

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715P270003 – Strojírenství
Studijní specializace: Programování NC strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití simulace procesu tisku z kovových materiálů

Autor: Vít KROUŽECKÝ
Vedoucí práce: Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vít KROUŽECKÝ**
Osobní číslo: **S19B0061P**
Studijní program: **B0715P270003 Strojírenství**
Specializace: **Programování NC strojů**
Téma práce: **Využití simulace procesu tisku z kovových materiálů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh vlastního řešení a jeho realizace
4. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Noha PETER, Zachary PITTS, Spencer Thompson, ANKIT Saharan, 2020. Additive Manufacturing [online]. Elsevier. Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101531>.
- Paras SHAH, Radu RACASAN, Paul BILLS, 2016. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation [online]. Elsevier. Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.05.008>.
- GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. München: Hanser Publications, 2016. ISBN 9781569905821.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce Doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, poskytování cenných rad. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům výzkumného ústavu RTI za poskytnutí informací nezbytných pro dokončení této práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kroužecký	Jméno Vít	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715P270003 Strojírenství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Využití simulace procesu tisku z kovových materiálů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	47	TEXTOVÁ ČÁST	41	GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	----	---------------------	----	----------------------	--

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zabývá využitím simulace tisku z kovových materiálů, aplikací topologické optimalizace a následnou simulací procesu tisku. Cílem bakalářské práce je snížení hmotnosti zadaných součástí a návrh výrobní technologie.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Topologická optimalizace, kovový 3D tisk, aditivní technologie

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Krouzecky	Name Vit
STUDY PROGRAMME	B0715P270003 Engineering	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Use of metal printing process simulation	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	47	TEXT PART	41	GRAPHICAL PART	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis deals with the use of simulation of printing from metallic materials, application of topological optimization and subsequent simulation of the printing process. The aim of the bachelor thesis is the lightweighting of the specified components and the design of the production technology.
KEY WORDS	Topology optimization, 3D metal printing, Additive manufacturing

Obsah

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	4
1 Úvod.....	5
2 Rozbor současného stavu	6
2.1 Topologická optimalizace.....	6
2.1.1 Druhy topologické optimalizace a jejich využití v aditivní technologii	6
2.1.2 Návrh topologické optimalizace podle cíle	8
2.1.3 Nástroje topologické optimalizace	10
2.2 Simulace procesu tisku	10
2.2.1 Druhy simulačních procesů a jejich využití v aditivní technologii.....	11
2.2.2 Kalibrační metody	13
3 Návrh vlastního řešení a jeho realizace.....	15
3.1 Návrh odlehčení vyrážecího mechanismu.....	15
3.1.1 Představení součásti pro topologickou optimalizaci	15
3.1.2 Návrh odlehčení na součásti a její výhody.....	15
3.1.3 Silové poměry na zadané součásti.....	16
3.1.4 Cíl topologické optimalizace.....	16
3.1.5 Postup při řešení problému.....	16
3.1.6 Aplikace na součást.....	17
3.1.7 Postup při topologickém návrhu	17
3.1.8 Návrh možných řešení.....	18
3.1.9 Výsledné řešení topologické optimalizace pro obráběný díl	18
3.1.10 Výsledné řešení topologické optimalizace pro tištěný díl.....	19
3.1.11 Porovnání výsledné topologické optimalizace pro obráběný díl a pro tištěný díl	20
3.1.12 Závěr.....	21
3.2 Návrh odlehčení a technologie tisku konzola.....	22
3.2.1 Představení součásti pro topologickou optimalizaci a následné simulace kovového tisku	22
3.2.2 Silové poměry na zadané součásti 2.....	23
3.2.3 Průběh napětí, součinitel bezpečnosti a posunutí podél součásti	23
3.2.4 Materiál zadané součásti	24
3.2.5 Aplikace topologické optimalizace na zadaný díl.....	24
3.2.6 Cíl topologické optimalizace.....	24

3.2.7	Postup návrhu.....	24
3.2.8	Výsledné řešení topologické optimalizace.....	26
3.2.9	Použitý materiál.....	26
3.2.10	Porovnání tištěné ANSI 316L a válcované ANSI 316L	26
3.2.11	Porovnání s původním dílem.....	27
3.2.12	Závěr aplikace topologické optimalizace na součást konzoly	28
3.2.13	Aplikace simulace procesu tisku na součást konzoly.....	29
3.2.14	Napoložování součásti, rozložení podpor	29
3.2.15	Nastavení mechanické a termální simulace	30
3.2.16	Výsledné řešení simulace tisku	31
3.2.17	Mechanická simulace	31
3.2.18	Termální simulace	35
3.2.19	Závěr simulace	37
3.2.20	Návrh možného řešení odhalení chyb za pomoci simulace	37
4	Závěr.....	39
	Seznam použitých zdrojů	40

Seznam obrázků

Obr. 1 - Diagram procesního toku při návrhu součásti [18].....	6
Obr. 2 - Zobrazení metody SIMP [20]	7
Obr. 3 - Zobrazení metody SIMP [19]	7
Obr. 4 - Zobrazení výpočtu u level-set metody topologické optimalizace [21].....	8
Obr. 5 - Rezonanční špičky [22]	9
Obr. 6 - Zobrazení parametrů altair inspire.....	10
Obr. 7 - Zobrazení parametrů altair inspire.....	10
Obr. 8 - Diagram procesního toku při návrhu součásti [23].....	11
Obr. 9 - Zobrazení jednoho ze způsobu spékání paprskem laseru [24]	12
Obr. 10 - Zobrazení tepelně ovlivněných oblastí po jedné operaci spékání [25].....	13
Obr. 11 - Zobrazení tvarových, rozměrových charakteristik kalibračních součástí ze softwaru Ansys [26]	13
Obr. 12 - Zadaná součást.....	15
Obr. 13 - Napětí Von Mises [MPa].....	16
Obr. 14 - Součinitel bezpečnosti	16
Obr. 15 - Posunutí (mm)	16
Obr. 16 - Výčet parametrů pro první variantu topologické optimalizace	17
Obr. 17 - První návrh topologické optimalizace	18
Obr. 18 - Výsledné řešení součásti pomocí topologické optimalizace pro obráběný díl	19
Obr. 19 - Napětí Von Mises [MPa].....	19
Obr. 20 - Posunutí [mm]	19
Obr. 21 - Součinitel bezpečnosti	19
Obr. 22 - Výsledné řešení topologické optimalizace pro tištěný díl	20
Obr. 23 - Posunutí v [mm]	20
Obr. 24 - Součinitel bezpečnosti	20
Obr. 25 - Napětí Von Mises [MPa].....	20
Obr. 26 - Podpory vygenerované v Materialise Magics, vyobrazené v EOSPRINT 2.9	21
Obr. 27 - Čas tisku, čas přejezdu recourteru a množství vrstev	21
Obr. 28 - Zadaná součást.....	22
Obr. 29 - Vyobrazení uspořádání včetně navrhovaného dílu.....	22
Obr. 30 - Detail na zadanou sestavu.....	22
Obr. 31 - Zobrazení působíště sil na součást konzole	23
Obr. 32 - Součinitel bezpečnosti	23
Obr. 33 - Napětí Von Mises	23

Obr. 34 - posunutí.....	24
Obr. 35 - Návrhový prostor	25
Obr. 36 - Napětí s přídavnou silou	28
Obr. 37 - Deformace s přídavnou silou	28
Obr. 38 - Výsledný návrh dílu ISO pohled	28
Obr. 39 - Výsledný návrh dílu.....	28
Obr. 40 - Rozložení podpor před simulací	29
Obr. 41 - Mechanická simulace [26].....	31
Obr. 42 - Simulace procesu tisku - posunutí	32
Obr. 43 - Simulace procesu tisku – Global - hustota	32
Obr. 44 - Simulace procesu tisku- riziko recoateru.....	33
Obr. 45 - Simulace procesu tisku – čára smrštění	34
Obr. 46 - Simulace procesu tisku napětí Von Misses	35
Obr. 47 - Simulace procesu tisku napětí na mezi kluzu	35
Obr. 48 - Simulace procesu tisku - teplota	36
Obr. 49 - Simulace procesu tisku – maximální dosahovaná teplota	36
Obr. 50 - Simulace procesu tisku - Přehřátí	37
Obr. 51 - Upravené podpory	38

Seznam tabulek

Tab. 1 - Srovnání jednotlivých návrhů.....	18
Tab. 2 - Výsledných parametrů jednotlivých technologií	20
Tab. 3 - Časové náročnosti daných operací, množství podpor.....	21
Tab. 4 - Porovnání tištěného materiálu s válcovaným materiálem data převzata z [16].....	26
Tab. 5 - výsledné porovnání topologicky optimalizovaného dílu a originálu.....	27

1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá využitím topologické optimalizace a simulace procesu tisku z kovových materiálů. Technologie 3D tisku je v poslední době na vzestupu. Tato technologie se stále více rozšiřuje mezi technickými odvětvími. Je stále více využíván v leteckém, automobilovém a potravinářském průmyslu, ale i v medicíně na vývoj různých implantátů či protéz. Tato technologie stále více nahrazuje odlévání či kování v oblasti tvorby prototypů. Důvodem je absence nutnosti použití formy či zápusky. Tento zvýšený zájem vede i k aplikaci technologie na stále složitější celky.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je zaměřena teoreticky, druhá je pojata z praktického hlediska. V teoretické části bakalářské práce je úvod do problematiky topologické optimalizace a úvod do problematiky aplikace simulačních technologií v oblasti SLM tisku z kovových materiálů. Tento úsek bakalářské práce je pojat pouze jako základní nastínění problematiky, k lepšímu pochopení dalších částí bakalářské práce.

Zaměření druhého úseku bakalářské práce je aplikace simulačních softwarů na díly, které se již vyskytují v praxi. Na začátku práce došlo k využití softwaru topologické optimalizace na zlepšení a nalezení optimálního tvaru dílů. Tento optimalizovaný tvar ale stále dbá na účel dílů, nutnost přenesení zatížení a predikci napětí a únosnost daných optimalizovaných součástí. Tyto optimalizované díly jsou však optimalizované na výrobu za pomoci SLM 3D tisku, tedy obtížně vyrobitelné pomocí konvekční technologie výroby.

Další částí praktického celku je použití softwaru na predikci procesu SLM 3D tisku na topologicky optimalizovanou součást. Tato predikce nám umožňuje sledovat různé druhy dat v jednotlivých vrstvách tisku. Tyto data jsou například napětí, deformace, teplota či různé rizikové faktory. Důvodem použití tohoto simulačního programu je zlepšení vstupních dat do kovové tiskárny, tudíž i zlepšení výstupu v podobě hotové součásti.

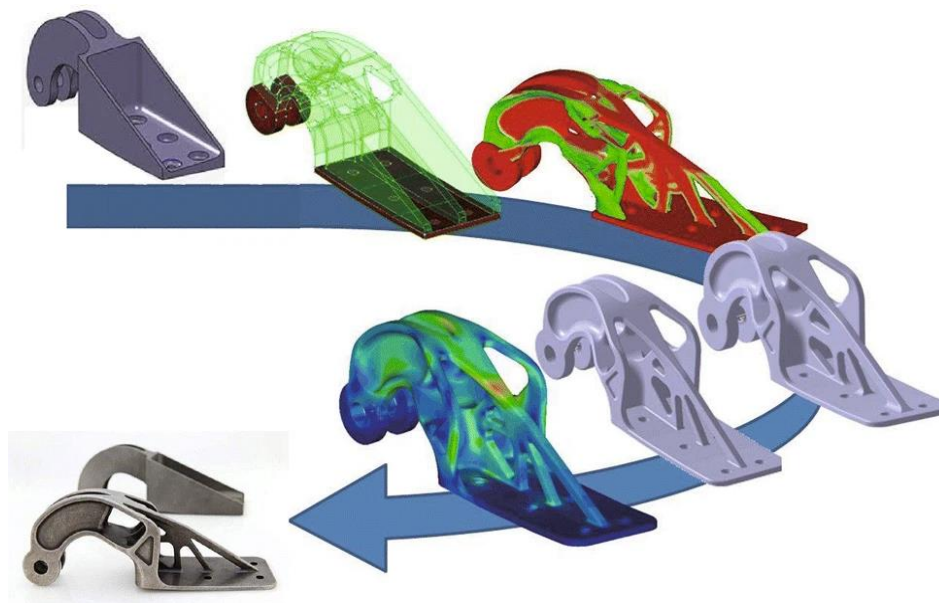
Oblast aditivních technologií je velice zajímavým oborem, u které se předpokládá stále větší nasazení v již zmíněných odvětvích. Technologie nám umožňuje zkrátit čas na vývoj prototypů a vyrábět součásti, které mají futuristický vzhled s použitím tenkých kovových prutů, které jsou spojeny do biometrických struktur. S aditivními technologiemi jsem se setkal již během studia, toto odvětví mě zaujalo díky svému potenciálu využití ve stále více oborech.

