

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

**FAKULTA STROJNÍ**



**MOŽNOSTI TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE PRO**  
**DÍLY VYRÁBĚNÉ TECHNOLOGIÍ KOVOVÉHO 3D**  
**TISKU**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Autor: Bc. Jan Hloušek

Studijní program: (N071TVIN) Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Vladislav Andronov

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hloušek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **409530**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Možnosti topologické optimalizace pro díly vyráběné technologií kovového 3D tisku**

Název diplomové práce anglicky:

**Possibilities of topology optimization for parts produced by metal 3D printing technology**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky aditivní výroby a topologické optimalizace
2. Kritická literární rešerše praktického využití topologické optimalizace v reálných aplikacích
3. Návrh metodiky a provedení experimentu využití topologické optimalizace na reálných dílech
4. Shmutí výsledků a závěrečné vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

REDDY K., Sai Nithin, Vincent MARANAN, Timothy W. SIMPSON, Todd PALMER a Corey J. DICKMAN, 2016. Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component. Volume 2A: 42nd Design Automation Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2016-08-21, -. ISBN 978-0-7918-5010-7. Dostupné z: doi:10.1115/DETC2016-59719  
MANTOVANI, Sara, Ignazio Lo PRESTI, Luca CAVAZZONI a Andrea BALDINI, 2017. Influence of Manufacturing Constraints on the Topology Optimization of an Automotive Dashboard. Procedia Manufacturing. 11, 1700-1708. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.296  
JANKOVICS, Davin a Ahmad BARARI, 2019. Customization of Automotive Structural Components using Additive Manufacturing and Topology Optimization. IFAC-PapersOnLine. 52(10), 212-217. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2019.10.066

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: **02.10.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2023**

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

Ing. Vladislav Andronov  
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

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

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Možnosti topologické optimalizace pro díly vyráběné technologií kovového 3D tisku“ vypracoval samostatně a veškeré použité informační zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsem uvedl na konci této práce v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o autorském právu, o právech souvisejících s autorským právem a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

Podpis: .....

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vladislavu Andronovovi za metodické rady, připomínky a celkové vedení. Dále bych rád poděkoval pracovníkům továrního oddělení Škoda Motorsport, a to především vedoucímu techniky závodního vozu Ing. Aleši Radovi, Ph.D. za příležitost zpracovávat diplomovou práci ve spolupráci s tímto oddělením, Ing. Janu Honetschlägerovi a Mgr. Martinu Kopeckému za cenné rady a příležitost získávat zkušenosti od odborníků v oblasti motosportu ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. Na závěr patří poděkování mé rodině za podporu během celého studia.

## **ANOTACE**

**Vysoká škola:** ..... ČVUT v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** ..... Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Název diplomové práce:** ..... Možnosti topologické optimalizace pro díly vyráběné  
technologii kovového 3D tisku

**Akademický rok:** ..... 2022/2023

**Autor:** ..... Bc. Jan Hloušek

**Vedoucí práce:** ..... Ing. Vladislav Andronov

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce je zaměřena na topologickou optimalizaci reálných dílů závodního speciálu Škoda Fabia RS Rally2. V teoretické části je popsán úvod do problematiky aditivní výroby, na který navazuje popis metody laser powder bed fusion (L-PBF) vhodné pro výrobu takto optimalizovaných dílů. Dále je v práci vytvořeno porovnání L-PBF tiskáren střední třídy a přehled dostupných materiálů pro toto zařízení. V následující části jsou shrnuty reálné aplikace topologické optimalizace v automotive průmyslu. Na základě získaných teoretických poznatků byly vytyčeny cíle praktické části práce. V té je řešena problematika topologické optimalizace skutečných součástí (adaptéru řízení, horního uložení tlumiče a spodní koncovky sloupku řízení). Všechny díly byly zoptimalizovány, kdy nejvíce je rozebrána spodní koncovka sloupku řízení, na jejíž konečné podobě je demonstrována i příprava tisku a porovnány náklady na výrobu.

**Klíčová slova:** aditivní výroba, topologická optimalizace, 3D tisk, L-PBF, motorsport.

## **ROZSAH PRÁCE A PŘÍLOH**

Počet stran..... 76

Počet obrázků..... 52

Počet tabulek..... 18

Počet rovnic ..... 6

## ANNOTATION

**University:**.....CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

**Department:**.....Department of machining, process planning and metrology

**Title of work:** .....Possibilities of topology optimization for parts produced by  
metal 3D printing technology

**Academic year:** .....2022/2023

**Author:**.....Bc. Jan Hloušek

**Supervisor:**.....Ing. Vladislav Andronov

## ABSTRACT

This diploma thesis is focused on topological optimisation of real parts of the Škoda Fabia RS Rally2 racing special. The theoretical part provides an introduction to the issue of additive manufacturing, followed by a description of the laser powder bed fusion (L-PBF) method which is suitable for production of optimised parts. In addition to this, a comparison of mid-range L-PBF printers is provided, as is an overview of the available materials for these devices. The following part of the thesis provides an overview of instances found of application of topological optimisation in the automotive industry. The objectives of the practical part of the thesis were determined on the basis of the theoretical knowledge which was acquired. This practical part addresses the issue of topological optimisation of real components (a steering adapter, upper shock absorber mounting and lower steering column end cap). All of the parts were optimised, the lower steering column end cap having been analysed most, the final form of which is also used to demonstrate print preparation and to compare production costs.

**Keywords:** additive manufacturing, topology optimization, 3D print, L-PBF, motorsport.

## VOLUME OF WORK

Number of pages .....76

Number of pictures.....52

Number of tables .....18

Number of equations .....6

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ADITIVNÍ VÝROBY A TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE.....</b>	<b>10</b>
1.1 Z historie aditivní výroby .....	10
1.2 Výhody a omezení aditivních technologií.....	12
1.3 Laser powder bed fusion .....	13
1.3.1 Přehled vybraných tiskáren pro technologii L-PBF.....	15
1.3.2 Přehled materiálů pro technologii L-PBF.....	22
1.4 Topologická optimalizace.....	24
1.4.1 Obecný proces výpočtu .....	24
1.4.2 Metoda SIMP .....	25
1.4.3 Metoda ESO/BESO.....	26
<b>2 KRITICKÁ LITERÁRNÍ REŠERŠE PRAKTICKÉHO VYUŽITÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE V REÁLNÝCH APLIKACÍCH.....</b>	<b>28</b>
2.1 Těhlice formule student.....	28
2.2 Spodní uložení pružiny.....	31
2.3 Skříň pohonu elektromobilu Porsche .....	31
2.4 Písty motoru pro Porsche 911 GT2 RS .....	32
2.5 Závěs ramen talířové brány .....	33
2.6 Ramena průmyslového manipulátoru.....	35
2.7 Palubní deska .....	36
2.8 Rám elektromotocyklu Light Rider .....	37
2.9 Shrnutí poznatků z uvedených aplikací topologické optimalizace .....	39
<b>3 NÁVRH METODIKY A PROVEDENÍ EXPERIMENTU VYUŽITÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE NA REÁLNÝCH DÍLECH.....</b>	<b>41</b>
3.1 Výběr dílů a postup optimalizace.....	43

3.2	Analýza možnosti topologické optimalizace adaptéru řízení .....	44
3.2.1	Definice zátěžných stavů .....	44
3.2.2	Výběr materiálu pro 3D tisk .....	45
3.2.3	Definice design space .....	46
3.2.4	Výsledek simulace .....	47
3.3	Analýza možnosti topologické optimalizace horního uložení tlumiče .....	48
3.3.1	Definice zátěžných stavů .....	49
3.3.2	Výběr materiálu pro 3D tisk .....	50
3.3.3	Definice design space .....	50
3.3.4	Výsledek simulace .....	51
3.4	Detailní topologická optimalizace spodní koncovky sloupku řízení .....	52
3.4.1	Definice zátěžných stavů .....	53
3.4.2	Výběr materiálu pro 3D tisk .....	54
3.4.3	Definice design space .....	54
3.4.4	Nastavení simulace .....	55
3.4.5	Výsledky simulací .....	57
3.4.6	Simulace výroby .....	59
3.4.7	Zhodnocení výrobních nákladů .....	61
<b>4</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ A NAZNAČENÍ DALŠÍHO POSTUPU .....</b>	<b>63</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM ROVNIC .....</b>	<b>72</b>
	<b>POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE .....</b>	<b>73</b>



# ÚVOD

V současné době se aditivní technologie stále více rozvíjejí a jsou již nezbytným doplňkem pro konvenční technologie. Zatímco 3D tiskárny pro zpracování plastů jsou dnes již natolik rozšířeny, že mimo konstrukčních firem je již vlastní i zástupci odborné veřejnosti, kovový 3D tisk expanduje výrazně pomaleji. Jeho největším omezením je především pořizovací cena těchto zařízení. Odpisy těchto tiskáren se tak nutně musí promítnout do cen jednotlivých výtisků. I přes vysokou cenu se ovšem 3D tisk kovů dostává do stále širších spekter průmyslu, včetně toho automobilového. Ve spojitosti s topologickou optimalizací součástí se tato technologie dostala i do odvětví motorsportu, kde byla zkoušena na vícero aplikacích. Dosud se však aditivní výroba příliš nedostala do produkce vozů určených pro automobilové rally. Tyto vozy musí mimo odolnosti vůči vysoké zátěži, vykazovat i vysokou spolehlivost. V této práci bude optimalizováno pro 3D tisk několik vybraných dílů závodního automobilu pro tuto disciplínu.

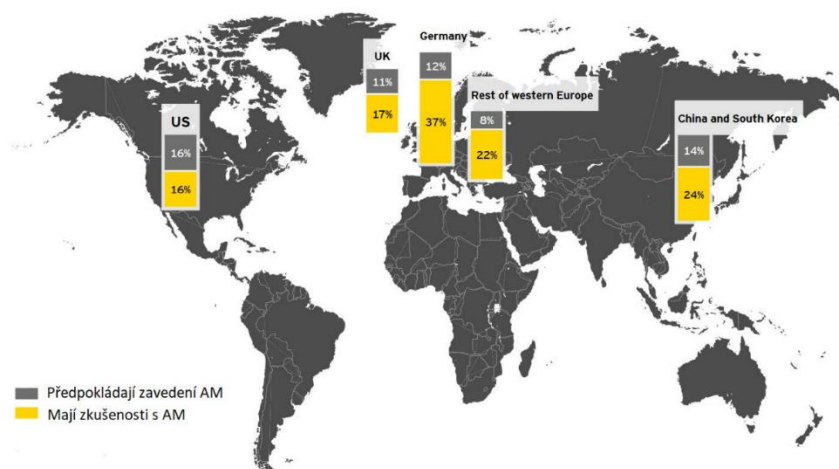
V první části této diplomové práce bude rozvedena problematika aditivní výroby, která se dále soustředí na 3D tisk kovů a tiskárny pro metodu L-PBF. Dále budou popsány metody topologické optimalizace dílů určených pro aditivní výrobu. V poslední části teorie této práce bude provedena kritická rešerše praktického využití topologické optimalizace, která je zaměřena především na reálné aplikace v automotive průmyslu.

Praktická část bude i s přihlédnutím k výsledkům rešerše, zpracována ve spolupráci se společností ŠKODA AUTO a.s., oddělením Škoda Motorsport. Na konkrétních reálných dílech (adaptér řízení, horní uložení tlumiče, spodní koncovka sloupku řízení) aktuálního závodního speciálu této značky – Škoda Fabia RS Rally2, představeného v červnu roku 2022, bude provedena topologická optimalizace.

Cílem této diplomové práce je provedení topologické optimalizace vybraných součástí za účelem snížení hmotnosti těchto dílů při snaze o zachování tuhosti a vlastní funkce. Nakonec bude porovnána i finanční náročnost aditivní a konvenční výroby vybraného dílu. V závěru práce bude provedena diskuze a kritické zhodnocení dosažených výsledků.

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ADITIVNÍ VÝROBY A TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

Technologie aditivní výroby se v současné době velmi rychle rozvíjejí a postupně jsou začleňovány do velkého množství spekter běžné výroby. Obecně je možné říct, že aditivní výroba je přesným opakem obrábění. Zatímco u obrábění je materiál postupně odebírán, u aditivních technologií je naopak po tenkých vrstvách postupně přidáván a zpravidla roztaven pomocí tepelného zdroje. S pojmem aditivní výroba se můžeme v literatuře setkat pod zkratkami: AM (Additive Manufacturing), RP (Rapid Prototyping), 3D printing (3D tisk), LM (Layered Manufacturing), nebo SFF (Solid Free-form Fabrication). Pokud máme CAD model, můžeme ho snadno vyrobit použitím těchto technologií, aniž bychom potřebovali speciální přípravky, nebo nářadí. Vyrobit lze zpravidla téměř jakýkoliv tvar, omezení jsou velmi malá. Velmi často se tyto technologie používají pro výrobu prototypů, před zavedením sériové výroby. [1]

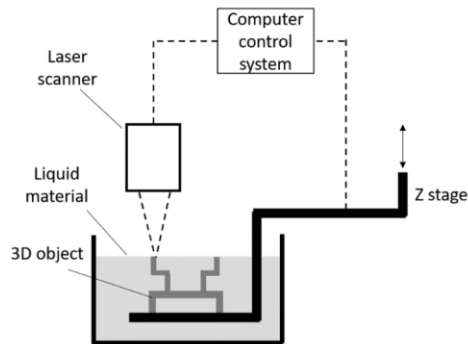


Obrázek 1 Rozložení uplatnění aditivní výroby ve světě [2]

## 1.1 Z historie aditivní výroby

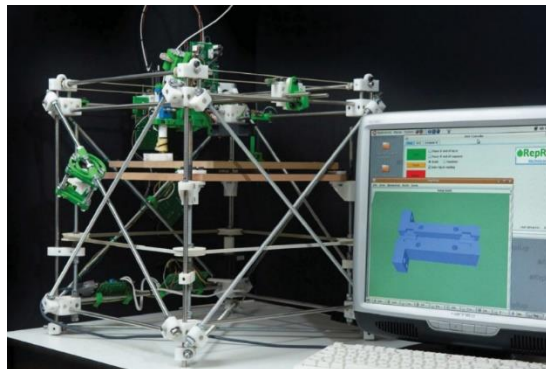
Počátky 3D tisku pocházejí ze začátku 80. let 20. století, kdy se Japonský vývojář Hideo Kodama pokoušel najít systém pro vytváření rychlých prototypů. Vymyslel jejich výrobu spojováním jednotlivých vrstev pomocí vytvrzování pryskyřice UV světlem. Pro 3D tisk se používal název Rapid Prototyping (rychlá výroba prototypů). V roce 1986 si nechal Charles W. Hull patentovat technologii stereolitografie. Jedná se o techniku

trojrozměrného laserového tisku s využitím UV laseru a tekutého fotopolymeru. Založil firmu 3D Systém, která v roce 1987 představila stereolitografický aparát SLA-1, dnešní termín 3D tisk se v té době ještě nepoužíval. Aparát se vyvíjel a upravoval, až vznikla jeho podoba SLA-250 pro využití široké veřejnosti a používá se dodnes. [3] [4] [5]



**Obrázek 2 Stereolitografický systém Charlese W. Hulla [5]**

V roce 2005 byl doktorem Adrianem Bowyerem založen projekt RepRap, jehož cílem bylo navrhnout 3D tiskárnu, která bude tisknout co nejvíce vlastních součástek. Projekt byl prezentován jako Open Source, díky čemuž se do něj zapojilo velké množství nadšenců z celého světa a tiskárny RepRap se staly nejrozšířenějšími 3D tiskárnami na světě. [3] [6]

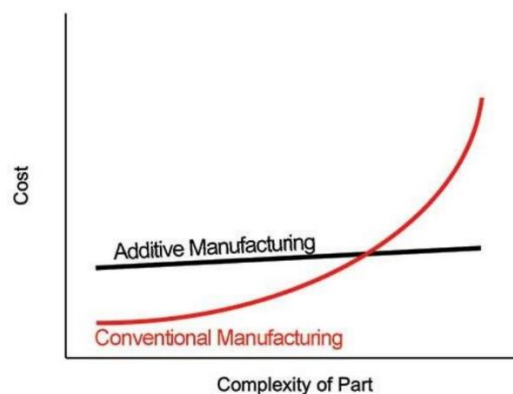


**Obrázek 3 První komerčně vyráběné RepRap zařízení představené v roce 2007 [6]**

Historie kovového 3D tisku je poměrně krátká. Poprvé byl kovový díl vytištěn v roce 1990, jednalo se o měděné ozubené kolo o průměru cca 7 cm a objekt se skládal ze 72 vrstev. Od té doby byl výzkum na kovové tiskárny více orientován, první technologie SLS však byla patentována až v roce 2004. Vývoj této technologie probíhal na univerzitě v Texasu již od devadesátých let. Belgická společnost Layerwise jako první představila technologii PBF, která se následně nejvíce rozvinula pro komerční účely. [7]

## 1.2 Výhody a omezení aditivních technologií

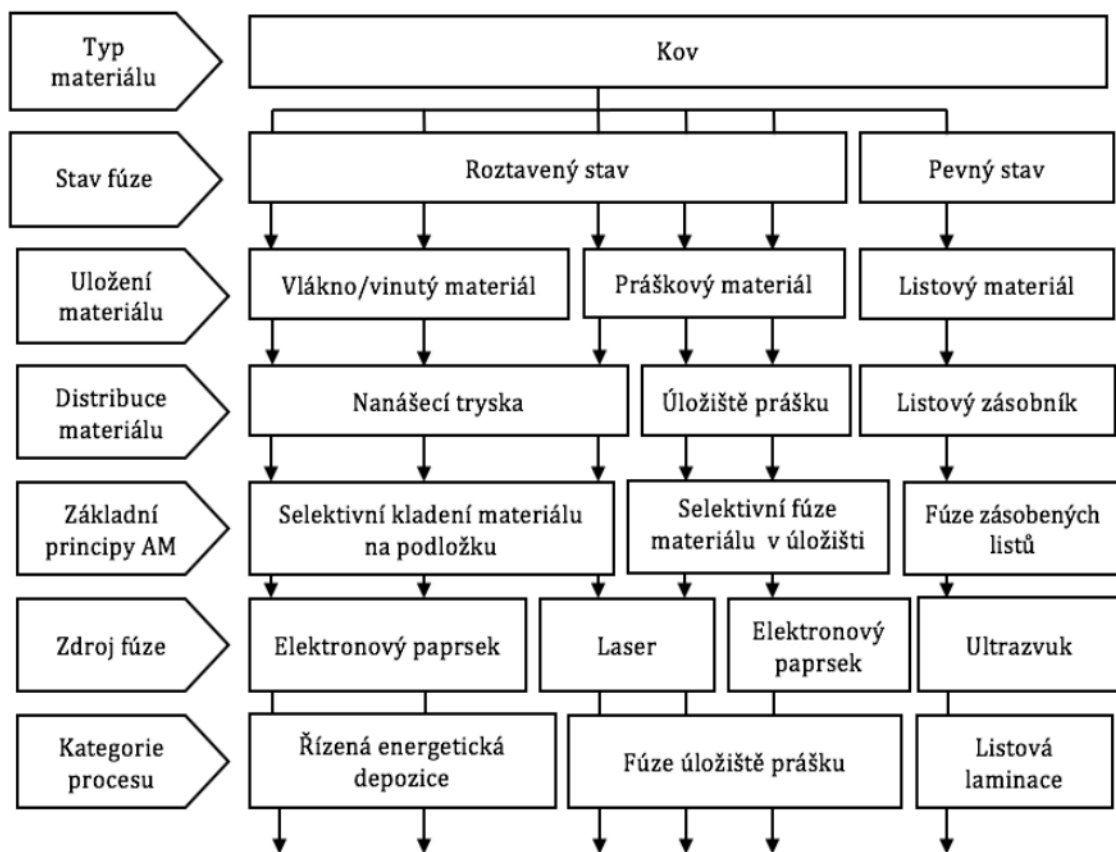
Aditivní výroba byla dříve spíše vnímána jako doplněk ke konvenčním technologiím, dnes však již v mnoho odvětvích některé tyto technologie nahradila. Za patrně největší výhodu můžeme považovat v podstatě libovolný tvar produktu. Naopak výrazným omezením 3D tisku často bývá velikost stovebního prostoru. Rozměrnější tiskárny jsou často mnohem hůře dostupné, ani na nich se však leckdy rozměrnější součásti vyrobit nedají. Částečným řešením tohoto problému může být výroba celku po částech a následné spojení částí některou z konvenčních technologií. I když jde vývoj tiskáren neustále dopředu, stále je aditivní výroba relativně časově náročná, protože proces probíhá spojováním velmi tenkých vrstev. 3D tisk je tak často využíván pro výrobu prototypů a v samotné produkci je již nahrazen jinou technologií. V dnešní době, kdy se v čím dál větší míře zmiňuje ekologie a udržitelnost, je velkou výhodou aditivní výroby její velmi malý odpad. Odpadem jsou zpravidla jen odstraněné podpory. Portfolio dostupných materiálů se pomalu rozšiřuje, občas je však při výběru stále nutné udělat kompromis. Mezi další úskalí většiny těchto technologií je možné zařadit i vysoké teplotní ovlivnění dílu, což má za následek vznik vnitřních pnutí, která je potřeba eliminovat například následným žiháním pro odstranění vnitřních pnutí. Během exportu modelu pro tisk, do formátu STL, je vytvořena trojúhelníková síť, která však nekopíruje linie modelu zcela přesně. Díky tomu může docházet k rozměrovým nepřesnostem. Odchylku od požadovaného rozměru lze snížit zjemněním sítě STL. Poslední velkou nevýhodou je postprocessing, následující po samotném tisku. Během něho je nutné za použití nástrojů odstranit materiál podpor a dokončit povrchy funkčních ploch, u kterých nesmí být zapomenuto na přídavek pro obrábění před samotným tiskem. [1] [3] [8]



