

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a
metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Postup topologické optimalizace s využitím aditivních
technologií

(Topological optimization process using additive technologies)

Praha 2018

Autor: Filip Soukup

Vedoucí: Ing. Libor Beránek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Soukup** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **459617**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Postup topologické optimalizace s využitím aditivních technologií

Název bakalářské práce anglicky:

Topological optimization process using additive technologies

Pokyny pro vypracování:

1. Princip a postup topologické optimalizace dílů, dostupná sw. řešení
2. Aditivní technologie a technologické možnosti DMLS
3. Návrh topologické optimalizace pro vybraný komponent leteckého motoru

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:


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



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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci zpracoval samostatně za použití zdrojů uvedených v seznamu použité literatury na konci této práce. Souhlasím s tím, že její výsledky mohou být dále využity dle uvážení vedoucího této práce
Ing. Libora Beránka, Ph.D.

Datum.....

Podpis.....

Poděkování

Děkuji panu Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné a důležité připomínky při zpracování a dohled nad postupem bakalářské práce. Také děkuji panu Ing. Jiřímu Sommerovi za cenné rady týkající se softwaru použitého při výpočtech a optimalizaci. Dále bych chtěl poděkovat společnosti GE Aviation Czech za poskytnutí dat a informací a také všem, kteří mě při psaní bakalářské práce a v průběhu celého studia podporovali.

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje postup při výrobě dílů pomocí aditivních technologií. Zaměřuje se na historický vznik a vývoj těchto technologií. Jejich výhody a nevýhody. Dále jsou zahrnuty jednotlivé aspekty aditivní výroby, jako jsou potřebná technologie, potřebný materiál, jeho dostupnost a výroba. Poté zdroje laserového záření a základní komponenty, jejich funkčnost a rozmístění ve 3D tiskárně. Hlavním cílem teoretické části bylo pak popsat problematiku topologické optimalizace včetně popisu jednotlivých kroků postupu.

V praktické části byl aplikován postup topologické optimalizace na daném komponentu leteckého motoru. Dále proběhlo zpracování pevnostní analýzy nově vymodelovaného dílu a porovnání vlastností s původním dílem.

Abstract

This bachelor thesis describes process of additive manufactured components. The theoretical part is focused on historical origin and evolution of additive manufacturing and its advantages or disadvantages. Required technologies, material and its availability are further included. Sources of laser beam, primary components their functionality and their placement in 3D printer. Main purpose of this thesis was to describe problematics of topology optimization its processing and steps of the procedure.

In the practical part of the bachelor thesis is applied process of topology optimization on an air craft engine component. Further was performed strength analysis of the new remodelled component and comparison of these properties with the original component.

Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk kovů, topologická optimalizace

Keywords

Additive technologies, metal 3D printing, topological optimization

Obsah

1	Úvod	8
2	Jednotlivé etapy výroby pomocí aditivních technologií	9
3	CAD modelování ve 3D	10
4	Topologická optimalizace.....	11
4.1	Počátky topologické optimalizace	11
4.2	Princip topologické optimalizace.....	13
4.3	Postup topologické optimalizace	14
4.4	Tvarová omezení.....	15
4.5	Penalizace středních hustot	15
4.6	Síťování.....	18
4.7	Problém vzniku šachovnicového jevu a jeho odstranění	18
5	Aditivní technologie	19
5.1	Historie 3D tisku	19
5.2	Dělení aditivních technologií	21
5.3	Materiály vhodné pro AM	23
5.4	DMLS	25
5.5	Výhody aditivních technologií.....	30
5.6	Nevýhody aditivních technologií.....	31
5.7	Vývojové trendy v oblasti aditivních technologií.....	32
5.8	Doporučená opatření laboratoře.....	33

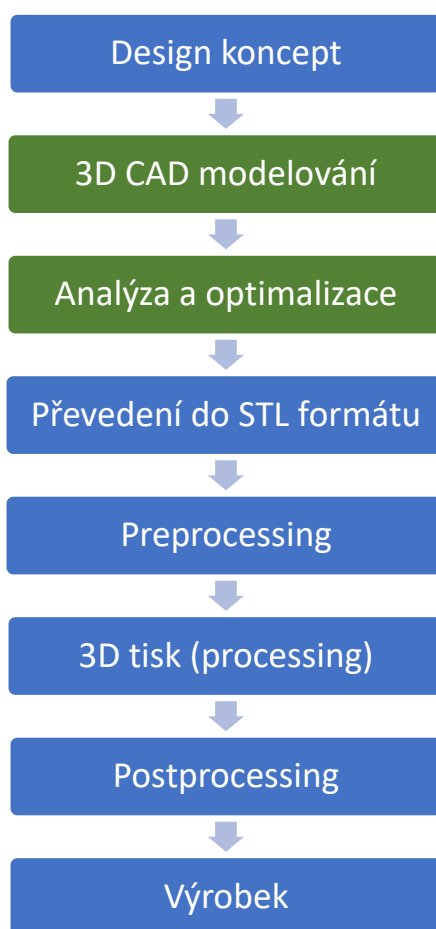
6	Topologická optimalizace vybraného komponentu.....	34
6.1	Kinematický a statický rozbor	35
6.2	MKP analýza.....	39
6.3	Návrh nové páčky	43
6.4	Zhodnocení	48
7	Závěr.....	49
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	50
9	Seznam použité literatury	51
10	Seznam grafů	53
11	Seznam tabulek.....	53
12	Seznam obrázků.....	54

1 Úvod

Výroba tvarově náročných dílů pomocí aditivních technologií (3D tisku) je dnes jedním z nejrychleji se rozvíjejících oborů. 3D tisk umožňuje firmám vyrábět komplexní tvary s minimální spotřebou materiálu ve stále se zlepšujících parametrech rozměrové přesnosti i kvality povrchu. K tisknutí kovů se v dnešní době používá metoda DMLS (Direct metal laser sintering), která je ideální technologií k vývoji prototypů. Tato technologie se používá zejména v leteckém průmyslu, automotive, ale i ve zdravotnictví a zejména pak v zubním lékařství. Každý návrh 3D tištěného dílu zahrnuje několik důležitých kroků, které musí být provedeny, aby byl díl z hlediska ekonomického a technologického použitelný. Jedním z důležitých kroků je tzv. Topologická optimalizace. Topologická optimalizace je jednou z disciplín v oblasti konstruování, která může těžit z technologických možností aditivních technologií. Hlavním cílem je snížit hmotnost, při zachování nebo dokonce zlepšení mechanických vlastností. V této bakalářské práci je cílem uvést některé druhy a metody tisknutí kovů, které se dnes běžně používají zejména pak metodu DMLS. Dále pak si osvojit základní dovednosti při návrhu vybraného komponentu s využitím postupu topologické optimalizace, jehož výroba bude realizována právě aditivními technologiemi. Jedná se o páčku motoru H80 firmy GE Aviation Czech s.r.o. Použitým softwarovým řešením byl Hypermesh společnosti Altair Hyperworks. Návrh přemodelované páky bude pak kontrolně analyzován, zdali vyhovuje daným podmínkám a porovnán s originální páčkou.

2 Jednotlivé etapy výroby pomocí aditivních technologií

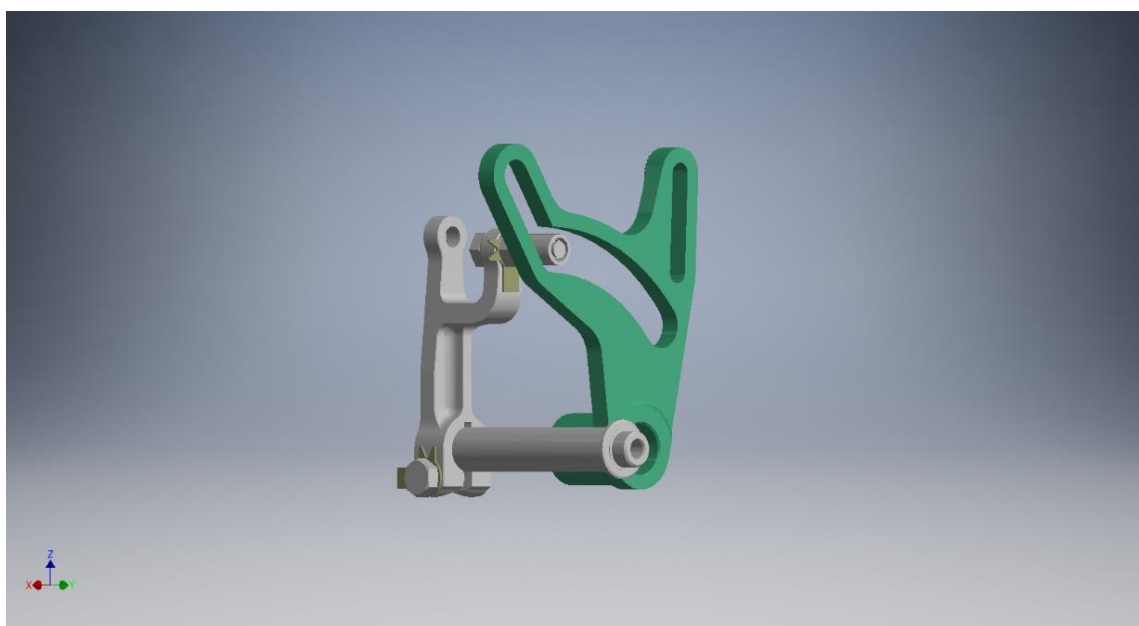
Aditivní výroba zahrnuje několik předvýrobních etap, které by měly být provedeny. Prvním krokem je samotný návrh designu nového výrobku. Následně musí být výrobek vymodelován v CAD systému, který je poté analyzován a optimalizován. Optimalizovaný model je poté převeden do formátu STL (Standart triangulation language). Před tím, než může být zahájen 3D tisk výrobku, musí být proveden preprocessing, ve kterém dochází k úpravě modelu a zavedení případných podpor. Vstupem pro 3D tiskárnu je sada instrukcí v podobě tzv. G-kódu. Po samotném tisku musí součást projít tzv. postprocessingem, kde dochází k další úpravě výrobku, případně k povrchovým úpravám. Na konci vychází již hotový výrobek. V grafu (č.1) jsou znázorněny tyto etapy a zvýrazněny ty, kterými se tato práce primárně zabývá. [1]



Graf č. 1 Schéma jednotlivých etap vedoucích k finálnímu výrobku

3 CAD modelování ve 3D

Je zřejmé, že aditivní metody by nebyly realizovatelné, kdyby nebyly podporovány 3D CAD (Computer - aided design) softwary, které slouží jako hlavní nástroj ke konstrukci. Umožňují pohled na objekt z jiné perspektivy a lze je lépe aplikovat na 3D tisk. Modelovací softwary jsou z velké části podporovány i programy používanými k analýze a optimalizaci. Modelovací 2D a 3D systémy jsou dnes základní položkou jakékoliv strojírenské firmy, zabývající se konstrukcí, návrhem, výrobou, ale i vývojem. Je nesčetné množství těchto programů, avšak některé jsou více rozšířené s větším množstvím funkcí, jiné zase cenově, ale i na ovládání náročnější. Např.: NX (Unigraphics), CATIA. Poté spousta běžněji užívaných softwarů jako: Autodesk Inventor, Solid Works, Solid Edge, ale samozřejmě i freeware verze jako je DesignSpark či Albatross 3D.



Obrázek č. 1 Ukázka modelovacího prostředí

4 Topologická optimalizace

Optimalizace jako taková dává odpovědi na základní inženýrské otázky: Jak navrhnout design součásti, aby byly dodrženy předepsané funkce a získány ty nejlepší strukturální, ale hlavně mechanické vlastnosti. Tento koncept vznikl původně jako nástroj hlavně pro účely strojního inženýrství. Koncept byl však rychle rozšířen do dalších vědních oborů jako je fyzika (včetně mechaniky tekutin), akustika, optika, ale i věda zabývající se elektromagnetismem. Předpokládá-li se výroba pomocí 3D tisku, může být navržena i tzv. bionická struktura, která svým vzhledem připomíná biologické struktury. [2]

4.1 Počátky topologické optimalizace

Optimalizace produktů používaných lidmi každý den je součástí historie již od počátků lidstva. Že šlo o optimalizaci, i když se tomu tak ještě neříkalo je zřejmé, jelikož úpravy jednotlivých nástrojů splňují i dnešní požadavky optimalizace. Těmi je snížení hmotnosti a úprava geometrie, ale zachování funkčnosti. V průběhu vývoje lidstva se i v samotné optimalizaci dosahovalo značného pokroku.