Zdroje v této bakalářské práci jsou čerpány především ze zahraničních vědeckých článků a studií. Důvodem zvolení převážně zahraničních zdrojů je nedostupnost zdrojů v českém jazyce, popřípadě jejich neaktuálnost.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Topologická optimalizace

Jedná se o metodu, která slouží pro návrh nejvýhodnějšího rozložení geometrického tvaru součásti nebo celé sestavy při znalosti okrajových podmínek. Je využívána v praxi kvůli významné úspoře, např. hmotnosti. Topologická optimalizace umožňuje zefektivnit výkon součásti odstraněním nepotřebného objemu materiálu z oblasti, kde nedochází k přenosu zatížení. Využitím optimalizace se nám podaří lépe a rychleji řešit problémy, které se týkají termálního namáhání či problémy s amplitudou kmitání. [1] Topologická optimalizace se spojením s aditivní technologií nám dává nové možnosti výroby. Jedná se o tvary, které nám připomínají organické struktury. Tato metoda je sice nákladná z hlediska výpočetních kapacit, ale přinese nám značnou úsporu materiálu. [2]



Obr. 1 - Diagram procesního toku při návrhu součásti [18]

2.1.1 Druhy topologické optimalizace a jejich využití v aditivní technologii

Topologická optimalizace má mnoho možností, jak se k ní dá přistupovat. Jedná se o metody, které jsou založeny například na změnách hustoty (SIMP), výpočtovém modelu, který postupně odstraňuje prvky, jejichž napětí je nejnižší ze zadané plochy (ESO/BESO), metoda, která se zaměřuje na mikrodutiny či organické struktury (HM), nebo například metoda, která využívá střídání dvou funkcí k odebírání materiálu v místech, kde topologická derivace dosahuje minima či je záporná.

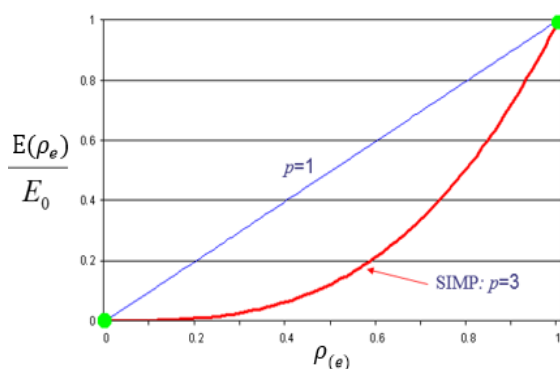
Metoda ISE

Zkratka je odvozena od anglického výrazu Isotropic Solid and Empty, což by se dalo volně přeložit jako izotropní pevná látka a prázdná místa. V Topologii ISE jsou jednotlivé prvky součásti vyplněny určitým izotropním materiálem nebo neobsahují žádný materiál. To se však ukázalo jako vysoce nákladné z výpočetního hlediska, jelikož metoda ISE obsahuje velké množství prvků. Z tohoto důvodu se v 80. letech 20. století začala soustředit pozornost na vývoj jiné techniky, která by umožnila efektivnější a rychlejší řešení problému [3]

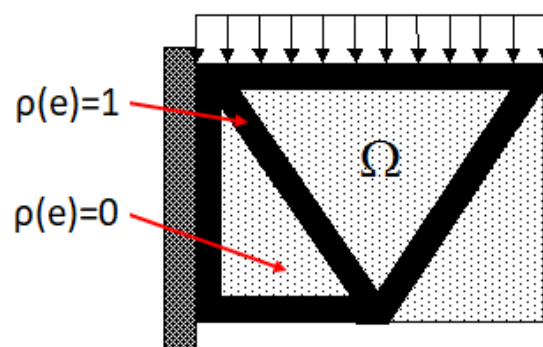
Metoda SIMP

Tuto metodu poprvé navrhl Bendsoe na konci 80. let 20. století. Metoda je někdy označována jako metoda hustoty. Funguje na principu diskretizace konečných prvků, kdy každý konečný prvek je spojen funkcí hustoty $\rho(x)$, jejíž přípustné hodnoty se pohybují mezi 1 a 0. Když funkce $\rho(x)$ nabývá hodnoty 1 ($\rho(x)=1$), jedná se o pevné těleso, pokud funkce nabývá hodnoty větší než 0 ($\rho(x)>0$), jedná se o prázdné místo. Tato funkce musí nabývat hodnoty větší než 0 z důvodu numerické stabilizace analýzy metody konečných prvků [5]. Pokud funkce $\rho(x)$ nabývá hodnot mezi 0;1 ($\rho(x) \in (0;1)$), tyto hodnoty lze označovat jako střední hodnota hustoty, například pokud jde o strukturu s otvory. [4] Relativní hustota materiálu se může spojitě měnit, také se budou spojitě lišit Youngovy moduly materiálu každého prvku, kdy pro každý prvek e je vypočítán vztah mezi koeficientem poměrné hustoty ρ_e a Youngovým modulem pružnosti přidruženého modelu izotropního materiálu E_0 na principu zákona síly: [5] Software využívající metodu SIMP je například Solidworks.

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



Obr. 2 - Zobrazení metody SIMP [20]



Obr. 3 - Zobrazení metody SIMP [19]

Metoda ESO/BESO

Metoda evoluční strukturální optimalizace ESO je odvozena z anglického výrazu Evolutionary structural optimization. Metoda byla představena v 90. letech 20. století vědci Xie a Steven. Myšlenka metody je navržena na empirickém konceptu, kdy se struktura vyvíjí směrem k optimálnímu pomalému odstraňování prvků, které mají nejnižší napětí. [6] Jak je zřejmé, jedná se pouze o jednosměrnou metodu, protože již odstraněný materiál nelze vrátit zpět. [7] Toto kritérium zapříčinilo vznik nové metody BESO Obousměrná evoluční strukturální optimalizace, jejíž zkratka pochází z anglického výrazu Bi-directional evolutionary structural optimization.[6] Tato metoda již obsahuje různé strategie pro vrácení již odebraného materiálu, které jsou podobné technikám vyhlazení a filtru v metodě SIMP. Metoda pracuje na principu eliminace oblastí s nízkou poddajností, z důvodu zlepšení celkové tuhosti. BESO obsahuje další metody jako je soft kill nebo hard kill, tudíž nevzniká žádná oblast středních hustot. [7]

Metoda HM

Homogenizační metoda (HM) je metoda optimalizace, která vychází z řešení problému optimalizace tvaru, kde je topologie tvořena z nekonečného počtu malých dutin. Tyto dutiny tvoří porézní strukturu. Řešení optimalizace pak záleží na nalezení ideálních hodnot pro

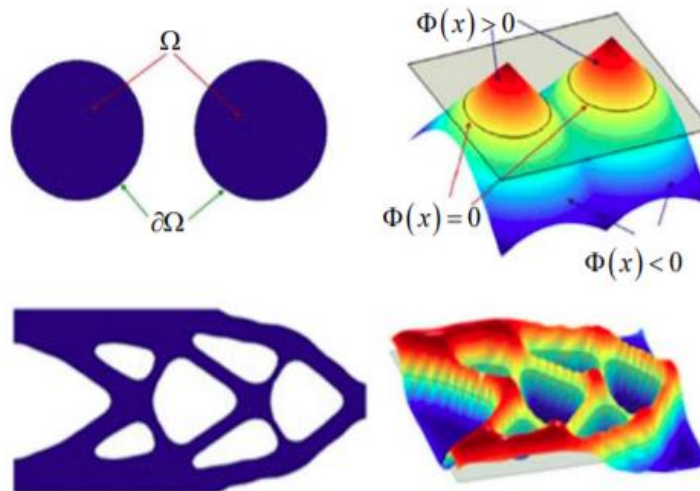
parametry geometrie mikrodutin. Pokud se část součásti skládá pouze z dutin, není v této části součásti umístěn žádný materiál. Na druhou stranu, pokud součást nemá pórovitost, jedná se pak o pevný materiál. [8] Každá mikrostruktura je popsána třemi parametry, θ_e , x_e a y_e , kde e je index mikrostruktury. Tyto hodnoty jsou definovány v homogenizační teorii a jsou přiřazeny iteračnímu procesu návrhu. Další vlastnosti jsou odvozeny od velkého počtu rozložení mikrostruktury pomocí metody FE. [9]

Hraniční metoda

Tato metoda zapadá do úrovnových metod, které na rozdíl od metod hustoty, které jsou parametrizovány v explicitních funkcích, jsou metody založené na hranicích implicitní funkce, která definuje strukturální hranici. Tato metoda je reprezentována například pomocí Level-set metody [9]

Level-set metoda

V této metodě je hranice představována jako křivka nulové úrovně a za pomoci skalární funkce Φ . Materiál je distribuován v oblasti návrhu podle hodnoty množin v určité oblasti.[9] Tato metoda se používá společně s gradientní metodou. Level set se zaměřuje na tvarovou derivaci, zatímco gradientní metoda se soustředí na topologickou optimalizaci. Tyto dvě derivace jsou nezávislé směry, které střídáme tak, že v prvním kroku je funkce level set, která je zaměřena na objem, poté se v místech, kde je topologická derivace minimální nebo záporná odebírá materiál. [10]



Obr. 4 - Zobrazení výpočtu u level-set metody topologické optimalizace [21]

2.1.2 Návrh topologické optimalizace podle cíle

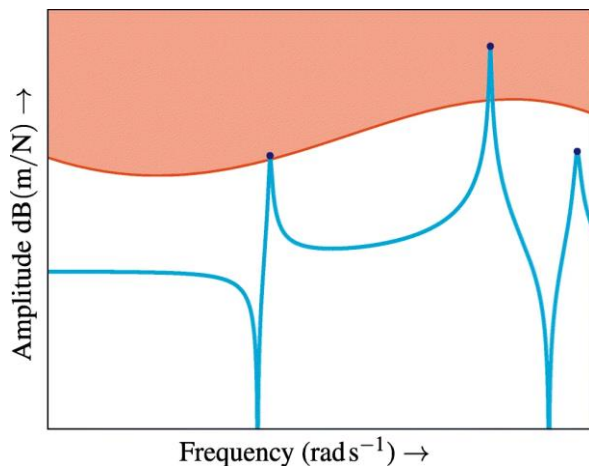
Topologickou optimalizaci můžeme navrhnout se zaměřením na určitý cíl, kterého chceme dosáhnout. K tomu nám slouží metody topologické optimalizace nastíněné v kapitole 1.1.1 Tyto cíle se mohou v jednotlivých optimalizačních softwarech lišit, záleží na vydavateli softwaru, co se rozhodnul implementovat. Jelikož praktická část bakalářské práce byla provedena v softwaru Autodesk Inventor PRO a Altair inspire, práce se zaměřuje převážně na nástroje, které obsahují výše zmíněné software.

Maximalizace tuhosti

Mezi hlavní a velmi častý cíl topologické optimalizace patří zvýšení celkové tuhosti a naopak snížení celkové poddajnosti při dané redukci hmotnosti. Globální poddajnosti je rovna součtu všech elastických nebo globálních energií. Algoritmus optimalizace se výše uvedenými metodami (SIMP, HM, ESO/BESO, Level set) snaží minimalizovat poddajnost, tudíž zvýšit tuhost celé konstrukce se snížením aktuální hmotnosti. [5]

Maximalizace frekvencí

Tento cíl je volen právě tehdy, když musíme vyvinout danou součást či konstrukci, jež bude funkční a odolná v co největším rozsahu frekvencí. V některých aplikacích musí být odezva na kmity co nejmenší, například u citlivých měřících přístrojů. Jinde se aplikace rozšiřuje na co největší pásmo, aby bylo docíleno co nejrozsáhlejšího použití. [11]

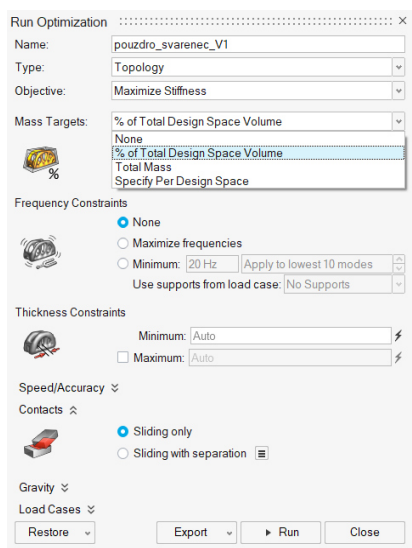


Rezonanční špičky frekvence by se neměly dostat nad uvedenou bezpečnou mez.

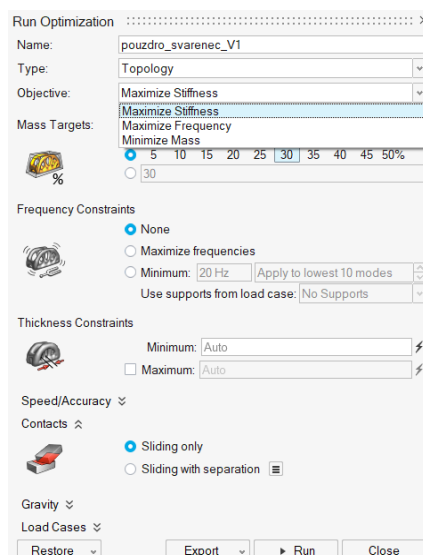
Obr. 5 - Rezonanční špičky [22]

Minimální váha

Tento cíl je nejčastěji volen, pokud používáme topologickou optimalizaci a nemáme specifické požadavky na tuhost konstrukce či maximalizaci frekvenčního pásma. Úspora váhy se projevuje v několika oblastech například při použití aditivních technologií, zejména pak 3D tisku, celkový úbytek váhy sníží čas tisku.



Obr. 6 - Zobrazení parametrů altair inspire



Obr. 7 - Zobrazení parametrů altair inspire

2.1.3 Nástroje topologické optimalizace

Cílová hmotnost

Toto kritérium je velmi důležité z hlediska návrhu. Lze s ním odhadnout celkovou hmotnost s odchylkou 3-5%. Není potřeba uvádět přesnou hmotnost součásti, je dostačující, pokud se uvede potřebný procentuální úbytek hmotnosti. To je velká výhoda u součástí, u kterých si nejsme jisti, na jakou hmotnost jsme schopni se dostat. [12]

Procentuální velikost volného prostoru

Toto kritérium nám udává, kolik materiálu má být odstraněno tak, aby součást stále vyhovovala pro dané zatížení. Obvykle se doporučuje pracovat spíše po menších částech. Tento spíše pomalý postup nám zaručí dostat ze součásti maximum přebytečného materiálu.