**Obrázek 4** Závislost členitosti výrobku na jeho ceně, při porovnání aditivní a konvenční technologie [9]

### 1.3 Laser powder bed fusion

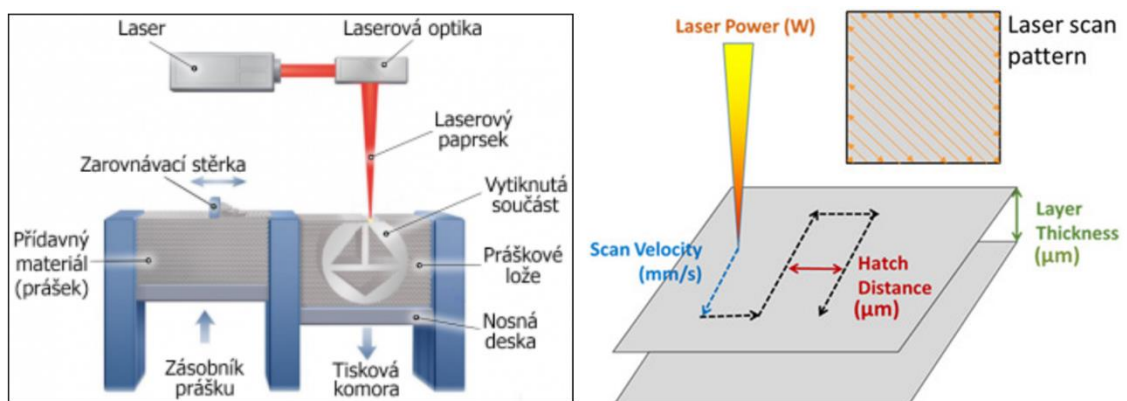
V aditivních technologiích definuje základní pojmy norma ISO/ASTM 52900. Je zde uveden rozsáhlý popis pojmů z tohoto oboru, kdy je vysvětlováno, co se rozumí například pojmem vytlačování, nebo co to je prášek. Základním rozdělením aditivních procesů je dělení na procesy jednokrokové, kdy je výrobek vyroben pouze v jednom kroku, a procesy vícekrokové, kdy po prvním kroku následují ještě procesy jako slinování, nebo infiltrace. Norma dělí výrobní procesy aditivních technologií na řízenou energetickou depozici, extruzi (vytlačování) materiálu, tryskání materiálu, fúzi práškového lůžka, nebo listovou laminaci. V případě této diplomové práce bude uvažována technologie powder bed fusion (fúze práškového lůžka), kde konkrétním zdrojem energie bude laser. Technologie je tedy souhrnně označována jako laser powder bed fusion (L-PBF) a můžeme ji zařadit mezi jednokrokové procesy. [2] [10]



**Obrázek 5** Přehled jednokrokových procesních principů pro kovové materiály [2]

Norma ISO/ASTM 52900 říká o metodě powder bed fusion, že využívá laserový (případně elektronový u technologie EBM) paprsek k vytvoření tepelné energie, která

způsobí selektivní fúzi práškového lůžka materiálu. K vytvoření součásti dochází postupně po velmi tenkých vrstvách, které jsou zpravidla silné jen několik setin milimetru. Vždy musí být nejdříve spečena celá vrstva, po dokončení je zarovnávací stěrka nanese nová vrstva materiálu a celý proces se opět opakuje. Během tisku se stavební platforma pohybuje po jednotlivých vrstvách směrem dolů. Proces tisku je zejména díky práci s velmi jemnými částicemi prášku nebezpečný pro lidské zdraví. Částice prášku jsou karcinogenní a mimo vdechnutí se vzhledem k své velikosti mohou do těla dostat i póry v kůži. Proto musí být obsluha vybavena ochrannými pomůckami jako jsou: ochranný oblek, uzavřená obuv, rukavice, dýchací maska a v neposlední řadě antistatický náramek. Nespotřebovaný prášek lze za použití speciálního zařízení přechistit a znovu použít. Proces tisku musí být realizován v inertní atmosféře, kterou je nejčastěji dusík, nebo argon. Některé firmy dodávají k tiskárnám vlastní generátory dusíku, což výrazně zlevňuje tisk. Doba tisku závisí především na maximální výšce stavby, ale obvykle trvá minimálně několik hodin. Po skončení tisku je potřeba odsát nespotřebovaný prášek. Dále následuje postprocessing, kdy je nejprve nutné odříznout výrobek od stavební podložky a pak musí být také odstraněny podpory, které zajišťují dosažení požadovaného tvaru výrobku a odvádějí z výrobku teplo. Vneseným teplem dochází ke vzniku napětí v součásti, proto musí být často po tisku přistoupeno k žíhání na odstranění pnutí. Velikost výrobku je omezena velikostí stavebního prostoru, který je vždy ještě zmenšen o tloušťku stavební palety. Použitím silnější stavební palety může dojít ke snížení napětí ve výtisku. [2] [10]



**Obrázek 6 Vlevo [11] princip metody L-PBF, vpravo [12] její klíčové parametry**

Zdrojem energie pro spékání prášků je laser. Používají se lasery CO<sub>2</sub>, Nd:YAG a fibre. Paprsek laseru musí směřovat na velmi malou plochu. Všechny fotony emitované laserem

mají stejnou vlnovou délku a směr. Když paprsek laseru narazí na práškový materiál, fotony jsou do něho absorbovány a přeměněny na teplo. V současné době se v procesu L-PBF monitoruje a ovlivňuje více než sto procesních parametrů. Jedním ze základních, který je v procesu sledován je tloušťka spékané vrstvy. Pokud je tato tloušťka příliš velká, může dojít ke vzniku porozit ve spékaném materiálu. Někdy může být nastavení tloušťky spékané vrstvy limitováno dostupností prášku v požadované velikosti částic. Dalším ostře sledovaným parametrem v procesu je energie laseru. Tu je třeba kontrolovat s ohledem na druh použitého prášku. Pokud je příliš malá, může dojít k nespečení vrstvy, pokud příliš velká, tak je zde riziko vzniku porozity. S energií laseru velmi úzce souvisí i skenovací rychlost. Nastavení obou těchto parametrů musí být synchronizováno. Důležitým parametrem je také tzv. šrafovací vzdálenost (hatch distance). Je to vzdálenost mezi jednotlivými pruhy, v kterých se paprsek laseru pohybuje. Tento parametr úzce souvisí s tloušťkou spékané vrstvy. Pokud je vzdálenost pruhů moc velká a není dostatečná roztavená lázeň, může opět docházet k nespojitostem spékaného materiálu. Toto jsou pouze základní parametry procesu, ve skutečnosti jich je sledováno mnohem více. Jsou to ovšem ty základní parametry, jejichž kontrola zásadně ovlivňuje kvalitu výsledných výrobků. [12]

### **1.3.1 Přehled vybraných tiskáren pro technologii L-PBF**

V dnešní době existuje celá řada tiskáren s práškovým ložem, kde jako zdroj energie slouží laser. Výrobců je mnoho, od těch renomovaných až po ty méně známé. Vzhledem k faktu, že každý výrobce má ke svým tiskárnám patentovanou i vlastní technologii, existuje spousta technologií na principu PBF, které jsou téměř identické. Například společnost EOS GmbH má patentovanou technologii DMLS (Direct Metal Laser Sintering), společnost SLM SOLUTIONS ji nese i ve svém názvu – Selective Laser Melting, společnost GE Additive zase označuje svoji technologii jako DMLM (Direct Metal Laser Melting) a TRUMPF ji označuje jako LMF (Laser Metal Fusion). Obecně ale dle normy ISO 52900 můžeme říct, že je do jednoho celku spojuje technologie popsaná v této normě jako PBF (Powder Bed Fusion). V podkapitolách níže, budou postupně představeny tiskárny střední třídy od jednotlivých výrobců, disponující stavebním prostorem mezi 200x200x200 mm a 300x300x300 mm a mohly by tak být potenciálně vhodné k tisku dílů řešených v praktické části této diplomové práce. [10] [13] [14] [15] [16]

### 1.3.1.1 EOS M 290

Tato tiskárna byla společností EOS GmbH [13] představena v roce 2014. Od té doby se stala jednou z nejrozšířenějších tiskáren pro tisk kovů vůbec. Její největší přednost spočívá v možnosti tisku až 24 různých materiálů, což pokrývá téměř celou materiálovou paletu od společnosti EOS. Na této tiskárně není možné tisknout součásti z wolframu. Tuto tiskárnu má k dispozici koncern VW Group. [13]

**Tabulka 1 Parametry tiskárny EOS M 290 [13]**

EOS M 290	
Stavební prostor	250x250x325 mm (výška vč. stavební palety)
Typ laseru	Yb laser, 400 W
Přesná optika	F-theta čočka, vysokorychlostní scanner
Rychlost skenování	Až 7 m/s
Zdroj napájení	32 A / 400 V
Spotřeba el. energie	Max. 8,5 kW
Tlak inertního plynu	Max. 7000 hPa
Spotřeba inertního plynu	20 m <sup>3</sup> / hod. (během stavby)
Rozměry	2500x1300x2190 mm
Hmotnost	1250 kg



**Obrázek 7 EOS M 290 [13]**



### 1.3.1.2 SLM<sup>®</sup>280 2.0

Tiskárna od společnosti SLM SOLUTIONS může být vybavena jedním, nebo dvěma lasery o jmenovitém výkonu 700 W. Výrobce uvádí, že varianta s dvěma lasery je o 80% rychlejší, oproti své jedno-laserové variantě. Další časovou úsporou umožňuje nanášení vrstvy prášku ve dvou směrech, což je inovace, kterou má tato společnost patentovanou. SLM SOLUTIONS označuje svoji technologii jako SLM (Selective Laser Melting). Tiskárna může být vybavena volitelným příslušenstvím, jako třeba funkcí MPM (Melt Pool Monitoring), sledující tepelné ovlivnění jednotlivých řezů součástí v průběhu stavby, vývoj zaznamenává a automaticky vyhodnocuje nebezpečí vzniku defektů. Další volitelnou funkcí je tzv. LPM (Laser Power Monitoring), která vyhodnocuje použitou energii laseru. Tuto tiskárnu má k dispozici koncern VW Group. [15]

**Tabulka 2 Parametry tiskárny SLM<sup>®</sup>280 2.0 [15]**

SLM <sup>®</sup> 280 2.0	
Stavební prostor	280x280x365 mm
Typ laseru	IPG fiber laser, 1x700 W, nebo 2x700 W
Rychlost skenování	Až 10 m/s
Zdroj napájení	400 V, 63 A, 50/60 Hz
Tlak inertního plynu	6 bar
Spotřeba inertního plynu	2,5 l / min. (během stavby)
Rozměry	2600x1200x2760 mm
Hmotnost	1300 kg (prázdná), 1800 kg (s práškem)



**Obrázek 8 SLM<sup>®</sup>280 2.0 [15]**

### 1.3.1.3 Concept Laser M2 Series 5

Concept Laser je tiskárna od společnosti GE Additive. Tento výrobce označuje svou technologii jako DMLM (Direct Metal Laser Melting). Tiskárna je dostupná ve dvou variantách, slabší s výkonem laseru 400 W a silnější o výkonu 1 kW. Díky optimalizované stavební komoře je proudění inertního plynu v tomto prostoru plynulejší. Pro zajištění lepší teplotní stability tiskového procesu jsou v komoře umístěny přídavné optické senzory. Program QuickStart zaručuje rychlejší přípravu tiskárny do pracovního režimu, a šetří tak čas i náklady. Výrobce k tiskárně nabízí vlastní software pro nastavení tisku zvoleného výrobku, což zaručuje optimalizaci výrobního procesu pro tento typ tiskárny. Tiskárna je ve své starší verzi dostupná na Fakultě strojní ČVUT v Praze. [14]

**Tabulka 3 Parametry tiskárny Concept Laser M2 Series 5 [14]**

Concept Laser M2 Series 5	
Stavební prostor	245x245x350 mm
Typ laseru	Fibre laser 400 W
Rychlost skenování	Až 4,5 m/s
Zdroj napájení	AC 400 V, 32 A
Spotřeba el. energie	9 kW
Tlak inertního plynu	6-10 bar
Spotřeba inertního plynu	15 m <sup>3</sup> / hod. (během stavby)
Rozměry	2739x1818x2185 mm
Hmotnost	2500 kg



**Obrázek 9 Concept Laser M2 Series 5 [14]**

### 1.3.1.4 TruPrint 2000

Stavebním prostorem této tiskárny od společnosti TRUMPF [16] je válec o průměru 200 mm. Společnost má pro technologii svých tiskáren označení LMF (Laser Metal Fusion). Tiskárna disponuje laserem o výkonu 300 W, volitelně zde můžou být umístěny dva tyto lasery pro zvýšení produktivity. Celý proces tisku řídí a sleduje software Melt Pool Monitoring. Pomocí funkce Powder Bed Monitoring je možné sledovat díky integrované kameře práškové lože. Díky této technologii je možné analyzovat kvalitu každé vrstvy. [16]

**Tabulka 4 Parametry tiskárny TruPrint 2000 [16]**

TruPrint 2000	
Stavební prostor	Ø200x200 mm
Typ laseru	Laser Trumpf 300 W
Průměr ohniska	55 µm
Tloušťka vrstvy	20-100 µm
Zdroj napájení	400/460 V, 32 A
Ochranný plyn	Dusík, Argon
Rozměry	2180x2030x1400 mm
Hmotnost	3200 kg



**Obrázek 10 TruPrint 2000 [16]**

### 1.3.1.5 RenAM 500Q Flex

Řada tiskáren RenAM 500 pochází od britské strojírenské společnosti Renishaw [17]. Osazena může být jedním (500S), nebo hned čtyřmi (500Q) lasery o jmenovitém výkonu 500 W. Manipulace s práškem může být buď automatická, nebo flexibilní, kde má dráha prášku spád a ten je přesouván pomocí vlastní gravitace. Rychlost výroby dosahuje u tiskáren se čtyřmi lasery až 150 cm<sup>3</sup>/h. I při plném výkonu 2 kW musí být zajištěna regulace teploty, kterou zajišťuje mezichladič. Optický snímač RESOLUTE snímá polohu s rozlišením 1nm. [17]

**Tabulka 5 Parametry tiskárny RenAM 500Q Flex [17]**

RenAM 500Q Flex	
Stavební prostor	250x250x350 mm
Typ laseru	Yb laser, 4x 500 W
Zdroj napájení	3x63 A
Spotřeba el. energie	20,3 kVa
Spotřeba inertního plynu	140 l / hod. (během stavby)
Rozměry	2165x1236x2130 mm
Hmotnost	1400 kg



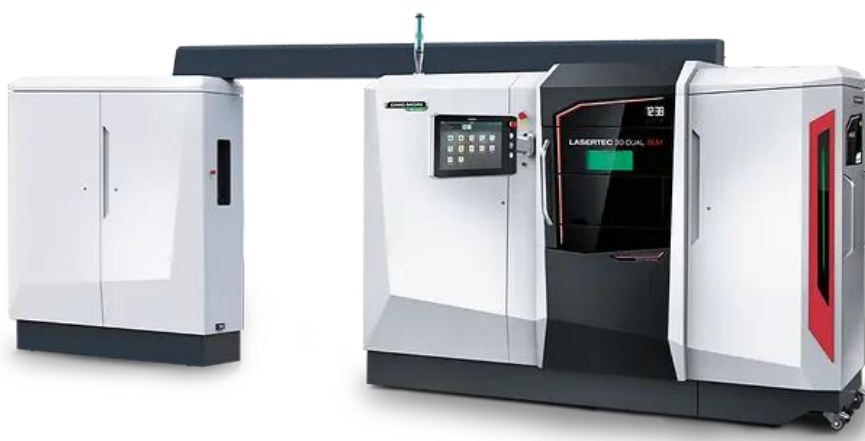
**Obrázek 11 Tiskárny řady RenAM 500 [17]**

### 1.3.1.6 LASERTEC 30 DUAL SLM

Tiskárna od společnosti DMG MORI využívá technologii SLM (Selective Laser Melting). Varianta DUAL, představená v roce 2020 pracuje s využitím dvou laserových hlav, přičemž každá má výkon 600 W. Dle výrobce je díky tomu oproti předchozí variantě s jednou laserovou hlavou produktivita o 80% vyšší. Práškový modul rePLUG zajišťuje automatizovanou manipulaci s práškem, jeho recyklaci, a změna materiálu díky tomuto modulu nezabere více než dvě hodiny. Vybírat je možné ze široké palety materiálů včetně titanu. [18]

**Tabulka 6 Parametry tiskárny LASERTEC 30 DUAL SLM [18]**

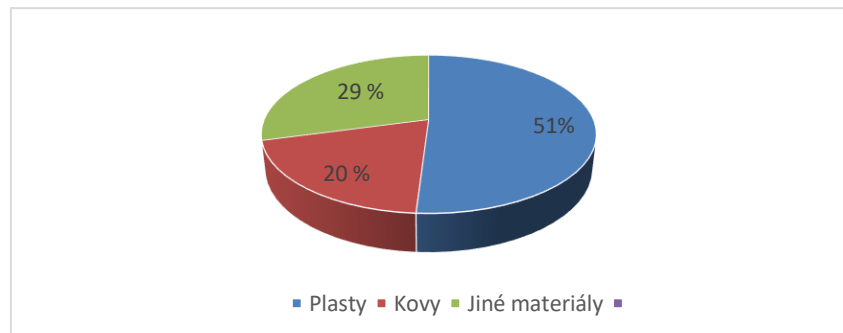
LASERTEC 30 DUAL SLM	
Stavební prostor	300x300x350 mm
Typ laseru	Fibre laser, 2x 600 W
Průměr ohniska	50-80 $\mu\text{m}$
Zdroj napájení	35 A
Spotřeba el. energie	20,3 kVa
Tlak inertního plynu	Min. 6 bar
Spotřeba inertního plynu	150 l / hod. (během stavby)
Rozměry	5612x926x2377 mm
Hmotnost	1200 kg



**Obrázek 12 LASERTEC 30 DUAL SLM [18]**

### 1.3.2 Přehled materiálů pro technologii L-PBF

Jak je patrné z následujícího grafu, z celkového objemu používaných materiálů v aditivní výrobě jsou kovy využívány jenom v pětina případů. I když je technologie kovového tisku na vzestupu a portfolio kovových prášků se neustále rozšiřuje, stále je tato technologie zatížena vysokými náklady na pořízení této tiskárny. [2]



**Obrázek 13** Procentuální využití jednotlivých materiálů v AM [2]

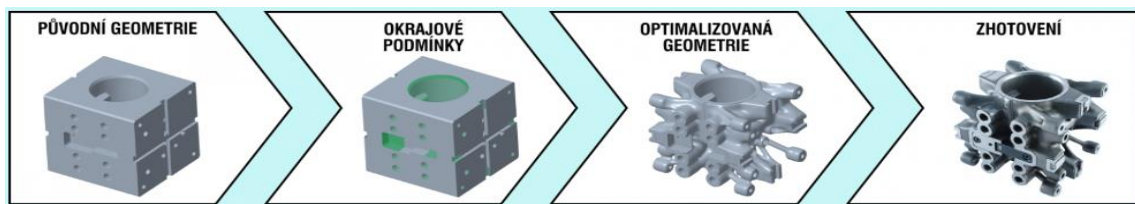
Kovové prášky pro L-PBF tiskárny nejsou univerzální, ale každý výrobce má své portfolio materiálů, které vyvíjí přímo pro svá zařízení. Cena prášků se zpravidla odvíjí od mnoha faktorů. Běžně používané prášky jsou zpravidla levnější než ty pro speciální aplikace. Dnes již je dostupná široká škála práškových materiálů, která zahrnuje mnoho druhů ocelí, včetně těch s výbornými mechanickými vlastnostmi, hliníkové slitiny, speciální slitiny niklu (Inconely), slitiny kobaltu s chromem, které jsou využívány v leteckém průmyslu, wolfram, který je používán ve zdravotnických aplikacích, čistou měď, nebo třeba několik druhů slitin titanu. Z ocelí jsou nejvíce používány vysokopevnostní oceli a austenitické nerezové oceli. Díky svým dobrým mechanickým vlastnostem jsou vhodné i pro odlehčení vyráběných konstrukcí, které je možné provést například topologickou optimalizací. Hliníkových slitin na trhu není mnoho. Je to dáno špatnou svařitelností hliníku, jeho poměrně velkou odrazivostí pro laserový paprsek a v neposlední řadě také faktem, že hliníkové slitiny jsou snadno obrobitelné a cena hliníkových výtisků není vůči obrobkům zpravidla konkurenceschopná. Hliníkové díly se tedy zpravidla tisknou, pokud jejich geometrie není vyrobitelná jinou technologií. Jedná se například o díly s vnitřním chlazením. Naopak konkurenceschopný vůči konvenčním technologiím je 3D tisk součástí z titanu a jeho slitin. Titan je hojně využíván v aplikacích leteckého průmyslu, v součástech především závodních automobilů, nebo ve zdravotnictví pro výrobu nejrůznějších implantátů. Tisk titanu je nákladnější proti tisku ocelí, což je mimo ceny prášku zapříčiněno i nutností použít argon jako inertní plyn. [7]

**Tabulka 7 Přehled dostupných prášků od jednotlivých výrobců: EOS GmbH (EOS) [13], Renishaw (RS) [17], Trumpf (TRU) [16], Concept Laser (CL) [14], SLM Solutions (SLM) [15]**

Materiál	EOS	RS	TRU	CL	SLM
AlSi10Mg	✓	✓	✓	✓	✓
AlSi7Mg0,6	✓				✓
AlSi9Cu3			✓		✓
Al2139	✓				
CoCr	✓	✓	✓		✓
Inconel 625	✓	✓	✓		✓
Inconel 718	✓	✓	✓	✓	✓
Inconel 939					✓
Hastelloy X	✓		✓		✓
Maraging ocel 1.2709	✓	✓	✓	✓	✓
Nástrojová ocel 1.2344					✓
Invar36					✓
Korozivzdorná ocel 17-4PH	✓		✓	✓	✓
Korozivzdorná ocel CX	✓				
Korozivzdorná ocel GP1	✓				
Korozivzdorná ocel 316L	✓	✓	✓	✓	✓
Ti6Al4V	✓	✓	✓	✓	✓
Titan Grade 2	✓		✓		✓

## 1.4 Topologická optimalizace

Optimalizaci můžeme označit jako proces, při němž je vybírána nejlepší dostupná varianta z množiny možných jevů. Optimalizovat se nemusí pouze strojní součásti. Můžeme tímto procesem minimalizovat finanční náklady, nebo zkrátit na minimum čas určitého procesu. Při topologické optimalizaci je snahou nalézt optimální tvar součásti na základě definovaných okrajových podmínek s cílem přiblížit se co nejvíce požadovanému výsledku, kterým může být redukce hmotnosti, maximalizace tuhosti součásti, nebo vzájemná kombinace těchto parametrů. Výpočet je realizován na základě speciálních algoritmů, výsledkem jsou zpravidla velmi nepravidelné tvary, které je možné většinou vyrobit pouze metodami aditivní výroby. V některých případech lze v softwaru nadefinovat i okrajovou podmínku vyrobitelnosti dílu konvenční metodou. K optimalizaci je zpravidla využít stávající tvar dílu, k němuž může, ale nemusí být přidán další materiál tak, aby software mohl optimalizovat ve větším prostoru a případně dojít k lepším výsledkům. [19] [20]