4.1.1 Období doby kamenné

Samotné počátky optimalizace sahají do období Paleolitu, tedy starší doby kamenné. To je zhruba 40 000 až 10 000 let před naším letopočtem. Už od počátku šlo především o to, aby byly používané nástroje efektivnější. Zdrojem obživy tehdejších lidí byl především lov zvířete, což je spojeno s používáním a vývojem základních loveckých zbraní. Na obrázku je demonstrováno odlehčení a úprava hrotu šípů v průběhu času. První byl z období 10 000 let před naším letopočtem. Poslední byl vyroben zhruba před 200 lety. Je zřejmé, že šlo především o úsporu hmotnosti nástroje a lepší funkční vlastnosti potřebné k lovu zvířete. [3]



Obrázek č. 2 Ukázka vývoje loveckých zbraní [3]

4.1.2 Nová doba

Úvod do znalostí a následné prohlubování problematiky návrhu konstrukcí za současného uvažování struktury a rozložení materiálu byly přirozeně řešeny v průběhu vývoje průmyslu, a to jak při navrhování tvaru nejrůznějších strojů, tak při jejich dimenzování. Zřetelně byl tento problém popsán v článku Chenga a Olhoffa v roce 1981, kde se zabývali optimální tloušťkou pružných desek. Jejich práce vedla k řadě dalších prací, zabývajících se tématem optimálního návrhu dílů. Vůbec první představení metody ubírání materiálu v rámci topologické optimalizace a využití výpočetních nástrojů bylo představeno Bendsoem a Kikuchim v roce 1988. [4]

U tenkých, lehkých konstrukcí, jako jsou konstrukce s nízkým podílem použitého materiálu vychází z této metody jako nejlepší východisko buďto síťová struktura, nebo příhradová konstrukce či mřížování, což je jedno z nejčastějších konstrukčních řešení, vedené snahou ušetřit hmotnost. To, že metoda materiálové distribuce tedy jen doplňuje klasické analytické metody o studia základních vlastností sítí, poprvé sepsal vědec Michell. Různé aplikace numerických metod k řešení nosíkových a jiných velice rozsáhlých konstrukčních problémů byly popsány již v 60. letech 20. století, avšak až v posledních letech víme, že tyto záležitosti jsou řešitelné pomocí speciálních algoritmů, které využívají nejmodernější vývoj matematického programování. [4]

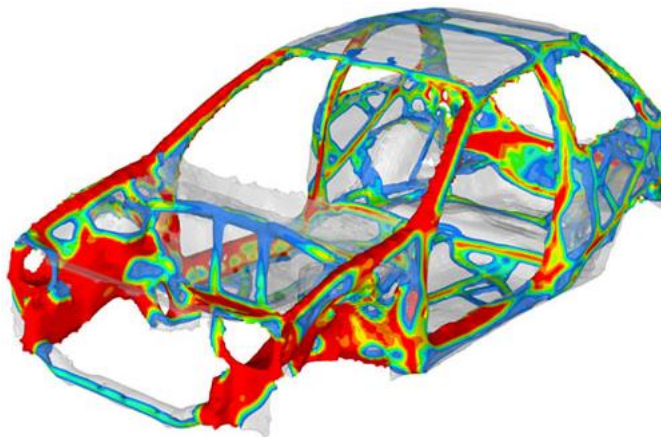
4.2 Princip topologické optimalizace

Topologická optimalizace v moderním pojetí je pevně svázána s výpočty metodou konečných prvků. Jde o typ iteračního algoritmu, který aby mohl zanalyzovat výsledek, provede konečný počet prvkových výpočtů. Podle výsledku je poté upravena topologie modelu tak, aby mohla být pak dále používána jako výchozí model a s touto strukturou se pak dále pracuje. Algoritmus se může ukončit a program se dostává k teoreticky ideální topologii jen pod podmínkou, že výsledek splňuje všechny atributy a dostatečně konverguje k požadavkům zadaným uživatelem. Pokud by tato podmínka nebyla splněna a výsledek nekonverguje k požadavkům, musí výpočet proběhnout znova, nebo i několikrát, dokud nejsou podmínky splněny. Lze i proto nastavit konečný počet iteračních kroků, aby nedošlo k nekonečnému cyklení a vypočítávání algoritmem. [5]

Po zadání konečného počtu iterací a úspěšném vypočtení dojde k analýze deformací. V oblasti, kterou systém vyhodnotil jako vhodnou, dochází ke snížení hustoty materiálu na nejmenší možnou hranici. Software je definován tak, že v počátku je veškerý materiál v izotropním stavu a jeho hustota je rovna jedné. Avšak po analýze může být hustota i nula, což představuje oblast, ve které se materiál nenachází vůbec. V případech, kdy nám poréznost vyjde jako číslo blížící se k nule lze také předpokládat, že tam materiál nebude potřebný. [5]

V této práci je zahrnuta topologická optimalizace pouze izotropního materiálu. Tudiž očekáváme v celé navrhované konstrukci stejné chování, a to ve všech směrech vznikající deformace.

Výsledkem je tedy izotropní struktura s materiálem o různé hustotě.



Obrázek č. 3 Izotropní struktura [12]

4.3 Postup topologické optimalizace

Prvním krokem při řešení obecných případů tvarové optimalizace spojitých struktur by mělo být definování jednotlivých bodů v prostoru dílu a přiřazení, zdali se v daném bodě nachází materiál či nikoliv. Pro metodu FEM (finite element method), neboli MKP (Metoda konečných prvků) se používá diskretizace jednotlivých bodů. Diskretizace slouží k nahrazení spojitého prostředí diskretním modelem. Pro každý bod jsou získány 3 rovnice. Každá rovnice značí posuv daného bodu v ose x , y a z . Tyto funkce jsou dále aproximovány pomocí diferenciálních rovnic nebo polynomů, se kterými dokáže software pracovat. [4]

4.4 Tvarová omezení

V některých případech je žádoucí vytvořit konstrukci charakterizovanou konstantním průřezem podél dané křivky zejména u dílů vyráběných procesem extruze. Nechceme tedy měnit její vnější geometrii, lze však odebírat materiál uvnitř požadované konstrukce. Tato omezení se používají také u dílu, které nejsou vyráběny procesem extruze, ale je požadována specifické geometrie. Na tomto příkladu je ukázané porovnání tvarového omezení a případ, kdy není omezení použito. Tato kolejnice, na které se vozidlo pohybuje jednoduše podepřena. [6]

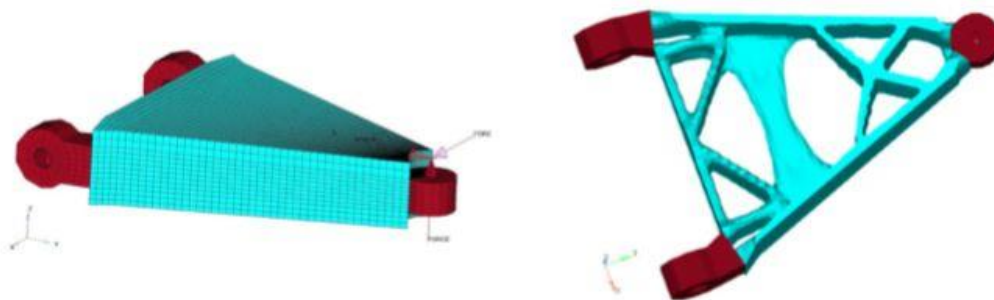


Obrázek č. 4 Tvarové omezení [6]

4.5 Penalizace středních hustot

Software Hyperworks společnosti Altair používá metodu SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), která funguje na změny hustoty v modelu. Materiálová hustota může nabírat hodnot 0 až 1. Kde 0 je oblast modelu absolutně bez materiálu a 1 je fiktivní materiál. Lze si hustotu představit jako houbu, jejíž poréznost od nuly k jedné roste.

Předpokládáme, že tuhost materiálu je lineárně závislá na hustotě materiálu. Tento předpoklad je spojen se znalostí používaných materiálů. Například ocel má větší hustotu než hliník, proto i její tuhost bude v modelu vyšší. Na obrázku je znázorněn počátek a výsledek topologické optimalizace. [4]



Obrázek č. 5 Topologická optimalizace [6]

Obecně tedy model zahrnuje velkou oblast středních hustot v prostoru celého modelu. Pokud hledáme určité řešení, je nezbytné zavést techniky k penalizaci mezilehlých hustot a vynutit, aby byla konečná konstrukce reprezentována buďto 0 nebo 1 pro každý prvek. Často se také hustota znázorňuje pomocí bílé a černé barvy. Obecně je penalizace vyjádřena rovnicí:

$$K'(r) = \rho^p K \quad (4.1)$$

Kde K' vyjadřuje již penalizovaný prvek a K matici tuhosti reálného prvku před penalizací. ρ je hustota a exponent p je penalizace, která může nabývat hodnot větších než 1. Penalizace je závislá na množství vstupních dat, ale v praxi nabývá hodnot 2 až 4.

4.5.1 Kontrola minimální velikosti členů

Má za cíl diskretizovat model, protože optimalizace hledá pro prvky elementární hodnotu 0 nebo 1. Nastavením minimální velikosti členů (MINDIM) tedy dosáhneme přesnějšího výsledku, jelikož minimalizujeme riziko vzniku mezilehlých elementů, které by mohly vzniknout. Hrozí také vznik šachovnicového efektu. Doporučuje se, aby zmenšování prvků bylo minimálně 3krát, ale maximálně 12krát průměrná velikost původního elementu. Průměr elementu ve 2D se spočítá jako průměr druhé odmocniny plochy prvků a u 3D prvků jako průměr kubického kořene objemu. [7]

4.5.2 Kontrola maximální velikosti členů

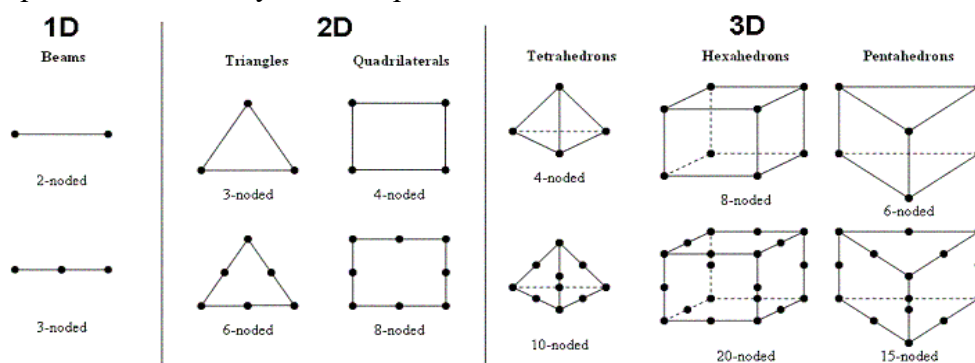
Maximální velikost ovládacího prvku (MAXDIM) je řízena tak, aby zabránila tvorbě příliš velkých členů. Kontrola není dána směrem. To znamená, že pokud je tloušťka členu splněna v libovolném směru, je člen vyhovující. Maximální velikost členů musí být alespoň 2krát větší než MINDIM. Tzn. Nejmenší možná velikost je 6krát větší než rozměr původního členu. Toto omezení je velice důležité a při nedodržení se vyskytne chyba. Kromě toho by měl být MAXDIM 2krát menší než nejtenčí část konstrukce. Na základě těchto podmínek je vyžadována jemná síť. Kontrola minimální a maximální velikosti členů nám tedy umožňuje lépe definovat daný model, ale je však stále ve vývoji a nastávají i nežádoucí vedlejší účinky. Může se stát, že konečný výsledek by vykazoval větší střední hustotu. Na obrázku (č.6) je znázorněn model vlevo v případě nepoužití a vpravo v případě použití MAXDIM. [7]



Obrázek č. 6 Porovnání použití a nepoužití MAXDIM [7]

4.6 Síťování

Dostává se nám hned několik možností, jak lze danou strukturu síťovat. Musíme však dodržet určitá pravidla, aby model fungoval korektně. Jednotlivé elementy jsou vždy spojeny pomocí uzlů. Zatížení musí také působit a přenášet se jen v místě uzlů. Příklady nejčastěji a nejuvhodněji používaných sítí jsou uvedeny na obrázku (č.7). V případě 2D prostoru jsou to rovinné útvary tří, čtyř nebo více uzlové. Tedy trojúhelník nebo čtyřúhelník. Ve 3D prostoru pak čtyř, pěti nebo šestistěny s větším počtem uzlů.



Obrázek č. 7 Typy sítí [18]

4.7 Problém vzniku šachovnicového jevu a jeho odstranění

V řešení výpočtů se může často objevit tento problém, který je způsoben přemístěním některých prvků v metodě konečných prvků. Může nastat tak, že jako na šachovnici se jednotlivá políčka pevného materiálu a prázdné oblasti střídají periodicky a mají vliv na hustotu a tuhost materiálu. Tento jev připomínající rastr je také pozorován v prostorovém rozložení tlaku při používání metody MKP. Nyní je dobře známo, že tento jev se vztahuje k nedokonalé aproximaci při použití MKP. Konkrétně jde o nedobré číselné modelování, které nadhodnocuje tuhost jednotlivých tabulek při výpočtu. Tento jev má také vliv na délku výpočtů. Pomocí omezujících metod lze efekt šachovnice kontrolovat a omezit, či jej úplně odstranit. Princip je, že docílíme omezení geometrie (délku hranice a variabilitu velikosti dílů). Je to tedy nežádoucí jev, který je třeba eliminovat. Abychom ušetřili čas, ale zároveň dostali návrh bez šachovnice, byl navržen postup pomocí tzv. záplat. Jedná se v podstatě o “super prvek“, který má danou hustotu vůči sousedním prvkům a dojde k eliminaci tohoto jevu. [4]

5 Aditivní technologie

5.1 Historie 3D tisku

Úplné počátky 3D tisku sahají zhruba do brzkých 80. let 20. století, kdy tehdejší průmyslová výroba běžně probíhala ubíráním materiálu z plného bloku. Avšak začaly se objevovat myšlenky, že by se namísto ubírání materiál přidával po vrstvách. Od té doby bylo jen ve Spojených státech amerických nahlášeno přes 30 tisíc patentů. Patenty se týkaly nejrůznějších technologií a variabilních materiálů. Od fotopolymerizace přes FDM metody až po 3D “bioprinting“ lidských orgánů. Masový rozvoj 3D tiskáren je především spojen s rozvojem počítačové a výpočetní techniky, až pomocí které mohly být tyto tiskárny řízeny a laděny k velmi kvalitním výkonům. Kolem roku 1940 Američan J. T. Parsons započal a P. Henretty poté vyvinul numerické řízení výroby, které odstartovalo masivní progres ve vývoji jak softwaru, tak i hardwaru. Jedním z největších světových výrobců a distributorů tiskáren na plasty je i česká firma Prusa Research s.r.o., která dokázala dokonale zachytit aktuálnost, inovaci a budoucnost této technologie [14]