2.2 Simulace procesu tisku

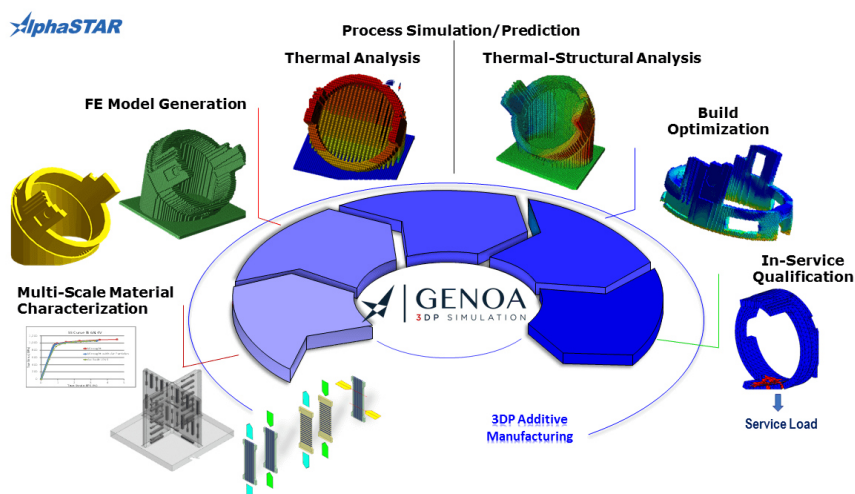
Simulace procesu tisku se v posledních letech objevuje jako nová výkonná technologie ve výrobních odvětvích. Aditivní technologie je schopná vyrábět složité díly efektivní cestou. Rychlý rozvoj a využití této metody si vyžádal rozsáhlý vývoj softwaru a zařízení. Tento vývoj se ubíral dvěma směry, a to optimalizace navrhnuté součásti z hlediska mechanických nebo hmotnostních vlastností nebo simulace samotné výroby dílu. S rychlým nástupem této technologie bylo pozorováním a následným zkoumáním výrobků vyrobených pomocí aditivní technologie shledáno několik nedostatků. Tyto nedostatky či zkresení byly způsobeny řadou na sebe navazujících faktorů, které ovlivnily konečný výsledek vyrobeného dílu. [14] Simulace je založena na voxelové reprezentaci součásti. Voxel neboli objemový pixel je kubická jednotka, ze které se skládá trojrozměrný objekt. Je to minimální simulovatelná jednotka trojrozměrné matice. Lze ji uvažovat jako ekvivalent pixelu u dvojdimenzionálního zobrazení. Funguje jako stoh kostek ohraničující vnější povrch dílu. Simulační metoda je použita na každý voxel jako

vektor pro proměnné, které jsou analyzovány. V případě posunutí dílu je tato vlastnost vektorem, který posune konkrétní voxel z jeho předešlé polohy do stávající polohy poté, kdy dojde k deformaci. Je umožněn posun ve všech osách X, Y, Z jako celkový posun. Metoda je aplikována na každý voxel. Proces voxelizace je objemovou aproximací skutečného dílu, kdy je očekávaná určitá oblast přesnosti. Čím menší rozměr jednoho voxelu je použit, tím spíše je možné více se přiblížit k reálnému stavu. Proces samotné simulace však není lineárně závislý na počtu voxelu, času a nutného výpočetní výkonu. Spíše by se dalo říci, že tato závislost je skoro exponenciální. [17]

2.2.1 Druhy simulačních procesů a jejich využití v aditivní technologii

Je zde několik přístupů, které můžeme uplatnit při simulacích v oblasti 3D tisku. Většina simulačních přístupů je vysoce náročná na výpočetní výkon. V této práci je uvedeno několik základních přístupů. Tyto přístupy obsahuje většina simulačních softwarů, nejspíše se budou lišit názvem, ale podstata by měla být zachována. Neustále musíme mít na paměti, že žádný simulační software neumí efektivně pracovat bez řádně zpracovaných vstupních dat. První a nejméně nákladná simulace na výpočetní výkon je ve volném překladu předpokládaná deformace (z anglického Assumed Strain), další přístup je vzor spékání (z anglického Scan pattern) a poslední a nejvíce náročné na vstupní data a výpočetní výkon je tepelné namáhání (z anglického Thermal strain).

Práce je zaměřena na jednu z konkrétních technologií, a to technologii SLS neboli selektivní laserové tavení. Díly vyrobené touto technologií obsahují vnitřní pnutí a zbytkové deformace, které jsou způsobené charakteristikou technologie. Tato charakteristika spočívá v opakovaném vrstveném tavení základního materiálu a následném přechodném ochlazení vytištěných vrstev. To je důvod vzniku nadměrných deformací či prasklin. Tyto defekty mohou vést k drahým neshodám s výrobní dokumentací. V praxi existují dva základní přístupy k vyhnutí se neshodným výrobkům. Jedním z přístupů je návrh technologie na základě předchozích zkušeností, ale z hlediska stále větší složitosti vyráběných dílů bylo nutné vyvinout software, který řeší vlastní simulaci procesu tisku. [15]



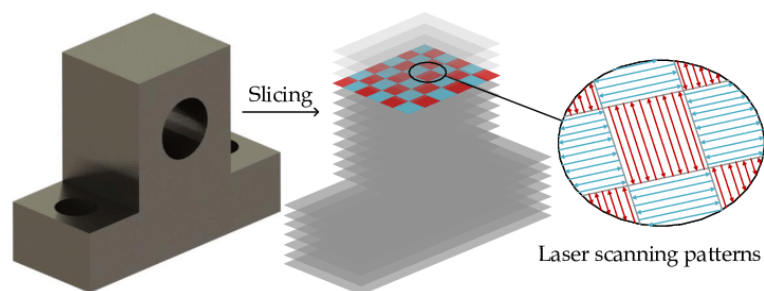
Obr. 8 - Diagram procesního toku při návrhu součásti [23]

Předpokládaná deformace

Tato simulace představuje nejjednodušší a nejrychlejší simulaci v rámci programu od vydavatele Ansys. Anizotropní efekty v materiálu nebo další různé procesní závislosti nejsou uvažovány. Předpokládaná deformace se spoléhá na to, že materiál je sice anizotropního charakteru, ale tento materiál převádí dle specifické kalibrace použití různých konstant na materiál izotropní. Předpokládaná deformace dále nezohledňuje termální deformace a další jevy způsobené tepelným cyklováním. Hlavním přínosem této simulace je, že není příliš časově náročná a nejsou zde vyžadovány specifické kalibrace.

Vzor spékání

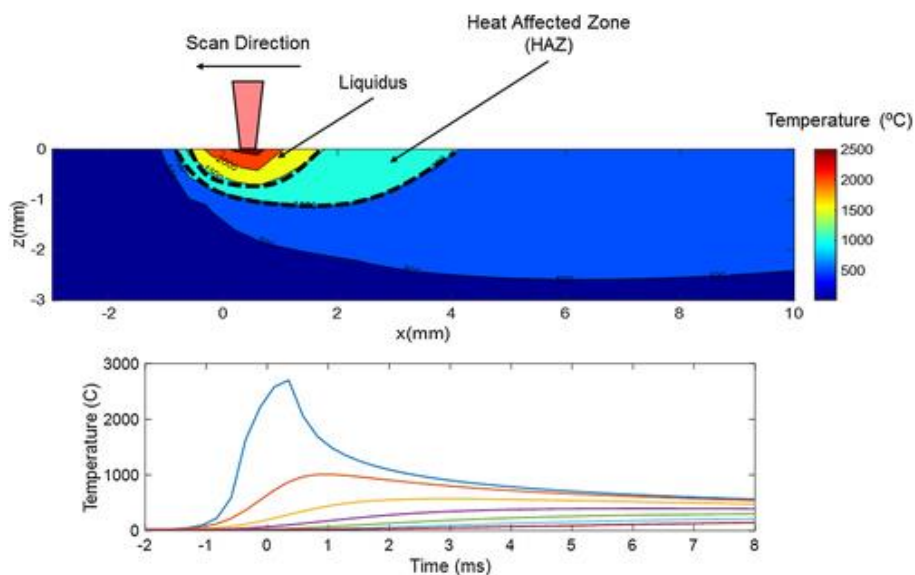
Tento další přístup zohledňuje také směr spékání laseru. K větším deformacím dochází podél směru spékání, nežli kolmo k němu. Tímto dochází k výraznému anizotropnímu zkreslení. Toto chování může být vykompenzováno vhodnou kalibrací anizotropních součinitelů přetvoření. U této metody je nutné, kromě standartních parametrů, které jsou definovány v předpokládané deformaci, specifikovat přesné parametry vzoru spékání, jako je například začátek nebo úhel a směr natočení spékání. Tento typ simulace je výpočetně i časově náročnější než předpokládaná deformace při stejné velikosti sítě a stejném nastavení chování materiálu.



Obr. 9 - Zobrazení jednoho ze způsobu spékání paprskem laseru [24]

Tepelné namáhání

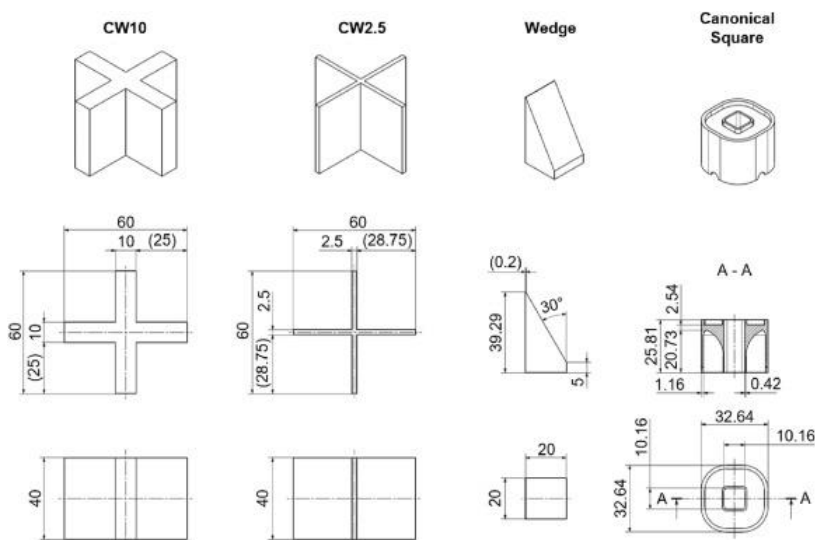
Dalším druhem přístupu k simulaci aditivních technologií je simulace tepelného namáhání neboli termální analýza. Tento druh představuje nejpřesnější přístup k simulaci kovového tisku, protože jsou zde uvažovány efekty akumulace tepelného napětí v důsledcích lokálního přehřátí již vychladlých vrstev, tudíž na simulační součásti dochází k nehomogennímu ochlazování. To vede k dalšímu vzniku napětí a distorzí. Termální analýza v sobě obvykle obsahuje všechny výše uvedené druhy simulací. Je to nejvíce numericky náročná simulace v oblasti 3D tisku, protože se zde musí nejdříve vypočítat mechanická simulace a pak následuje samotná termální analýza. Také příprava na samotnou simulaci je časově náročná. Musí se kalibrovat na koeficienty změny měřítka izotropní i anizotropní deformace. Kromě parametrů, které vyžadují přechozí simulační metody, termální analýza vyžaduje skutečné procesní parametry, jako jsou směry spékání, výkon a rychlost laseru, množství laserových hlav, teplota předehřevu základní desky, tloušťky nanášených vrstev nebo tzv. hatching, což je rozteč šrafů nebo šířka pruhů.



Obr. 10 - Zobrazení tepelně ovlivněných oblastí po jedné operaci spékání [25]

2.2.2 Kalibrační metody

Všechny výše uvedené druhy simulací vyžadují kalibraci. Tato kalibrace musí být provedena na stroji, kde se díl bude vyrábět. Každý software má rozdílné profily na kalibraci. Podstata však musí být u každého softwaru stejná, kdy se vytisknou zadané díly se specifickým profilem. Tento profil je pevně dán dle dodávané dokumentace stroje, dále jsou dodávány procesní parametry tisku. Po tisku následuje kontrola předepsaných rozměrů. Většinou tato kontrola probíhá na 3D souřadnicovém měřicím stroji, který nám umožňuje dosahovat vysoké přesnosti. Naměřené odchylky od předepsaných rozměrů jsou zapsány do příslušných parametrů, které si software přepočte na výsledné hodnoty korekcí.



Obr. 11 - Zobrazení tvarových, rozměrových charakteristik kalibračních součástí ze softwaru Ansys [26]

Cross wall CW10

Cross wall CW10 neboli příčné stěny. Jde o metodu, kterou používají simulační softwary od vydavatele Ansys. Tloušťka stěny u této geometrie je 10mm, křížový tvar geometrie poskytuje potřebné informace ohledně anizotropních škálovacích faktorů. Protože

jedna větev je vytištěna v podélném směru spékání, druhá větev je vytištěna kolmo na tento směr. Očekává se, že první větev, tedy větev vytištěná v podélném směru spékání, bude obsahovat větší množství vnitřního pnutí, tedy i deformací. To je způsobeno důsledkem teplotních gradientů v oblasti taveniny.

Cross wall CW 2.5

Další varianta kalibrace je cross wall CW 2.5 neboli metoda příčné stěny, ale tloušťka samotné stěny je pouze 2,5mm. Na rozdíl od CW10 je štíhlostní poměr výrazně vyšší. Očekávají se vyšší deformace než v případě metody CW10.