Obrázek 14 Proces topologické optimalizace [21]

### 1.4.1 Obecný proces výpočtu

Při topologické optimalizaci je cílem nalezení lokálního minimum sledované funkce:

$$\min f(x); x \in D$$

$$c(x) \geq 0$$

(1)

*x ... vhodná parametrizace problému*

*D ... design space*

*f(x) ... objektivní funkce*

*c(x) ... omezení optimalizace*



Objektivní funkce a omezení optimalizace je stanoveno na základě metody konečných prvků. Hlavním cílem metody je nalezení optimálního rozložení materiálu ve struktuře. Vektor  $x$  zpravidla představuje relativní hustotu materiálu, která je stanovena za pomoci MKP analýzy. [19]

$$x = \{x_i \in (0,1], \forall i = 1, \dots, N\}$$

$N$  ... počet konečných prvků ve struktuře

$$\rho_i(x_i) = x_i \rho^*$$

(2)

$\rho_i$  ... hustota  $i$  – tého prvku

$\rho^*$  ... celková hustota materiálu

#### 1.4.2 Metoda SIMP

Nejrozšířenější výpočetní metodou topologické optimalizace je tzv. metoda SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization). Používá ji většina optimalizačních softwarů a vychází z tuhosti  $E$   $i$ -tého prvku:

$$E_i(x_i) = x_i^p E^*$$

(3)

$p$  ... faktor penalizace

$E^*$  ... celková tuhost isotropního materiálu

Tento algoritmus topologické optimalizace mění rozložení materiálu v součásti na základě specifikovaných požadavků pro optimalizaci. Pokud součást není vyráběna metodou 3D tisku, ale sléváním, často optimalizace vytvoří dutiny, u nichž není výroba realizovatelná. Zároveň je v řadě případů optimalizací potřeba definovat jednu, nebo více rovin symetrie. Většina softwarů včetně Altair Inspire nabízí funkci „draw direction“, která při optimalizaci již dopředu uvažuje směr výroby, který je podstatný jak při 3D tisku, tak slévání, případně tváření. Z těchto důvodů je nutné algoritmus převést do formy, která výrobní směr uvažuje:

$$\sum_{k=1}^{K1-1} |(x_{ij}^e)_{k+1} - (x_{ij}^e)_k|_p \leq \delta; i = 1, \dots, n_x; j = 1, \dots, n_y \quad (4)$$

$(x_{ij}^e)_k$  ... hustota  $k$  – tého prvku umístěného v  $i, j$  na promítnuté rovině  $p$

$K1$  ... počet prvků ležících v  $(i, j)$

$n_x$  ... počet prvků ve směru  $x$  ležících na promítnuté rovině  $p$

$n_y$  ... počet prvků ve směru  $y$  ležících na promítnuté rovině  $p$

$\delta$  ... počet kladných prvků

Takto již algoritmus zahrnuje výrobní směr, pokud je třeba zároveň uvažovat i rovinu symetrie, lze použít jeho následující alternativu:

$$\sum_{k=1}^{K2} |(x_{ij}^e)_k - (x_{ij}^e)_{-k}|_M \leq \delta; i = 1, \dots, n_x; j = 1, \dots, n_y \quad (5)$$

$(x_{ij}^e)_{-k}$  ... hustota symetrických prvků  $(x_{ij}^e)_k$  na rovině  $M$ , která představuje rovinu  $xy$

$K2$  ... počet prvků ležících v  $(i, j)$

Všechny prvky, vykazující nulovou hustotu jsou z optimalizovaného modelu odstraněny. [19] [22] [23]

### 1.4.3 Metoda ESO/BESO

Tyto dvě metody spočívají v postupném odebírání jednotlivých prvků, na základě předem definovaných kritérií (maximální napětí, maximální deformace, vlastní frekvence). Metoda ESO (Evolutionary Structural Optimization) je předchůdcem metody BESO (Bilinear Evolutionary Structural Optimization). Rozdíl v těchto metodách spočívá v problému, kdy jsou jednotlivé prvky postupně odstraňovány ze struktury. Zatímco u metody BESO, mohou být po odstranění do struktury zpět vráceny, u metody ESO nikoliv. Výpočet optima metodou BESO je tedy výrazně rychlejší a zpravidla je dosaženo lepších výsledků, jelikož postup je možné opakovat v jednotlivých iteracích. [20]

Výpočet metodou BESO lze popsat následovně:

$$\text{Min: } C = \frac{1}{2} u^t K u$$

$$V^* - \sum_{i=1}^N V_i x_i = 0$$

$$x_i = x_{\min}^{1}$$

(6)

*C ... střední hodnota hustoty z metody SIMP*

*K ... matice tuhosti*

*u ... vektor posunutí*




*V<sub>i</sub> ... objem i – tého prvku*

*V\* ... stanovený objem*

*N ... celkový počet prvků*

*x<sub>i</sub> ... hustota i – tého prvku*

Tento BESO výpočet je založen na základě maximálního předem definovaného objemu, kterého má optimalizace dosáhnout, aby došlo k redukci materiálu. Otázkou ovšem zůstává, jakým způsobem tento objem předem stanovit. Jednou z možností je nejprve provést optimalizaci na základě jiného kritéria, například maximálního napětí v součásti. Z této prvotní optimalizace získáme výchozí objem, na jehož základě je možné následně provést opětovnou optimalizaci způsobem popsáním výše. [20]

	Optimization parameters	Total iteration	Solutions		Error <sup>a</sup> (%)
ESO <sup>b</sup>	ER = 1%	67		C = 188.91 Nmm	4.12
Soft-kill BESO	ER = 2% p = 3.0	44		C = 183.25 Nmm	1.00
SIMP	move = 0.02 p = 3.0	37		C = 196.48 Nmm	8.29

**Obrázek 15 Porovnání jednotlivých výpočetních metod [20]**

## 2 KRITICKÁ LITERÁRNÍ REŠERŠE

### PRAKTICKÉHO VYUŽITÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE V REÁLNÝCH APLIKACÍCH

V několika následujících podkapitolách bude uvedeno několik příkladů reálného využití topologické optimalizace. Byly vybrány aplikace z prostředí automotive průmyslu. Některé dohledané články mají návaznost na motorsport, nenalezl jsem však žádný, který by se věnoval topologické optimalizaci dílů rally vozu.

#### 2.1 Těhlice formule student

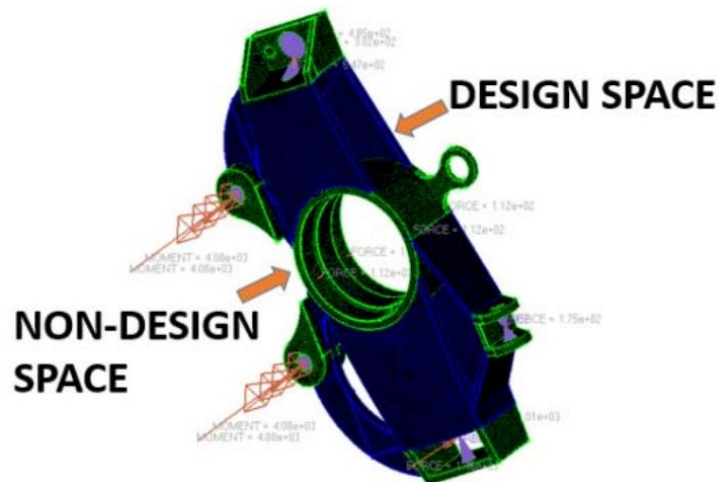
Závodní tým studentů státní univerzity v Pensylvánii v USA se potýkal s příliš vysokou hmotností těhlice své studentské formule. Těhlice (hlava kola) patří mezi díly automobilového podvozku, reprezentující tzv. neodpruženou hmotnost. Mimo hlavy kola jde zpravidla také o kolo s pneumatikou, ložiska a také brzdový kotouč s brzdíčem. Veškerá neodpružená hmotnost zhoršuje stabilitu, ovladatelnost a další jízdní vlastnosti vozidel, proto je snahou výrobců konstruovat tyto díly, pokud možno co nejlehčí. Dvojnásobně to pak platí u závodních vozů, kde jsou na ovladatelnost, akceleraci i deceleraci kladeny ještě vyšší požadavky než u sériových vozů. Proto se tento tým studentů rozhodl přistoupit k snížení hmotnosti těhlice a jako nástroj zde byla využita topologická optimalizace. [24]



**Obrázek 16** Původní těhlice studentské formule vyrobená technologií svařování [24]

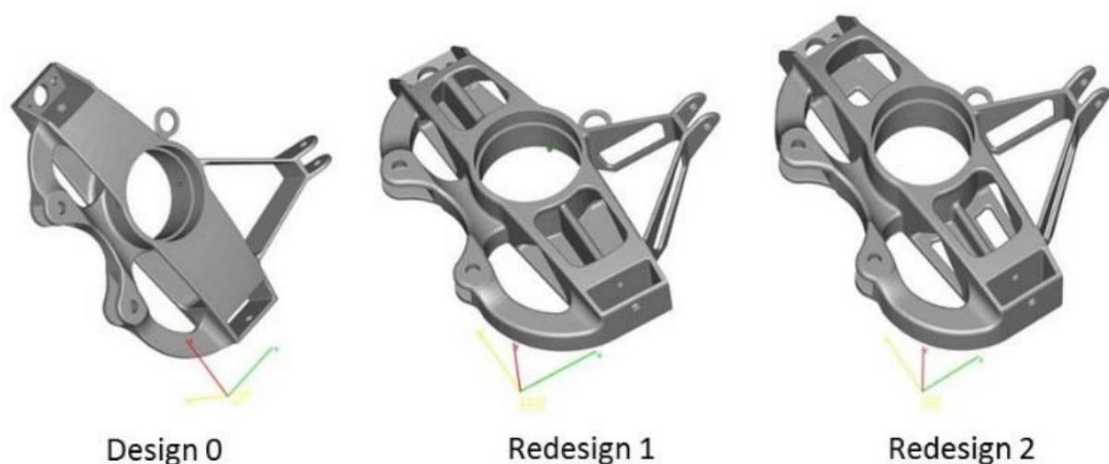
Pro samotnou topologickou optimalizaci byl využit v první fázi software 3D TopOpt a následně v další fázi Altair Optistruct. Po první optimalizaci byl díl ručně vymodelován

v softwaru SolidWorks. Jelikož se jedná o poměrně složitý díl, na který přímo navazuje několik dalších součástí (tlumič, vrchní a spodní rameno, spojovací tyč řízení, ložisko, nebo brzdič), bylo potřeba přesně nadefinovat design space, tedy oblast dílu, která může být optimalizována, aby nedocházelo ke kolizím jednotlivých součástí při provozu formule. [24]



Obrázek 17 Definovaný design a non-design space po první optimalizaci [24]

Optimalizace byla provedena postupně, nejdříve byl definován design0, následně pak redesign1 a redesign2. Po dokončení výsledného tvaru byla součást opět zpětně analyzována, aby byla ověřena její požadovaná pevnost vzhledem k původně definovaným zatížením. [24]



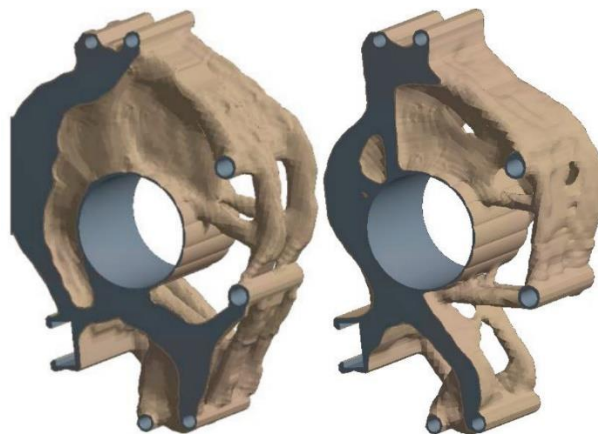
Obrázek 18 Postupná optimalizace těhlice [24]

Finální tvar byl vytištěn metodou DMLS z alfa-beta slitiny titanu s vysokou pevností na 3D tiskárně EOS M290. Postupnou optimalizací se snížila cena tisku z původních více

než 2000 USD na konečných 1450 USD. Velmi tomu napomohla také ideální orientace výrobku na tiskové paletě. Pro porovnání, pokud byl výrobek položen horizontálně, byla doba tisku poloviční (14 hodin) oproti výrobku, který byl natočen o 90 stupňů. Špatná orientace měla také za následek zdražení tisku o téměř 1000 USD. Především to bylo způsobeno tím, že natočenou součást bylo potřeba daleko více podporovat. [24]

Topologická optimalizace těhlice studentské formule byla řešena i na univerzitě v Ontariu. Zde došlo k porovnání dvou přístupů k topologické optimalizaci, a to sice metody SIMP (Solid Isotropic Material Penalization) a OCO (Overhang Constraint Optimization). Metoda SIMP využívá klasického přístupu, který používá většina optimalizačních softwarů, kde je hlavním cílem maximalizovat tuhost za současné minimalizace hmotnosti, při dodržení konstrukčních požadavků. Maximalizace tuhosti je definována pomocí metody konečných prvků a objem součásti je odebírán postupně v jednotlivých iteračních krocích, dokud není dosaženo požadovaného výsledku. [23]

Metoda OCO je již komplexnější a mimo klasických přístupů k topologické optimalizaci bere v úvahu již navazující parametry výroby jako jsou směr umístění součásti vzhledem ke stavební paletě a rychlost tisku. Tyto další parametry mohou omezit prostor pro optimalizaci, ale komplexní řešení problematiky omezuje vznik deformací a nepřesností v dalším procesu. Rychlost tisku citelně ovlivňuje výslednou cenu výrobku, jelikož každá minuta výroby na LPBF tiskárně je velmi drahá. [23]



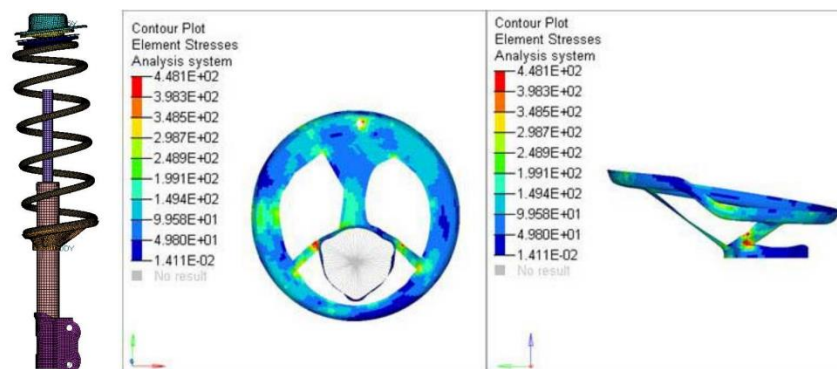
**Obrázek 19** Vlevo těhlice optimalizovaná metodou SIMP, vpravo metodou OCO [23]

Samotná těhlice byla tisknuta ze slitiny hliníku, nejdříve byl definován design space a zátěžné stavy, které mohou nastat. Porovnáním obou metod optimalizace bylo zjištěno, že metodou OCO bylo uspořeno o 12 % více materiálu než při použití standardní metody

SIMP. Metodou OCO bylo také dosaženo výrazné úspory materiálu při podporování součásti během tisku. [23]

## 2.2 Spodní uložení pružiny

Na technické univerzitě v Malajsii byla provedena topologická optimalizace spodního uložení pružiny sériového automobilu. Cílem této optimalizace byla redukce hmotnosti, která by vedla ke zlepšení jízdních vlastností automobilu, úspoře výrobních nákladů a materiálu. Autoři [25] využili mimo topologické optimalizace i optimalizaci topografickou. Jako design space byl definován pouze původní tvar uložení, optimalizací tedy došlo k vytvoření odlehčujících otvorů. Jedním z problémů starého řešení byl nedostatečný kontakt pružiny se spodním uložením. Pružina byla v kontaktu s uložením pouze na třech malých plochách. Na uložení působí od pružiny síla o velikosti 430 N a jedním z cílů nové konstrukce bylo i lepší rozložení síly po celém obvodu uložení. Celkově došlo k úspoře 36 % hmotnosti. Pro topologicky optimalizovaný díl byla použita ocel s dvojnásobnou mezí kluzu, proti původnímu řešení. Součást byla napočítána téměř na hranici meze kluzu, když maximální napětí v optimalizovaném dílu dosáhlo 529 MPa při mezi kluzu 540 MPa. Po provedení topologické optimalizace byla použita optimalizace topografická, z důvodu zvýšení pevnosti dílu. Deformace optimalizovaného uložení byly následně ověřeny experimentem, kdy byla celá sestava tlumiče s pružinou upevněna do zkušebního stavu a měřen byl průhyb uložení. [25]



Obrázek 20 Rozložení napětí v optimalizovaném spodním uložení pružiny [25]

## 2.3 Skříň pohonu elektromobilu Porsche

Inženýři z Porsche Development Centre v německém Weissachu topologicky optimalizovali skříň pohonu elektromobilu, určeného pro malosériovou výrobu. Navíc celý projekt dovedli až k výrobě a skutečné aplikaci dílu. Chtěli tak demonstrovat, že

aditivní výroba má své místo v konstrukci vysoce namáhaných automotive dílů. Díky topologické optimalizaci došlo k snížení hmotnosti o 10 % (proti odlitku), za současného zvýšení tuhosti celé konstrukce, která byla možná díky speciálním tvarům, jež jsou vyrobitelné pouze aditivní technologií. Zároveň do celku mohlo být integrováno mnoho dalších komponentů, čímž odpadá celá řada montážních operací. Úspora času při montáži dosáhla dvaceti minut, když je nyní v sestavě o třicet šroubů méně. Ve skříni je mimo elektromotoru umístěna i dvoustupňová převodovka. K samotné výrobě byla využita technologie L-PBF. [26]

Před optimalizací byly do sestavy nejdříve přidány součásti jako ložiska, výměník tepla, nebo olejová vana. Následovalo definování load case a design space. Topologickou optimalizací byly mimo jiné vytvořeny struktury lattice, které mohou připomínat buněčnou strukturu kostí, nebo rostlin. Díky těmto strukturám byla pevnost některých částí zvýšena o 100 %. Tloušťka stěny dosahuje v několika místech pouze 1,5 mm. Vzhledem k omezenému stavebnímu prostoru nemohly být všechny díly skříně vytištěny najednou a tisk tak zabral několik dnů. Autoři tvrdí, že již disponují zařízením, které celou skříň vytiskne v jednom procesu, při zkrácení výroby na desetinu původního času. [26]



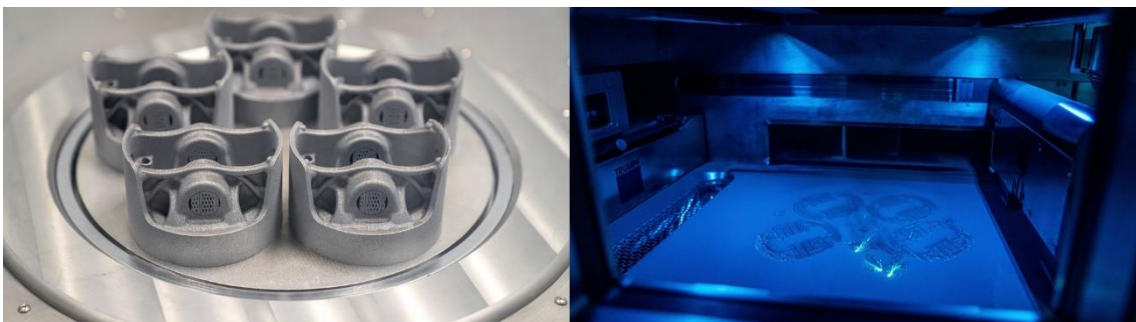
Obrázek 21 Vlevo topologická optimalizace skříně, uprostřed výtisk součástí, vpravo zkompletovaná skříň pohonu [26]

## 2.4 Písty motoru pro Porsche 911 GT2 RS

Automobilka Porsche topologicky optimalizovala písty spalovacího motoru. Písty následně vytiskla metodou LMF (Laser Metal Fusion) na tiskárně od společnosti Trumpf a odzkoušela je v reálném motoru Porsche 911 GT2 RS. Potenciál standardně odlévaných pístů ve výkonných spalovacích motorech se zdál být vyčerpán. Díky topologické optimalizaci a transformaci materiálu pouze do míst, kde působí největší síly, bylo uspořeno 10 % hmotnosti. Automobilka tvrdí, že se vydala cestou bezpečnosti konstrukce, ale do budoucna vidí potenciál pro úsporu hmotnosti až 20 %. Dalším přínosem bylo vytvoření chladicího kanálu za pístním kroužkem. Jeho vytvoření bylo



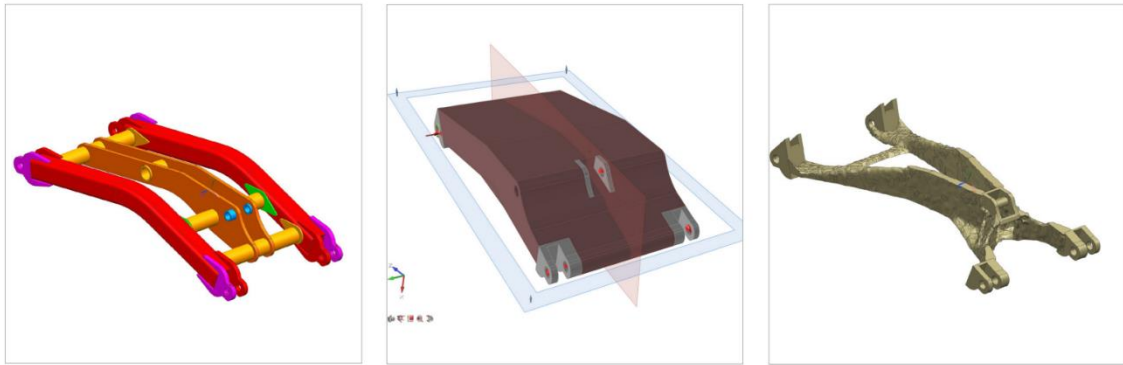
možné jenom díky následné výrobě pístu 3D tiskem. Díky tomuto kanálu došlo k snížení teploty v dané oblasti o 20 °C. Tím došlo k optimalizování spalování, když ve spalovacím prostoru nyní může figurovat vyšší tlak a teplota, a to má za následek celkové zvýšení výkonu tohoto motoru o zhruba 30 koní. Samotný píst byl vyroben ze slitiny M174+ od společnosti Mahle. Tisk proběhl na tiskárně TruPrint 3000 od společnosti Trumpf, trval 12 hodin a bylo při něm spečeno přes 1200 vrstev prášku. Následovalo testování výtisků vizuální i destruktivní metodou. Samotné otestování šesti pístů proběhlo na motorové brzdě, kde motor běžel dohromady dvě stě hodin. Opakovaně byla simulována 24hodinová jízda na vysokorychlostním okruhu, kdy motor virtuálně ujel 6000 km při průměrné rychlosti 250 km/h. Provedení tohoto experimentu je dobrým příkladem, že spalovací motor má stále svoji budoucnost a je zde prostor k zvyšování jeho účinnosti. Porsche se v současnosti zabývá také topologickou optimalizací a tiskem dílů turbodmychadla, kde je velký potenciál pro vytvoření vnitřního chlazení. [27]



Obrázek 22 3D tištěné písty pro Porsche 911 GT2 RS [27]

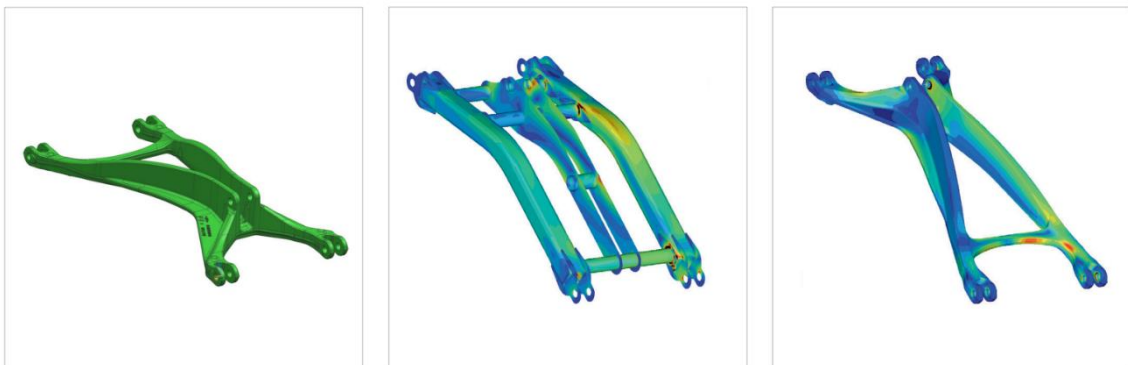
## 2.5 Závěs ramen talířové brány

Topologická optimalizace našla své uplatnění i v zemědělské technice, když německá společnost Amazone, nechala touto metodou přepracovat závěs ramen talířové brány, která nese název Catros-2TS. Toto zařízení je určeno pro kultivaci a mělkou orbu. Na traktor se upevňuje do třibodového závěsu. Původní díl byl svařenec o hmotnosti 245 kg a obsahoval celkem 16,5 m svarů. Každý rok se vyrobí 350 ks tohoto závěsu. Pracovníci této společnosti se spolu s optimalizací rozhodli i pro novou výrobní technologii – nový díl je vyráběn odléváním. Topologická optimalizace byla provedena v softwarech Altair OptiStruct a Altair Inspire. Pro lepší koordinaci práce mezi výpočtáři a konstruktéry byla použita metoda „model based design“, která minimalizuje počet optimalizačních iterací a umožňuje rychle dosáhnout požadovaných výsledků.