5.1.1 Patent 3D tisku

Další metodou, která byla později vynalezena, byla tzv. SLS (Selective laser sintering). Tato metoda je založena na spékání prášku laserovým paprskem. Tato technologie byla patentována v USA v roce 1989 C. R. Deckardem. Po tomto roce vznikla na americké univerzitě MIT ochranná známka pro 3D tisk jako takový. Až do počátku 21. století byly 3D tiskárny velmi drahé a velmi obtížně sehnatelné, avšak očekávaná expanze této technologie nakonec dovršila svého vrcholu až v dnešní době. [14]

5.1.2 První tiskárna

Úplně první tiskárnu, která byla schopna aditivně nanášet materiál byla sestrojena v roce 1983 Coloradským vynálezcem a vědcem Chuckem Hullem, který se zabýval převážně stereolitografií (STL), což je proces, vytvrzující polymery pod vlivem ultrafialového záření. Tento průkopník popsal svoji metodu a celý tisknoucí aparát a v srpnu roku 1984 vytiskl první výrobek. Byl jím 5 centimetrů vysoký kelímek. Avšak rychlost, kterou stroj tiskl byla v praxi nevyužitelná. (Kelímek byl tisknut měsíce). [14]



Obrázek č. 8. První Hullova 3D tiskárna [1]

5.2 Dělení aditivních technologií

Aditivní technologie jsou klasifikovány dle mezinárodní normy ISO/ASTM52900:2015 (ASTM F2792) *Additive manufacturing – General principles – Terminology*. V této normě je popsáno celkem 7 metod a procesů těchto technologií. Jednotlivé typy se liší ve způsobu, kterým jsou jednotlivé vrstvy nanášeny a v materiálech, který se dá technologiemi zpracovat. Jelikož se předpokládá, že se aditivní technologie budou stále rozvíjet a dojde u nich k dalšímu vývoji a inovaci, je rozdělení na 7 kategorií nedostatečné a příliš obecné. V tabulce (č.1) je proto vypsané pro lepší názornost celkem 11 druhů aditivních metod výroby. Jednotlivé druhy jsou barevně odlišeny podle způsobu použití materiálu či jeho nanášení. [8]

- Metoda využívající tavení prášku
- Metoda využívající tavení drátu
- Metoda, kdy se lepí jednotlivé vrstvy materiálu
- Metoda extruze
- Metoda, využívající chemickou reakci k vytvrzování
- Metoda, kdy dochází k polymerizaci působením světla

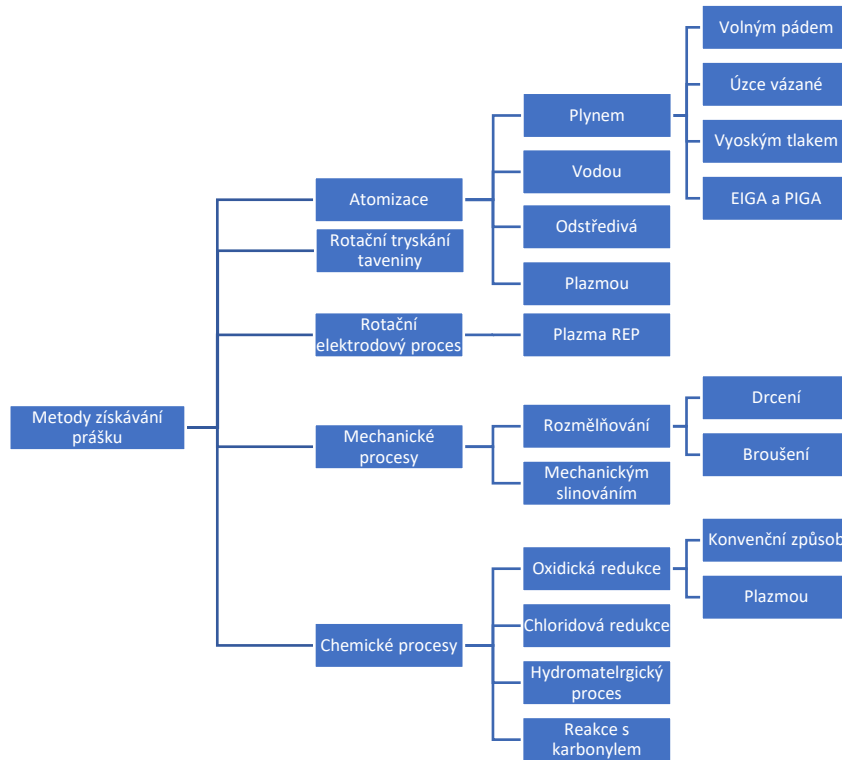
Tabulka č. 1 Souhrn aditivních technologií [9]

Zkratka	Technologie	Princip
DMLS	Direct metal laser sintering	Při tomto procesu lze využít téměř jakýkoliv kovový materiál. Na vymodelovaném CAD modelu dochází v podstatě ke svařování materiálu pomocí laseru. Po svaření jedné vrstvy se lůžko s práškem vysune o požadovanou výšku. Kvalita dílů je srovnatelná s konvenčními metodami.
SLS	Selective laser sintering	Využívá materiály v práškové formě a zdroj tepla pochází z laseru, který spéká prášek do pevné struktury. Umožňuje zpracovat velikou škálu materiálů (keramika, plasty, kov) a opětovné použití zbylého prášku. Konstrukce nejsou tak silné, jako u metody SLM.
SLM	Selective laser melting	Používány primárně sloučeniny Ti, Co-Cr, Al a nerezových ocelí. Dochází k úplnému natavení materiálu obdobně jako u metody SLS. Vhodné pro objekty s dutinami a kanálky. Výrobky nejsou tak silné, jako u metody EBM.

SHS	Selective heat sintering	Podobná metoda jako SLS, ale používá se pouze termoplastický prášek, který je uložen na lůžku, které se posouvá ve vertikální ose. Tisková hlava zůstává nehybná. Zdrojem tepelného záření není laser, ale tisková hlava.
EBM	Electron beam melting	Principiálně stejná metoda jako EBF. Rozdíl je ve zpracovaném materiálu. Ten je nejčastěji titanový prášek. Tato technologie je schopna vytvořit extrémně pevné a poměrně lehké výrobky vhodné k využití ve zdravotnictví.
EBF	Electron beam fabrication	Metoda vyvinutá společností NASA, která dokáže pracovat s téměř jakýmkoliv kovem. Zdrojem záření je elektronový paprsek (záporně nabitě sub-atomární částice), soustředící svoji energii do bodu, kam je podobně jako u svařování přiváděn kov v podobě drátu, který má kladně nabitě částice. Nutné dokončovací úpravy.
LOM	Laminated object manufacturing	Tato metoda zahrnuje nanášení jednotlivých vrstev fólie, která musí být poté nařezána. Fólie může být kovová, plastová, skleněná či plastová. Následným lepením se celá konstrukce zpevní. Je produkováno velké množství (až 50%) odpadního materiálu.
FDM	Fused deposition modelling	Pravděpodobně nejdostupnější technologie. Dochází k přímému nanášení materiálu z tiskové hlavy, která se pohybuje ve všech 3 souřadnicových osách. Nejčastěji se používá tavení drátu z termoplastu. Možné různé barevné variace.
PP	Plaster-based 3D printing	Metoda, kdy se formuje voda se sádrovým práškem, aby vytvořila pastu, ze které se vlivem tepla vypařuje voda a tím se forma vytvrzuje. Metoda známá také pod názvem "Binder jetting" je rychlá, avšak vzniklá konstrukce je křehká a je zpravidla nutný postprocesing.
DLP	Digital light processing	Velká podobnost s SLA. Odlišnost je pouze ve zdroji světla. Oproti UV záření je zde použito světlo emitujících zařízení a speciálních DLP projektorů. To činí tuto metodu levnější oproti starší SLA metodě a zároveň přesnou.
SLA	Stereolitografie	Vůbec první 3D tisknuté objekty. Využívá se UV citlivý fotopolymer, který po ozáření ztvdne. Jedna z nejrychlejších forem tisku.

5.3 Materiály vhodné pro AM

Materiály, které mohou být použity jsou ve formě prášku. To znamená poměrně náročný proces výroby. Prášek může být vyráběn mnohými procesy dle grafu (č.2):



Graf č. 2 Rozdělení výroby prášků [1]

Tyto formy získávání prášku nesou jisté výhody, ale i úskalí, proto je pro každý materiál pečlivě vybírána ta správná. Metody SLS, SLM, DMLS apod. jsou takové aditivní metody, které k výrobě využívají kovový prášek. V dnešní době jsou nejhojněji využívány nerezové materiály jako: slitina Co-Cr, CP-Ti, Ti-6Al-4V, Niti, ale i surové kovy jako Au, Ag, Cu a Al. Další velmi často používané materiály nesou totiž značná rizika, jejichž řešení může být velice nákladné. Hlavními problémy jsou zejména: drsnost povrchu, nižší mez únavy a mez pevnosti v tahu.

Dále pak například větší náchylnost na malé změny v chemické struktuře apod. Kovové prášky s velkou ušlechtilostí získáváme především pomocí plazmy REP. Dále pak plynovou atomizací vzduchem, párou nebo inertními plyny, které jsou schopny vyprodukovat prášky o rozměrech 10-300 μm . Další možností je elektrolytický proces, jež je nejhojněji používám na výrobu prášku z Cu v reakci s kyselinou sírovou o koncentraci 120-250g/L. [1]

V posledních letech vzniklo velké množství komerčních firem, které se touto tematikou zabývají. V Následující tabulce (č.2) je souhrn technologií a nejznámějších výrobců a poskytovatelů materiálu. Je viditelné a z ekonomického hlediska výhodné, když si společnost vyrábí sama i potřebný materiál.

Tabulka č. 2 Souhrn hlavních výrobců [1]

Technologie	Výrobce	Dodavatel materiálu
SLS	3D systems, Farsoon, Blueprinter, eos, MC machinery systems	3D systems, Paramount Product Development, Farsoon technologie, eos
SLM	MICROFABRICA, REALIZER, SLM solutions	MICROFABRICA, REALIZER, SLM solutions
DMLS	Innstek, EOS, Concept laser	Concept laser, Inststek
Laser metal deposition	BEAM	BEAM
Metal powder bed fusion	Renishaw	Renishaw
LENS	Optomec	Optomec, Concept laser
FDM	UP-3D, CandyFab, Stratasys	UP-3D, CandyFab, Stratasys

5.4 DMLS

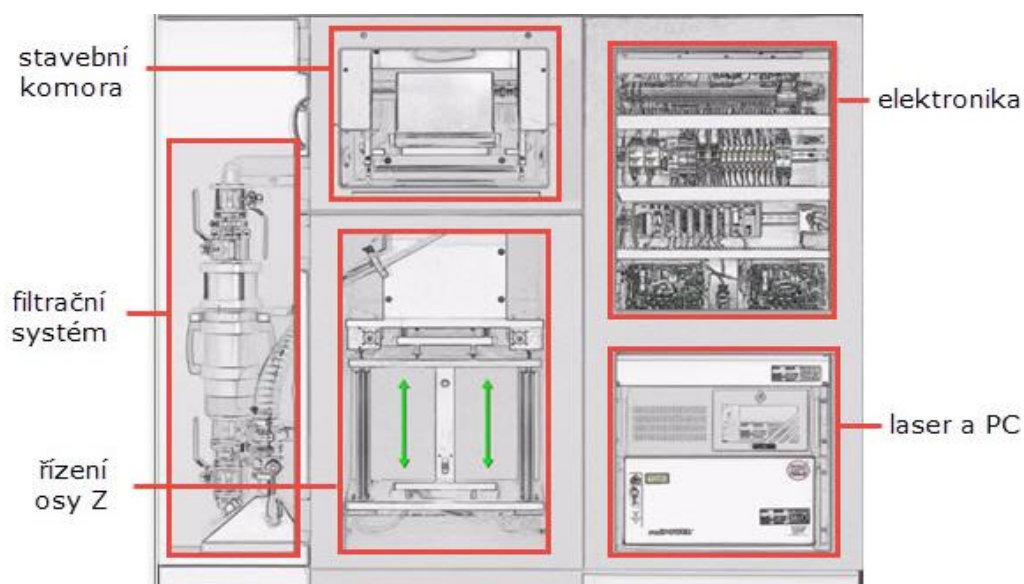
Technologie DMLS (Direct metal laser sintering) umožňuje 3D tisk objektů z kovového materiálu. Oproti konvenčnímu obrábění, frézování atp. nedochází k odběru materiálu, ale naopak k postupnému nanášení kovového prášku vrstvu po vrstvě, kdy v rámci vrstvy je materiál ve vybraných místech nataven. Tato metoda má původ v Německu. Konkrétně společnost EOS začala s výrobou 3D tištěných výrobků z Titanu v roce 1995.