Wedge

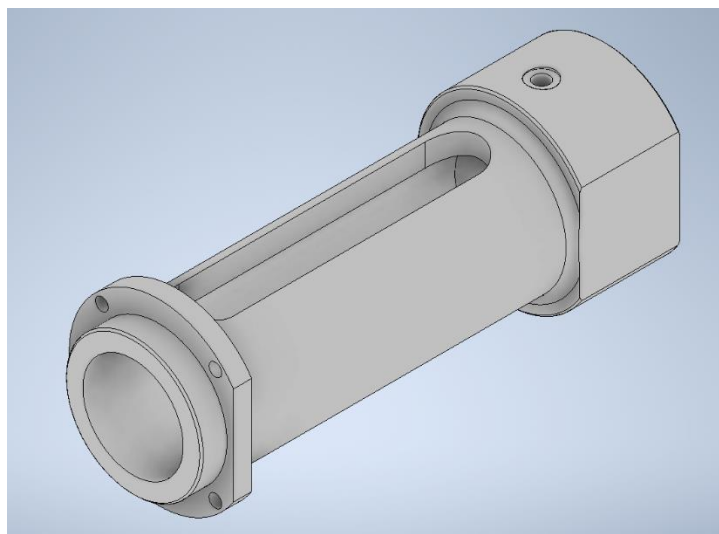
Název této metody znamená ve volném překladu klín. Tento název je odvozen od tvaru geometrie. Tloušťka stěny je proměnná, mění se od 0,2mm až do 20mm. Tato změna působí lineárně, a to pod úhlem 30°.

3 Návrh vlastního řešení a jeho realizace

3.1 Návrh odlehčení vyrážecího mechanismu

3.1.1 Představení součásti pro topologickou optimalizaci

Součást byla poskytnuta firmou ŠMT a.s. Jedná se o pouzdro vyrážecího mechanismu nástroje ve vřetenu. Tato součást má rozměry 259x98x98mm. Materiál pouzdra je 14MnCr5. Topologickou optimalizací bude upravena prostřední část dílu, která musí obsahovat drážku o minimálních rozměrech 165x30mm. Drážka slouží k montáži elektroinstalace a průchodu pneumatického a hydraulického hospodářství. Součást je namáhána z pravé strany tlakovým zatížením o velikosti 15MPa. Optimalizovaný díl je vetknut na obou stranách. Na pravé straně se díl opírá pouze o čelo Ø98, na levé straně se díl opírá také o čelo Ø98. Toto vetknutí je ale navíc pojištěno čtyřmi šrouby o velikosti M6. V dnešní době je díl vyráběn pouze z jednoho kusu.



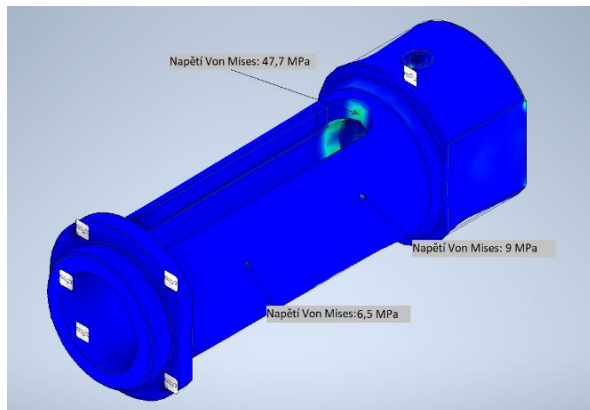
Obr. 12 - Zadaná součást

3.1.2 Návrh odlehčení na součásti a její výhody

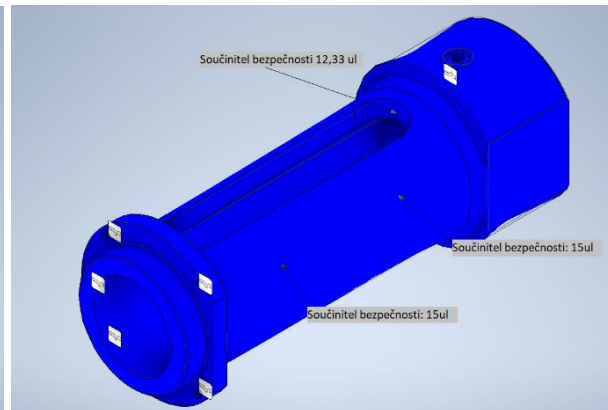
Teoretická část bakalářské práce se zaměřuje na návržení odlehčení součásti pomocí softwaru Autodesk Inventor pro 2021. Tento software byl zvolen z hlediska licenční dostupnosti v takzvané studentské verzi softwaru, která obsahuje všechny potřebné nástroje, ale je určena pouze k edukativním potřebám. Byl brán také ohled na velkou dostupnost návodů a manuálů pro výše uvedené softwary.

3.1.3 Silové poměry na zadané součásti

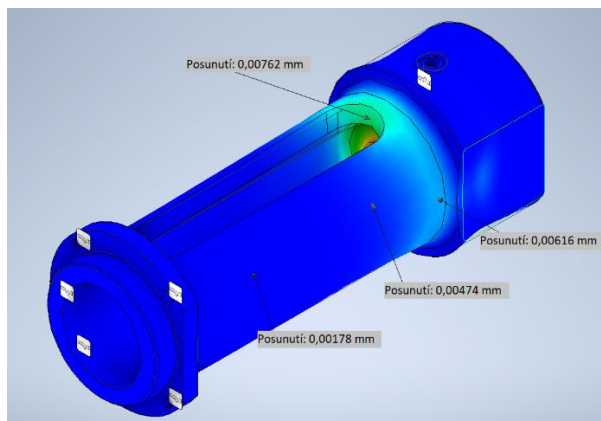
Silové poměry je nutné nadefinovat ještě před samotnou topologickou optimalizací, protože zvolením správných okrajových podmínek je zajištěn správný výsledek simulace. Nadefinování těchto okrajových podmínek vychází z použití tohoto dílu. Na tuto součást působí pouze tlakové namáhání. Na obrázcích 13,14,15 jsou zobrazeny silové poměry pro originální díl, tedy díl, který ještě neprošel topologickou optimalizací.



Obr. 13 - Napětí Von Mises [MPa]



Obr. 14 - Součinitel bezpečnosti



Obr. 15 – Posunutí (mm)

3.1.4 Cíl topologické optimalizace

V tomto případě bylo stanoveno několik cílů topologické optimalizace na zadanou součást. Jeden z hlavních cílů je dosažení snížení hmotnosti zadané součásti, další z cílů je optimalizace drážky k montáži a průchodu elektroinstalace a průchodu pneumatického a hydraulického hospodářství. Dalším z přidružených cílů je snížení nákladů na výrobu a materiál, snížení výrobního času s použitím technologie svařování z více kusů a následné tepelné zpracování, nebo možnost zvážení použití aditivní technologie výroby. Při použití aditivní technologie je nutné zvážit ekonomické hledisko výroby.

3.1.5 Postup při řešení problému

Zadaná součást vyráběcího mechanismu byla optimalizována z hlediska minimalizace hmotnosti. V našem případě je možné použít dva druhy výroby. Jedním ze způsobů je klasická

konvenční metoda, druhý možný druh výroby je za pomoci aditivních technologií. Zvolený typ výroby nám určuje další možnosti topologické optimalizace.

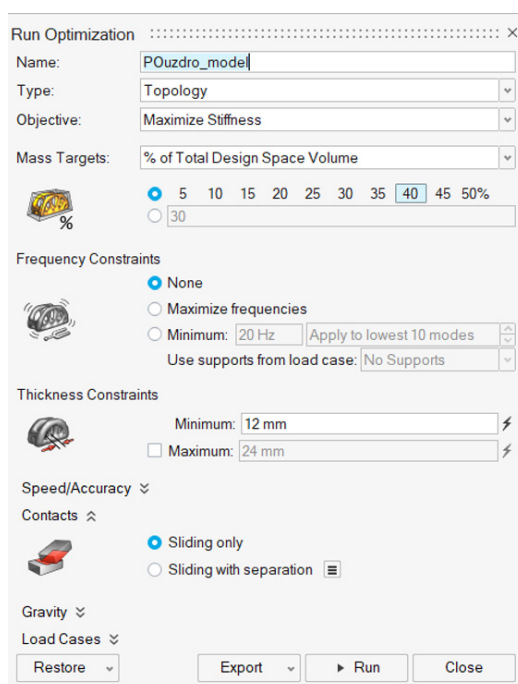
3.1.6 Aplikace na součást

Tato součást slouží jako pouzdro vyrážecího mechanismu nástroje. Na součásti je několik tolerovaných rozměrů a předepsaných drsností, které nebude možno za pomoci 3D tisku dosáhnout.

3.1.7 Postup při topologickém návrhu

Pokud je určeno, jakou technologií se daná součást bude vyrábět, v tomto případě na běžných obráběcích strojích, tak lze přistoupit k samotnému návrhu topologické optimalizace. Nejdříve bude nutné nasimulovat silové poměry na součásti. Tato část je velmi důležitá, jelikož musíme definovat síly, které nám působí na zadanou součást, v jakém směru nám působí a jejich velikost. Dále je velmi důležité určit, kde bude daná součást ukotvena a v jakém směru se nám může deformovat. Je dobré mít na paměti, že simulační softwary nejsou samospasné a měli bychom mít nějakou přibližnou představu, jaké zatížení se na součásti bude vyskytovat a jaký bude mít průběh.

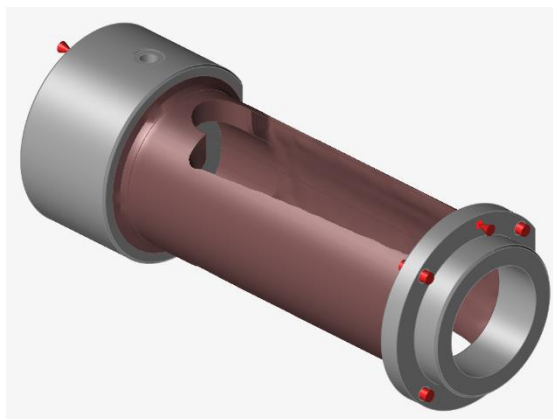
Pokud budeme mít nadefinované silové poměry na součásti a definované upevnění, můžeme přistoupit k samotné topologické simulaci. Na začátku simulace je nutné určit cíle topologické optimalizace. V této práci byl zvolen cíl z hlediska maximalizace tuhosti. To se definuje v samotném softwaru, jaký druh výpočtu má být použit. Při zaškrtnutí možnosti % množství materiálu, angl. % of total design space volume, zadáváme, jaké procentuální množství materiálu chceme z původního návrhu zachovat. V tomto případě bylo zvoleno 40%. Dalším parametrem určujeme minimální a maximální tloušťku stěny, angl. Thickness Constraints. Byla nastavena pouze minimální tloušťka stěn, a to na 12 mm. Další možné parametry, které je možné určit, jsou vztahy mezi přesností a rychlostí simulace. Toto nastavení nebylo změněno, tudíž se počítalo s výchozím nastavením. S možným vlivem gravitace nebylo počítáno.



Obr. 16 - Výčet parametrů pro první variantu topologické optimalizace

3.1.8 Návrh možných řešení

V této práci nejsou uváděny všechny návrhy topologické optimalizace z důvodu velkého množství prováděných variant. Byly vybrány jen 4 možnosti, z důvodu vyobrazení postupu změny. Tyto změny jsou nejvíce patrné na těchto čtyřech případech. Tyto varianty vychází z prvotních návrhů. V těchto návrzích se nejvíce přemísťuje materiál a je nejvíce patrný zásah topologické optimalizace. Ostatní návrhy byly pouze ověřovací či u nich proběhla zanedbatelná změna.



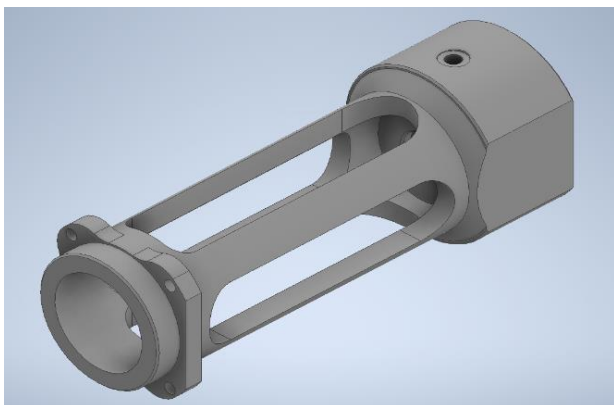
Obr. 17 - První návrh topologické optimalizace

Tab. 1 - Srovnání jednotlivých návrhů

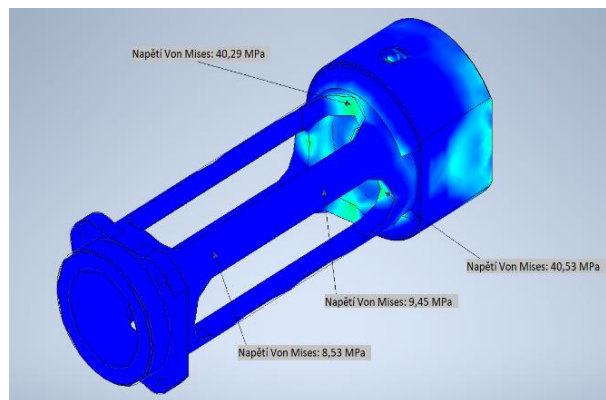
	Objem materiálu [mm ³]	Hmotnost součásti [Kg]	Maximální napětí [MPa]	Minimální bezpečnostní faktor [-]	Velikost deformace [mm]
Původní varianta	641881,738	5,007	109,9	5,35	0,0169
Varianta 1	513356,415	4,098	96,77	3,8	0,0182
Varianta 2	412840,088	3,241	129,7	4,53	0,0187
Varianta 3	417131,643	3,274	112,4	5,23	0,0186
Varianta 4	420920,384	3,304	88,24	4	0,02

3.1.9 Výsledné řešení topologické optimalizace pro obráběný díl

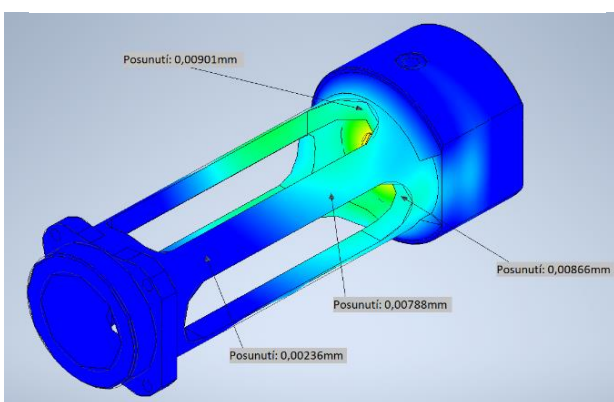
Výsledného řešení bylo dosaženo pomocí softwaru Autodesk Inventor Pro. Pomocí topologické optimalizace došlo k 35% úspoře váhy. Výsledné silové poměry byly počítány pomocí Autodesk Nastran, který je součástí Inventoru PRO. Výsledné řešení bylo optimalizováno s přihlédnutím na fakt, že se jedná o úpravu obráběného dílu. Tento díl byl přepracován z hlediska obrábění. Bylo zvoleno co největší možné zaoblení rohu, z důvodu co největší variability nástrojů. Celkový díl neprošel zásadní proměnou, která by zapříčinila nutnost zásadní změny v CNC programu. Oproti originálnímu dílu je pouze rozšíření a přidání tří vybrání. Obměna obráběcího programu bude obsahovat pouze jinou geometrii vybrání a následné otočení součásti o 90° a znovu zopakování tohoto úkonu. Nástroje, které jsou použity ve stávajícím programu, mohou být zachovány, protože proměny jsou relativně malé.