**Obrázek 23 Vlevo původní svařovaná konstrukce, uprostřed nadefinovaný design space, vpravo výsledek topologické optimalizace [28]**

Jako non-design space byla zdefinována jednotlivá uchycení závěsu. Samotné optimalizaci byl přidělen maximální prostor mezi úchyty, což ve výsledku vede k výpočtu zajímavých řešení. Počítáno bylo s jednou rovinou symetrie. Výsledek optimalizace byl výpočtáři zpětně zanalyzován v programu Altair OptiStruct za využití metody konečných prvků. Bylo dosaženo dobrých výsledků, jelikož hmotnost konstrukce byla snížena o 20 kg, což má pozitivní vliv na celkové zatížení náprav zemědělského stroje, ale také životnost konstrukce, která se i díky výrobě odlitím zvýšila zhruba 2,5krát. Zároveň odlitek vykazuje výrazně menší napětí, než jaká byla ve svařované konstrukci.



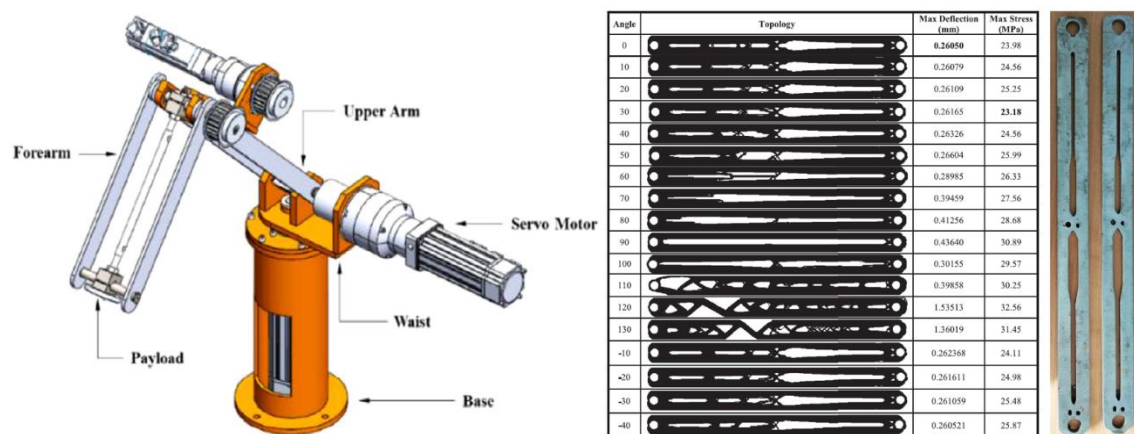
**Obrázek 24 Vlevo upravený výsledek topologické optimalizace, vpravo porovnání napěťových stavů původního a optimalizovaného dílu [28]**

Na druhou stranu je potřeba vzít v úvahu náklady na výrobu licí formy, které se negativně promítly do ceny závěsu i celkové ceny talířové brány, nicméně za předpokladu výroby velké série kusů se tento náklad rychle vrátí zpět. Nový závěs ramen byl úspěšně zoptimalizován a nasazen do sériové výroby. [28]

## 2.6 Ramena průmyslového manipulátoru

Na vysoké škole v Indii (Birla Institute of Technology and Science, Hyderabad) byla zkoumána problematika topologické optimalizace na ramenech průmyslového manipulátoru. Cílem autorů bylo vytvořit optimalizace vrchního a předního ramene tohoto manipulátoru, přičemž zohlednili fakt, že dynamické zatížení ramen se mění spolu s úhlem, o který jsou zrovna ramena natočena. [29]

Porovnávány byly jednotlivé varianty vrchního a předního ramene v úhlu natočení od -40 stupňů do +130 stupňů vůči základně. Jednotlivé varianty optimalizací byly vytvořeny vždy po deseti stupních. Po zoptimalizování konkrétní polohy ramene byla vždy provedena následná analýza a zjištění maximální průhybu ramene a maximální napětí v daném dílu. Vzhledem k faktu, že rameno průmyslového manipulátoru musí vykazovat spolehlivost ve všech možných úhlech natočení, byly nakonec vybrány varianty s nejmenším průhybem a nejnižším napětím v dílu. Tyto varianty byly tvarově velmi podobné, avšak ne zcela shodné. [29]

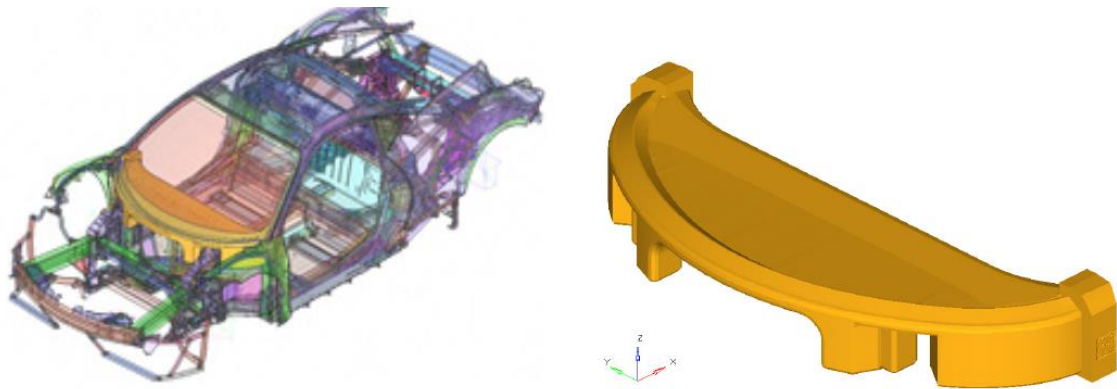


**Obrázek 25** Vlevo – dotčený průmyslový manipulátor, uprostřed – výsledky topologické optimalizace vrchního ramene v závislosti na úhlu natočení, vpravo – konečná podoba optimalizovaného vrchního ramene [29]

Na obrázku výše můžeme vidět finální podobu vrchního ramene. Jak můžeme pozorovat, reálná podoba se od optimalizovaného tvaru mírně liší. Na tomto příkladu lze vidět, že software nám vygenerovanou optimalizací naznačí, jak by součást měla optimálně vypadat, ale konečný vzhled je ovlivněný mimo jiné i technologií výroby. Zde lze předpokládat, že pro výrobu nebyl použit 3D tisk, ale některá z konvenčních metod. [29]

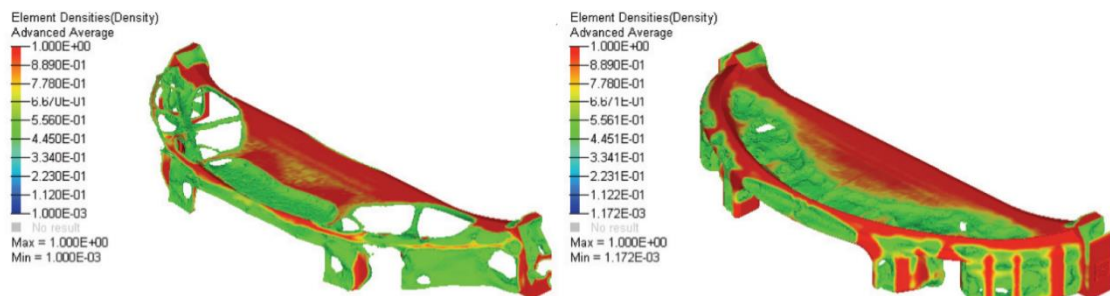
## 2.7 Palubní deska

Zaměstnanci institutu Enza Ferrariho z univerzity v Modeně, využili topologickou optimalizaci pro redukci hmotnosti palubní desky sportovního automobilu. Optimalizace byla provedena v softwaru Altair Optistruct. Původní palubní deska představovala 7,2 % váhy karoserie a hlavním cílem byla její redukce při zachování pevnosti ve všech zátěžných stavech. [19]



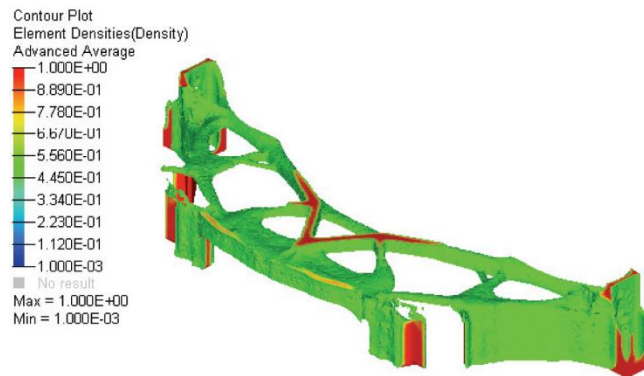
Obrázek 26 Vlevo palubní deska umístěná v sestavě, vpravo design space [19]

Celkový design space se skládal z 600000 čtyřstěnů o průměrném rozměru 8 mm. Palubní deska byla konstruována z hliníkové slitiny. Pro výrobu bylo uvažováno jak odlévání, tak i 3D tisk. Při návrhu byla definována jedna rovina symetrie, procházející svislou polovinou automobilu a dva zátěžné stavy, jeden na ohyb a druhý na krut. Minimální tloušťka struktury, kterou generuje optimalizace, byla stanovena na 20 mm. Samotná optimalizace byla provedena na základě dvou kritérií. První kritérium generuje určité procento hmoty z celkového objemu design space. Tato procenta se pohybovala od 20 % do 80 %. [19]



Obrázek 27 Výsledky na základě prvního kritéria, vlevo 20 %, vpravo 80 % [19]

Lepších výsledků topologické optimalizace bylo dosaženo při použití druhého kritéria, kdy byla minimalizována hmotnost na základě koeficientu bezpečnosti 1,2. Tímto přístupem došlo k výrazné minimalizaci hmotnosti, za současného udržení napětí v přijatelných mezích. [19]



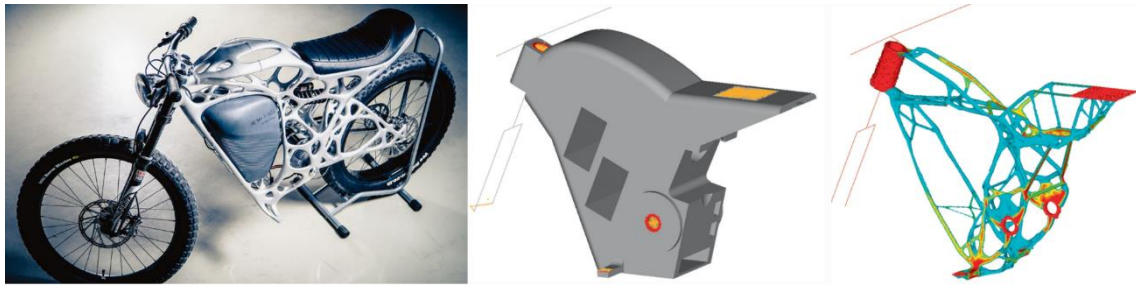
**Obrázek 28** Optimalizace palubní desky na základě kritéria min mass [19]

Palubní deska je sama o sobě velmi rozměrným dílem a pokud by byla uvažována její výroba 3D tiskem, musela by být rozdělena do čtyř samostatných dílů a následně spojena buď svařením, nebo jinou metodou. [19]

## 2.8 Rám elektromotocyklu Light Rider

Společnost Airbus APWorks, která sídlí v německém Mnichově vyvinula za pomoci topologické optimalizace rám motocyklu, poháněného elektromotorem. APWorks tak chtěl demonstrovat, že princip topologické optimalizace výrobků společně s aditivní výrobou může být vhodným řešením pro konstrukci elektromobilů, kde je často řešena redukce hmotnosti komponentů za účelem zvýšení dojezdu. Přestože šlo původně pouze o designovou studii, společnost má v plánu vyrobit až 50 ks tohoto stroje, cena je stanovena na 1,2 milionu Kč. Hlavní podíl na tak vysoké ceně má optimalizovaný rám, který byl po částech vyráběn 3D tiskem, což je velmi nákladné. Velkou předností tohoto motocyklu je jeho celková hmotnost, která činí 35 kg, přičemž samotný rám váží pouze 6 kg. Díky tak nízké hmotnosti dosahuje s elektromotorem o výkonu 4 kW výborného zrychlení (necelé 3 vteřiny z 0 na 45 km/h). [30]





**Obrázek 29 Vlevo – elektromotocykl Light Rider, uprostřed – design space, vpravo – výsledek topologické optimalizace [30]**

Pro výrobu tohoto rámu byla použita speciální hliníková slitina společnosti Airbus Scalmalloy. Tento materiál vyniká mimo nízké hustoty především vynikající pevností, blíží se pevnosti titanu. Na začátku vývoje rámu musely být definovány okrajové podmínky, jako je umístění a uchycení elektromotoru, celková délka a šířka motocyklu, rozvor kol, umístění sedla, řídítek a ovládacích prvků. Následně byl specifikován maximální možný návrhový prostor, tzv. design space. Stejně tak musel být určen prostor, do kterého software zasahovat nesmí – tzv. non-design space. Poté musela být definována všechna zatížení, která na rám motocyklu působí. Když měli vývojáři k dispozici výsledek topologické optimalizace, bylo ho nutné vyhladit do finálního tvaru za pomoci CAD a CAE softwarů, tak aby odpovídal, mimo dalších kritérií, požadavkům pro aditivní výrobu. [30]

Téměř celý návrh motocyklu byl zrealizován za pomoci softwarových nástrojů Altair HyperWorks, které tato společnost běžně využívá. Pro modelování byl využit z této rodiny softwarů Altair HyperMash, pro analýzu pomocí metody konečných prvků Altair Optistruct, pro topologickou optimalizaci Altair Inspire spolu s Altair Optistruct a pro postprocessing Altair HyperView. [30]

Velkou výzvou při samotné výrobě rámu bylo napolohování jednotlivých dílů, kdy bylo zapotřebí, aby byl optimálně využit celý stavební prostor tiskárny. Jednotlivé části rámu musely být pro tisk správně zapodporovány tak, aby jednak nedocházelo k nechtěným deformacím součásti a také s ohledem na maximální možný odvod tepla z procesu, jenž je zahříván energií laseru. Vzhledem k faktu, že zatím nebyla dostupná 3D tiskárna, která by zvládla vytisknout celý rám v jednom kuse, musel být rám rozčleněn do několika samostatných dílů, a ty byly po vytištění svařeny v jeden celek. [30]



**Obrázek 30 Light Rider – rám po vyhlazení výsledků topologické optimalizace [30]**

Je zřejmé, že společnost Airbus APWorks chtěla tímto projektem především demonstrovat možnosti aditivní výroby svým zákazníkům. Za cenu 1,2 milionu Kč si ho totiž pravděpodobně pořídí jen opravdový nadšenec inovativních technologií. [30]

## **2.9 Shrnutí poznatků z uvedených aplikací topologické optimalizace**

V každém ze zmíněných příkladů byla nějakým způsobem využita topologická optimalizace. Některé projekty skončily pouze v podobě studie, ostatní byly dotaženy až do samotné výroby.

Jako velmi zdařilé hodnotím především projekty automobilky Porsche. [26] [27] Tyto články sice nezabírají celou hloubku problému, je z nich ovšem patrné, že aplikace topologické optimalizace ve spojitosti s 3D tiskem, na zvolených dílech automobilů Porsche, dosáhla předem stanovených cílů. Na těchto projektech se podílela celá řada odborníků ve svých oborech, včetně dalších firem, které vyvíjejí optimalizační softwary i tiskárny pro kovový 3D tisk. Inženýři v Porsche použili software Altair Inspire, který bude využit pro topologickou optimalizaci i v této práci.

Další aplikací, kde byl pro topologickou optimalizaci využit Altair Inspire, byla úprava závěsu talířové brány [28] společnosti Amazone. Na této aplikaci se mi líbí velký prostor design space, který byl optimalizaci poskytnut. Z tohoto důvodu se nový závěs od toho původního poměrně výrazně liší. Uspořeno bylo 20 kg, což považuji za velký úspěch

topologické optimalizace, navíc nový optimalizovaný závěs byl ihned uveden do sériové výroby.

Ze studie [30], v níž společnost Airbus APWorks topologicky optimalizovala rám pro svůj elektromotocykl Light Rider je patrné, že 3D tisk má ještě stále svá omezení. Rám totiž, vzhledem k omezenému stavebnímu prostoru současných tiskáren, nemohl být vytištěn vcelku, ale po částech. Tyto části musely být následně svařeny, čímž došlo k dalšímu vnesení napětí do samotného rámu. Napětí byla do jednotlivých částí vnesena již procesem samotného tisku, kdy jsou částice prášku spékány energií laseru. Proto se autoři museli o to více zaměřit na polohování jednotlivých dílů a na tvorbu podpor, aby napětí v co největší míře eliminovali.

Až do výroby byly dotaženy oba případy těhlic [23] [24] formule student. Zde došlo v obou případech k redukci hmotnosti, která bude jedním z hlavních cílů i této práce. Za zmínku stojí ještě fakt, kdy studenti vhodným napolohováním dílů dospěli k výrazné úspoře výrobních nákladů. Já se v této práci zaměřím i na porovnání výrobních nákladů konvenční metody s 3D tiskem, které v žádném článku nebylo zmíněno.

Všechny zmíněné studie se věnovaly topologické optimalizaci dílů, nebo zařízení z automotive průmyslu. Některé studie byly orientovány na motorsport, jako například již zmíněné těhlice pro formule student [23] [24]. Také článek o výrobě pístů pro sportovní automobil Porsche 911 GT2 RS [27] s problematikou motorsportu úzce souvisí a dovedl bych si představit aplikaci stejně vyrobených pístů i do motoru Škoda Fabia RS Rally2. Žádný z nalezených článků se ovšem nezabýval problematikou topologické optimalizace dílů rally vozů. Proto jsem oslovil sportovní oddělení Škoda Motorsport, které projevilo zájem o spolupráci. Společně jsme vybrali několik součástí, na kterých jsem provedl analýzu možností topologické optimalizace, která bude podrobněji popsána v další kapitole této práce.



### 3 NÁVRH METODIKY A PROVEDENÍ EXPERIMENTU VYUŽITÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE NA REÁLNÝCH DÍLECH

Praktická část této diplomové práce je řešena ve spolupráci se společností ŠKODA AUTO a.s., respektive s jejím sportovním oddělením Škoda Motorsport. Tato společnost v současnosti produkuje závodní vůz Škoda Fabia RS Rally2, který vychází z aktuální čtvrté generace sériově vyráběné Škoda Fabia. Z tohoto vozu byly vybrány tři díly (adaptér řízení, horní uložení tlumiče a spodní koncovka sloupku řízení), u nichž byl požadavek na snížení hmotnosti a zachování, případně zvýšení pevnosti. Dalším cílem bylo porovnání finanční náročnosti výroby těchto dílů konvenční metodou a 3D tiskem.