Princip této metody spočívá tedy v postupném nanášení kovového prášku po vrstvách. Výška vrstvy se může lišit, řádově se jedná o desítky mikrometrů. Nanášení prášku je prováděno pomocí válce nebo může být prášek rovnoměrně rozprostřen speciálním keramickým břitkem. Po rozprostření prášku se spouští výkonný laser nejčastěji vysoce výkonný vláknový laser. Po nanesení a spečení jedné vrstvy následuje posuv platformy ve vertikálním směru o výšku jedné vrstvy a opětovné nanesení prášku. Tento proces se opakuje, dokud není výrobek kompletně hotov. Poté musí dojít k vychladnutí výrobku před tím, než bude možno ji vyjmout. Následně se musí odstranit podpěry a celkově výrobek upravit do finální podoby. Tento tzv. postprocessing obsahuje například broušení funkčních ploch za cílem získání požadovaného vzhledu a funkce.

Materiály používané v DMLS tiskárnách jsou zejména titan, hliník, nerezová a martenzitická ocel. Díly vytvořené touto technologií jsou pevné, tepelně odolné a odolné oproti opotřebení, avšak drsnost povrchu dosahuje horších hodnot kolem Ra 12,5. [10] [11]

5.4.1 Vnitřní prostor 3D tiskárny

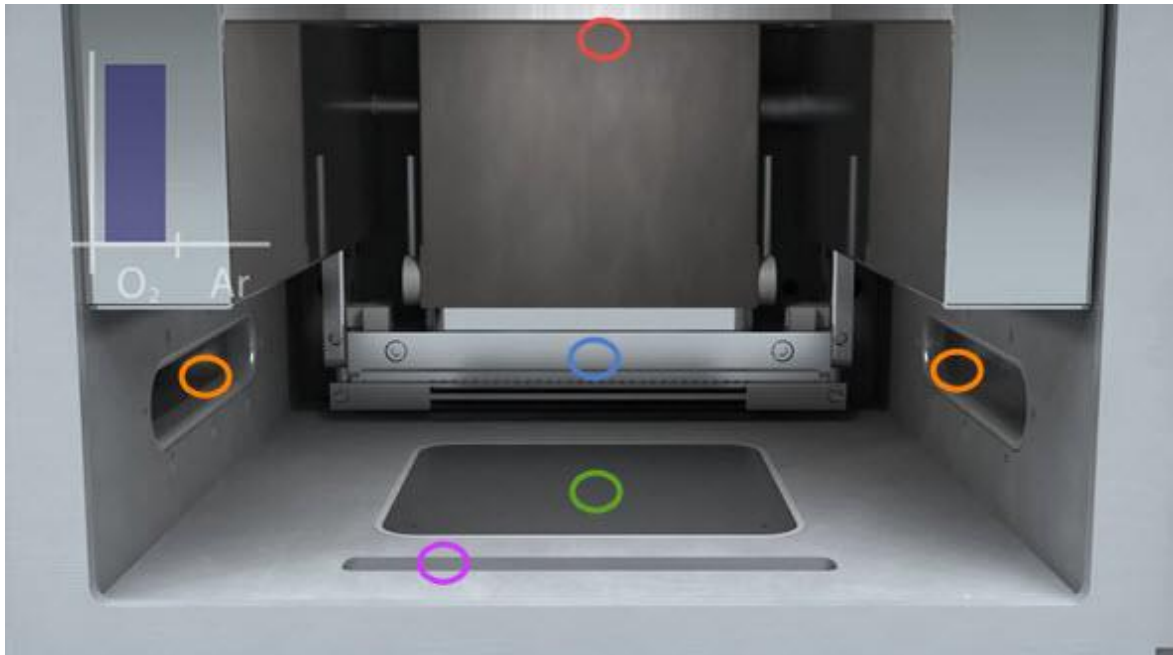
Z obrázku je patrné, že každé zařízení na tavení prášku se skládá z těchto základních segmentů: stavební komora, elektronika, laser a PC, filtrační systém a posuvný stůl s řízením osy Z. Tato struktura součástí je však individuální a každý výrobce používá svou vlastní. Na obrázku (č.9) je pro názornou ukázkou demonstrován jeden z těchto systémů. V pracovní komoře dochází k naplnění ochranou inertní atmosférou. Nejčastěji však argonem, který má díky vysokému protonovému číslu za úkol vytlačit kyslík z atmosféry ochranné komory. Při tavení “obyčejných“ materiálů je obsah kyslíku pod 0,1 %. Při tavení reaktivních kovů, jako je titan až pod 0,01 %. Při tavení reaktivních kovů, jako je titan až pod 0,01 %. Řízení osy Z je neméně důležité, správná kalibrace posuvu ve směru osy Z způsobuje rovnoměrné nanesení prášku, ale hlavně správné množství, které může být ideálně nataveno. Proto je nutné znát tloušťku jednotlivých vrstev prášku, který je nanášen. Filtrační systém zde plní funkci očištění plynu, který je přiváděn/odváděn z prostoru komory. Laserový paprsek je usměrňován pomocí vysokofrekvenčních zrcátek v osách X a Y. Po ukončení procesu je výrobek obalen zbytkovým práškem, který je poté odstraněn a výrobek může být dále zpracováván. V některých aplikacích lze nepoužitou směs materiálů využít, avšak někdy musí být použit tzv. panenský prášek, který musí dosahovat požadovaných aspektů. [15]



Obrázek č. 9 Vnitřní prostor tiskárny [15]

5.4.2 Pracovní komora

V červeném oválu je označen zdroj laseru, který je zdrojem tepla pro požadovanou operaci. Oranžové ovály značí přívod/ odvod filtrovaného ochranného plynu, čímž je docílena správná regulace atmosféry v prostoru komory. Modrým oválem je znázorněn mechanismus na dávkování prášku, který je poté rovnoměrně rozprostřen speciální lištou. Cílem lišty je také minimalizovat přilnutí prášku na jejím povrchu. Zeleně je znázorněna platforma, na které je hlavní pracovní prostor. Je zabudována na stole, který je posuvný v ose Z. Po každém cyklu laseru se stůl posouvá o danou výšku směrem dolů. Tento děj se opakuje. Fialově je vyobrazen otvor pro odvádění nespotřebovaného prášku, který může být opětovně používán. [15]



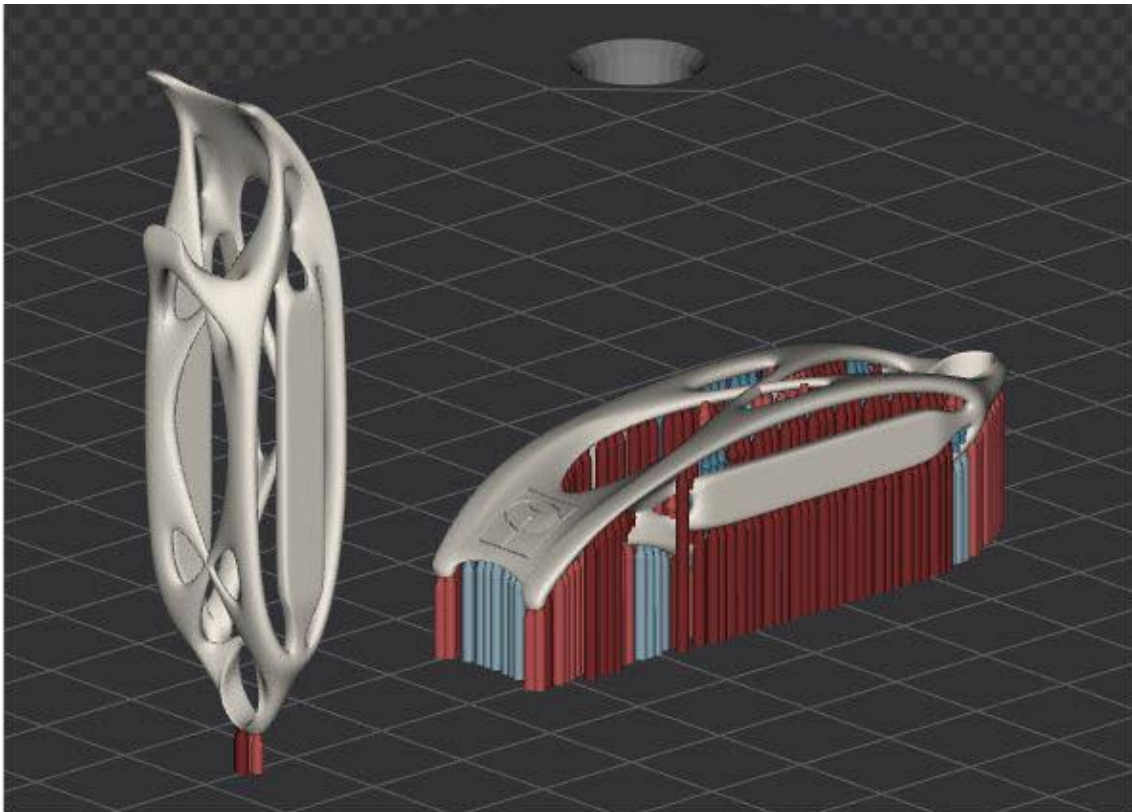
Obrázek č. 10 Pracovní komora [15]

5.4.3 Zdroje laseru

Po mnoho let byly v DMLS metodě použity buďto CO₂ nebo Nd: YAG lasery, které byly také standartními typy laserů i v dalších výrobních procesech, jako je řezání laserem a laserové svařování. V posledních letech vlivem vývoje materiálů a výrobních procesů se staly tyto lasery limitními faktory při výrobě. Proto musely i lasery projít nezbytným vývojem. Zejména pak vláknové a diskové lasery. Nejnovější generace DMLS systémů používá např.: EOSINT M 270, využívající 200 Wattové ytterbiové vlákno, nebo Trumaform LF 250 s diskovým laserem. Ytterbiové vlákno použité v laseru EOSINT M 270 je schopno dosáhnout poměrné kvality paprsku blížící se k jedné. Toto nám umožňuje zaostřit až na velikost 100 μm v celém rozsahu 250 mm x 250 mm, což s výkonem 200 Wattů odpovídá průměrně až 25 kW/mm². Tento laser má také kratší vlnovou délku než CO₂ lasery, která má za následek vyšší absorpci kovů, proto má tento laser lepší účinný výkon a vyšší možnou rychlost. [16]

5.4.4 Nutnost podpěr

Jak již bylo uvedeno výše, 3D technologie jsou v některých případech omezeny nutností podpěr. Pokud byl díl topologicky optimalizován a převeden do bionické struktury, nemusí být podpory nutné, jelikož díl je navržen tak, aby již vytištěná vrstva byla současně i podporou pro další tisknuté vrstvy. V případě návrhu tisku musí však být zvážena a navrhnutá poloha tisknutého dílu, abychom získali opět co nejmenší počet případných podpěr, které mají negativní vliv na výsledný povrch a spotřebu materiálu, ale hlavně na další časové ztráty spojené s náročnějším postprocessingem. Na obrázku (č. 9) lze vidět, jak může vhodná volba těchto podmínek zrychlit proces. [13]

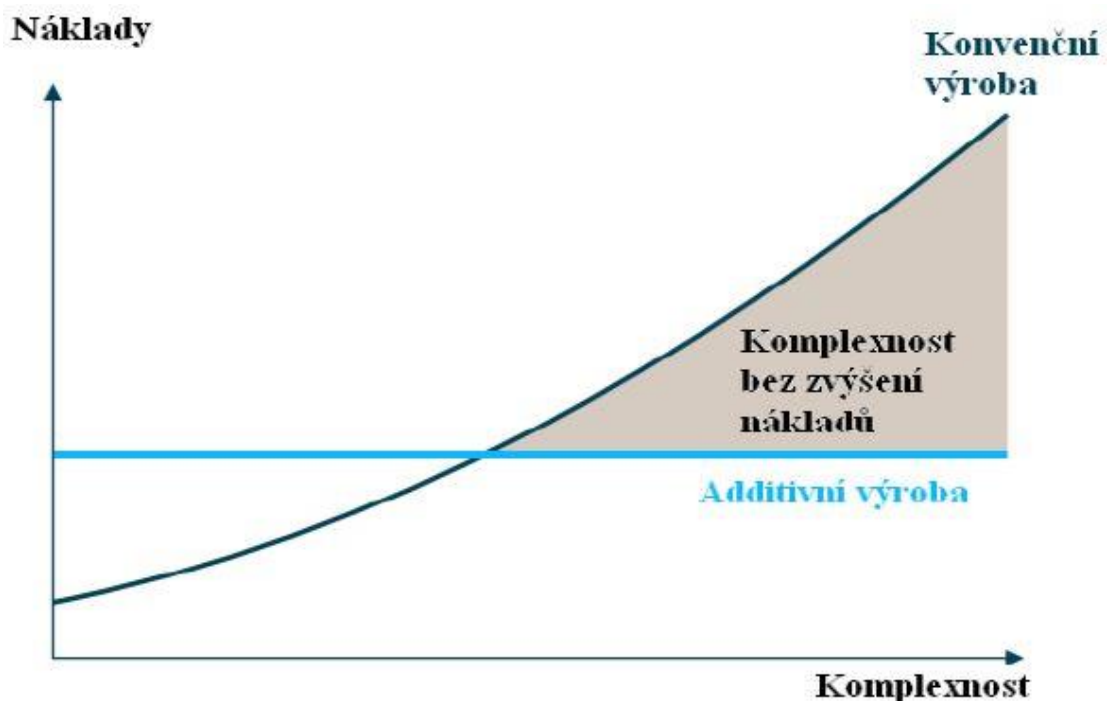


Obrázek č. 11 Vhodné umístění modelu v komoře 3D tiskárny [13]

5.5 Výhody aditivních technologií

Mezi hlavní přednosti aditivní výroby, jak vychází z grafu (č.3), patří nezávislost na složitost výroby. Tato pozitiva jsou využívána především při vývoji nových prototypů. Jako velkou kladnou vlastnost je považováno to, že díky 3D tisku lze integrovat několik součástí dohromady a tím tak redukovat jak hmotnost celé sestavy, tak i ušetřit náklady a čas spojené s montáží jednotlivých komponent do sebe. [15]

- Při konstrukci není nutné hledět na složitost výroby
- Náklady na výrobu tvarově složitých součástí jsou srovnatelné s náklady na výrobu součástí jednodušších
- O nákladech rozhoduje především doba stavění (průřez a výška výrobku)
- Snadná adaptace na změnu výroby
- Možnost výroby různých tvarů a komplexnost
- Krátké dodací lhůty
- Nenáročné požadavky na operátora



Graf č. 3 Aditivní technologie v závislosti na nákladech a komplexnosti [15]

5.6 Nevýhody aditivních technologií

V kapitole 5.1 bylo uvedeno, že 3D technologie usnadňuje montáž a tvoří celou soustavu více komplexní. Má to ale určité nedostatky. V případě poruchy či poškození malé části musí dojít k opravě nebo výměně celého integrovaného členu, což může naopak způsobit větší potíže.