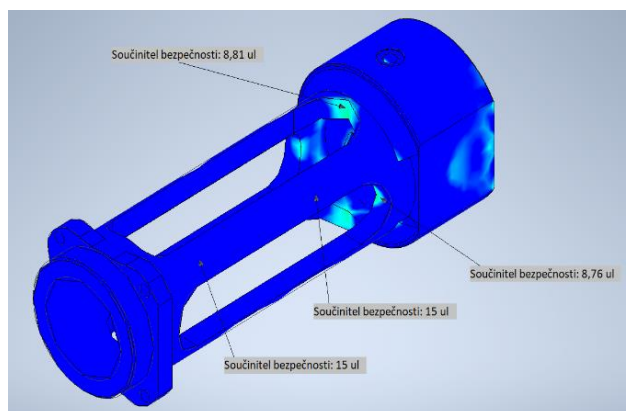
Obr. 18 - Výsledné řešení součásti pomocí topologické optimalizace pro obráběný díl



Obr. 19 - Napětí Von Mises [MPa]



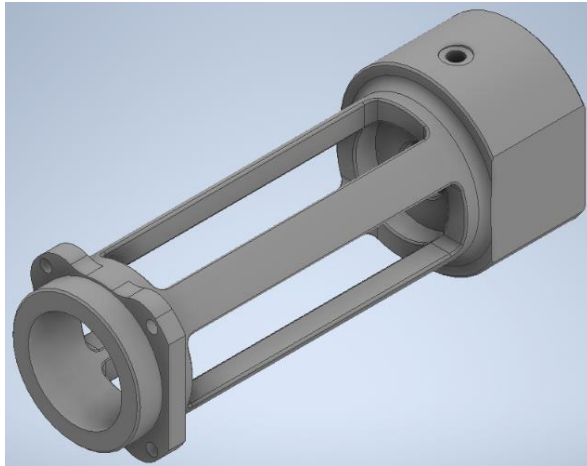
Obr. 20 - Posunutí [mm]



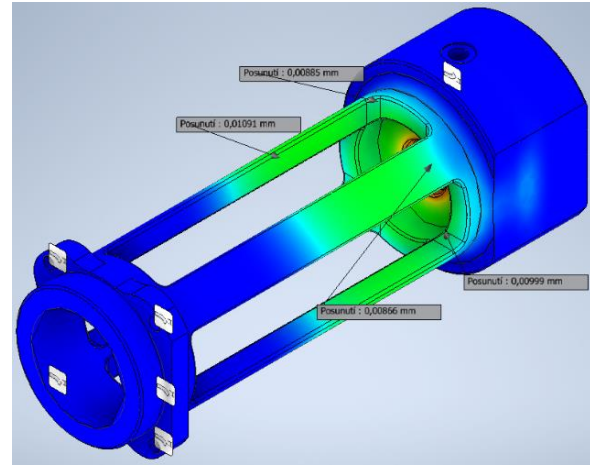
Obr. 21 - Součinitel bezpečnosti

3.1.10 Výsledné řešení topologické optimalizace pro tisknutí díl

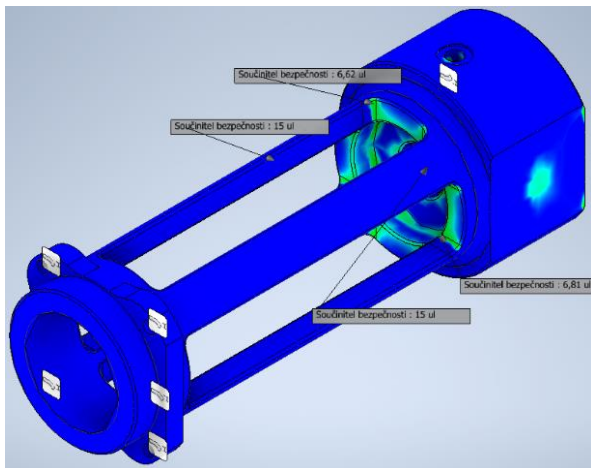
Pro potřeby kovového tisku bylo nutno přistoupit k topologické optimalizaci z trochu jiného hlediska. Toto hledisko bylo zaměřeno na tisknutelnost dílu. Bylo nutné změnit rádie v rozích součásti. Tato změna byla učiněna z důvodu minimalizace podpěr a lepší tisknutelnosti. Další změnou bylo snížení velikostí odlehčovacích drážek. Toto rozhodnutí bylo z hlediska zlepšení štíhlostních poměrů na součásti. Pokud by byl tento štíhlostní poměr zachován, tak by mohlo dojít k velkým pnutím a následné deformaci. Tato deformace by vycházela z více důvodů. Prvním důvodem by bylo tepelné zatížení součásti. Další důvod deformace by byl od nanášecího mechanismu, který nanáší kovový prášek, tzv. recourter. Tento mechanismus by neustále zatěžoval součást z jedné strany, tudíž by bylo riziko vychýlení.



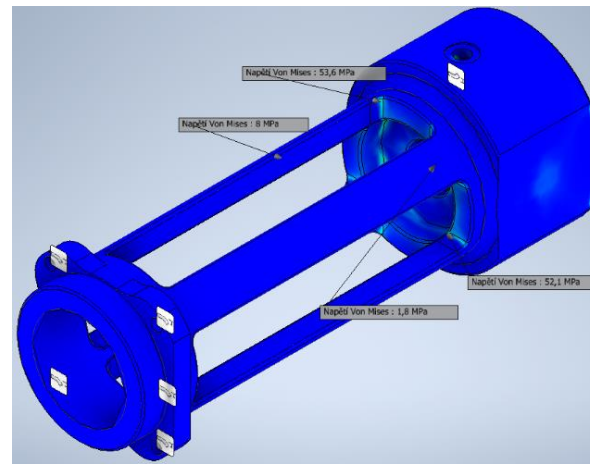
Obr. 22 - Výsledné řešení topologické optimalizace pro tištěný díl



Obr. 23 - Posunutí v [mm]



Obr. 24 - Součinitel bezpečnosti

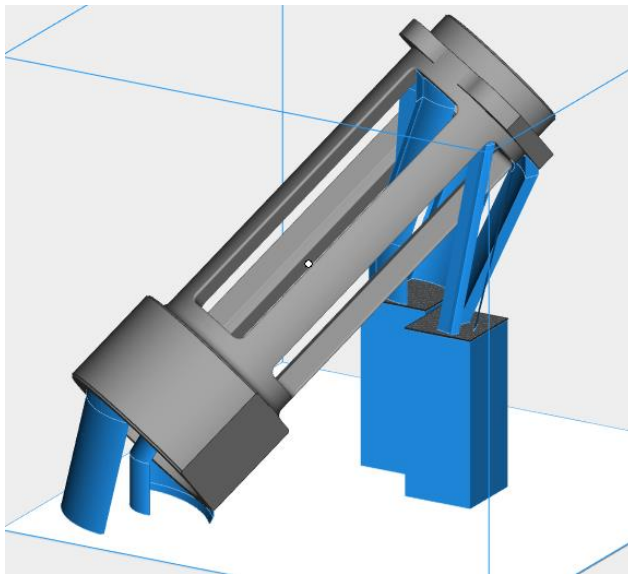


Obr. 25 - Napětí Von Mises [MPa]

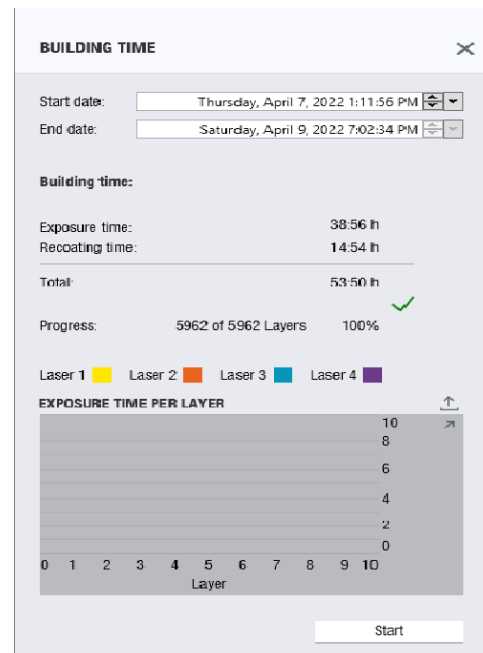
3.1.11 Porovnání výsledné topologické optimalizace pro obráběný díl a pro tištění díl

Tab. 2 - Výsledných parametrů jednotlivých technologií

Finální varianta	Objem materiálu [mm ³]	Hmotnost součásti [Kg]	Maximální napětí [MPa]	Minimální bezpečnostní faktor [-]	Velikost deformace [mm]
Obráběný díl	420925,3	3,305	98,45	4,8	0,026
Tištěný díl	425468	3,3399	95,7	4,2	0,056



Obr. 26 - Podpory vygenerované v Materialise Magics, vyobrazené v EOSPRINT 2.9



Obr. 27 - Čas tisku, čas přejezdu recourteru a množství vrstev

Tab. 3 - Časové náročnosti daných operací, množství podpor

	Časová náročnost	Množství podpor
Tištěný díl	3229 minut	130126,885 mm ³
Obráběný díl	390 minut	-
Původní díl	310 minut	-

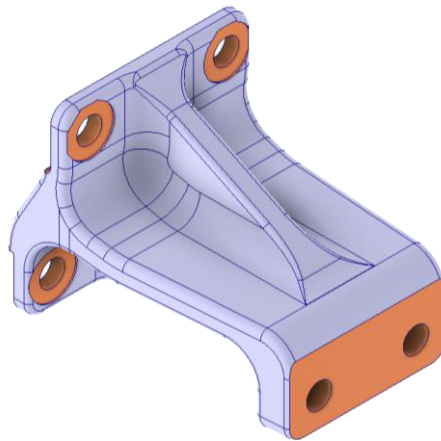
3.1.12 Závěr

Na zadané součásti proběhla optimalizace, jejímž hlavním úkolem bylo snížení hmotnosti. Tento úkol byl splněn a součást byla odlehčena o 35% při zachování potřebné tuhosti a pevnosti z hlediska namáhání součásti. Součást byla navržena a vyvinuta s ohledem na výrobu na konvenčních obráběcích strojích. Z tohoto důvodu použití SLM 3D technologie na optimalizovanou součást není ekonomické. Proto jsem se rozhodl zvolit běžný způsob výroby, a to obrábění dostupnými konvenčními nástroji.

