek 40: Vlastnosti materiálů [35]	41
Obrázek 41: Představec jízdního kola [36].....	41
Obrázek 42: Nadefinování design-space a zatížení [36]	42
Obrázek 43: Analýza výpočtu zatížení [36]	42
Obrázek 44: Použití funkce NURBS pro vyhlazení povrchu [36]	43
Obrázek 45: výsledná struktura a tvar [36].....	43
Obrázek 46: Umístění pylonů a jejich tvar [37].....	44
Obrázek 47: Schéma pylonu [37]	44
Obrázek 48: Nastavení pylonu na platformě [37].....	45
Obrázek 49: Výsledky optimalizace topologie [37]	45
Obrázek 50: ruční lis [38]	46
Obrázek 51: Převedení reálného modelu do CAD modelu	46
Obrázek 53: Schéma přenosu dat mezi reálným a CAD modelem [38]	47
Obrázek 52: Analýzy a výsledný model [38].....	47
Obrázek 54: Optimalizované díly. a) těleso pro tříbodý ohyb, b) těleso pro zkoušku tlakem, c) těleso pro zkoušku vetknutého nosníku	49
Obrázek 55: Nastavení design a non-design space, a) těleso pro tříbodý ohyb, b) těleso pro zkoušku tlakem, c) těleso pro zkoušku vetknutého nosníku	49
Obrázek 56: Definice design-space, ukotvení a zatížení	50
Obrázek 57: Optimalizovaný díl	51
Obrázek 58: Ukázka výsledku simulace a) posunutí, b) napětí.....	51
Obrázek 59: Ukázka prostředí SW Creo	52
Obrázek 60: Ukázka prostředí Siemens NX [49].....	52

Obrázek 61: Výsledné geometrie optimalizovaných dílů.....	53
Obrázek 62: Stavební paleta v SW Magics	55
Obrázek 64: Příprava palet v SW Magics	56
Obrázek 63: Ukázka podpor vytvořených v SW Magics	56
Obrázek 65: Volba materiálu	57
Obrázek 66: Ochranné prostředky	58
Obrázek 67: Stavební prostor tiskárny M2 Cusing Laser	59
Obrázek 68: Tiskárna M2 Cusing Laser [41]	60
Obrázek 69: Ukončení tisku a odstraňování prášku.....	62
Obrázek 70: Omytí vzorků na paletě.....	62
Obrázek 71: Tepelné zpracování.....	63
Obrázek 72: Vzorky po tepelném zpracování	63
Obrázek 74: Podpory.....	64
Obrázek 73: Díly na mycím stole.....	64
Obrázek 75: Příprava vzorků před zkouškami.....	65
Obrázek 77: Kalibrace zařízení ARAMIS	66
Obrázek 76: Nanesení rastru černé a bílé barvy	66
Obrázek 78: umístění vzorků do stroje pro snímání kamer	67
Obrázek 79: Graf posunutí pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu.....	69
Obrázek 80: Graf posunutí pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu.....	70
Obrázek 81: Graf posunutí pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu.....	71
Obrázek 82: Znázornění maximálního zatížení pro tříbodový ohyb	72
Obrázek 83: Znázornění posunutí při maximálním zatížení pro tříbodový ohyb.....	73
Obrázek 84: Graf posunutí pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu.....	74
Obrázek 85: Graf posunutí pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu.....	75
Obrázek 86: Graf posunutí pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu.....	76
Obrázek 87: Znázornění maximálního zatížení pro zkoušku tlakem.....	77
Obrázek 88: Znázornění posunutí při maximálním zatížení pro tříbodový ohyb.....	78
Obrázek 89: Ukázka tvorby meshe.....	79

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání hodnot posunutí a max. napětí ve zkoumaných SW.....	54
Tabulka 2: Chemické složení 1.2709 [48].....	59
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti materiálu 1.2709 [40]	59
Tabulka 4: Parametry tiskárny [41]	60
Tabulka 5: Parametry skenování.....	61
Tabulka 6: Hmotnost všech vytištěných vzorků.....	68
Tabulka 7: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu.....	69
Tabulka 8: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu.....	70
Tabulka 9: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu.....	71
Tabulka 10: Hodnoty maximálního zatížení a posunutí pro třibodový ohyb.....	72
Tabulka 11: Poměr maximálního zatížení ku hmotnosti.....	73
Tabulka 12: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 50 % objemem původního materiálu.....	74
Tabulka 13: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 30 % objemem původního materiálu.....	75
Tabulka 14: Hodnoty posunutí pro zatížení 5000 N pro vzorky s 15 % objemem původního materiálu.....	76
Tabulka 15: Hodnoty maximálního zatížení a posunutí pro zkoušku tlakem	77
Tabulka 16: Poměr maximálního zatížení ku hmotnosti.....	78