- Rozdíly v mechanických vlastnostech v porovnání s konvenčními metodami
- Nutnost podpěr, aby se součást nedeformovala
- Složitější odladění stroje i výrobního procesu
- Produktivita
 - Při výrobě méně složitých částí je doba značně delší
 - Nutnost tvorby výrobku vrstvu po vrstvě

5.7 Vývojové trendy v oblasti aditivních technologií







Poznámka: Následující kapitola shrnuje čistě teoretické myšlenky, týkající se případného směru, jakým by se 3D tisk v budoucnosti mohl ubírat.

Byla provedena analýza metodou Delphi 65ti odborníky, kteří vydali 1172 kvalitativních komentářů a návrhů, díky kterým bylo možno predikovat budoucnost aditivních technologií v roce 2030. Dle této předpovědi budou aditivní technologie zasahovat téměř do všech odvětví průmyslu. Aditivní výroba bude rozvinuta natolik, že bude možno ji distribuovat do domácností po celém světě a v každém městě bude společnost, která bude schopna tisknout jakékoliv náhradní díly. Díky této inovaci nebude nutné prodávat hotové výrobky, jejichž distribuce ke koncovým zákazníkům zahrnuje logistiku dopravy, balení atd., ale budou se prodávat pouze digitální soubory – modely, které si každý bude moci vytisknout přímo u sebe, podobně jako tomu bylo u distribuce hudby pomocí formátu MP3. Budou k tomu využívány on-line dostupné repositáře, kde bude vše dostupné. Toto platí pro tvarově a technologicky nenáročné sestavy a díly, zbytek bude tisknut ve specializovaných dílnách. Dojde ke značnému snížení uhlíkové stopy výroby a dopravy.

Dále v roce 2030 nastane snížení “času uvedení na trh“ od návrhu až po výrobu požadovaného dílu právě díky aditivním technologiím. V roce 2030 bude také větší podíl aditivně vyráběných komponentů vůči konvenčně vyráběným ve všech průmyslových odvětvích, a to až o 10%. Bude rozvinut 3D tisk lidských orgánů, které budou schopny plně nahradit nedostačující dárcovství orgánů. Jelikož bude velké množství tzv. open source licencí, bude nutné zavést také nové regulace a opatření, která budou upřesňovat právě tyto problémy, týkající se i duševního vlastnictví.[12]

5.8 Doporučená opatření laboratoře

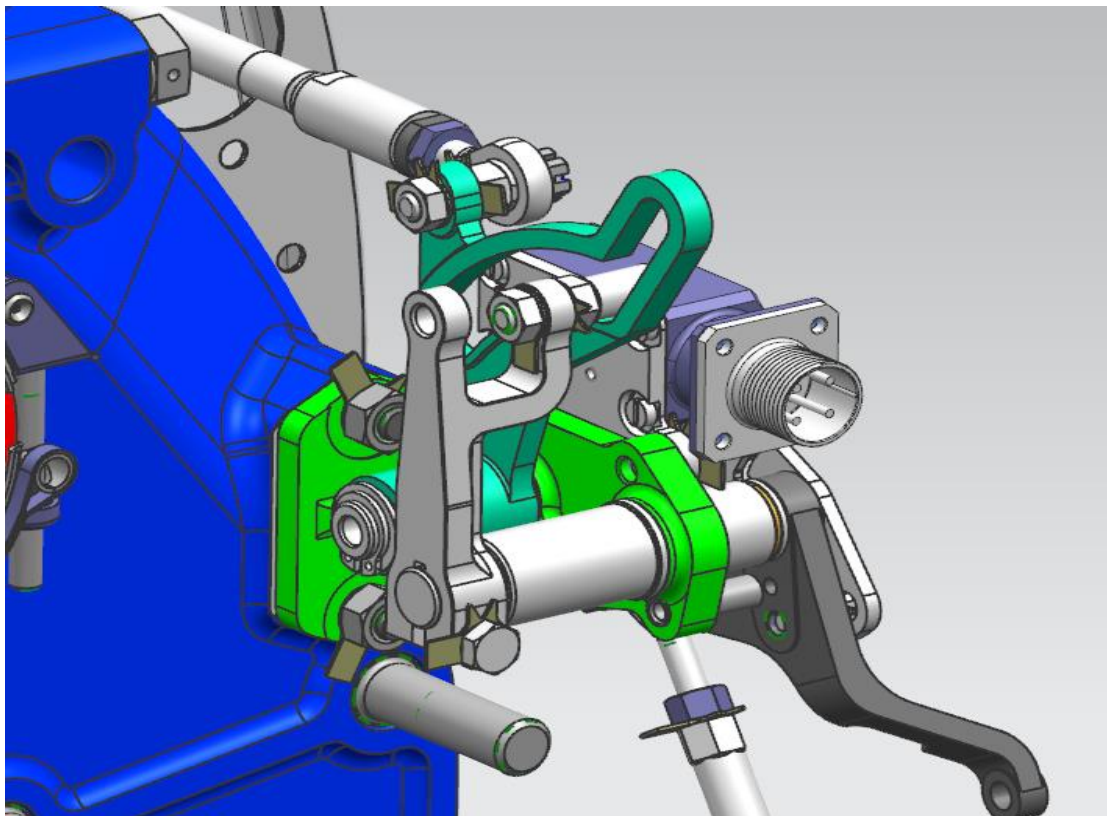
Při manipulaci s kovovým práškem musí mít obsluha ochranné pomůcky. Nutností jsou gumové rukavice, ochranné brýle a respirátor, aby nedošlo ke vnesení prášku do očí, či do úst. Pro hašení přístrojů nesmí být použit vodní nebo tlakový hasící přístroj. [17]

BEZPEČNOSTNÍ POKYNY – PRAVIDLA BEZPEČNOSTI PRÁCE SAFETY INFORMATION – SAFETY RULES	
PorG105 Laboratoř aditivní výroby – Laboratory of Additive Manufacturing	
	Noste ochranné brýle, masku a ochranný oděv. <i>Wear protective eyewear, dust masks and protective clothing</i>
	Nedovolte rozvíření práškového kovu. <i>Do not allow the metallic powder or waste products to form a dust cloud.</i>
	Zákaz konzumace jídla, nápojů a kouření. <i>Never eat, drink or smoke in the vicinity of the Renishaw AM system or components produced by the process that have not been properly cleaned.</i>
	Po manipulaci s kovovým práškem a vytištěnými díly si umyjte ruce mýdlem pod tekoucí vodou. <i>Wash hands thoroughly with soap and water after handling.</i>
	Potenciální nebezpečí výbuchu. <i>Ex-Potentially explosive atmosphere.</i>
	Potenciální vznik statických výbojů. Používejte antistatickou obuv. <i>ESD Avoid static discharge, wear ESD foot wear.</i>

Obrázek č. 12 Bezpečnostní tabule [17]

6 Topologická optimalizace vybraného komponentu

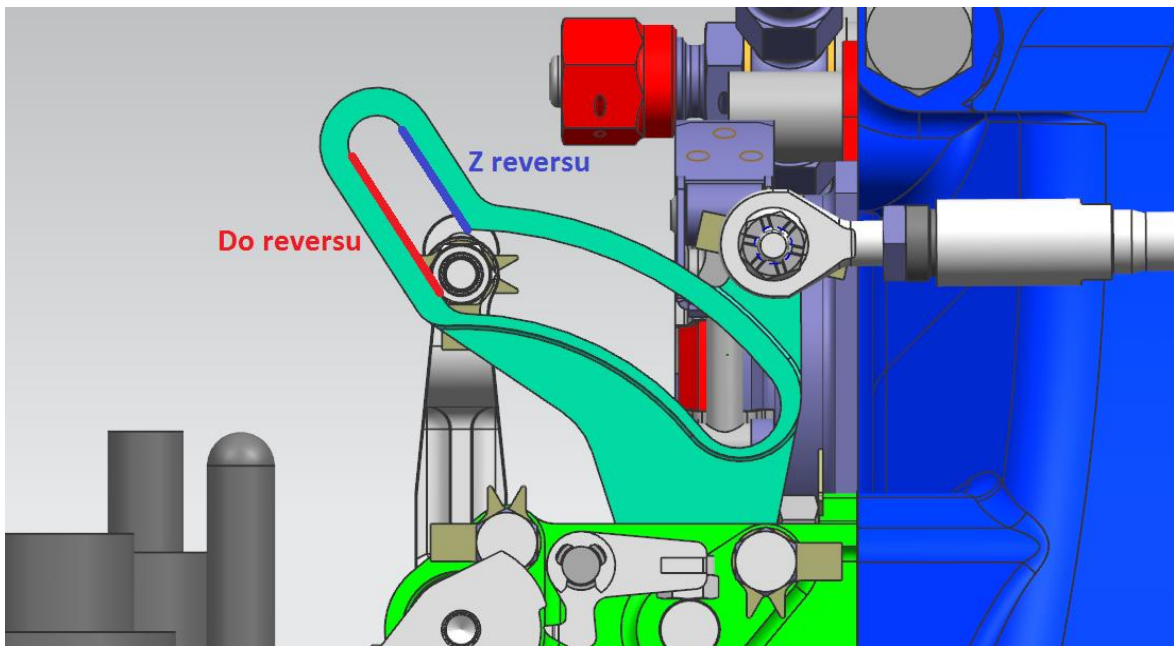
V praktické části této práce je cílem výpočet napětí, topologická optimalizace a porovnání referenční a optimalizované ovládací páčky turbovrtulového motoru H80-200 společnosti GE Aviation Czech. Páčka je součástí mechanismu, který slouží k natáčení listů vrtule Avia AV-725 do beta úhlu a ovládnání motoru, což umožňuje letadlu zpomalit po dosednutí na zem. Páčka je šedé těleso na obrázku (č.13). Součástí obdržných dat byla její 3D geometrie, zatížení a materiál. Páčka není tepelně zatížena. Prvním krokem bylo součást analyzovat a stanovit kinematický a statický rozbor, pomocí kterého byla určena síla, kterou je páčka namáhána na ohyb a na krut. Funkční rozměry topologicky optimalizované páčky zůstaly nezměněny. Výpočty byly provedeny v softwaru Altair HyperWorks 2017 – Student edition.



Obrázek č. 13 Původní vzhled páčky

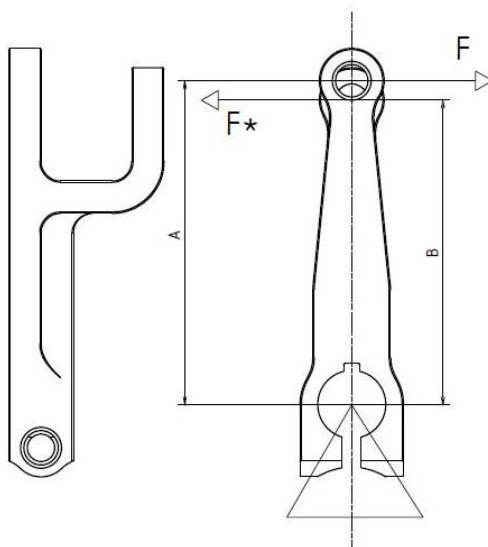
6.1 Kinematický a statický rozbor

Páčka je vodorovně tažena případně tlačena ovládacím zařízením v kabině letadla silou, jejíž velikost byla naměřena v několika různých režimech motoru. Byly provedeny zkoušky motoru - 3 pomalé akcelerace, 3 rychlé akcelerace, 3 pomalé akcelerace do reversu, 3 vstřícné akcelerace s 2-sekundovou výdrží na volnoběhu a 1 rychlá akcelerace (1 sekunda) do reverzu. Maximální naměřenou hodnotou byla síla při rychlé akceleraci do reversu (1 sekunda), jejíž hodnota byla 435 N, při níž je páčka namáhána na tah. Funkce a pohyb páčky byl simulován kinematickým rozbohem ve formě paralelogramu. Je-li známa síla a její poloha působící na páčku, lze pomocí geometrie a momentové rovnice vypočítat sílu, která působí v bodě kontaktu se sousedním tělesem. Tato síla vyšla větší, než ovládací síla z kokpitu, jelikož působí na menším rameni. Nazýváme tuto sílu jako ekvivalentní a její hodnota je 464,15 N.