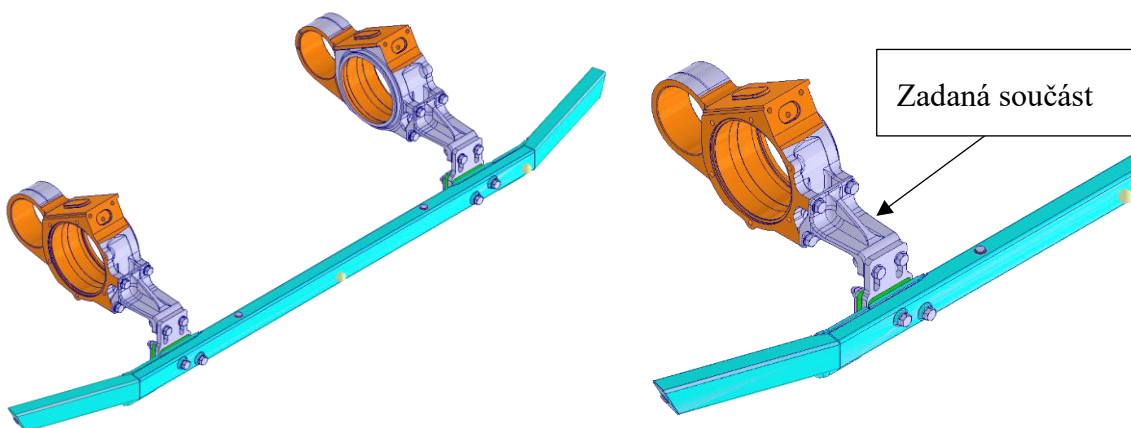
3.2 Návrh odlehčení a technologie tisku konzola

3.2.1 Představení součásti pro topologickou optimalizaci a následné simulace kovového tisku

Další součástí, kterou se tato práce zabývá, je díl ze Škody Transportation. Jedná se o konzolu, která se používá pro uchycení ochranného rámu v dopravní technice. Výroba tohoto dílu probíhá tak, že výchozí polotovar je odlitek, jedná se o odlitek z materiálu G24Mn6+QT2. Na dílu jsou obráběny hlavně dosedací plochy pro šrouby a dosedací plochy, které navazují na další součásti. Připojení konzoly k ochrannému rámu je realizováno pomocí jednoho mezičlenu a tento mezičlen je následně připojen k ochrannému rámu, mezičlen je vypořádán pružnými podložkami z důvodu redukce vibrací. Samotná konzola je připojena k mezičlenu dvěma šrouby M16x65. Tyto šrouby jsou utaheny přesným utahovacím momentem, a to 170Nm. Na druhé straně je konzola uchycena ke kyvnému rameni. Toto uchycení je realizováno čtyřmi šrouby M16x35 s pojistnou podložkou. Tyto šrouby jsou utaheny utahovacím momentem o velikosti 115Nm. Součást je namáhána silou o velikosti 10KN. Tato síla nepůsobí přímo na součást konzoly, ale působí na ochranný rám, mezičlen. Tato práce se zabývá pouze topologickou optimalizací a následnou simulací procesu tisku konzoly.



Obr. 28 - Zadaná součást

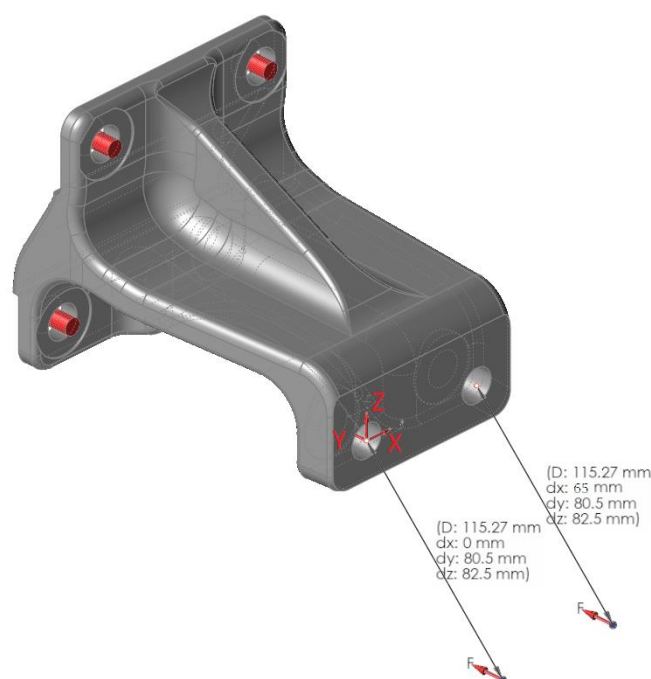


Obr. 29 - Vyobrazení uspořádání včetně navrhovaného dílu

Obr. 30 - Detail na zadanou sestavu

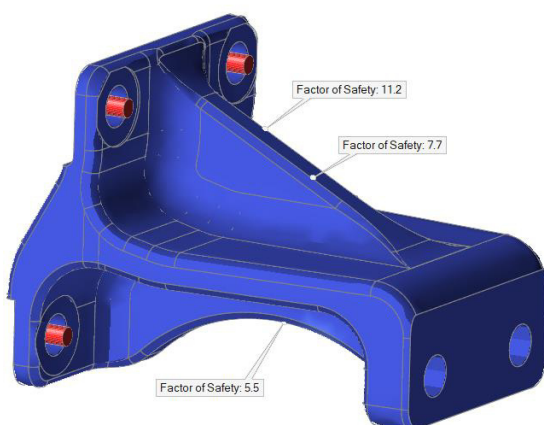
3.2.2 Silové poměry na zadané součásti 2

Na optimalizované součásti je nutné znát všechny síly, které na součást působí, jejich směry i působiště. Aby příslušný software dokázal provést správně vlastní topologickou optimalizaci, tento díl je namáhán hlavně tahem, tlakem a ohybem. Tyto síly byly zadány od zadavatele. Síly nepůsobí přímo na optimalizovanou součást, ale působí přes další elementy konstrukce. Vlivy těchto elementů nejsou uvažovány. Jak bylo řečeno, tyto síly působí mimo díl, souřadný systém na lokalizování působiště byl zvolen kartézský, tedy X, Y, Z. Počátek tohoto souřadného systému byl zvolen na pravém čele, ve středu díry pro šrouby M16 na uchycení mezičlenu a tento mezičlen je dále uchycen k ochrannému rámu. Působiště síly je vyobrazeno na obrázku číslo 32. Safety factor. Průběhy napětí a průběh posunutí byly vyobrazeny pomocí softwaru Altair Inspire 2021 2.1

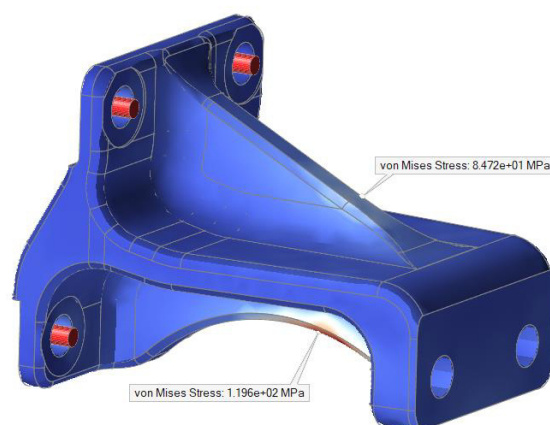


Obr. 31 - Zobrazení působiště sil na součást konzoly

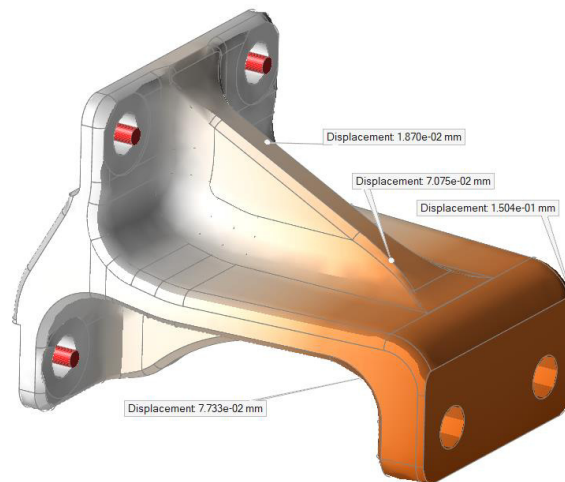
3.2.3 Průběh napětí, součinitel bezpečnosti a posunutí podél součásti



Obr. 32 - Součinitel bezpečnosti



Obr. 33 - Napětí Von Mises



Obr. 34 - posunutí

3.2.4 Materiál zadané součásti

Zadaná součást je nyní vyráběna technologií odlévání, materiál je ocel na odlitky, přesněji dle normy DIN G24Mn6+QT2, přidružená zkratka za materiálem, v tomto případě QT2, znamená další tepelné zpracování po odlévání. Zkratka QT2 znamená zušlechtnění na úroveň 2. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou následující. Mez pevnosti R_m je 695MPa, mez kluzu $R_{p0,2}$ je 538MPa. Tyto hodnoty jsou pouze výčtem z hodnot, které byly poskytnuty zadavatelskou firmou [16]. Tyto odlitky byly kontrolovány vizuálně a magnetickou polévací zkouškou.

3.2.5 Aplikace topologické optimalizace na zadaný díl

Na zadaný díl byla aplikována topologická optimalizace, která byla prováděna v simulačním softwaru Altair Inspire 2021 2.1. Postup topologické optimalizace zde není znovu uváděn z důvodu uvedení do dané problematiky na předešlém dílu. U toho dílu bylo nutné zachovat příslušné připojovací rozměry, dále bylo nutné se vejít do zadaného prostoru.

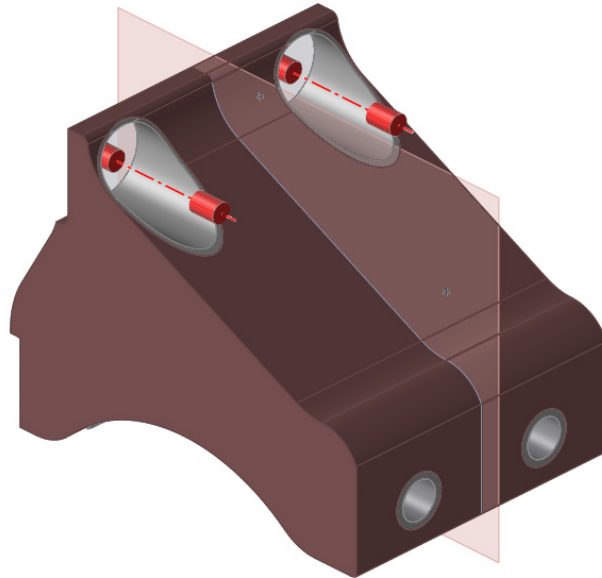
3.2.6 Cíl topologické optimalizace

Cílem topologické optimalizace bylo snížení hmotnosti zadaného dílu a zachování nebo zlepšení tuhosti. Tohoto cíle bude dosaženo pomocí nástrojů v softwaru Altair Inspire,

3.2.7 Postup návrhu

Existuje více základních přístupů, jak těchto cílů dosáhnout. Jedním z přístupů je vytvoření úplně nového design space. Tato oblast je určena kvádrem, který má maximální rozměry dle zástavbového plánu. Tato možnost se používá, pokud je vyvíjen úplně nový díl a není známo, jak bude díl vypadat, ale jsou dané představy o funkci. Dalším přístupem je použití již vyvinutého dílu. Tento díl se naimportuje do softwaru, který disponuje topologickou optimalizací. Následuje zvětšení hranic dílu například odsazením ekvidistantou. To se dělá z toho důvodu, aby se zvětšila oblast, kam může daný software zasáhnout. Tento přístup je určen pro uživatele, kteří mají představu o vzhledu dílu či kteří inovují již navržený díl.

V této práci byl zvolen přístup vytvoření dostatečného odsazení od původního dílu, tím vznikl dostatek prostoru pro realizaci topologické optimalizace. V nově navrženém pracovním prostoru byly zachovány okrajové podmínky, jako jsou upevňovací díry a dosedací plochy, které se po výrobě musí zarovnat z důvodu přesného ustavení dílu.



Obr. 35 - Návrhový prostor

Nežli mohla být spuštěna samotná topologická optimalizace, musel být nejdříve nadefinován materiál, ze kterého bude výsledný díl. Bylo rozhodnuto, že výsledný díl bude vyroben pomocí aditivních technologií. 3D tištěný materiál dosahuje odlišných mechanických vlastností, než válcovaný materiál, další informace se nachází v kapitole 3.2.10. Tento materiál byl nadefinován pomocí dodaného materiálového listu, kde byly provedeny potřebné mechanické zkoušky pro zjištění mechanických vlastností materiálu. Poté byla spuštěna topologická optimalizace s cílem snížení hmotnosti při zachování tuhosti. Tato topologická optimalizace sestávala z velkého množství mezikroků, než bylo dosaženo finální varianty.

Úprava topologicky optimalizovaného dílu

Díl, který nám vyhodnotí topologická optimalizace jako výsledný, musí většinou projít dalšími úpravami, aby dosáhl technologičnosti. To platí i u tohoto dílu. Díl prošel celou řadou změn. Topologická optimalizace vytvořila hlavní tělo konzoly a nastínila řešení ostatních částí. Takto optimalizovaný díl musel projít vyhlazováním z důvodu odstranění různých vad či koncentrátorů napětí. Tohoto bylo dosaženo dalším nástrojem ze softwaru Altair Inspire.

Další fází aplikace topologicky optimalizovaného dílu výroby za pomoci aditivní technologie je úprava dílu z hlediska co nejmenšího využití podpor. Tohoto kritéria lze dosáhnout například snížením velikosti rádia na bezpečně tisknutelnou mez. Dalším řešením, jak těchto kritérií dosáhnout, je snížení převislých konců na minimum a využití pozvolného napojování jednotlivých částí konzoly. Pokud toto napojení nepřesáhne úhel 40 stupňů, tak není nutné vytvářet podpory. Je nutné mít na paměti princip SLM 3D tisku, do materiálu je vnášeno velké množství energie ve formě tepla. Toto teplo se může hromadit v tepelných bodech. Toto hromadění tepla může způsobit celou řadu problémů, jako například deformaci, snížení bodové hustoty či tvorbu trhlin. K predikci deformací a odhalení těchto tepelných bodů nám slouží mechanická a termální simulace.

3.2.8 Výsledné řešení topologické optimalizace

Výsledné řešení topologické optimalizace zadané konzoly bylo dosaženo za použití softwaru Altair Inspire. Toto řešení bylo zaměřeno na výrobu pomocí aditivní technologie. V tomto případě technologie SLM 3D tisku. Tento výsledný tvar je vygenerován s přihlédnutím na dodané zadání. Dodané zadání je vyobrazeno v kapitole 3.2 Silové poměry na součásti 2. Pokud by se mělo jednat o přesnou a finální aplikaci do ostrého provozu, muselo by se přihlédnout i k mezním stavům zatížení. Zejména pak ke způsobu deformace, aby deformace této součásti nepoškodila její okolí. Na tyto faktory se však tato práce nezaměřuje, zabírá se použitím topologické optimalizace pouze jako nástrojem pro zefektivnění použití SLM tisku. Z tohoto důvodu byl změněn použitý materiál součásti z G24Mn6+QT2 na materiál ANSI 316L.