Škoda Fabia RS Rally2 je již třetí generací závodního vozu mladoboleslavské automobilky kategorie Rally2, dříve označované jako R5. Nahrazuje tak své předchůdce – ŠKODA Fabia R5 a ŠKODA Fabia Rally2 Evo, kteří patřili k nejlepším modelům ve své třídě a bylo jich dohromady prodáno více než 470 ks do celého Světa. Vůz je určen pro automobilové rally, kde se bude účastnit kategorie WRC2<sup>1</sup> v rámci Mistrovství světa, Mistrovství Evropy a národních šampionátů půjde o vůz vrcholné kategorie. Vývoj byl mimo výkonu zaměřen také na spolehlivost, kterou jsou závodní vozy ŠKODA již řadu let pověstné. Během testování najezdil nový závodní vůz několik tisíc ostrých kilometrů na asfaltu, šotolině i sněhu v obvyklých destinacích světových rally. [31]

Škoda Fabia RS Rally2 byla vyvíjena od roku 2020, první jízdni testy se uskutečnily v létě roku 2021, představena novinářům, závodníkům i široké veřejnosti byla 14. června 2022 před objektem Škoda Motorsport v Plazích u Mladé Boleslavi. Svoji závodní premiéru si odbyla v listopadu 2022 na východoněmecké Lausitz Rallye s norskou posádkou Andreas Mikkelsen – Torstein Eriksen. První vyrobené kusy se dostanou k zákazníkům na konci roku 2022 a začátku roku 2023, zájem o tento nový závodní vůz společnosti ŠKODA je obrovský. [31]

---

<sup>1</sup> Druhá nejvyšší kategorie v rámci Mistrovství světa v rally



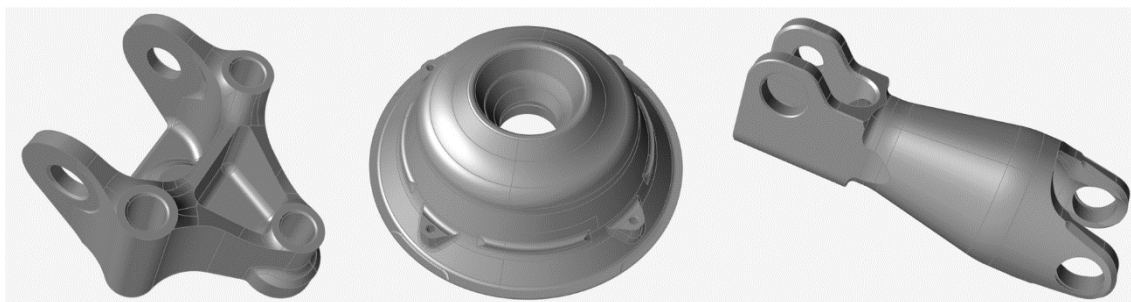
**Obrázek 31 Škoda Fabia RS Rally2 [31]**

Vůz je vyvinut na základě obsáhlých zkušeností z vývoje a provozu předchozích dvou modelů, téměř každý díl byl oproti předchozí generaci přepracován a vylepšen. Technické předpisy pro vozy kategorie Rally2 jsou velmi striktní a obsáhlé. Řada dílů musí vycházet ze sériově vyráběných variant a zároveň musí splnit cenový strop proto, aby celková cena vozu byla dosažitelná pro zákazníky a zároveň, aby tým s větším rozpočtem nezískal při vývoji zásadní výhodu. Zakázané jsou pro výrobu i některé technologie, jako například svařování metodou TIG na karoserii vozu, nebo výroba dílů z titanu. Některé díly mají předepsanou minimální, nebo maximální hmotnost, stejně tak jako rozměry. [31]

Nejzásadnější změnou je nová platforma MQB-A0, kterou nově disponuje Fabia čtvrté generace, a na níž již byly postaveny současné koncernové modely VW Polo a Seat Ibiza. S předchozí platformou PQ24 a následně PQ26 jezdila Škoda Fabia od roku 1999. Změna platformy znamená výraznou změnu rozměrů civilní Fabia, a i závodní vůz tomu musel být přizpůsoben. Větší rozměry poskytly novému vozu lepší stabilitu, vůz je zároveň velmi dobře vyvážen. Další výraznou novinkou je zcela nový motor, vycházející ze sériové verze motoru 2.0 TFSI EA888 Lk1, který pohání sériové modely Octavia a Kodiaq RS. Zdvihový objem motoru musel být dle pravidel kategorie Rally2 snížen na 1620 cm<sup>3</sup>. Vylepšena byla termodynamika spalovacích prostor, variabilní časování výfukových a sacích ventilů, nebo optimalizované mazání. Přepracovaný byl rovněž ochranný rám, chránící posádku v případě nehody. [31]

### 3.1 Výběr dílů a postup optimalizace

Výchozí díly pro topologickou optimalizaci byly zvoleny po společné konzultaci s oddělením Škoda Motorsport. Na první pohled bylo zřejmé, že většina dílů nové Škoda Fabia RS Rally2 je již ve velké míře odlehčena, jejich optimalizace tedy bude opravdovou výzvou. Postupně budou topologicky optimalizovány díly: adaptér řízení, horní uložení tlumiče a spodní koncovka sloupku řízení. Byly zvoleny takové součásti, které mimo toho, že nabízely určitý prostor k optimalizaci, jsou náročné pro výrobu konvenční metodou, a tudíž zde byl potenciál zjednodušení výroby 3D tiskem. Ruku v ruce s faktem obtížnosti výroby jde i finanční náročnost výroby dílu, která bude rovněž porovnána. Podrobněji bude řešena spodní koncovka sloupku řízení, u adaptéru řízení a horního uložení tlumiče bude pouze naznačen postup.

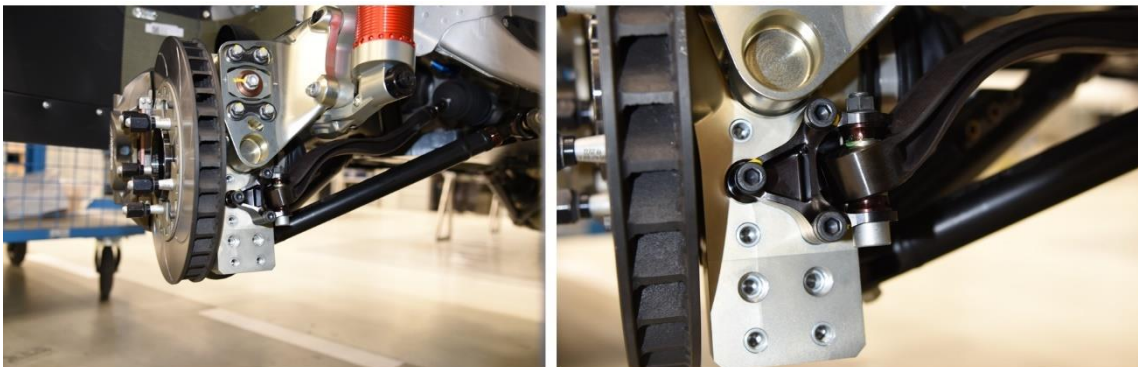


**Obrázek 32 Vybrané díly pro topologickou optimalizaci, zleva – adaptér řízení, horní uložení tlumiče, spodní koncovka sloupku řízení**

Vlastní topologická optimalizace jednotlivých dílů byla provedena v softwaru Altair Inspire, verze 2022.12953. Vzhledem k faktu, že zátěžné stavy dotčených dílů jsou interním know-how oddělení Škoda Motorsport, která potřebná data sbírá již od projektu Fabie Super 2000, jejíž vývoj odstartoval již v roce 2007, budou přesná čísla uvedena jen u dílu spodní koncovky sloupku řízení. Na tento díl působí především ovládací síla volantu, která nepodléhá utajení. U ostatních dílů bude pouze naznačen směr působících sil.

## 3.2 Analýza možnosti topologické optimalizace adaptéru řízení

Prvním dílem, který byl vytipován pro optimalizaci je adaptér řízení. Tento díl spojuje hlavu kola spolu se spojovací tyčí řízení, respektive jejím unibalem. Adaptér je třemi šrouby připevněn k hlavě kola, v jeho spodní části se nachází otvor pro protikus, sloužící k vystředění dílu při montáži a aretaci na hlavě kola. Díl je v současné době vyráběn CNC frézováním a na první pohled je zřejmé, že maximum materiálu bylo již odebráno pro co největší úsporu hmotnosti. Při optimalizaci bude nutné respektovat i okolní prostor tohoto dílu, jelikož v blízkosti se nachází další součásti podvozku, které také mají svůj pracovní prostor. Současný díl je vyroben z nízkolegované konstrukční oceli ČSN 15260, která je vhodná pro velmi namáhané strojní součásti, s mezí pevnosti  $R_m$  1450-1550 MPa. Maximální rozměr adaptéru řízení činí zhruba 70 mm. Hmotnost tohoto dílu je 200 g. Na adaptér řízení působí síla přesahující 40 kN. Na voze jsou dohromady 4 kusy tohoto dílu, na zadní nápravě adaptér spojuje hlavu kola s pevnou spojovací tyčí, která je uchycena k zadní nápravnici. Unifikace dílů ulehčuje situaci zákazníkům, protože s sebou na závody nemusí vozit příliš velké množství náhradních dílů. Zajímavostí je, že i samotná hlava kola je vpředu i vzadu na obou stranách vozu shodná, pro její záměnu stačí pouze přemontovat navazující komponenty. Díl je opatřen povrchovou úpravou – černěním.

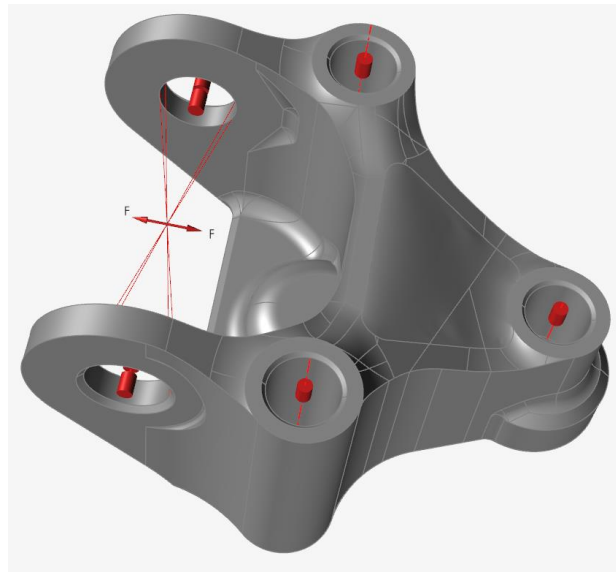


Obrázek 33 Vlevo – závěs předního kola, vpravo – detail adaptéru řízení

### 3.2.1 Definice zátěžných stavů

Nejdříve byla zadefinována síla, kterou na díl působí spojovací tyč řízení, a to jak v kladném, tak záporném směru. Jelikož mají síly společné působiště, ale působí obráceným směrem, dostala každá svůj vlastní load case. Velikost sil je rozdílná, síla

působící jako tlak je zhruba dvojnásobná, oproti tahu. Dále byly umístěny podpory do všech otvorů pro šrouby a do středícího otvoru ve spodní straně dílu.



Obrázek 34 Definice okrajových podmínek – adaptér řízení

### 3.2.2 Výběr materiálu pro 3D tisk

Materiál pro jednotlivé díly byl vybírán s ohledem na mechanické vlastnosti tak, aby předčil původní materiál. Díky tomu bylo možné odebírat materiál z původních tvarů bez navyšování dílčích napětí v součástech. Volba byla zároveň učiněna s ohledem na fakt, že koncern VW disponuje několika tiskárnami od společnosti EOS GmbH. Proto byly zvoleny prášky od této společnosti.

Původní díl je vyroben z nízkolegované konstrukční oceli ČSN 15260. Tato ocel má mez kluzu zhruba 800 MPa. Pro výrobu 3D tiskem byla zvolena ocel maraging 1.2709, která má ve stavu AB (as build – bez tepelného zpracování) mez kluzu 1070 MPa. Jedná se o relativně levný materiál s vysokými hodnotami mechanických vlastností. Jeho další výhodou je snadná tisknutelnost. Nový materiál, tak již v základním stavu vykazuje lepší mechanické vlastnosti než materiál původní, a v případě potřeby je možné získat ještě výrazně vyšší hodnoty mechanických vlastností následným tepelným zpracováním. Částice prášku mají velikost 20-65  $\mu\text{m}$ . Jako inertní plyn pro stavbu je výrobcem doporučen argon. V praxi je ovšem často využíván dusík, jehož generátor lze dokoupit k tiskárně jako příslušenství, čímž dochází k redukci nákladů. [13]

**Tabulka 8 Chemické složení oceli 1.2709 [%] [13]**

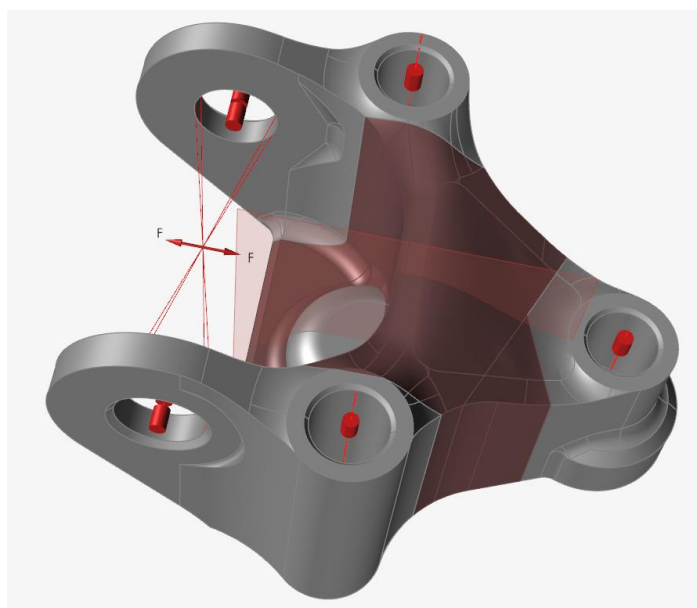
Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Cr	Mn	Si	C	S	P
zbytek	18,0	9,2	4,8	1,0	≤0,25	≤0,15	≤0,1	≤0,03	≤0,01	≤0,01

**Tabulka 9 Porovnání mechanických vlastností původního materiálu s ocelí 1.2709, stav HT označuje tepelné zpracování [13]**

	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
ČSN 15260	800	1450	9,0
1.2709 AB	1070	1200	8,0
1.2709 HT	2180	2260	3,3

### 3.2.3 Definice design space

Design space je prostor, v němž je optimalizačnímu softwaru dovoleno provádět změny. U každého dílu bylo potřeba pečlivě rozmyslet, které části dílu musí být ponechány bez zásahu, a která část může být optimalizována.



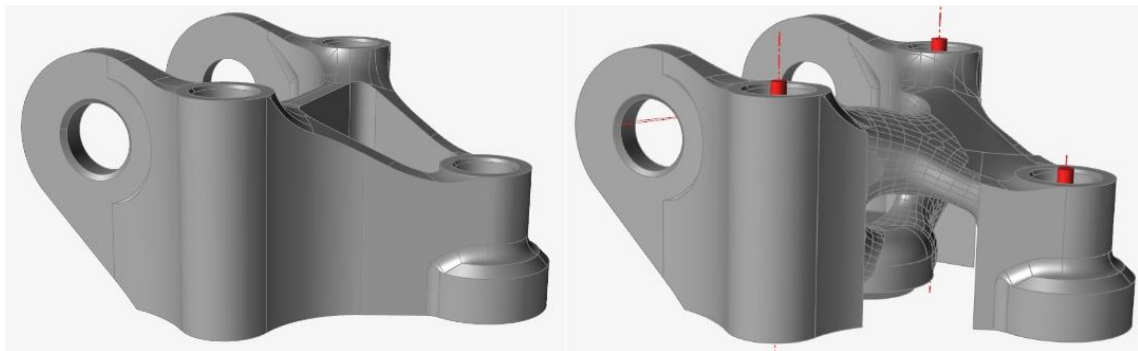
**Obrázek 35 Definice design space (hnědá barva) - adaptér řízení**

Adaptér řízení byl ze všech vybraných součástí tou s nejmenším prostorem pro optimalizaci. Součást je již svým původním tvarem výrazně odlehčena frézováním. Zároveň zde nebylo místo pro výrazné přidání prostoru pro optimalizaci z vnější strany dílu, protože se součást nachází v prostoru, kde dochází k pohybu několika dalších dílů. Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro přidání materiálu „zalepením“ odlehčujících otvorů

ve spodní straně dílu a stejný postup jsem aplikoval na velký otvor z vrchní části. Bez zásahu musely být ponechány všechny otvory pro šrouby, stejně jako prostor pro spojovací tyč řízení s unibalem a centrážní otvor. Jako design space jsem tedy zvolil prostor v prostřední části dílu. Pro optimalizaci byla definována jedna rovina symetrie, podle níž jsou obě části dílu totožné.

### 3.2.4 Výsledek simulace

Design space tohoto dílu byl mimo původní tvar rozšířen o materiál, kterým byly zaslepeny nepotřebné otvory uvnitř součásti, což dalo optimalizaci prostor pro jiné rozmístění materiálu v dílu. Zde byl materiál propojující jednotlivé části dílu přesunut ze spodní části směrem vzhůru. Jde o logický jev, jelikož ve spodní části je díl v kontaktu s hlavou kola. Optimalizace byla vytvořena kritériem maximalizace tuhosti (Maximize Stiffness), při využití 30 % objemu celkového design space, což odpovídá základnímu nastavení tohoto optimalizačního kritéria. Po zoptimalizování byl povrch optimalizované části vyhlazen funkcí PolyNURBS. Optimalizací došlo k nepatrné úspoře hmotnosti 12 g. Příznivějším faktem je snížení maximálního napětí v optimalizovaném dílu o více než 100 MPa. Toto napětí se nachází na hraně otvoru pro šroub spojující součást se spojovací tyčí řízení.



**Obrázek 36** Porovnání optimalizovaného adaptéru řízení s původním dílem

**Tabulka 10 Porovnání adaptérů řízení**

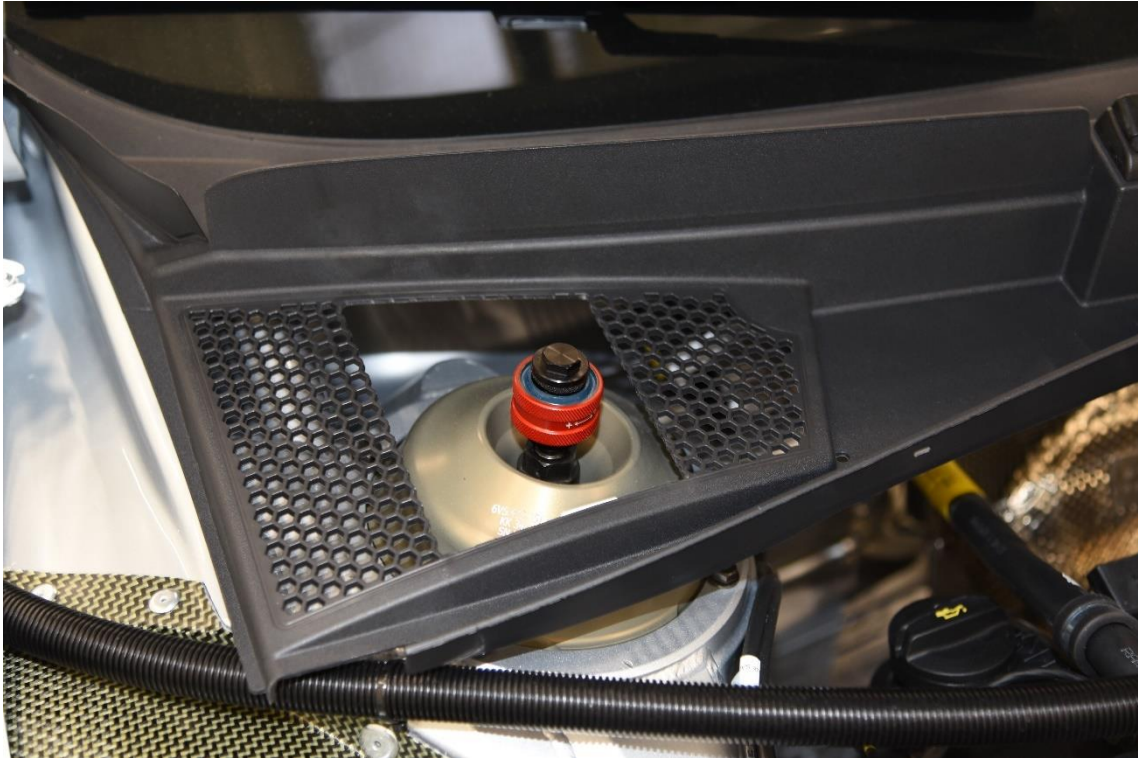
	Původní díl	Optimalizovaný díl	Změna
Materiál	25CrMo4	1.2709 AB	-
Mez kluzu	800 MPa	1070 MPa	+25 %
Objem	25 625 mm <sup>3</sup>	24 129 mm <sup>3</sup>	-6 %
Hmotnost	205 g	193 g	-6 %
Maximální deformace	0,135 mm	0,559 mm	+76 %
Maximální napětí (Von Mises)	536 MPa	428 MPa	-20 %

Vzhledem k velmi malému prostoru pro optimalizaci tohoto dílu a zanedbatelné úspoře hmotnosti jsem se rozhodl nepokračovat v dalších iteracích optimalizace adaptéru řízení a věnovat se dvěma zbývajícím součástem, především spodní koncovce sloupku řízení.

### **3.3 Analýza možnosti topologické optimalizace horního uložení tlumiče**

Druhým dílem, určeným k optimalizování je horní uložení tlumiče, běžněji označovaným anglickým překladem – topmount. Topmount je mezičlánkem mezi karoserií a předními tlumiči. Přenáší do karoserie síly a rázy od předních kol a musí odolat i velkým rázům, které nastanou při dopadu vozu za skokem, nebo pokud kolo automobilu vjede do velké díry. Jde o rotační díl, v současné době vyráběný převážně CNC soustružením. Uložení je ke karoserii připevněno pomocí čtyř šroubů, tlumič je vsazen přes unibal do prostředního otvoru tohoto dílu a z vrchu zajištěn. Z důvodu utažení tlumiče musí být vrchní část středového otvoru rozšířena, aby byl zajištěn prostor pro manipulaci s nářadím. Na první pohled je patrné, že tento díl nabízí prostor pro svoji optimalizaci, jelikož zde není realizováno žádné odlehčení. Topmount je umístěn v blízkosti přední kapoty vozu, proto nesmí být překročena stanovená výška tohoto dílu. Současná součást je vyrobena ze zastudena vytvrditelné slitiny hliníku EN AW-7075 T651 s mezí pevnosti  $R_m$  minimálně 460 MPa a váží 440 g. Maximální průměr horního uložení činí cca 180 mm. Díl je opatřen povrchovou úpravou – tvrdou anodickou oxidací. Síla působící na díl ve svislém směru přesahuje 60 kN.