Obrázek č. 14 Funkce páčky

6.1.1 Výpočet ekvivalentní síly



Obrázek č. 15 Výpočet ekvivalentní síly

Zadané hodnoty jsou $A=47$ mm. $B=50,15$ mm. Síla $F=435$ N. Bude řešena momentová rovnice, pro kterou platí vztah:

$$M_v = \sum_i M_i = \sum_i r_i \times F_i \quad (9.1)$$

Z podmínek silové rovnováhy vyplývá, že výsledný moment bude nulový. Potom lze momentovou rovnici upravit na tvar:

$$F \times B = F^* \times A \quad (9.2)$$

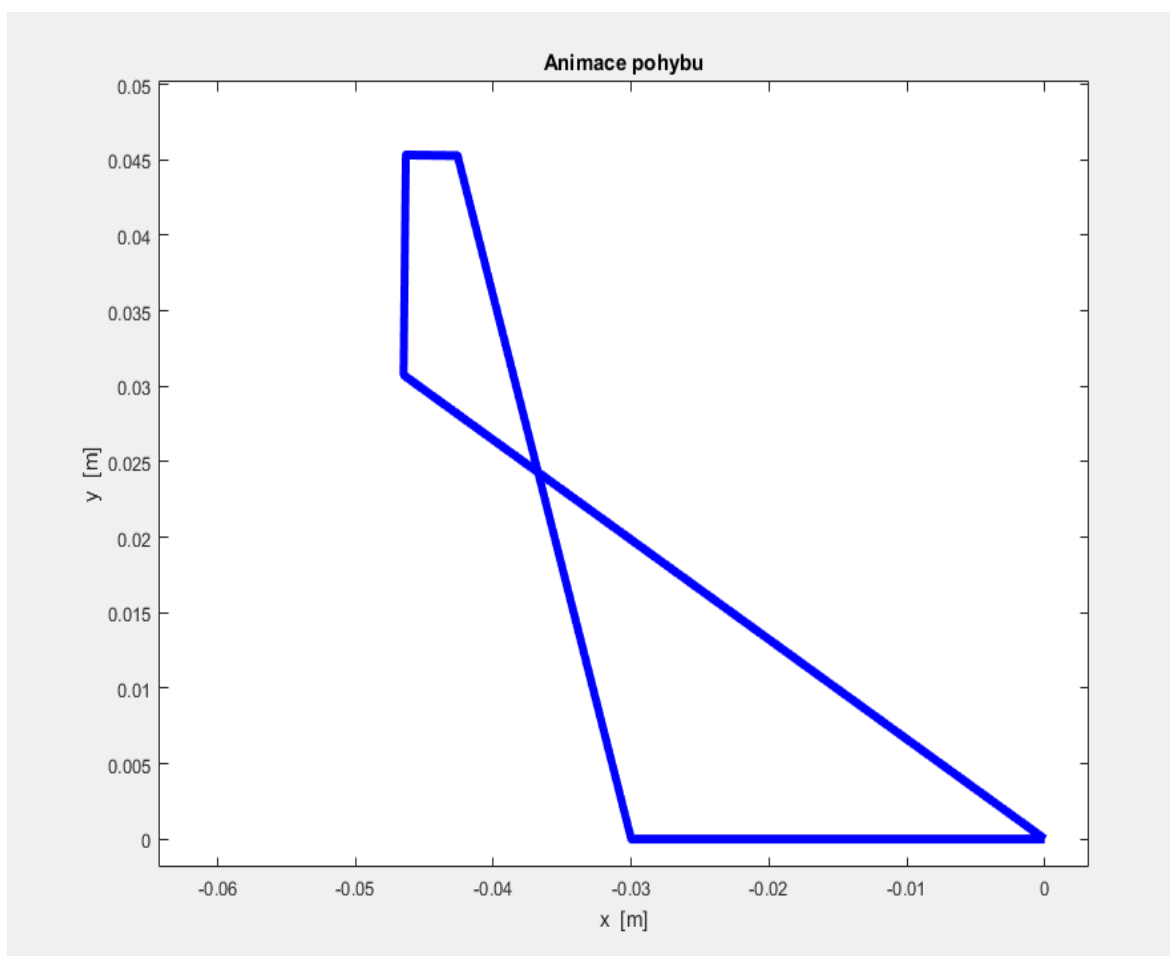
Do této rovnice dosadíme hodnoty, které známe:

$$435 \times 50,15 = F^* \times 47 \quad (9.3)$$

Výsledná síla

$$\mathbf{F^* = 464,15 N}$$

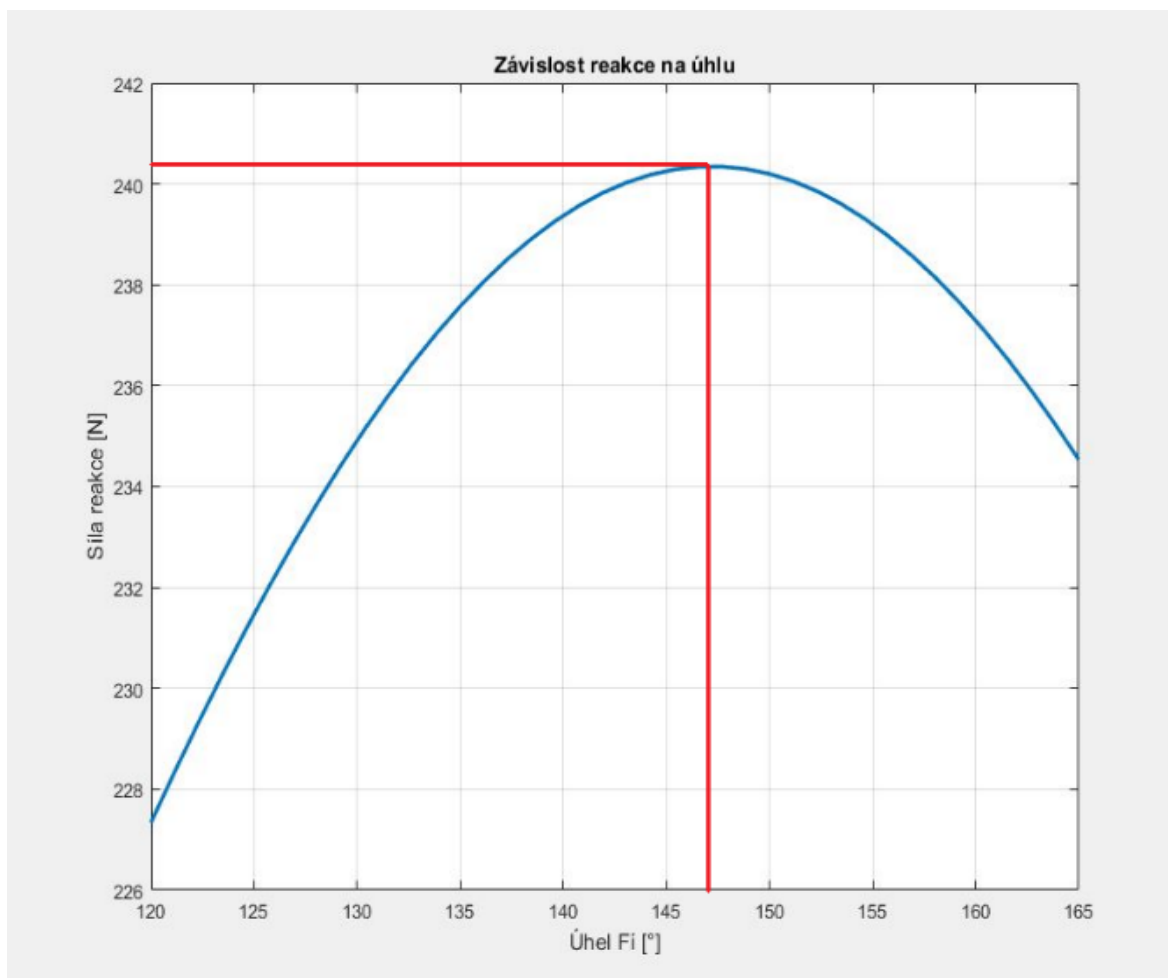
Cílem je zjistit velikost reakční síly, abych jí mohl použít jako jednu ze vstupních parametrů do procesu topologické optimalizace. Přejdu tedy do tangenciální roviny, ve které mohu tuto úlohu řešit jako rovinnou úlohu s jedním stupněm volnosti. Jelikož je síla přenášena pomocí valivé vazby, bude naše hledaná výsledná reakční síla kolmá na kontaktní rovinu sousedního tělesa. Musí být vyřešen stav, kdy nabývá výsledná reakční síla maximálních hodnot a na tento stav bude poté součást dimenzována. V grafu (č.4) je ukázán model pohybu tělesa.



Graf č.4 Model pro animaci pohybu

Pomocí statických rovnic rovnováhy a maticového součinu byla soustava rozdělena na 3 tělesa. Pomocí softwaru Matlab byla úloha vyřešena a byl vynesena graf závislosti reakční síly na úhlu natočení φ . V příloze této práce se nachází textový dokument, obsahující zdrojový kód, použitý k výpočtu reakce.

Následně pomocí funkce “max“ byla vyhodnocena největší reakční síla pod úhlem $147^{\circ}46'$ a její hodnota byla 240,3446 N.



Graf č. 5 Závislost velikosti reakce na natočení páčky

Poznámka: Síla je v grafu znázorněna v absolutní hodnotě pomocí funkce “abs“.

6.2 MKP analýza

Dalším krokem byl výpočet deformací a napětí v získaném mezním stavu. Tato analýza byla nutným předpokladem k získání vstupních podmínek k topologické optimalizaci. Nejprve byl vložen 3D model ve formátu “.stp“. Byl definován 3-osý souřadnicový systém pro páčku. Dále bylo potřeba vytvořit několik bodů, se kterými se bude dále pracovat. V již vytvořeném souřadnicovém systému byly definovány pomocí dvou bodů dva směrové vektory na přímkách, které jsou nositelkami výsledných působících sil. Oba vektory leží v rovině XZ. Vektor V_1 je vůči ose X pootočen o $37^\circ 11'$ a počáteční bod leží v bodě S_1 , který leží ve středu horního výše situovaného otvoru. Druhý směrový vektor V_2 působí v opačném směru jako reakce ze sousedního tělesa a je pootočen o $20^\circ 9'$. Počáteční bod S_2 byl opět umístěn ve středu horního níže situovaného otvoru.

Poznámka: Na obrázku (č. 16) jsou znázorněny body S_1 a S_2

Na tyto vektory byly poté aplikovány síly F_1 o velikosti 435 N, ležící na vektoru V_1 . A síla F_2 o velikosti 240,5 N ležící na vektoru V_2 . Aby mohly být síly přenášeny do páčky, musel být vytvořen imaginární komponent s názvem RBE3 (Rigid body element). Tomuto prvku se musí udělit závislé a nezávislé body. Jako nezávislé body byla zvolena válcová vnitřní plocha, která je ve skutečnosti v přímém kontaktu s dalšími tělesy, a kde dochází k přenosu zatížení. Závislý bod byl opět bod S_1 a S_2 . Páčka byla ve spodní části vetknuta. Bylo tedy odebráno všech 6 stupňů volnosti, a to pohyb ve směru osy x, y, z a natočení kolem osy x, y, a z.

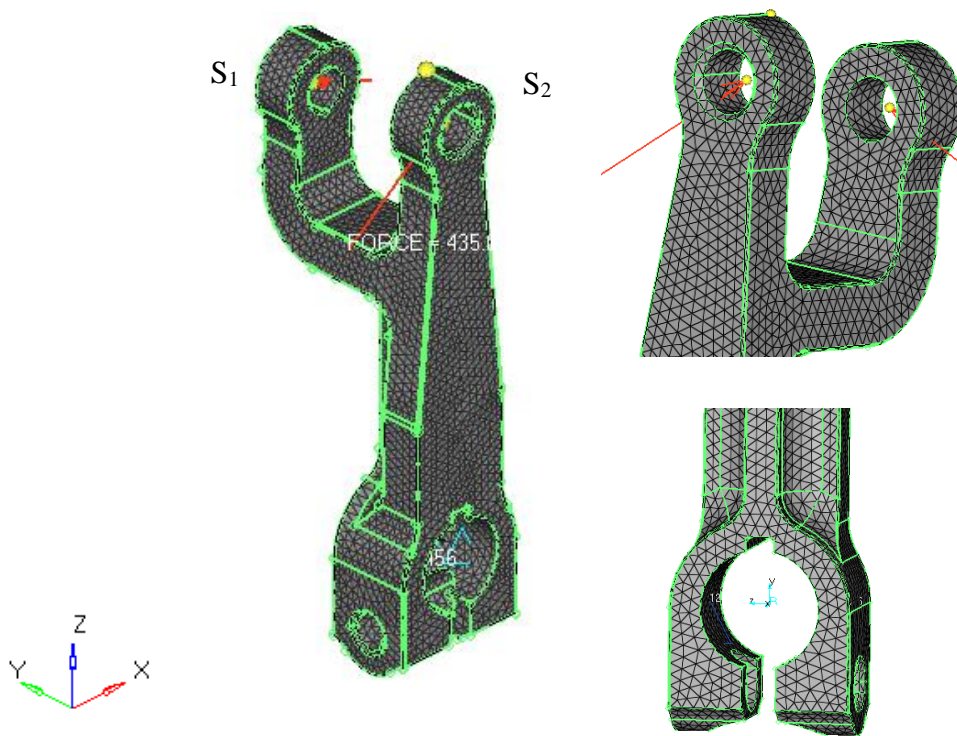
Nejdříve byl definován materiál ocel a poté byly páčce přiděleny materiálové vlastnosti. Běžná ocel s Youngovým modulem $E = 210$ MPa, Poissonovou konstantou $\nu = 0,3$ a modulem pružnosti ve smyku $G = 81$ MPa. Tyto materiálové vlastnosti byly přiřazeny celé páčce bez výjimek. A byla provedena diskretizace modelu geometrie. Jednalo se o automatizované objemové tetra síťování 2. řádu o velikosti 1 mm s celkovým počtem 28717 elementů a 47982 uzlů.