3.2.9 Použitý materiál

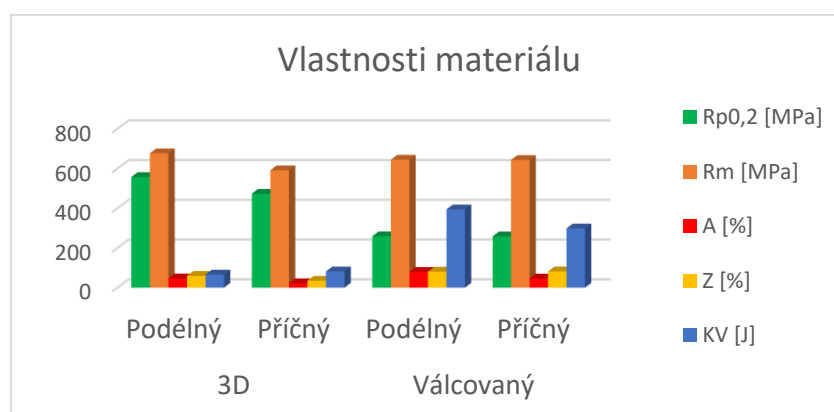
Změna materiálu proběhla z důvodu změny výrobní technologie dané součásti. Výsledná topologická optimalizace byla navrhována na materiál dle normy ANSI, a to na 316L neboli chromniklová-molybdenová austenitická nerezová ocel. Tato ocel vyniká ve vysoké odolnosti vůči atmosférické korozi, kyselému i zásaditému prostředí. V našem případě byla ale tato ocel použita z důvodu dobré tisknutelnosti.

3.2.10 Porovnání tištěné ANSI 316L a válcované ANSI 316L

Toto porovnání se zaujímá spíše mechanickými vlastnostmi než chemickými. Jelikož se jedná o jednu a tu samou ocel, pouze se liší technologie zpracování, tak je v podstatě stejné chemické složení jak u tištěné, tak u válcované oceli. Ocel se může lišit stejně tak jako jednotlivé tavby u jakéhokoliv jiného materiálu. Materiál byl testován pomocí tahové zkoušky a Cheryho vrubové zkoušky s V vrubem. [16]

Tab. 4 - Porovnání tištěného materiálu s válcovaným materiálem data převzata z [16]

Materiál	Směr	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]	KV [J]
3D	L	557,1	676,6	46,5	59,5	66
	T	472,8	591,1	21,5	34,5	82
Válcovaný	L	258,8	643,9	79,2	80,6	394
	T	257,9	642,9	46,2	81,6	298



Graf 1 Porovnání tištěného a válcovaného materiálu

V tabulce 4 jsou zaneseny výsledné hodnoty, které byly získány pomocí tahové zkoušky a zkoušky vrubové houževnatosti na Cherpyho kladivě, kde byly oba materiály vyzkoušeny v obou směrech, jak příčném, tak podélném. Zkratka L je z anglického výrazu longitudinal, to v překladu znamená podélný, T je z anglického výrazu transverse, v překladu příčný. Zatímco vlastnosti materiálu, který je válcovaný za tepla, jsou v obou směrech skoro totožné, u tištěného zkušební vzorku dochází k poklesu pevnosti i meze kluzu v příčném směru. Ještě k daleko výraznějšímu snížení plasticity a vrubové houževnatosti, kdy tažnost „A“ 3D tištěného zkušební vzorku byla pouze více než poloviční hodnota v podélném směru a čtvrtinová hodnota v příčném směru v porovnání s plechem, který byl válcován za tepla. [16]

3.2.11 Porovnání s původním dílem

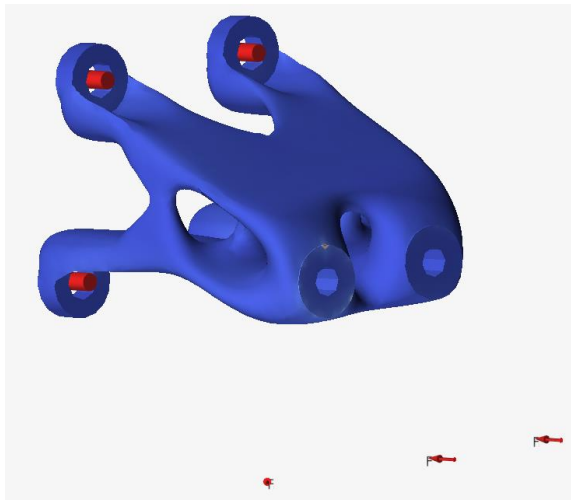
Původní díl s nově přepracovaným dílem se zřetelně liší. Tyto odlišnosti jsou dány jinou technologií výroby. Obě součásti se shodují v okrajových podmínkách, tj. velikost a pozice děr pro šrouby. Dalším stejným parametrem je celková výška této konzoly. Zatímco polotovary pro výrobu originálního dílu je odlitek, mnou navržený díl je vyroben za pomoci aditivních technologií, konkrétně za pomoci 3D SLM tisku. To nám umožňuje vytvářet složitější plochy, které by jinou technologií byly jen obtížně vyrobitelné. Kvůli technologii tisku byl také změněn materiál z původní ocelolitině na nerezovou ocel třídy ANSI 316L. Hlavní změny jsou zaneseny v tabulce č. 5.

Tab. 5 - výsledné porovnání topologicky optimalizovaného dílu a originálu

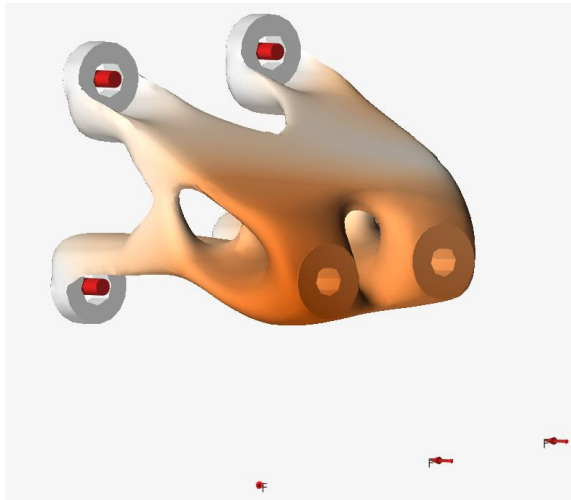
Finální varianta	Objem materiálu [mm ³]	Hmotnost součásti [Kg]	Maximální napětí [MPa]	Minimální bezpečnostní faktor [-]	Velikost deformace [mm]
Odlitek	745286	5.851	95	5	0,2
Tištěný díl	506704	3,927	110	4.1	0,08
Tištěný díl s přídatnou boční silou 10KN	506704	3,927	175	2.6	0,21

Popis tabulky porovnání

Tabulka porovnává topologicky optimalizovaný díl s původním dílem. Pokud porovnáme objem materiálu před topologickou optimalizací a po ní, můžeme vidět zřetelný úbytek. Tento úbytek se projeví samozřejmě i v poklesu celkové hmotnosti, přičemž maximální napětí v součásti není zřetelně vyšší, než u původního návrhu součásti. Velikosti deformací dílu jsou dokonce o řád nižší, než u původního dílu. Pouze pro informativní představení tuhosti optimalizovaného dílu bylo přidáno zatížení ve formě síly, která působí na levou dosedací plochu pod úhlem 40 stupňů ve stejné poloze jako předešlé síly. Velikost této dodatečné síly je nastavena na 10KN. Tato síla způsobuje vychýlení v jednom směru, výsledné napětí a deformace nám ukazují tuhost celého návrhu.



Obr. 36 - Napětí s přidavnou silou



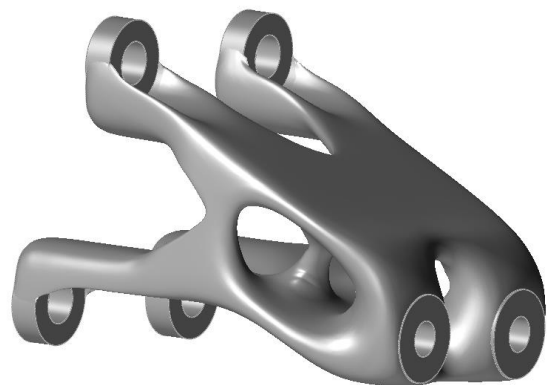
Obr. 37 - Deformace s přidavnou silou

3.2.12 Závěr aplikace topologické optimalizace na součást konzoly

Výsledný získaný tvar byl navržen s ohledem na dostatečné přenesení zatížení, ale také na nejvýhodnější výrobu. Výroba byla provedena na 3D tiskárně EOS M290, jedná se o tiskárnu s tiskovým prostorem 230x230x250. Tvar byl zvolen tak, aby se součást musela co nejméně podporovat a tím narůstaly náklady na její výrobu. Z konstruktérského hlediska má tato součást několik dalších možných řešení. Spoustu faktorů zde bylo zanedbáno z důvodu obsáhlosti tohoto tématu. Jeden z faktorů, který zde byl zanedbán, je například působení sil, které nejsou v zadání. Na součást by ve skutečnosti nejspíše působily síly nejen z přímého směru, ale také z šikmého směru. Součást je navržena symetricky, ale pokud by bylo uvažováno působení sil z šikmých směrů, tak by navržená konzola měla mít na jedné straně vyšší tuhost než na druhé. Ve výsledném součtu tuhosti nárazníku by byla na všech místech stejná tuhost. Pokud by však byla tato šikmá síla přidána do zatížení, simulace by ukázala, že navržená součást odolá bez větších změn i sílu, která převyšuje zadané silové poměry dvojnásobek. Dále by tato součást měla mít vyřešenou deformaci v důsledku přetížení součásti, jak se tato konzola bude plasticky deformovat, aby její deformace nepoškodila další součásti v její blízkosti. Tato práce se zabývá spíše návrhem technologie výroby, nežli návrhem zadané součásti z konstruktérského hlediska. Dalším postupem bude návrh technologie výroby, návrh podpor pro 3D tisk a následná simulace procesu tisku.



Obr. 38 - Výsledný návrh dílu ISO pohled



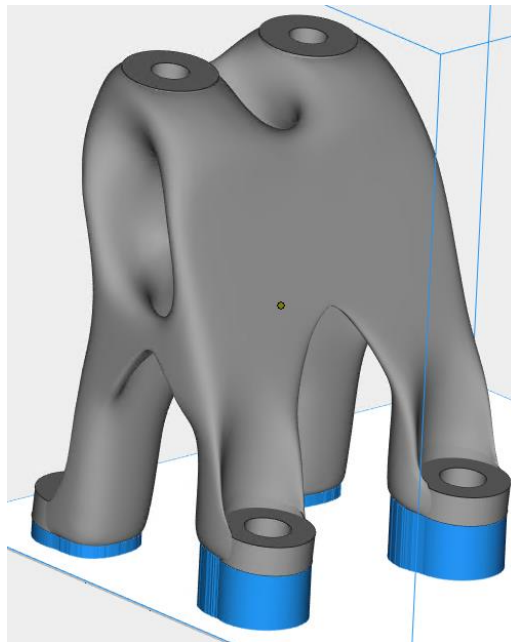
Obr. 39 - Výsledný návrh dílu

3.2.13 Aplikace simulace procesu tisku na součást konzoly

Další fází návrhu součásti konzoly je samotná výroba za pomoci aditivní technologie, v tomto případě technologie SLM 3D tisku. Samotné výrobě musí předcházet příprava procesu, tato příprava byla vytvořena v softwaru Materialise Magics. Příprava spočívá ve správném napolohování součásti, z důvodu co nejlepší tisknutelnosti, nejefektivnějšímu rozložení dílu na platformě a navržení příslušných podpor. Pro ověření všech těchto kritérií, které vedou ke správnému efektivnímu tisku, byl použit simulační modul také od vydavatele Materialise Magics. Díky tomuto modulu byly odhaleny případné poruchy a chyby v procesu tisku.

3.2.14 Napolohování součásti, rozložení podpor

Správné napolohování součásti vede ke značnému snížení množství chyb v procesu 3D tisku. Tyto chyby mohou vést ke snížení kvality samotného tisku, k bodovému snížení hustoty materiálu neboli zvýšení pórovitosti materiálu a tím ke značnému snížení mechanické a cyklické odolnosti součásti. Rozložení součástí na platformě je dalším kritériem, kterým je nutné se zabývat. Toto rozložení by se mělo řídit dle parametrů příslušné 3D tiskárny. Správné rozložení podpor u tisku snižuje množství vznikajícího napětí a vznikajících deformací. Tyto podpory slouží k upevnění samotné součásti k platformě. Podpory ale slouží současně jako pasivní chladič, který ze součásti odvádí přebytečné teplo a tím výrazně snižuje vznik napětí mezi studenými částmi a přehřátými částmi výrobku. Teplo je také odváděno pomocí kovového prášku v okolí součásti, ale tento odvod není tak výrazný jako skrze podpory. Ke zhodnocení všech těchto kritérií slouží mechanická a termální simulace procesu tisku. Této simulaci předcházejí kroky, které byly zmíněny výše, tedy napolohování, vytvoření podpor a následné uložení ve formátu, který podporuje Materialise Magics. Samotná technologie a provedení podpor a poloha součásti v této práci není rozebírána z kapacitních důvodů a z důvodů velkého množství bakalářských a diplomových prací, které se na toto téma již vyskytují. Podpory jsou zvoleny pouze na kontaktních místech s platformou. Toto rozložení bylo zvoleno z důvodu co nejnižšího počtu podpor.