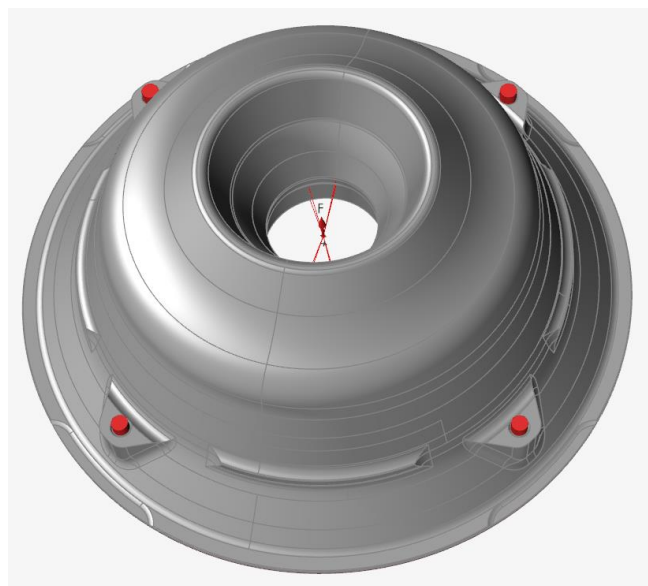




**Obrázek 37 Horní uložení tlumiče na zkompletovaném závodním voze**

### **3.3.1 Definice zátěžných stavů**

Tato součást spojuje přední tlumič s karoserií vozu. Na díl působí v jeho ose síla od tlumiče, která nepůsobí zcela svisle vzhůru, ale je lehce natočena do středu vozu. Síla se přes horní uložení roznáší do karoserie. Podpory byly umístěny do čtyř otvorů pro závit, přes který drží šrouby horní uložení v karoserii.



**Obrázek 38 Definice okrajových podmínek – horní uložení tlumiče**

### 3.3.2 Výběr materiálu pro 3D tisk

Současné uložení tlumiče je vyrobeno ze zastudena vytvrditelné slitiny hliníku EN AW-7075 T651. Pro 3D tisk volím slitinu Al2139, která může dosáhnout lepších mechanických vlastností tepelným zpracováním. Jde o nejpevnější hliníkovou slitinu pro 3D tisk od společnosti EOS. Tato slitina je hojně využívána v odvětví motorsportu. Výrobky mohou být následně opatřeny anodickou oxidací. Částice prášku mají velikost 20-63  $\mu\text{m}$ . Inertním plynem používaným v tiskovém procesu je Argon. [13]

**Tabulka 11 Chemické složení slitiny Al2139 [%] [13]**

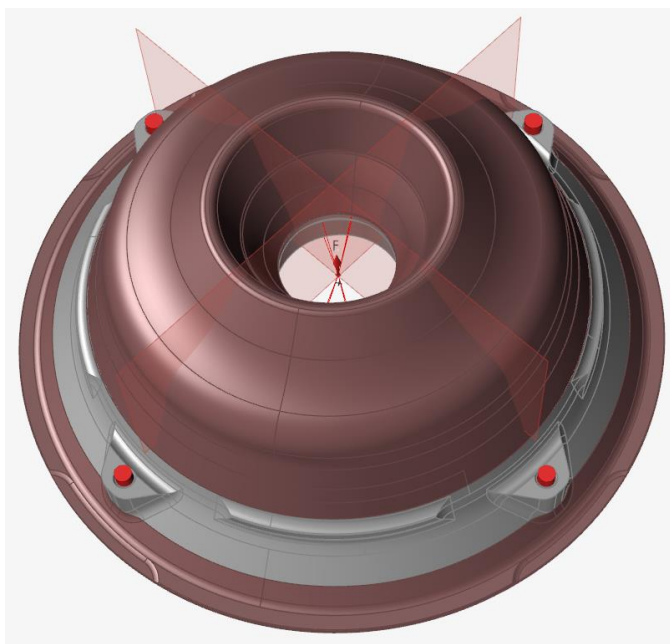
Al	Cu	Mg	Ag	Mn	Zn	Si	Fe	Cr	V	Ostatní
zbytek	5,00	>0,80	0,22	0,40	<0,25	<0,10	<0,15	<0,05	<0,05	<4,00

**Tabulka 12 Porovnání mechanických vlastností původní hliníkové slitiny se slitinami pro 3D tisk [13]**

	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
EN AW-7075 T651	400	460-540	6
Al2139 AM	350	380	6
Al2139 HT	460	520	4

### 3.3.3 Definice design space

U tohoto dílu jsem se rozhodl jít cestou odebrání materiálu při zachování původního tvaru. Tento postup byl možný vzhledem k volbě materiálu s vyšší mezí kluzu oproti původnímu dílu. Zachována musela být část ve středu uložení, kde je usazen unibal, přes který je tlumič spojen s horním uložením. Mezi další části, které musely být zachovány bez zásahu, byly středící plošky, sloužící k vystředění uložení do kroužku v karoserii, k němuž je přišroubováno. Zachovány musely být samozřejmě i samotné otvory pro šrouby. Ve všech ostatních částech mohl být definován design space. Vzhledem k tomu, že se jedná o rotační součást, byly definovány dvě roviny symetrie, procházející osou dílu a osami děr pro závit.

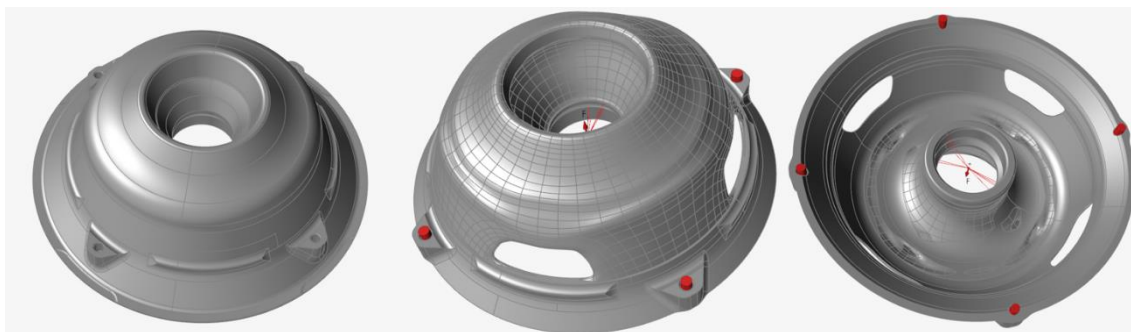


Obrázek 39 Definice design space (hnědá barva) - horní uložení tlumiče

### 3.3.4 Výsledek simulace

U součásti horního uložení tlumiče byl pouze odebírán materiál. Design space tedy vycházel pouze z částí dílu, které neslouží žádnému významnému účelu. Na obrázcích níže je vidět, že optimalizace do uložení udělala několik odlehčujících otvorů a na několika místech ztenčila tloušťku. Toto odlehčení bylo možné díky větší mezi kluzu materiálu pro 3D tisk a také z důvodu, že součást byla zjevně svou konstrukcí lehce předdimenzována. Otvory v dílu nejsou vzhledem k funkčnosti žádoucí, jelikož by jimi mohly vnikat nečistoty do motorového prostoru. Tento problém lze však jednoduše vyřešit pomocí přelepku, kterými jsou na karoserii soutěžního vozu z tohoto důvodu zalepeny mnohé otvory. Optimalizace byla vytvořena s kritériem minimalizace hmotnosti (Minimize Mass). V tabulce níže můžeme vidět, že došlo k výrazné úspoře hmotnosti více než 40 %, která už v prostředí automobilových závodů dává smysl. Pozitivním faktem je taky částečné snížení maximálního napětí v dílu, jehož bylo docíleno optimálním rozložením hmoty spolu s vyšší mezí kluzu nového materiálu. Důležité je ovšem zmínit, že k dosažení těchto mechanických hodnot je zapotřebí tepelného zpracování, jenž může negativně ovlivnit křehkost dílu. Negativním faktem se stává poměrně výrazné zvýšení deformací (30 %), které jsem očekával. Pokud pouze odebíráme materiál a Youngův modul pružnosti zůstane přibližně stejný, deformace se vždy zvýší. Hlavním účelem tohoto dílu je zajištění pevného spojení tlumiče s karoserií, nejsou zde tak vysoké nároky na přesné vedení jako u jiných podvozkových dílů, proto jsou

deformace v tomto rozsahu přípustné. Po optimalizaci byla výsledná plocha opět vyhlazena funkcí PolyNURBS.



**Obrázek 40** Optimalizované horní uložení tlumiče (vpravo)

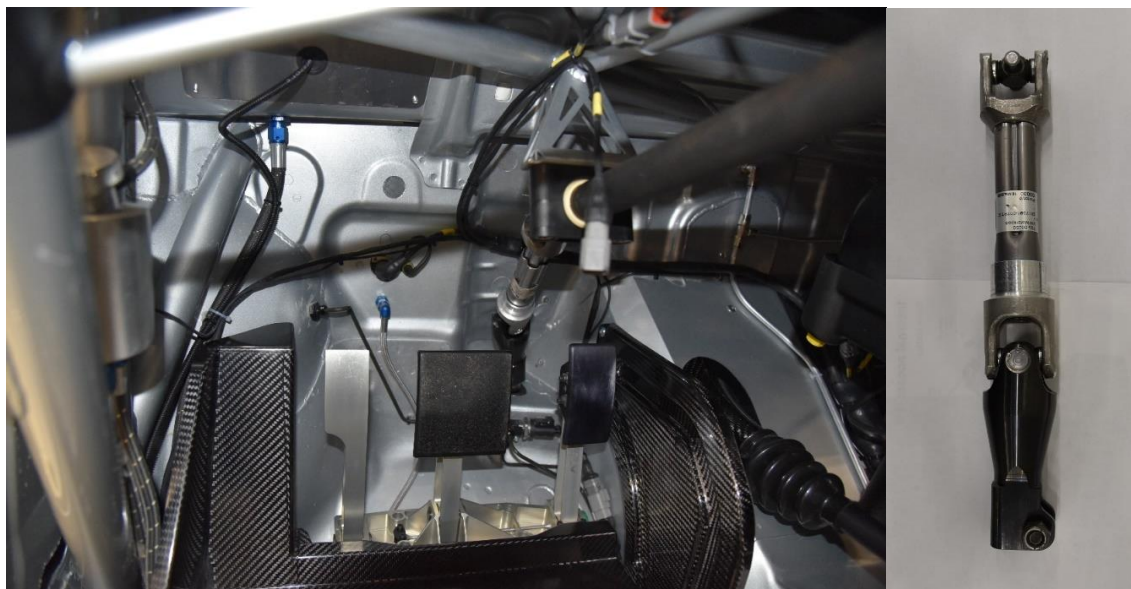
**Tabulka 13** Porovnání horního uložení tlumiče s optimalizací

	Původní díl	Optimalizovaný díl	Změna
Materiál	AlZn5, 5MgCu	Al2139 AM	-
Mez kluzu	400 MPa	460 MPa	+13 %
Objem	162 745 mm <sup>3</sup>	92 526 mm <sup>3</sup>	-43 %
Hmotnost	462 g	263 g	-43 %
Maximální deformace	0,522 mm	0,742 mm	+30 %
Maximální napětí (Von Mises)	590 MPa	521 MPa	-12 %

### 3.4 Detailní topologická optimalizace spodní koncovky sloupku řízení

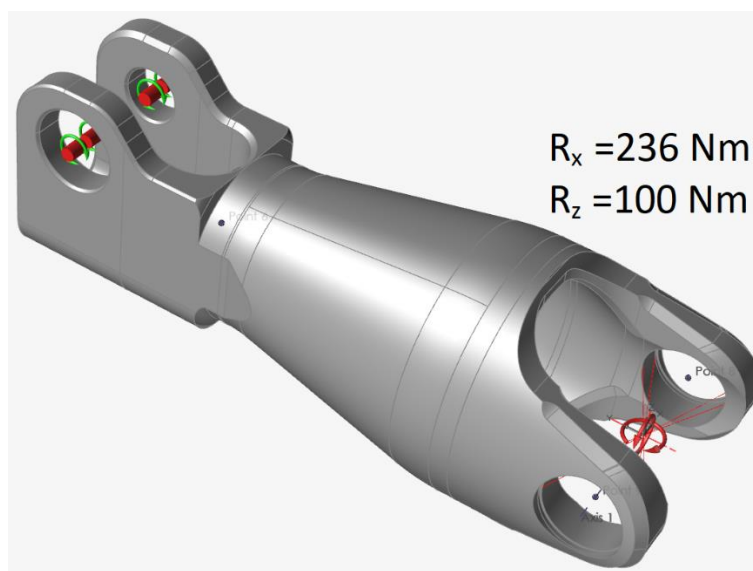
Posledním dílem, na němž bude provedena topologická optimalizace je spodní koncovka sloupku řízení. Tento díl je součástí sloupku řízení, který přenáší sílu od volantu do samotného řízení. Vpravo z pohledu obrázku, viz. níže, je přes křížový kloub spojen s vrchní koncovkou sloupku řízení, která navazuje na deformační prvek sloupku řízení, zajišťující bezpečnost v případě nehody a musí být zachován ze sériového vozu. Na druhé straně je do otvoru zasunut pastorek hřebenového řízení, který je sevřen do koncovky sloupku řízení pomocí speciálního šroubu, který je utážen s předpětím 18 kN. Na koncovku působí v místě křížového kloubu dva krouticí momenty ( $R_x=236$  Nm a  $R_z=100$  Nm).

Součást je vyfrézována z nízkolegované chrom-molybdenové oceli k zušlechťování ČSN 15142, která má mez pevnosti  $R_m$  930-1130 MPa a je opatřena povrchovou úpravou – černěním, stejně jako adaptér řízení. Prostřední část dílu je sice dutá, ale zdá se, že by tu ještě mohl být prostor pro optimalizaci. Současná hmotnost dílu je 334 g.



Obrázek 41 Vlevo: umístění spodní koncovky sloupku řízení za pedály závodního vozu, vpravo: sestava sloupku řízení

### 3.4.1 Definice zátěžných stavů



Obrázek 42 Definice okrajových podmínek – spodní koncovka sloupku řízení

Do osy díry křížového kloubu byly zadefinovány dva momenty, které na součást působí –  $R_x=236$  Nm a  $R_z=100$  Nm. Podpory byly umístěny do otvorů pro šroub, zajišťující

spojení s pastorkem hřebenového řízení. Byla jim odebrána fixace momentu  $R_z$  (na obrázku zelené šipky). Poslední podpora byla umístěna na vnitřní plochu dílu, kde dochází ke kontaktu s pastorkem.

### 3.4.2 Výběr materiálu pro 3D tisk

Díl spodní koncovky sloupku řízení, je konvenční technologií zhotovován z nízkolegované chrom-molybdenové oceli k zušlechťování ČSN 15142. Tato ocel má mez kluzu zhruba 650 MPa. Stejně jako v případě adaptéru řízení jsem i pro tento díl zvolil maraging ocel 1.2709, jejíž mez kluzu 1070 MPa již ve výchozím stavu výrazně převyšuje původní materiál. [13]

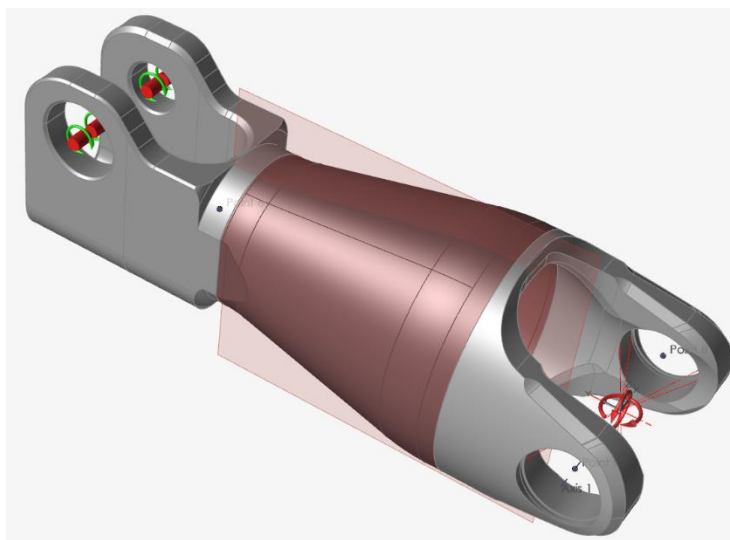
**Tabulka 14 Porovnání mechanických vlastností původního materiálu a materiálu určeného pro 3D tisk [13]**

	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
ČSN 15142	650	1130	12,0
1.2709 AB	1070	1200	8,0
1.2709 HT	2180	2260	3,3

### 3.4.3 Definice design space

Při úvaze, které části dílu optimalizovat a které ponechat, muselo být vzato v potaz, že z pohledu obrázku na pravou část dílu navazuje křížový kloub s protikusem, jenž pro svůj pohyb potřebuje přesně vymezený prostor. Naopak na levé straně dílu je součást spojena s pastorkem řízení. Vnitřní část dílu přesně kopíruje vnější tvar pastorku a díly jsou spolu zajištěny speciálním šroubem. Proto bylo rozhodnuto rozříznout díl na tři kusy a ty krajní ponechat bez zásahu vzhledem k svým funkčním vlastnostem. Naopak vhodným prostorem pro optimalizaci se jeví prostřední část, která byla definována jako design space ve dvou variantách. U první varianty nebyl tvar dílu měněn. Myšlenkou byl fakt, že může dojít k úběru materiálu bez snížení celkové pevnosti, jelikož pro 3D tisk byl zvolen materiál s výrazně vyšší mezí kluzu, oproti původnímu dílu. U druhé varianty byl vyplněn vnitřní prostor optimalizované části a byl tak poskytnut větší prostor samotné optimalizaci. Z vnější části dílu nebyl materiál přidáván, jelikož zde by mohla vzniknout kolize s dalšími díly automobilu. Pro optimalizaci byla definována jedna rovina symetrie, jenž vede osou dílu a rozděluje ho na dvě symetrické části.





Obrázek 43 Definice design space (hnědá barva) - spodní koncovka sloupku řízení

### 3.4.4 Nastavení simulace

Vzhledem k tomu, že nastavení simulace bylo u všech dílů podobné, bude toto nastavení demonstrováno pouze na dílu spodní koncovky sloupku řízení. Dříve, než se spustí samotná topologická optimalizace, je třeba provést předběžnou analýzu. Díky ní, můžeme provést kontrolu, zda máme správně definovány okrajové podmínky, nebo zda nedošlo k zadání chybných jednotek. Software Inspire nabízí volbu ze dvou rychlostí výpočtu analýzy. První varianta je rychlejší a slouží pro rychlé ověření. Druhá volba výpočtu je výrazně časově náročnější, ale poskytuje přesnější výsledky. Analýzu lze provést buď celkovou, nebo pro každý „load case“ zvlášť.

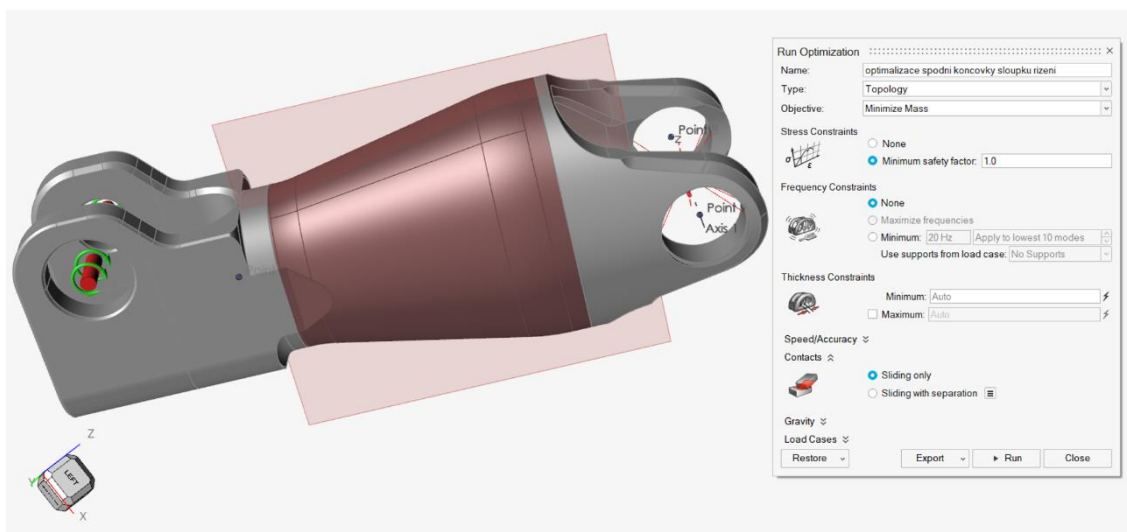


Obrázek 44 Analýza součásti, rozložení deformací

Prvním výsledkem, který lze z analýzy získat je velikost deformací v mm. Deformace lze zobrazit buď jako celkové, nebo pro každý směr zvlášť (X, Y, Z). Následně lze spustit dynamickou simulaci pohybu dílu, kde je možné zobrazit místa s minimální a maximální deformací. Pokud byl součásti zadefinován materiál, zobrazí nám analýza rozložení koeficientu bezpečnosti v dílu, jenž vychází z meze kluzu. Další částí analýzy zobrazují rozložení napětí v součásti. Pokud během analýzy není shledána žádná nesrovnalost, může se dále pokračovat s nastavením topologické optimalizace.

Mimo topologické optimalizace je dále v softwaru Altair Inspire k dispozici optimalizace topografická, strukturální optimalizace, optimalizace lattice, nebo Gauge. Software nabízí několik přístupů k topologické optimalizaci. Prvním je maximalizace tuhosti, kdy je optimalizace orientována na předem definované výsledné procento objemu design space. Toto procento lze v softwaru zvolit od pěti do padesáti procent, případně zvolit vlastní. Druhým přístupem je minimalizace hmotnosti, kdy je počítáno s koeficientem bezpečnosti, zohledňujícím mez kluzu nastaveného materiálu. V nastavení optimalizace je možné zvolit minimální koeficient bezpečnosti, což v praxi znamená, že v žádném místě optimalizovaného dílu nebude ve výsledku větší napětí, než je odpovídající násobek meze kluzu. Posledním dostupným přístupem je optimalizace s maximalizací frekvence, kde lze navolit minimální a maximální tloušťku výsledku.

V tomto případě byl zpravidla zvolen přístup minimalizace hmotnosti, při koeficientu bezpečnosti 1,0. Obdobný způsob využívá i oddělení Škoda Motorsport, jelikož se snaží své díly konstruovat s bezpečností, která se rovná mezi kluzu materiálu.