6.2.1 Zadání parametrů do softwaru

Tabulka č. 3 Postup zadávání jednotlivých funkcí do softwaru

	Panel	Funkce	Parametr	Hodnota	Cílový subjekt
1	Geometry	Systems → Axis direction → Create	-	-	System collector
2	Geometry	Nodes → Create	-	-	Nodes
3	1D	Vectors → Vector creation methods → Two nodes → Create	Vector size	100%	Vector collector
4	Materials	Material name → Type → Card image → Create	Material name Type Card image	Steel Isotrop MAT1	Materials
5	Properties	Property name → Type → Card image → Material → Create	Property name Type Card image Material	Steel_p All PSOLID Steel	Properties
6	3D	Tetra mesh → Enclosed volume → 2D → 3D → Element size → Elems to Current Comp → Create	Tetra mesh Enclosed volume 2D type 3D type Element size	Volume tetra Solids Trias Tetras 1	Mesh
7	Collectors	Components → 1D → rbe3 → dependent → Independent → By geoms → Surfs → Create	Dependent Independent	Calculate Nodes	RBE3
8	Analysis	Forces → Nodes → Vector → Magnitude → Create	Magnitude 1 Magnitude 2 Load type Relative size	240,5 435 Force 100	Forces
9	Analysis	Constraints → By geoms → Surfs → Load types → Create	Relative size Load type	10 SPC	Constrains
10	Analysis	Name → SPC → Load → Linear static → Create	Name	Zatizeni	Load steps
11	Analysis	OptiStruct → Run options → OptiStruct	Run options	Optimization	OptiStruct

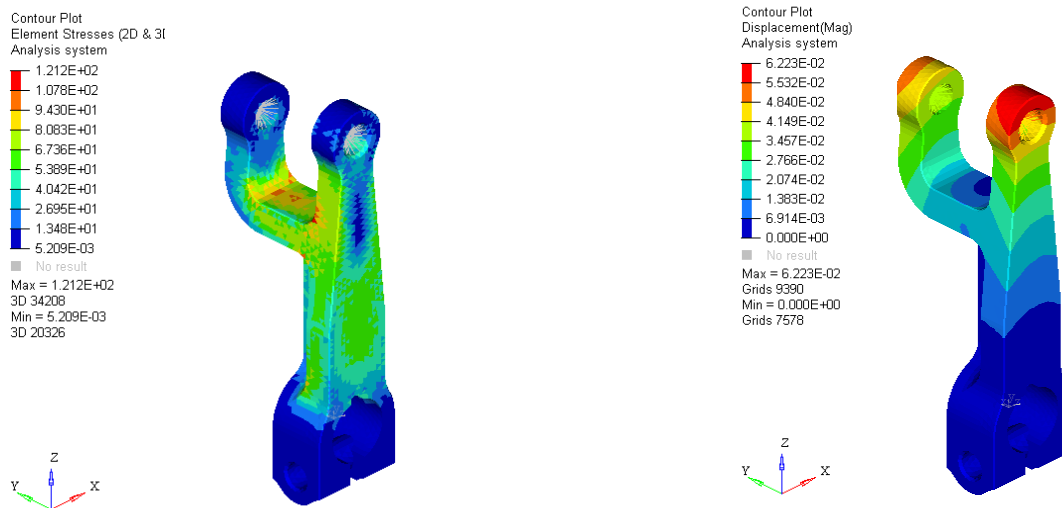
Výsledek parametrizovaného modelu připraveného k výpočtu jde vidět na obrázku (č.16). Velká pozornost musí být věnována především zvolení správného bodu pro umístění sil a uložení. Také je nutné vyvarovat se případné chybě ve velikosti elementů. Takto nadefinovaný model by po spuštění výpočtu neměl generovat žádné chyby a úspěšně proběhnout.



Obrázek č. 16 Rozsítování páčky včetně detailů

6.2.2 Výsledek analýzy

Poté byla spuštěna analýza OptiStruct. Proběhl výpočet a byla získána data pro potřebné deformace a napětí v navrhované páčce. Výstupními hodnotami pro páčku bylo softwarem vypočteno maximální napětí a deformace. V nejnamáhanější oblasti páčky, tedy na vnitřní straně bylo napětí 121,2 MPa a deformace v bodě blízkosti vstupní síly 6,22 μm . Tato maxima však ve výpočtu potřebná dále nebudou. Pro další průběh jsem zvolil jako výchozí body S_1 , S_2 , ve kterých bude později stanovené omezení z hlediska posuvu. V bodě S_1 pak bylo celkový posuv vypočten na 4,67 μm . V bodě S_2 to bylo 4,10 μm .



Obrázek č. 17 Napětí a deformace původní páčky

6.3 Návrh nové páčky

6.3.1 Topologická optimalizace

Pro tvorbu nové páčky bylo nejprve nutné vytvořit obálku. Tedy takový objekt, který se podobá původnímu tvaru, ale je zaobalen materiálem, ze kterého bude výpočetní software vycházet. Omezení této obálky bylo v našem případě prostorové, avšak ne značně. Kolem páky v motoru není v těsné blízkosti žádné těleso, kterému by páčka nesměla překážet. Dále pak muselo být zachováno ukotvení páčky a základní rozměry otvorů. Z konstrukčního hlediska byly ponechány velikosti průměrů děr a jejich rozmístění. Jiná omezení však nebyla. V softwaru Autodesk Inventor byl vytvořen model přesně s těmito požadavky. Po vymodelování a exportování tohoto modelu do formátu STEP, který je čitelný i pro software Hypermesh, byl model opět nahrán do Hypermesh. V tomto prostředí bylo nutné postupovat stejně, jako v podkapitole 9.2. Opět byly vloženy síly, pod stejným úhlem, jako v původní páčce, jelikož tyto podmínky se nemění. Do spodního otvoru bylo vloženo vetknutí.

Byl vytvořen materiál “ocel“, avšak abychom byli schopni přiřadit materiálové vlastnosti dané oblasti, musel být nejprve vytvořeny dva nové komponenty s názvy “Design“ a “Non - design“. Tyto dvě oblasti demonstrují dělení elementů v průběhu procesu optimalizace. Oběma komponentům byl přiřazen materiál ocel, avšak oblast pojmenovaná jako “Non design“ nebude podléhat jakýmkoliv návrhům optimalizace softwarem.

Prvním krokem v nastavení optimalizace bylo definovat hlavní designovou proměnnou. Ta byla definována jako topologická. Dále bylo potřeba zavést jednotlivá omezení a odezvy. Odezvy byly dvojího typu. První se týkala celkového statického posunutí daného bodu. V našem případě body S_1 a S_2 . Druhá odezva byla objemová, která cílí na oblast, která bude upravována. Odezvy byly pak použity k vytvoření omezení. Omezení už byla pouze jednoho druhu, a to celková deformace bodu, která byla výsledkem analýzy (viz. Kapitola 9.2) Bodu S_1 bylo dovoleno maximální posunutí $0,46 \mu\text{m}$ a bodu S_2 $0,41 \mu\text{m}$. V posledním kroku byl nastaven hlavní cíl analýzy a tím byla minimalizace objemu.

6.3.2 Zadání parametrů do softwaru

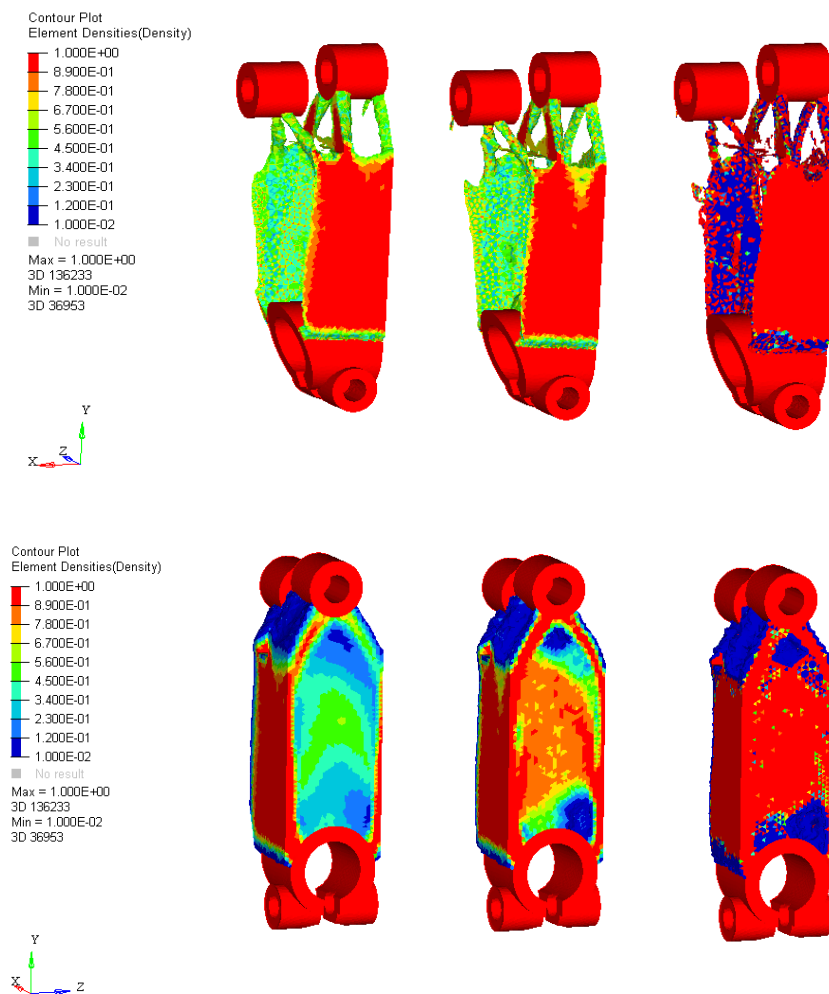
Tabulka č. 4. Zadání parametrů do softwaru

	Panel	Funkce	Parametr	Hodnota	Cílový subjekt
1	Analysis	Optimization → Topology → Create	Desvar Type Props	Topology PSOLID Design	Design variables
2	Analysis	Responses → No region ID → Create	Name Response type	Displ_1 Displ_2 Static displacement	Optimization responses
3	Analysis	Responses → No region ID → Create	Name Response type	Volume Volume	Optimization responses
4	Analysis	D constraints → Constraints → Upper bound → Create	Constraint Upper bound Response Load step	Const_1 Const_2 0,041 0,047 Displ_1 Displ_2 Sila_1 Sila_2	Optimization constraints
5	Analysis	Objective → min →Create	Response	Volume	Objectives
6	Analysis	OptiStruct → save as → OptiStruct	-	-	OptiStruct

Poznámka: V následující tabulce se předpokládá, že vše z kapitoly 9.2 je již v modelu nastavené pro analýzu a může se pokračovat v nastavování parametrů pro optimalizaci.

6.3.3 Výsledek topologické optimalizace v softwaru

Po úspěšném spuštění výpočtu, a pakliže řešení konvergovalo ke konečnému počtu iterací, byly automaticky spuštěny výsledky, které vykazují model, ze kterého jsem vycházel. Celkově bylo provedeno 42 iterací. Poslední iterace by měla reprezentovat nejpřesnější výsledky, přibližující se daným požadavkům. Na obrázku (č.18) lze vidět 10., 20. a 40. iteraci a také, jaká místa v páčce jsou nezbytná, tedy místa, kterým byla přiřazena hustota o velikosti 1. Zbylá místa bylo možné odebrat.



Obrázek č. 18 Iterace při topologické optimalizaci

6.3.4 Modelování optimalizovaného tvaru

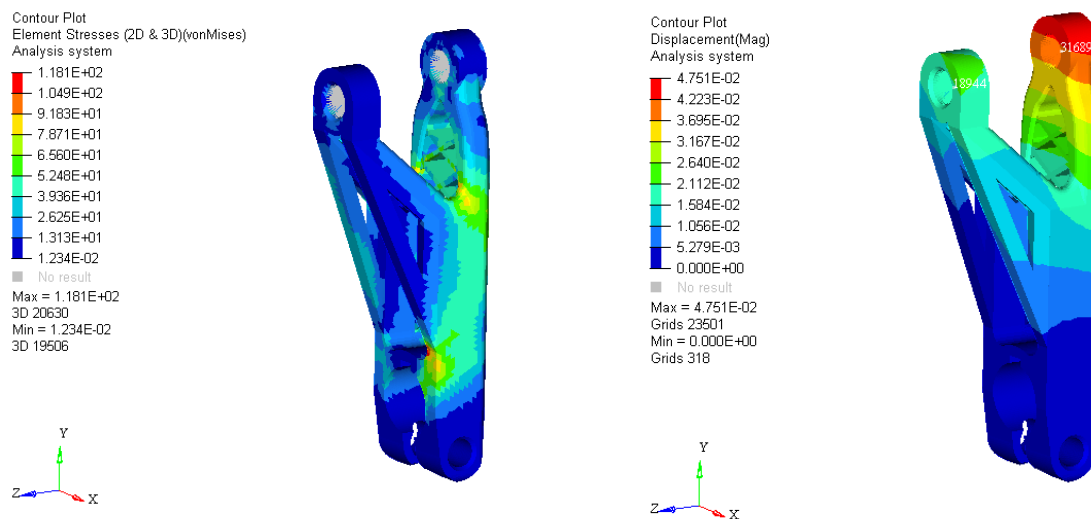
Z výsledků, plynoucích z optimalizace, byl stanoven přibližný tvar komponentu, avšak bylo zapotřebí výsledky vyhladit a přemodelovat do použitelné podoby. Celkově jsem modeloval 12 objektů, které musely být postupně zkoušeny a analyzovány. Až poslední varianta splňovala požadované parametry. Zvolil jsem mřížovou konstrukci, která perfektně plní funkci odlehčení, ale dokáže stabilně přenést dané zatížení. Toto mřížování jsem použil jak na zadní straně páčky, tak na podpůrném rameni. Bylo odebráno střední žebro, ale byla použita dvě vysunutí, která plní stejnou funkci. Dále pak bylo provedeno napojení dvou horních otvorů pomocí vysunuté plochy mezikruží. Spodní část dílu, která je nasazena na hřídel zůstala beze změny. Bylo provedeno pouze ubrání materiálu o 0,5 mm kolem dvou spodních otvorů. Celkový vzhled páčky byl poté upravován několika zaobleními, aby nebylo příliš velké množství ostrých hran. Na snímku (č.19) je zobrazeno několik pohledů finální verze navrhované páčky.