Obrázek 45 Nastavení optimalizace s kritériem minimalizace hmotnosti

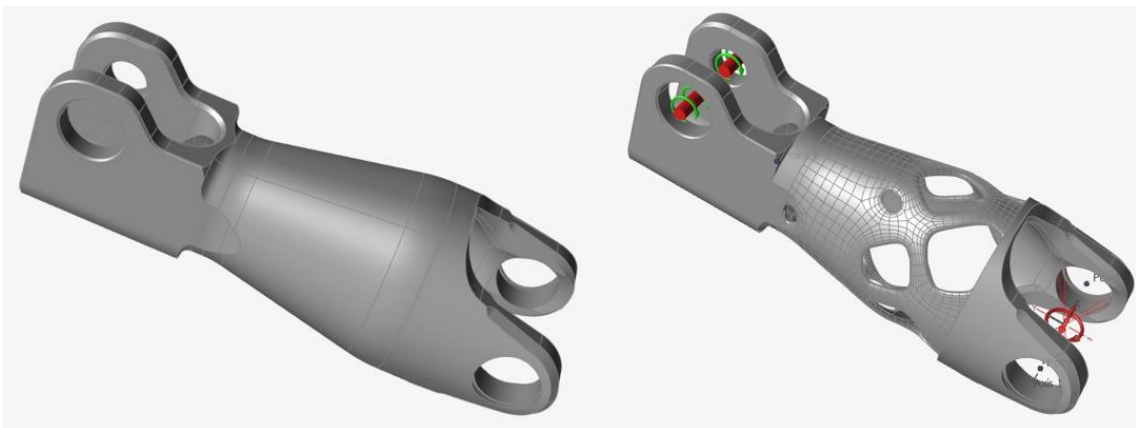


### 3.4.5 Výsledky simulací

Dílem, na který jsem se při optimalizacích nejvíce zaměřil, je spodní koncovka sloupku řízení. Pro porovnání jsem zvolil 3 varianty optimalizací tohoto dílu, jednu optimalizaci původního tvaru a dvě optimalizace s vnitřním objemem. Součást byla vždy rozřezána na tři části, krajní části navazující na další komponenty zůstaly bez optimalizace, optimalizována byla pouze prostřední část.

#### 3.4.5.1 Varianta 1

První variantou byla optimalizace původního tvaru, která byla vypočítána na z kritéria minimalizace hmotnosti (Minimize Mass) na základě koeficientu bezpečnosti 1,0. Výsledkem je poměrně výrazné odlehčení. Z výsledku je možné pozorovat snahu softwaru o vytvoření struktury, která může připomínat pletivo, což je pravděpodobně způsobené zatížením součásti na krut. Tato varianta byla nejlehčí, s úsporou hmotnosti 15 % proti původnímu dílu. Na součásti se v její spodní straně nachází jedno slabé místo, kde se vyskytuje výrazně větší napětí oproti celku.



Obrázek 46 Varianta 1 - optimalizace původního tvaru

#### 3.4.5.2 Varianta 2

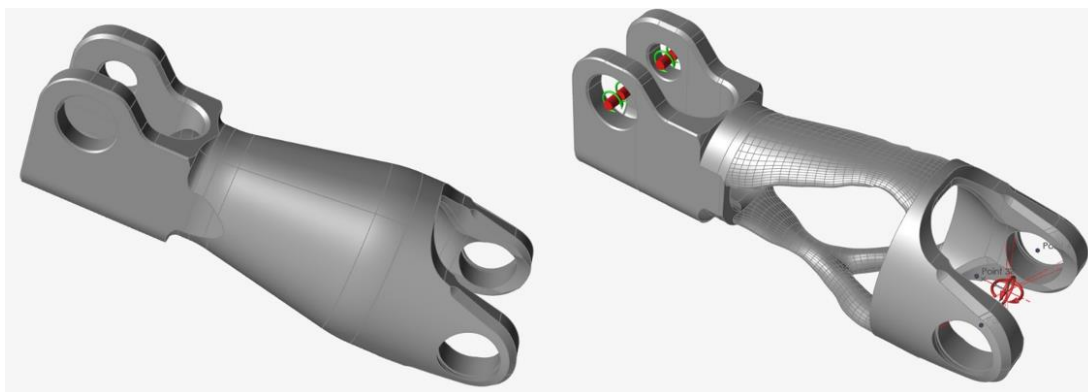
Druhá varianta byla vytvořena z tvaru s vnitřním objemem na základě kritéria maximalizace tuhosti (Maximize Stiffness), při optimalizaci na 30 % celkového design space. Na první pohled se jedná o robustní tvar, který je mimo materiálu na obvodu doplněn o vnitřní výztuhu ve tvaru kříže. Jednoznačně se jedná o nejpevnější variantu, k úspoře hmotnosti zde však nedošlo.



**Obrázek 47 Varianta 2 - optimalizace s vnitřním objemem, kritérium Max. Stiffness**

### 3.4.5.3 Varianta 3

Poslední varianta vychází z původního tvaru, který je doplněn o vnitřní objem prostřední části. Kritériem výpočtu byla minimalizace hmotnosti (Minimize Mass) s koeficientem bezpečnosti 1,0. I přes velký vnitřní objem, který optimalizace dostala, můžeme pozorovat, že materiál byl rozmístěn pouze po obvodu dotčené části dílu, stejně jako tomu je u původního dílu vyráběného konvenční metodou. Pravděpodobně to vychází z důvodu, že právě na obvodu střední části dílu vznikají největší napětí, což vychází z povahy působení kroutících momentů na součást. Optimalizací došlo i přes velký design space k redukcii hmotnosti vůči původnímu dílu.



**Obrázek 48 Varianta 3 - optimalizace s vnitřním objemem, kritérium Minimize Mass**

### 3.4.5.4 Porovnání jednotlivých variant spodní koncovky sloupku řízení

Zvolením třech různých přístupů k optimalizaci spodní koncovky sloupku řízení došlo ke vzniku třech zcela odlišných variant. Každá varianta má nějakou výhodou, byť k úspoře hmotnosti proti původnímu dílu došlo pouze ve dvou ze třech případů. Ve všech variantách došlo k snížení maximálních napětí. První varianta je nejlehčí a disponuje zajímavým kompromisem mezi všemi parametry. Jejím úskalím je však slabá část v její spodní polovině, která vykazuje nejvyšší napětí ze všech výsledků. Druhá varianta sice úsporu hmotnosti nepřinesla, je však velmi robustní i v porovnání s původním dílem. Oproti původnímu dílu se ve variantě 2 nachází čtyřikrát menší maximální napětí dle von Mises. Poslední varianta 3 je pak těžší, než varianta 1, tato verze však nevykazuje žádné slabé místo. Z pohledu deformací došlo k jejich snížení pouze u varianty 2, což potvrzuje, že se jedná o velmi pevnou součást. U první varianty došlo k mírnému nárůstu maximální deformace, ale u té poslední byl již nárůst poměrně výrazný.

**Tabulka 15 Porovnání parametrů jednotlivých variant spodní koncovky sloupku řízení**

	Původní díl	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Materiál	ČSN 15142	1.2709 AB	1.2709 AB	1.2709 AB
Mez kluzu	650 MPa	1070 MPa	1070 MPa	1070 MPa
Kritérium výpočtu	-	Minimize Mass	Maximize Stiffness	Minimize Mass
Koeficient bezp.	-	1,0	-	1,0
Design space	-	Původní tvar	Plný průřez	Plný průřez
Objem	42 514 mm <sup>3</sup>	35 658 mm <sup>3</sup>	53 021 mm <sup>3</sup>	36 498 mm <sup>3</sup>
Hmotnost	334 g	285 g	424 g	292 g
Úspora hmotnosti	-	-49g (-15 %)	+90g (+27 %)	-42g (-13 %)
Maximální deformace	0,197 mm	0,243 mm	0,162 mm	0,577 mm
Maximální napětí (Von Mises)	1340 MPa	796 MPa	332 MPa	1054 MPa

### 3.4.6 Simulace výroby

Z důvodu nedostatku času pro samotnou výrobu zvolené varianty 1 spodní koncovky sloupku řízení, jsem se rozhodl alespoň pro simulaci tisku a jeho analýzu. Software Altair Inspire disponuje souborem funkcí „Print3D“, umožňující nastavit samotný tisk součástí.

Podporovány jsou tiskárny od společností EOS, Renishaw a SLM Solutions. Na výběr je ze dvou technologií: SLM (Selective Laser Melting) a Binder Sinter. Ačkoliv je zde technologie nazvána jako SLM, zastupuje všechny technologie L-PBF, tedy i technologii DMLS od společnosti EOS GmbH. Po zvolení technologie je třeba vybrat součást pro tisk a dále konkrétní typ tiskárny. Následuje volba orientace dílu ve stavebním prostoru. Software nabízí tři rychlé možnosti orientace – orientaci s maximální stavební výškou, orientaci s minimální stavební výškou a orientaci na povrch, kdy lze zvolit libovolnou plochu součásti a tu umístit na tiskovou podložku. Mimo těchto rychlých funkcí je možné orientaci dílu ve stavebním prostoru spočítat na základě kritérií jako jsou: čas stavby, objem materiálu nutný pro vytvoření podpor a podíl deformací vnesených do výtisku. V programu je možné mezi kritérii libovolně volit a vybrat ideální kompromis mezi těmito parametry. Vždy je třeba nechat mezi tiskovou podložkou a samotnou součástí patřičnou vůli, která následně slouží pro odřezání vytištěného dílu od podložky. Důležitým faktorem je také správná volba tloušťky tiskové podložky. Tato tloušťka sice negativně omezuje stavební prostor z hlediska výšky, ale její dostatečná síla eliminuje deformace z důvodu vneseného tepla při stavebním procesu. V neposlední řadě je třeba vygenerovat podpory. Software nabízí několik druhů podpor – plné, s dutinami, rozvětvené a další. V poslední fázi je třeba spustit analýzu tisku, která ověří velikost vnesených deformací, spočítá celkový čas tisku, nebo maximální napětí uvnitř výtisku. Pokud máme k dispozici tiskárnu, je možné ještě provést její kalibraci, a nakonec připravený díl exportovat k výrobě.

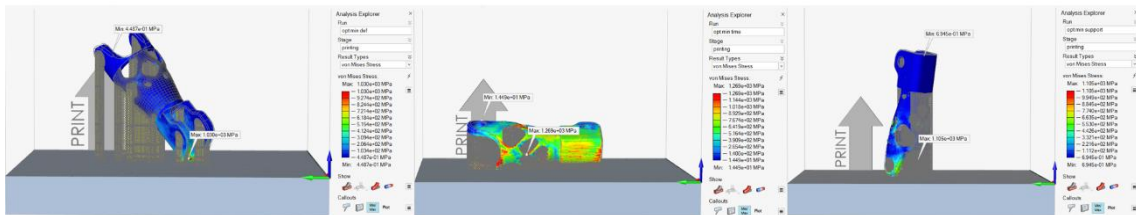
**Tabulka 16 Porovnání různých orientací dílu při tisku**

Orientace	Objem podpor [cm <sup>3</sup> ]	Čas výroby [hod]	Max. napětí [MPa]
Min. podporování	186	7,57	1105
Min. čas	233	4,17	1269
Min. deformace	204	5,65	1030

Nastavení tisku je simulováno na příkladu spodní koncovky sloupku řízení – varianta 1, kterou jsem vybral z důvodu nejnižší hmotnosti a shodě výsledků optimalizace s jejím zadáním. Zvolil jsem tiskárnu EOS M 290, dostupnou v koncernu VW. Při generování podpor jsem vybral podpory s dutinami. Byly porovnány tři orientace dílu na tiskové podložce, první byla zvolena s ohledem na minimální vnesené deformace, druhá

s ohledem na čas výroby a třetí orientace představuje natočení, kdy je objem podpor minimální.

Nejvyšší napětí se zpravidla nachází v podpoře součásti. Z hlediska objemu materiálu pro vytvoření podpor se jednotlivé varianty příliš neliší. Z pohledu časové náročnosti procesu je zde však již rozdíl velký. Orientace s minimálním podporováním zabere téměř dvakrát tolik času, co orientace s minimálním časem výroby. Je to dáno umístěním dílu na výšku, tudíž musí být spečeno výrazně více vrstev. Z pohledu maximálního vneseného napětí dle von Mises vyšla nejlépe podle očekávání poloha s minimální deformací.



**Obrázek 49** Porovnání orientací součásti z pohledu maximálního napětí dle von Mises, vlevo minimální deformace, uprostřed minimální čas, vpravo minimální objem podpor

### 3.4.7 Zhodnocení výrobních nákladů

Pro zhodnocení finanční stránky výroby bylo osloveno několik zahraničních výrobců. Poptávanou součástí byla spodní koncovka sloupku řízení, varianta 1. Z oddělení Škoda Motorsport byla pro porovnání získána i cena výroby současné spodní koncovky sloupku řízení, vyráběná konvenční metodou u externího dodavatele. Oceněna byla technologie DMLS s vysokou přesností, materiál 1.2709 bez tepelného zpracování. Nabídnuté ceny zahrnují i postprocessing, obrobení funkčních ploch a dopravné do České republiky. Všechny ceny jsou uvedeny včetně DPH. Na první pohled je patrné, že cenové nabídky 3D tisku nejsou konkurenceschopné pro cenu výroby frézováním. Cena 3D tisku je hodně závislá i na orientaci dílu ve stavebním prostoru, a tedy i na dosažené stavební výšce, spotřebě materiálu a časové náročnosti výroby.


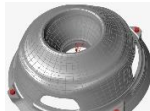
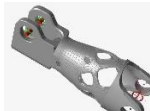
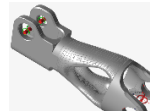

**Tabulka 17 Porovnání cen jednoho kusu výrobku v závislosti na počtu objednaných kusů od různých dodavatelů**

Výrobce	Cena 1ks [EUR]	Cena 10ks [EUR]	Cena 100ks [EUR]
Unionfab, Shanghai, Čína	368	319	305
KleRo GmbH, Berlín, Německo	726	521	471
Protolabs, Minnesota, USA	816	793	791
SuNPe Ltd., Zhongshan, Čína	827	761	754
Průměrná cena	684	599	580
Konvenční výroba současného dílu	-	-	133

## 4 DISKUZE VÝSLEDKŮ A NAZNAČENÍ DALŠÍHO POSTUPU

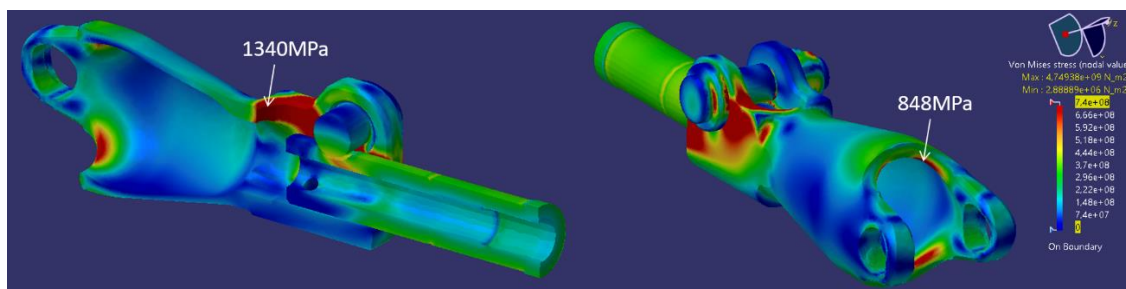
Na všech dílech byla postupně s větší, či menší úspěšností provedena topologická optimalizace. V sumarizační tabulce níže je shrnut přehled dosažených výsledků. Nejdříve byla provedena topologická optimalizace adaptéru řízení. Díl byl velmi odlehčen již ve své původní variantě. Úspora hmotnosti dosáhla pouze 6 % bez výhledu dalšího výrazného zlepšení. Proto bylo od dalších variant upuštěno. Jeden přínosný poznatek však optimalizace přeci jen přinesla. Přesunula hlavní masu materiálu směrem vzhůru, zatímco původní díl má většinu svého materiálu ve své spodní části, kde je připevněn k hlavě kola. Tento přesun vede ke snížení napětí v součásti a tento fakt by mohl vést k zamyšlení při dalších konstrukčních iteracích tohoto dílu pro konvenční výrobu.

**Tabulka 18 Sumarizační tabulka dosažených výsledků**

	Adaptér řízení	Horní uložení tlumiče	Spodní koncovka sloupku řízení v1	Spodní koncovka sloupku řízení v2	Spodní koncovka sloupku řízení v3
					
Materiál	1.2709 AB	Al2139 AM	1.2709 AB	1.2709 AB	1.2709 AB
Mez kluzu	1070 MPa	460 MPa	1070 MPa	1070 MPa	1070 MPa
Kritérium výpočtu	Maximize Stiffness	Minimize Mass	Minimize Mass	Maximize Stiffness	Minimize Mass
Koeficient bezpečnosti	-	1,0	1,0	-	1,0
Design space	upravený	původní	původní	plný průřez	plný průřez
Objem	24 129 mm <sup>3</sup>	92 526 mm <sup>3</sup>	35 658 mm <sup>3</sup>	53 021 mm <sup>3</sup>	36 498 mm <sup>3</sup>
Hmotnost	193 g	263 g	285 g	424 g	292 g
Úspora hmotnosti	6 %	43 %	15 %	-	13 %
Maximální deformace	0,559 mm	0,742 mm	0,243 mm	0,162 mm	0,577 mm
Maximální napětí	428 MPa	521 MPa	796 MPa	332 MPa	1054 MPa

Dalším topologicky optimalizovaným dílem bylo horní uložení tlumiče. Zde byl optimalizován původní tvar dílu a došlo k výrazné úspoře materiálu 43 %. V součásti byly vytvořeny odlehčující otvory, které jsou nežádoucí z důvodu průniku nečistot do motorového prostoru. Tento problém je ale snadno řešitelný pomocí zalepení otvorů přeplepkami. Pro 3D tištěnou součást byla zvolena méně často používaná slitina Al2139 AM, která ovšem jako jediná disponovala potřebnými mechanickými vlastnostmi.

Nejpodrobněji rozebraným dílem byla spodní koncovka sloupku řízení. Zde došlo postupně k vytvoření třech zajímavých variant, které byly následně porovnány. Variantou zvolenou pro další postup byla ta první, nabízející nejlepší kompromis mezi všemi požadovanými vlastnostmi. Došlo k výraznému snížení maximálního napětí v součásti, za současného snížení hmotnosti o 15 % proti původnímu dílu. Šlo tedy o nejlépeší variantu. Negativním výsledkem této optimalizace bylo částečné zvýšení maximální deformace. Pokud se Youngův modul pružnosti nezmění a materiál je ze součásti pouze odebírán, pak je zvýšení deformace logickým vyústěním tohoto stavu. Přesnost řízení a jeho rychlá odezva je pro závodní automobil zásadní, proto je nižší tuhost celku sloupku řízení nežádoucí. Vzhledem k tomu, že rozdíl v deformacích činil pouze 0,046 mm, mohlo by být promítnutí tohoto rozdílu do tuhosti celku zanedbatelné. Jedním z dalších hodnotících kritérií byl i atraktivní vzhled této varianty, jelikož optimalizovaná součást má svým designem dobře reprezentovat využití aditivních technologií.



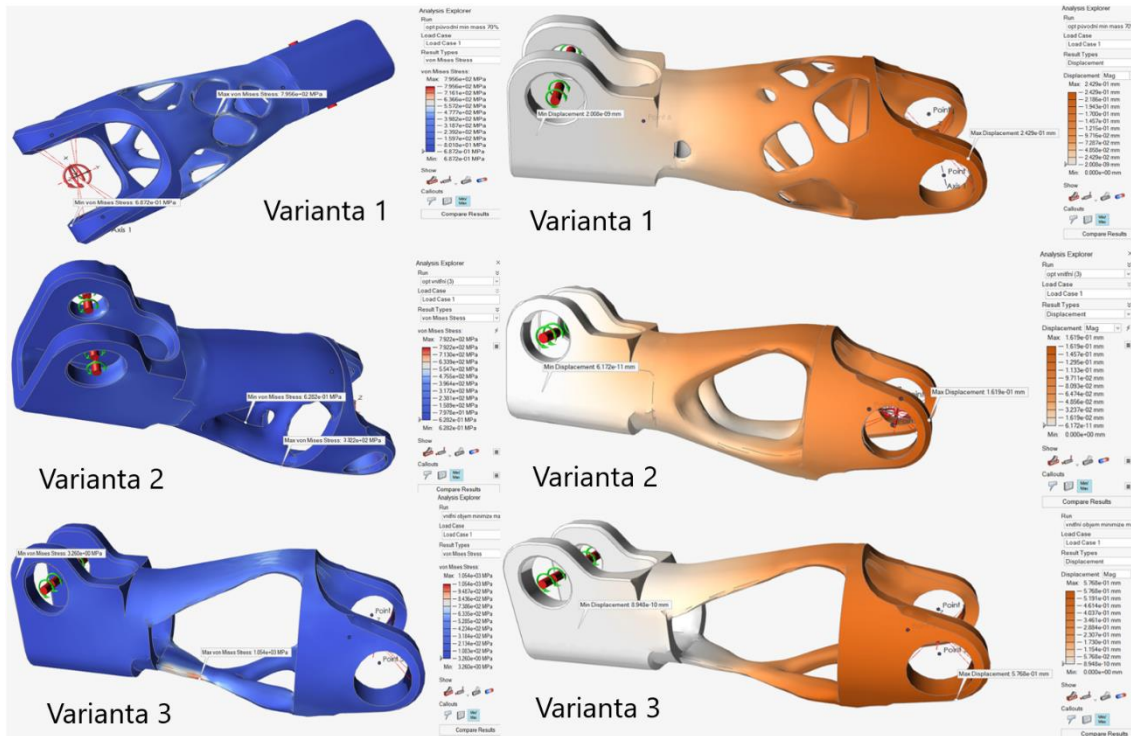
**Obrázek 50 Rozložení napětí von Mises v původní spodní koncovce sloupku řízení**

Jako zajímavou hodnotím i variantu 2, která sice nedosáhla na požadovanou redukci hmotnosti, ale vyniká svým zajímavým tvarem z pohledu konstrukce a robustnosti. Maximální napětí zde dosahuje velmi nízké hodnoty 332 MPa. Napětí je 4x nižší než to maximální v původní součásti. Zároveň došlo ke snížení deformací. Tato varianta optimalizace by mohla být v budoucnu podkladem pro další konstrukci dílu, pokud by zde nastal problém s jeho celkovou pevností. Součást je rovněž dutá, stejně jako ta původní, její důležité části jsou však mohutné, a navíc je uvnitř vyztužena křížem, který



rovněž napomáhá k dosažení vypočítaných hodnot. Porovnání rozložení napětí a deformací jednotlivých variant je znázorněno na obrázcích uvedených níže.

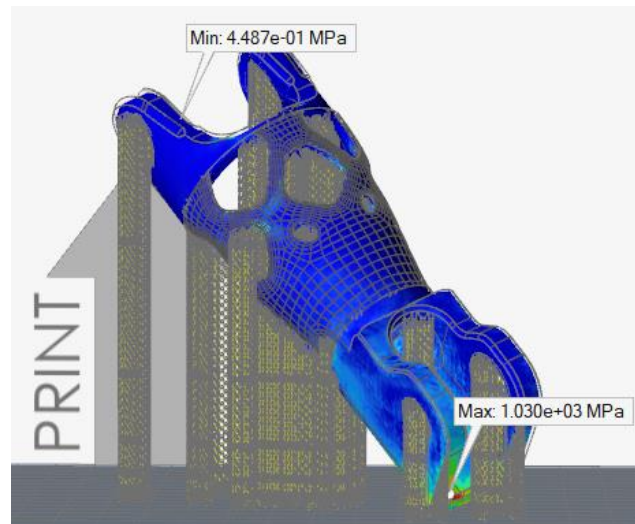
Jako nekonkurenceschopná se bohužel technologie L-PBF ukázala z pohledu nákladů pro výrobu. I nejlevnější cenová nabídka téměř 3x přesahuje cenu konvenční výroby. Je to dáno stále vysokou finanční náročností kovového 3D tisku, za niž stojí především vysoké pořizovací ceny těchto tiskáren.



**Obrázek 51 Vlevo rozložení napětí von Mises v optimalizovaných variantách spodní koncovky sloupku řízení, vpravo rozložení deformací**

Mimo jiné z důvodu nedostatku času pro zrealizování výroby zvolené varianty 1 spodní koncovky sloupku řízení, jsem přistoupil alespoň k simulaci tisku. Porovnány byly tři varianty orientace součásti v tiskovém prostoru. Jako nejvhodnější varianta, kterou bych zvolil pro případný tisk se mi jeví orientace s minimálním napětím. Je vhodným kompromisem všech získaných parametrů. Vnesená napětí do součástí při tisku nejsou zanedbatelná, proto toto kritérium považuji za nadřazené. Časová náročnost výroby i objem generovaných podpor tak musí jít lehce stranou, byť to jsou parametry, které jistě promluví do celkové ceny tisku. Pokud by součást byla tisknuta jako varianta s minimem podpor, jistě by se na tiskovou paletu vešlo několik součástí zároveň, což by naopak mohlo tisk výrazně zlevnit.

Po vytištění dílu však může nastat ještě jeden problém, a to sice s odstraněním podpor. Orientace na obrázku 51 sice vykazuje nejnižší vnesené napětí během výrobního procesu, ale jinak je takové podporování nevhodné. Jednak je v takovém případě odstraňování podpor problematické a také by při tomto postupu mohlo dojít k poškození vytištěné součásti.



**Obrázek 52 Ukázka problematického umístění podpor**

Jelikož je v plánu projekt spodní koncovky sloupku řízení dotáhnout až do výroby a odzkoušení, dalším postupem by mělo být ověření správnosti dosažených výsledků přepočítáním součásti v sestavě, za použití metody konečných prvků. Následně bude součást vyrobena metodou DMLS na tiskárně EOS M 290, kterou disponuje koncern VW. Součást bude muset být nejdříve odzkoušena na dynamickém stavu pro namáhání krutem. Vzhledem k tomu, že sestava sloupku řízení je nezbytným prostředkem pro bezpečné ovládání závodního vozu, není možné součást testovat v reálném provozu soutěžního automobilu. Selhání této součásti by totiž téměř jistě znamenalo havárii.

# ZÁVĚR

Diplomová práce se věnovala topologické optimalizaci ve spojitosti s kovovým 3D tiskem metodou z kategorie L-PBF. V teoretické části byla nejdříve popsána tato metoda a byl vytvořen přehled tiskáren střední třídy, které by byly teoreticky použitelné pro výrobu všech optimalizovaných dílů v této práci. V další části byly nalezeny aplikace topologické optimalizace na součástech pocházejících z automotive průmyslu. Dále byly shrnuty poznatky z těchto článků, které daly podněty pro zpracování praktické části. V té se tato diplomová práce věnuje topologické optimalizaci vybraných dílů závodního speciálu Škoda Fabia RS Rally2, jimiž byly adaptér řízení, horní uložení tlumiče a spodní koncovka sloupku řízení. Postupně byly analyzovány způsoby optimalizace těchto dílů, a nejvíce byl následně rozebrán díl spodní koncovky sloupku řízení. Zde byly vytvořeny tři varianty topologické optimalizace na základě různých okrajových podmínek. Jednotlivé varianty byly pečlivě porovnány a posléze byla vybrána varianta 1, která nejlépe odpovídala definovanému zadání, když byla klasifikována jako nejlehčí (úspora hmotnosti 49 g = 15 %) za současné minimalizace maximálních napětí v součásti (redukce o 544 MPa = 41 %). V další části bylo provedeno, na příkladu této varianty, porovnání třech orientací tisku na základě rozdílných kritérií, kdy nejlepšimu kompromisu odpovídala varianta zaměřená na minimalizaci napětí. Poté bylo pokračováno zhodnocením výrobních nákladů, které dopadlo lépe pro současnou výrobu dílu CNC frézováním. Nakonec byla provedena diskuze výsledků, celkové zhodnocení a nastínění dalšího postupu v tomto projektu.

Tato diplomová práce je unikátní ve spojitosti použití topologické optimalizace a kovového 3D tisku na reálných dílech rally vozů. Při analýze možností topologické optimalizace jednotlivých dílů se ukázalo, že samotné díly vyráběné konvenční metodou jsou již velmi zoptimalizované a těžko se zde hledá úspora materiálu. Na první pohled tak z dosažených výsledků může být patrné, že úspory hmotnosti nejsou zásadní. Avšak aby závodní vůz dosahoval požadovaných výkonů, musí být jeho konstrukce co nejlehčí, a proto je zde snaha o redukci každého gramu celkové hmotnosti. Z časových důvodů momentálně výroba vybrané varianty spodní koncovky sloupku řízení nebyla realizována, nicméně s oddělením Škoda Motorsport je již domluveno její vytištění a dynamické odzkoušení na stavu pro namáhání krutem. Veškeré cíle diplomové práce byly splněny.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina
<b>AM</b>	additive manufacturing
<b>RP</b>	rapid prototyping
<b>LM</b>	layered manufacturing
<b>SFF</b>	solid free-form fabrication
<b>CAD</b>	computer aided design
<b>CAE</b>	computer aided engineering
<b>UV</b>	ultraviolet
<b>ISO</b>	international organization for standardization
<b>ASTM</b>	american society for testing materials
<b>PBF</b>	powder bed fusion
<b>DMLS</b>	direct metal laser sintering
<b>SLM</b>	selective laser melting
<b>DMLM</b>	direct metal laser melting
<b>LMF</b>	laser metal fusion
<b>LPM</b>	laser power monitoring
<b>L-PBF</b>	laser powder bed fusion
<b>MKP</b>	metoda konečných prvků
<b>SIMP</b>	solid isotropic material with penalization
<b>ESO</b>	evolutionary structural optimization
<b>BESO</b>	bilinear evolutionary structural optimization
<b>OCO</b>	overhang constraint optimization
<b>CNC</b>	computer numeric control
<b>AB</b>	as build
<b>HT</b>	heat treated
<b>VW</b>	Volkswagen

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozložení uplatnění aditivní výroby ve světě [2] .....	10
Obrázek 2 Stereolitografický systém Charlese W. Hulla [5] .....	11
Obrázek 3 První komerčně vyráběné RepRap zařízení představené v roce 2007 [6] .....	11
Obrázek 4 Závislost členitosti výrobku na jeho ceně, při porovnání aditivní a konvenční technologie [9] .....	12
Obrázek 5 Přehled jednokrokových procesních principů pro kovové materiály [2] .....	13
Obrázek 6 Vlevo [11] princip metody L-PBF, vpravo [12] její klíčové parametry .....	14
Obrázek 7 EOS M 290 [13] .....	16
Obrázek 8 SLM <sup>®</sup> 280 2.0 [15] .....	17
Obrázek 9 Concept Laser M2 Series 5 [14] .....	18
Obrázek 10 TruPrint 2000 [16] .....	19
Obrázek 11 Tiskárny řady RenAM 500 [17] .....	20
Obrázek 12 LASERTEC 30 DUAL SLM [18] .....	21
Obrázek 13 Procentuální využití jednotlivých materiálů v AM [2] .....	22
Obrázek 14 Proces topologické optimalizace [21] .....	24
Obrázek 15 Porovnání jednotlivých výpočetních metod [20] .....	27
Obrázek 16 Původní těhlice studentské formule vyrobená technologií svařování [24] ..	28
Obrázek 17 Definovaný design a non-design space po první optimalizaci [24] .....	29
Obrázek 18 Postupná optimalizace těhlice [24] .....	29
Obrázek 19 Vlevo těhlice optimalizovaná metodou SIMP, vpravo metodou OCO [23]	30
Obrázek 20 Rozložení napětí v optimalizovaném spodním uložení pružiny [25] .....	31
Obrázek 21 Vlevo topologická optimalizace skříně, uprostřed výtisk součástí, vpravo zkompletovaná skříň pohonu [26] .....	32
Obrázek 22 3D tištěné písky pro Porsche 911 GT2 RS [27] .....	33
Obrázek 23 Vlevo původní svařovaná konstrukce, uprostřed nadefinovaný design space, vpravo výsledek topologické optimalizace [28] .....	34
Obrázek 24 Vlevo upravený výsledek topologické optimalizace, vpravo porovnání napěťových stavů původního a optimalizovaného dílu [28] .....	34
Obrázek 25 Vlevo – dotčený průmyslový manipulátor, uprostřed – výsledky topologické optimalizace vrchního ramene v závislosti na úhlu natočení, vpravo - konečná podoba optimalizovaného vrchního ramene [29] .....	35

Obrázek 26 Vlevo palubní deska umístěna v sestavě, vpravo design space [19] .....	36
Obrázek 27 Výsledky na základě prvního kritéria, vlevo 20 %, vpravo 80 % [19] .....	36
Obrázek 28 Optimalizace palubní desky na základě kritéria min mass [19].....	37
Obrázek 29 Vlevo – elektromotocykl Light Rider, uprostřed – design space, vpravo – výsledek topologické optimalizace [30] .....	38
Obrázek 30 Light Rider – rám po vyhlazení výsledků topologické optimalizace [30]...	39
Obrázek 31 Škoda Fabia RS Rally2 [31].....	42
Obrázek 32 Vybrané díly pro topologickou optimalizaci, zleva – adaptér řízení, horní uložení tlumiče, spodní koncovka sloupku řízení .....	43
Obrázek 33 Vlevo – závěs předního kola, vpravo – detail adaptéru řízení .....	44
Obrázek 34 Definice okrajových podmínek – adaptér řízení .....	45
Obrázek 35 Definice design space (hnědá barva) - adaptér řízení.....	46
Obrázek 36 Porovnání optimalizovaného adaptéru řízení s původním dílem .....	47
Obrázek 37 Horní uložení tlumiče na zkompletovaném závodním voze .....	49
Obrázek 38 Definice okrajových podmínek – horní uložení tlumiče .....	49
Obrázek 39 Definice design space (hnědá barva) - horní uložení tlumiče .....	51
Obrázek 40 Optimalizované horní uložení tlumiče (vpravo) .....	52
Obrázek 41 Vlevo: umístění spodní koncovky sloupku řízení za pedály závodního vozu, vpravo: sestava sloupku řízení .....	53
Obrázek 42 Definice okrajových podmínek – spodní koncovka sloupku řízení .....	53
Obrázek 43 Definice design space (hnědá barva) - spodní koncovka sloupku řízení.....	55
Obrázek 44 Analýza součásti, rozložení deformací .....	55
Obrázek 45 Nastavení optimalizace s kritériem minimalizace hmotnosti .....	56
Obrázek 46 Varianta 1 - optimalizace původního tvaru.....	57
Obrázek 47 Varianta 2 - optimalizace s vnitřním objemem, kritérium Max. Stiffness ..	58
Obrázek 48 Varianta 3 - optimalizace s vnitřním objemem, kritérium Minimize Mass.	58
Obrázek 49 Porovnání orientací součásti z pohledu maximálního napětí von Mises, vlevo minimální deformace, uprostřed minimální čas, vpravo minimální objem podpor .....	61
Obrázek 50 Rozložení napětí von Mises v původní spodní koncovce sloupku řízení....	64
Obrázek 51 Vlevo rozložení napětí von Mises v optimalizovaných variantách spodní koncovky sloupku řízení, vpravo rozložení deformací .....	65
Obrázek 52 Ukázka problematického umístění podpor .....	66

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Parametry tiskárny EOS M 290 [13] .....	16
Tabulka 2 Parametry tiskárny SLM <sup>®</sup> 280 2.0 [15] .....	17
Tabulka 3 Parametry tiskárny Concept Laser M2 Series 5 [14].....	18
Tabulka 4 Parametry tiskárny TruPrint 2000 [16] .....	19
Tabulka 5 Parametry tiskárny RenAM 500Q Flex [17] .....	20
Tabulka 6 Parametry tiskárny LASERTEC 30 DUAL SLM [18] .....	21
Tabulka 7 Přehled dostupných prášků od jednotlivých výrobců: EOS GmbH (EOS) [13], Renishaw (RS) [17], Trumpf (TRU) [16], Concept Laser (CL) [14], SLM Solutions (SLM) [15].....	23
Tabulka 8 Chemické složení oceli 1.2709 [%] [13].....	46
Tabulka 9 Porovnání mechanických vlastností původního materiálu s ocelí 1.2709, stav HT označuje tepelné zpracování [13].....	46
Tabulka 10 Porovnání adaptérů řízení.....	48
Tabulka 11 Chemické složení slitiny Al2139 [%] [13].....	50
Tabulka 12 Porovnání mechanických vlastností původní hliníkové slitiny se slitinami pro 3D tisk [13] .....	50
Tabulka 13 Porovnání horního uložení tlumiče s optimalizací .....	52
Tabulka 14 Porovnání mechanických vlastností původního materiálu a materiálu určeného pro 3D tisk [13] .....	54
Tabulka 15 Porovnání parametrů jednotlivých variant spodní koncovky sloupku řízení....	59
Tabulka 16 Porovnání různých orientací dílu při tisku .....	60
Tabulka 17 Porovnání cen jednoho kusu výrobku v závislosti na počtu objednaných kusů od různých dodavatelů.....	62
Tabulka 18 Sumarizační tabulka dosažených výsledků .....	63

## SEZNAM ROVNIC

- (1) ... hledání lokálního minima
- (2) ... relativní hustota materiálu
- (3) ... výpočet metody SIMP
- (4) ... algoritmus metody SIMP zohledňující výrobní směr
- (5) ... algoritmus metody SIMP zohledňující rovinu symetrie
- (6) ... výpočet metody BESO



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BANDYOPADHYAY, Amit a Susmita BOSE. *Additive manufacturing: second sediton*. 2. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2020. ISBN 13:978-1-138-60925-9.
- [2] SKOPAL, Ing. Jaroslav. *Využití technických norem v aditivní výrobě* [online]. ČVUT Praha - Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie: Česká agentura pro standardizaci, 2018 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.agentura-cas.cz/sites/default/files/public/download/PRTN/Normy%20v%20aditivn%C3%AD%20v%C3%BDrob%C4%9B.pdf>
- [3] WONG, Kaufui V. a Aldo HERNANDEZ. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*. 2012, **2012**, 1-10. ISSN 2090-5130. Dostupné z: doi:10.5402/2012/208760
- [4] HULL, Chuck. On Stereolithography. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2012, **7**(3), 177-177 [cit. 2022-11-20]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2012.723409
- [5] HUANG, Jigang, Qin QIN a Jie WANG. A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes* [online]. 2020, **8**(9) [cit. 2022-11-20]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr8091138
- [6] JONES, Rhys, Patrick HAUFE, Edward SELLS, Pejman IRAVANI, Vik OLLIVER, Chris PALMER a Adrian BOWYER. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica* [online]. 2011, **29**(1), 177-191 [cit. 2022-11-20]. ISSN 0263-5747. Dostupné z: doi:10.1017/S026357471000069X
- [7] DAS, Suman, David L. BOURELL a S.S. BABU. Metallic materials for 3D printing. *MRS Bulletin* [online]. 2016, **41**(10), 729-741 [cit. 2022-11-21]. ISSN 0883-7694. Dostupné z: doi:10.1557/mrs.2016.217
- [8] GIBSON, Ian, David ROSEN, Brent STUCKER a Mahyar KHORASANI. Introduction and Basic Principles. *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2021, 1-21. ISBN 978-3-030-56126-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-56127-7\_1

- [9] BERÁNEK, PH.D., Ing. Libor. *Aditivní a alternativní technologie, přednáška č. 1: Vývoj aditivních technologií, používané principy výroby, proces výroby dílu technologií 3D tisku, aplikační potenciál aditivních technologií, výhody a nevýhody* [online]. Fakulta strojní ČVUT v Praze, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 28 [cit. 2022-12-04].
- [10] ICS 01.040.25; 25.030. *ISO/ASTM 52900:2021: Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary*. Supersedes EN ISO/ASTM 52900:2017. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels, Belgium: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2021.
- [11] ŠPLÍCHAL, Ing. Jan. 3D tisk kovových materiálů: Princip metod 3D tisku. In: *Technický týdeník* [online]. 2020 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/3d-tisk-kovovych-materialu\\_50018.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/3d-tisk-kovovych-materialu_50018.html)
- [12] *Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing: Materials & Design* [online]. 193 [cit. 2022-11-20]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108762>.
- [13] EOS. In: *EOS: Additive Manufacturing and 3D Printing Solutions* [online]. GMBH: EOS, 2022 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en>
- [14] GE, Additive. *Concept Laser M2 Series 5: Enabling repeatability at scale*. 2021. Dostupné také z: [https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2021-02/DMLM\\_M2Series5\\_Bro\\_4\\_US\\_EN\\_v2\\_0.pdf](https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2021-02/DMLM_M2Series5_Bro_4_US_EN_v2_0.pdf)
- [15] *SLM SOLUTIONS: SLM 280 2.0* [online]. In: . [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-280/>
- [16] *TRUMF: 3D tiskové systémy TruPrint 2000* [online]. In: . [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-aditivni-vyroby/truprint-2000/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-aditivni-vyroby/truprint-2000/)
- [17] RENISHAW. In: *RENISHAW: RenAM 500 metal additive manufacturing (3D printing) systems* [online]. 2022 [cit. 2022-12-14].

- [18] DMG MORI. In: *DMG MORI: LASERTEC 30 DUAL SLM* [online]. 2020 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskove-loze/lasertec-30-slm>
- [19] MANTOVANI, Sara, Ignazio Lo PRESTI, Luca CAVAZZONI a Andrea BALDINI. Influence of Manufacturing Constraints on the Topology Optimization of an Automotive Dashboard. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **11**, 1700-1708 [cit. 2022-12-04]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.296
- [20] HUANG, Xiaodong a Yi-Min XIE. A further review of ESO type methods for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2010, **41**(5), 671-683 [cit. 2022-12-10]. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-010-0487-9
- [21] Optimalizace: Topologická optimalizace. In: *MATCA: Materials, Advanced Technologies, Coatings and their Applications* [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/numericke-simulace/optimalizace/>
- [22] TCHERNIAK, Dmitri. Topology optimization of resonating structures using SIMP method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* [online]. 2002, **54**(11), 1605-1622 [cit. 2022-12-10]. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.484
- [23] JANKOVICS, Davin a Ahmad BARARI. Customization of Automotive Structural Components using Additive Manufacturing and Topology Optimization. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2019, **52**(10), 212-217 [cit. 2022-12-15]. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2019.10.066
- [24] REDDY K., Sai Nithin, Vincent MARANAN, Timothy W. SIMPSON, Todd PALMER a Corey J. DICKMAN. Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component. *Volume 2A: 42nd Design Automation Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2016, -. ISBN 978-0-7918-5010-7. Dostupné z: doi:10.1115/DETC2016-59719
- [25] KONG, Y.S., S. ABDULLAH, M.Z. OMAR a S.M. HARIS. Topological and Topographical Optimization of Automotive Spring Lower Seat. *Latin*

- American Journal of Solids and Structures* [online]. 2016, **13**(7), 1388-1405 [cit. 2022-12-11]. ISSN 1679-7825. Dostupné z: doi:10.1590/1679-78252082
- [26] STAPPEN, Hermann-Josef. Prototype for small-series production: electric drive housing from a 3D printer. In: *Porsche Newsroom* [online]. Porsche Development Centre in Weissach, 2020 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://newsroom.porsche.com/en/2020/innovation/porsche-prototype-small-production-electric-drive-housing-3d-printer-23235.html>
- [27] ICKINGER, Frank. 3D printing technology optimises pistons for the powerful 911 GT2 RS: COOPERATION: PORSCHE DEVELOPS INNOVATIVE MANUFACTURING PROCESS FOR HIGHLY-STRESSED DRIVE COMPONENTS WITH MAHLE AND TRUMPF. In: *Porsche Media: newsroom* [online]. Advance Drive Development Department: Porsche AG, 2020 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons>
- [28] *Topology optimization and new manufacturing methods enable lightweight design in agricultural engineering: Success Story* [online]. Altair Engineering, Inc., World Headquarters: 1820 E. Big Beaver Rd., Troy, MI 48083-2031 USA, 4 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: [https://www.altairjp.co.jp/optimization/docs/AMAZONE\\_SS\\_Letter.pdf](https://www.altairjp.co.jp/optimization/docs/AMAZONE_SS_Letter.pdf)
- [29] LAKSHMI SRINIVAS, G. a Arshad JAVED. Topology optimization of rigid-links for industrial manipulator considering dynamic loading conditions. *Mechanism and Machine Theory* [online]. 2020, **153** [cit. 2022-11-20]. ISSN 0094114X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.103979
- [30] SCHÜRMAN, John Patrick a Felix ROTHE. Materialoptimierung für die additive Fertigung — das Konzept Light Rider. *Lightweight Design* [online]. 2016, **9**(2), 10-15 [cit. 2022-11-30]. ISSN 1865-4819. Dostupné z: doi:10.1007/s35725-016-0059-z
- [31] *ŠKODA Motorsport: ŠKODA Fabia RS Rally2* [online]. In: . [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.skoda-motorsport.com/cs/skoda-fabia-rs-rally2/>