Obrázek č. 19 Pohledy nově vytvořené páčky

6.3.5 Pevnostní analýza optimalizovaného dílu

Po vymodelování páčky byla provedena analýza stejným způsobem, jako v odstavci 9.2.1 s jedním rozdílem. Z důvodu větší tvarové náročnosti a z hlediska získání přesnějších výsledků byla volena velikost elementů 0,9 mm. Menší velikost členů však již nebyla umožněna licencí softwaru, která je omezena na 100 000 elementů. Celkem bylo vytvořeno 75715 bodů a 42858 elementů. Analýza byla provedena, abychom mohli ověřit, že výsledné napětí, ale hlavně deformace daných bodů S_1 a S_2 , které byly definovány, nepřekračují meze, stanovené na základě analýzy původní páčky. Výsledné maximální napětí bylo 118,1 MPa, což je o 3,1 MPa méně než v původní páčce. Výsledný posuv bodů S_1 a S_2 byly také na lepších hodnotách. A to 3,939 μm v bodě S_1 a 1,342 μm v bodě S_2 . V bodě S_2 tedy dochází k více než 2,5 násobnému zlepšení. Z obrázku (č.20) je patrné, že největšího napětí bylo dosaženo pod pravou podpěrou ramene. Napětí je poměrně rovnoměrně rozloženo. A v ostatních místech dochází k lepšímu rozložení než v původním případě. Maximální deformace dílu v horním bodě byla 4,751 μm což je opět méně než v případě původní páčky.




Obrázek č. 20 Napětí a deformace nové páčky

6.4 Zhodnocení

V tabulce (č. 5) je provedeno srovnání původní a nově navržené páčky. Celkovou analýzu a následnou topologickou optimalizaci hodnotím jako úspěšnou. Je zřetelně vidět, že veškeré aspekty, které byly požadovány, nová optimalizovaná páčka splňuje. Dokonce zlepšuje některé charakteristiky. Původní díl byl vytvořen jako odlitek s dalšími dokončovacími operacemi k získání potřebných tolerancí. Nově vytvořený komponent bude vytvářen technologií 3D tisku. Díky topologické optimalizaci bylo dosaženo snížení hmotnosti o 0,04 kg, a tedy úspore materiálu přibližně o 10 %. Jsem si vědom toho, že hodnoty, kterých dosahuje deformace bodů je v řádech mikrometrů, což znamená, že by bylo přípustné modelovat páčku tak, aby nedodržela atributy týkající se deformací. Tzn., že další varianta by dosahovala větší hodnoty deformací. Toto zhoršení by však nemělo větší význam na změny funkce páčky, ale bylo by možné dosáhnout ještě větší úspory hmotnosti, což byl hlavní důvod, proč byla optimalizace provedena.

Tabulka č. 5 Srovnání obou páček



HMOTNOST	0,042 kg	0,038 kg
OBJEM	5401,264 mm ³	4702,302 mm ³
MATERIÁL	PH Steel 1.4540	PH Steel 1.4540
MAX. NAPĚTÍ	121,2 MPa	118,1 MPa
MAX. DEFORMACE	6,223 μm	4,751 μm
CENA	71 €	Neznámá

Poznámka: Cenu bude možné odhadnout po stanovení celkového výrobního času, tedy až po uskutečnění 3D tisku.

7 Závěr

Teoretická část bakalářské práce slouží k seznámení s topologickou optimalizací využitou při návrhu komponentu, vyráběného aditivními technologiemi a uvést dostupná softwarová řešení. V kapitole zabývající se topologickou optimalizací jsou zahrnuty její počátky, princip a jednotlivé kroky postupu. Následující kapitola obsahuje rozdělení aditivních technologií, které se využívají především pro výrobu tvarově náročných dílů, jejich historický vznik a rozdělení podle toho, jakým způsobem je využíván a nanášen materiál. Detailněji je popsána metoda DMLS (Direct metal laser sintering). V dalších podkapitolách je uvedena možná konstrukce 3D tiskárny, výroba a příprava materiálu k tisku a druhy laserů. Závěr této kapitoly hodnotí pozitiva a negativa aditivních technologií.

Cílem praktické části této práce bylo provést topologickou optimalizaci vybraného strojního komponentu, kterým byla páčka leteckého motoru, s využitím moderních softwarových řešení. Prvním krokem byla analýza zatížení páčky a vypočítání potřebné reakční síly. Dále jsem provedl pevnostní analýzu původní páčky, ze které jsem obdržel hodnoty maximálního napětí a deformací. Jelikož páčka nebyla prostorově omezena konstrukcí, bylo možné vytvořit 3D model páčky i s vnější obálkou. Tento model jsem poté nahrál do MKP softwaru Hypermesh společně s hodnotami, obdrženy z analýzy. Výsledkem byla bionická struktura, která sloužila jako výchozí vzhled k přemodelování nové páčky. Celkem jsem vytvořil několik modelů, které musely být kontrolně analyzovány, stejně, jako referenční páčka. Výsledný model splňoval podmínky, které byly definovány. Těmi bylo maximální napětí v komponentu a posuv dvou určených bodů. Finální verze páčky měla nižší maximální napětí o 3,1 MPa a deformaci téměř o 35% nižší než její původní verze. Hmotnost byla redukována o 10%. Výsledky topologické optimalizace by se daly využít ke snížení celkové hmotnosti motoru při zachování nebo i zlepšení tuhosti.

8 Seznam použitých zkratek a symbolů

3D – 3 dimension

DMLS – Direct metal laser sintering

SLM – Selective laser melting

FDM – Fused deposition modelling

STL – Stereolithography

SLS – Selective laser sintering

MIT – Massachusetts Institute of Technology

AM – Additive methods

REP – Rotating electrode process

CT – Computed tomography

MRI – Magnetic resonance imaging

CAD – Computer-aided design

FEM – Finite element method

MKP – Metoda konečných prvků

SIMP – Solid isotropic material with penalization

MPa – Megapascal

μm – Mikrometr

Ti – Titan

Co – Cobalt (Kobalt)

Cr – Chrome (Chrom)

Al – Aluminium (Hliník)

CO₂ – Carbon dioxide (Oxid uhličitý)

Ra – Drsnost povrchu

9 Seznam použité literatury

- [1] SINGH, Sunpreet, Seeram RAMAKRISHNA a Rupinder SINGH. Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017, 25, 185-200. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006. ISSN 15266125. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S152661251630161X>
- [2] SIGMUND, Ole a Kurt MAUTE. Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2013, 48(6), 1031-1055. DOI: 10.1007/s00158-013-0978-6. ISSN 1615-147x. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00158-013-0978-6>
- [3] TORRESDAL, Dennis. Flintknapping and Stone Tools Found in Oregon. In: *Puget Sound Knappers* [online]. Oregon, 2010 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: http://www.pugetsoundknappers.com/interesting_stuff/Stone_Tools_in_Oregon.html
- [4] BENDSØE, Martin P. a O. SIGMUND. *Topology optimization: theory, methods, and applications*. New York: Springer, 2003. ISBN 3-540-42992-1.
- [5] MENŠÍK, Martin. *Optimalizace konstrukce skořepiny vozu Praga R1*. Praha, 2017. Diplomová práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
- [6] Topology optimization with OptiStruct. In: *Altair University: Learning and Certification Program* [online]. © 2016 Altair University, b.r. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://certification.altairuniversity.com/pluginfile.php/5934/mod_resource/content/0/Topology_optimization_new.pdf
- [7] Manufacturing constraints. In: *Altair University: Learning and Certification Program* [online]. © 2016 Altair University, b.r. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://certification.altairuniversity.com/pluginfile.php/5936/mod_resource/content/0/Manufacturing%20Constraints.pdf
- [8] *ISO/ASTM 52900:2015 : Additive manufacturing--General principles — Terminology*. First edition. Geneva, Switzerland: ISO/ASTM International 2015, 2015.
- [9] The Types Of 3D Printing. In: *All about 3D printing* [online]. b.r. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing/>
- [10] Stratasys: Direct metal laser sintering. In: *Stratasys* [online]. 2017 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/technologies/direct-metal-laser-sintering>

- [11] N'DRI, N., H.-W. MINDT, B. SHULA, M. MEGAHED, A. PERALTA, P. KANTZOS a J. NEUMANN. DMLS Process Modelling and Validation. *TMS 2015 144th Annual Meeting & Exhibition* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 389-396 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1007/978-3-319-48127-2_49. ISBN 978-3-319-48608-6. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-48127-2_49
- [12] JIANG, Ruth, Robin KLEER a Frank T. PILLER. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technological Forecasting and Social Change* [online]. 2017, 117, 84-97 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.01.006. ISSN 00401625. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162517300276>
- [13] PAGÁČ, Marek. Začínáme s 3D tiskem kovů #3: Předvýrobní etapa (topologická optimalizace). In: *Konstruktor* [online]. Brno: Nová média, 2017 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.konstruktor.cz/2017/01/26/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobní-etapa-topologická-optimalizace/>
- [14] SAVINI, A. a G.G. SAVINI. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON)*. IEEE, 2015, , 1-8. DOI: 10.1109/HISTELCON.2015.7307314. ISBN 978-1-5090-0065-4. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7307314/>
- [15] PAGÁČ, Marek. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). In: *Konstruktor* [online]. Výstaviště 405/1, 603 00 Brno: Vydavatelství Nová média, 2016 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.konstruktor.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [16] SHELLABEAR, M a O NYRHILÄ. *DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART*. Prezentováno na LANE konferenci, Erlangen, Německo, 2004, , 1-12.
- [17] PAGÁČ, Marek. Začínáme s 3D tiskem kovů #1: Příprava laboratoře. In: *Konstruktor* [online]. Výstaviště 405/1, 603 00 Brno: Vydavatelství Nová média, 2016 [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: <https://www.konstruktor.cz/2016/10/10/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-1/>
- [18] ANDUJAR, Rabindranath. Understanding Finite-Element Modal Analysis. In: *Scicomp* [online]. 2016 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://scicomp.stackexchange.com/q/24697>

10 Seznam grafů

Graf č. 1 Schéma jednotlivých etap vedoucích k finálnímu výrobku.....	9
Graf č. 2 Rozdělení výroby prášků [1].....	23
Graf č. 3 Aditivní technologie v závislosti na nákladech a komplexnosti.....	30
Graf č. 4 Model pro animaci pohybu.....	37
Graf č. 5 Závislost reakční síly na úhlu natočení páčky.....	38

11 Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Souhrn aditivních technologií [9].....	21
Tabulka č. 2 Souhrn hlavních výrobců [1].....	24
Tabulka č. 3 Postup zadávání jednotlivých funkcí do softwaru.....	40
Tabulka č. 4 Zadání parametrů do softwaru.....	44
Tabulka č. 5 Srovnání obou páček.....	48

12 Seznam obrázků

Obrázek č. 1 Ukázka modelovacího prostředí.....	10
Obrázek č. 2 Ukázka vývoje loveckých zbraní [3].....	12
Obrázek č. 3 Izotropní struktura [12].....	14
Obrázek č. 4 Tvarové omezení [6].....	15
Obrázek č. 5 Topologická optimalizace [6].....	16
Obrázek č. 6 Porovnání použití a nepoužití MAXDIM [7].....	17
Obrázek č. 7 Typy sítí [18].....	18
Obrázek č. 8 První Hullova 3D tiskárna [1].....	20
Obrázek č. 9 Vnitřní prostor tiskárny [15].....	26
Obrázek č. 10 Pracovní komora [15].....	27
Obrázek č. 11 Vhodné umístění modelu v komoře [13].....	29
Obrázek č. 12 Bezpečnostní tabule [17].....	33
Obrázek č. 13 Původní vzhled páčky.....	34
Obrázek č. 14 Funkce páčky.....	35
Obrázek č. 15 Výpočet ekvivalentní síly.....	36
Obrázek č. 16 Rozsítování páčky včetně detailů.....	41
Obrázek č. 17 Napětí a deformace původní páčky.....	42
Obrázek č. 18 Iterace při topologické optimalizaci.....	45
Obrázek č. 19 Pohledy nově vytvořené páčky.....	46
Obrázek č. 20 Napětí a deformace nové páčky.....	47