Obr. 40 - Rozložení podpor před simulací

3.2.15 Nastavení mechanické a termální simulace

Mechanická, ale zejména termální simulace vyžaduje velký výpočetní výkon zařízení, na kterém simulace byla prováděna. Za pomoci správného nastavení simulace může být tento výkon správně rozložen. Toto nastavení bylo provedeno za pomoci uživatelské příručky přímo od vydavatele modulu do Materialise Magics. Simulace byla prováděna ve výzkumném ústavu RTI za pomoci zaměstnanců, kteří již mají praktické znalosti v oblastech simulací aditivních technologií. Simulace je založena na voxelové reprezentaci součásti.

Nastavení mechanické simulace

Nastavení mechanické simulace je relativně jednoduché v porovnání s termální simulací. V této simulaci nastavujeme, z jakého materiálu bude součást vyrobena a velikosti deformací v příslušných směrech ε_x , ε_y , ε_z . Tyto deformace jsou zjištěny pomocí kalibrace na typových součástích, které mají přesné rozměry. Odchylka od těchto rozměrů je příslušná velikost deformace. Hodnotami deformací ε se tato práce nezabývá, byly použity již zjištěné hodnoty. Dalším parametrem mechanické simulace je tloušťka vrstvy nanášeného prášku. Tato hodnota také nebyla měněna, z důvodu nutnosti změny všech dalších hodnot.

Nastavení termální simulace

Nastavení termální simulace vyžaduje zadání více parametrů, než u mechanické simulace. Termální simulace si převezme data z mechanické simulace, ale je nutné zadat parametry ohledně zdroje tepla, jako například výkon laseru ve watttech, rychlost laseru v mm/s, průměr laserového paprsku, efektivitu laseru a časovou prodlevu mezi spékáním a nanášením další vrstvy prášku, v nastavení simulace vedenou jako recourter time v sekundách.

Spuštění simulace

Samotné spuštění simulace je relativně jednoduché nastavit, jedná se o určení cesty k datům simulace, zvolit si, jaká simulace se má provádět. Je třeba mít na paměti, že termální simulace bude trvat 2-3x déle, než mechanická simulace. Dále je třeba nastavit pracovní prostor stroje, takzvané platformy. U platformy se musí nastavit její výška a určení teploty přehřevu této platformy. V našem případě byla tloušťka platformy zvolena 25mm a teplota přehřevu 80°C. Dalším velmi důležitým parametrem je nastavení velikosti voxelů. Po tomto určení můžeme přejít k samotnému spuštění simulace. Pokud byly vybrány oba druhy simulace, tak nejdříve proběhne mechanická simulace a poté termální simulace.

Velikost voxelů

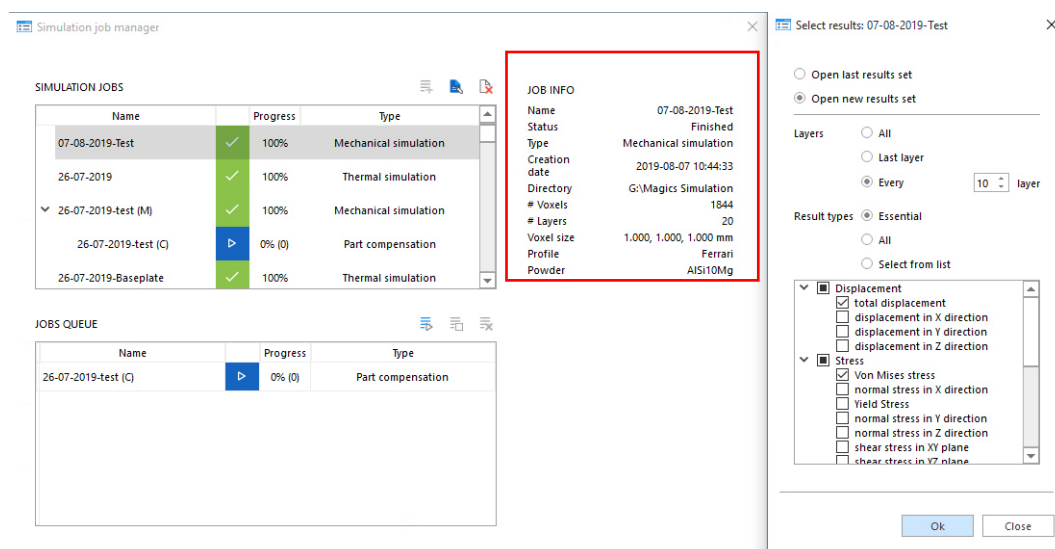
Velikost voxelů je jedním z parametrů, který napřímo ovlivní přesnost dané simulace. Čím větší velikost prvku, tím je větší očekávaná chybovost ve srovnání se skutečností. I když je v technické praxi očekávaná co nejmenší odlišnost od skutečnosti, je třeba vzít k úvahu i množství výpočetního výkonu a čas, který je spotřebován na co nejmenší velikost voxelu. Velikost voxelu musí být stanovena tak, aby byla dosažena potřebná přesnost, ale zároveň nebylo spotřebováno zbytečně velké množství výpočetního výkonu a času. Je potřeba vzít k úvahu, že zmenšením velikosti voxelu exponenciálně narůstá množství vyžadovaného výkonu a času na proběhnutí obou typů simulací. V tomto případě byla zvolena nejprve velikost voxelu 1x1x1mm na mechanickou simulaci. Trvání této simulace bylo skoro 15h. Jak již bylo uvedeno, trvání termální simulace je několikanásobně delší, než mechanická simulace. Z toho důvodu byla termální simulace zastavena. Hlavním důvodem k zastavení byla vysoká spotřeba výkonu a tím pádem zastavení běhu softwaru. V reakci na toto zastavení byla termální simulace přenastavena na větší velikost voxelu, a to 1,5x1,5x1,5mm.

3.2.16 Výsledné řešení simulace tisku

Výsledné řešení je jeden z mála přístupů, kterého lze za pomoci tohoto simulačního softwaru dosáhnout. Jak již bylo zmíněno, simulace procesu tisku vyžaduje velké množství výpočetního výkonu, tak i času. Celková doba simulace, včetně nedokončené simulace, činí cca 35 hodin nepřetržitého procesu výpočtu. Výsledná velikost těchto souborů, které byly vygenerovány ze simulace, přesahují 75GB dat. Z toho důvodu tyto soubory nejsou přiloženy v přílohách.

3.2.17 Mechanická simulace

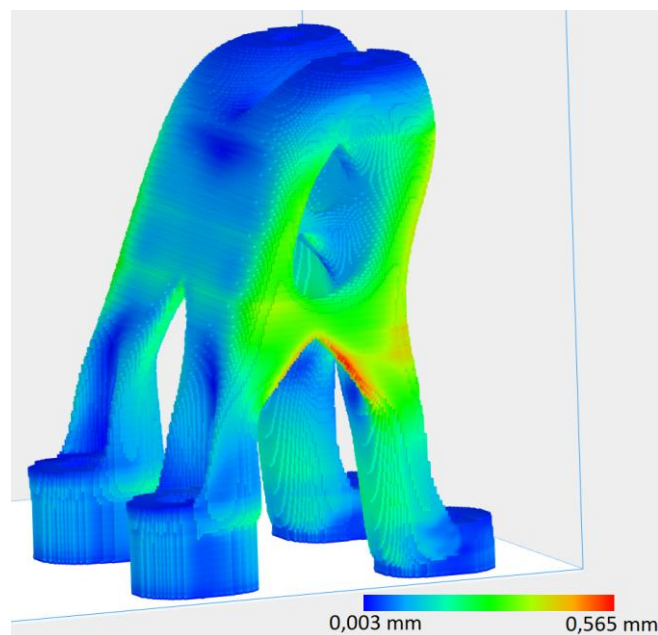
Na Obr. 41 v náhledu na mechanickou simulaci, můžeme vidět rychlý přehled důležitých dat, bez nutnosti dalšího načítání ostatních dat simulace, jako například typ simulace, čas vytvoření, ale i počet voxelů, na kolik byla součást rozdělena a počet vrstev, mezi kterými je možno vybírat, v tomto případě byl tento počet 181 vrstev. Tento počet je přímo ovlivněn velikostí voxelů a materiálem simulované součásti. Nejdůležitější je však záložka Job results neboli výsledky. V tomto rychlém přehledu se objeví maximální deformace, maximální napětí, možnosti nedokončení procesu nebo možného zavedení recoutru o součást, či její podpory. Další výsledky je možné zobrazit po úplném načtení dat.



Obr. 41 - Mechanická simulace [17]

Displacement

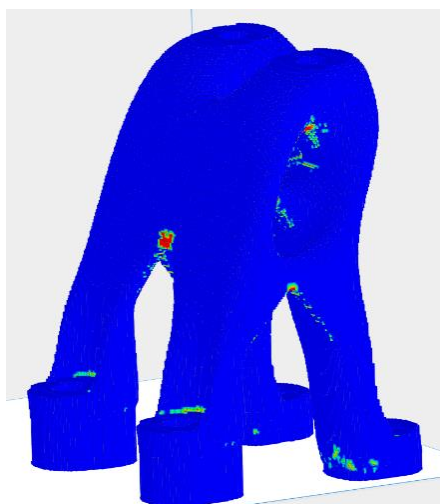
Displacement neboli posunutí, či možná deformace. V této části je ukázán vztah mezi deformací objektu k jeho původní geometrii. Na každý voxel je aplikován určitý vektor posunutí. To lze zobrazit ve směru x, y, či z, nebo jako celkové posunutí. Na obrázku č. 39 je patrné, že obrázek se skládá z více oblastí, kde jsou jednotlivé oblasti rozlišeny jinou barvou. Tyto barvy jsou zásadní na rozlišení velikostí deformací. Modrá barva indikuje velmi malé, až zanedbatelné deformace, zelená barva značí zvětšující se deformaci a oranžovou, až červenou barvou jsou vyznačeny extrémy. K barvám lze přiřadit číselné hodnoty deformací. Od modré, která odpovídá deformaci 0,0003mm, až po červenou barvu, která odpovídá deformaci až 0,57mm. Tento software netvoří pouze statické náhledy, ale může vytvořit i náhled v jednotlivých vrstvách.



Obr. 42 - Simulace procesu tisku - posunutí

Global

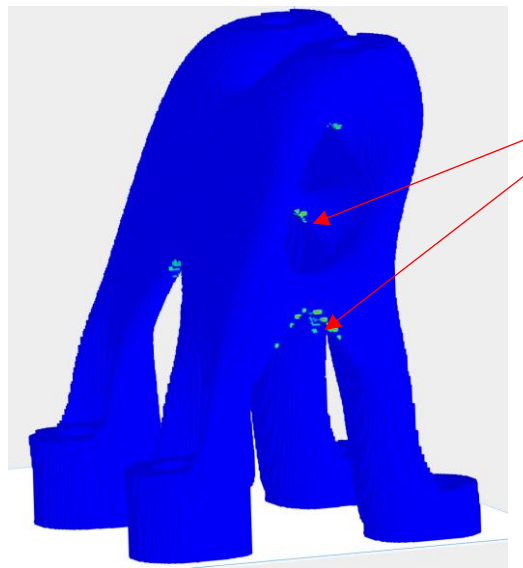
Dalším zobrazením, které obsahuje více částí, je globální zobrazení. Toto zobrazení obsahuje error elements, v překladu chybné prvky, relative density neboli relativní hustota a solid fraction, což je ve volném překladu pevná frakce. Hustota se bude lišit například v podporách, kdy se předpokládá, že podpora bude vytvořena tak aby byla lehčí než tištěný díl, tudíž v podporách je žádoucí, aby tyto hodnoty byly menší než 1. Kde je naopak toto nežádoucí, je v samotném dílu. To nám může značit možné lokální zvýšení pórovitosti, tudíž náchylnosti na případné deformace či lomy při statickém nebo cyklickém namáhání. I v tomto případě platí, že modrá barva symbolizuje oblasti, ve kterých je velice malé, spíše nulové procento výskytu porušení. Červená barva naopak indikuje zvýšené riziko výskytu těchto vad.



Obr. 43 - Simulace procesu tisku – Global - hustota

Re-coater Risk

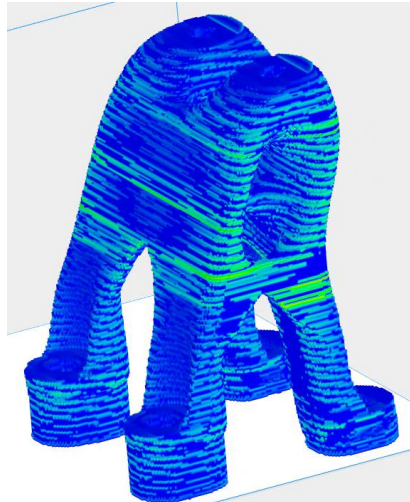
Další záložkou, která se vyskytuje u mechanické simulace, je Re-coater Risk neboli v překladu riziko recoateru. Recoater nanáší jednotlivé vrstvy prášku. Může se stát, že ve svém přímočarém pohybu narazí do tištěného dílu nebo podpory. Toto riziko je nutné brát v potaz, jelikož může způsobit vychýlení tištěného dílu nebo podpory a tím znehodnotit tisk. Pokud recoater narazí do tištěného dílu, může způsobit rozkmitání součásti, díky čemuž dojde ke střásání kovového prášku, což bude mít za následek nedostatečné množství nanášeného prášku a zastavení tisku. Toto rozkmitání bude patrnější ve výše položených vrstvách součásti nežli blízko u platformy. Je možné využití více druhů recoaterů, které snižují riziko rozkmitání součásti. V této práci je viditelné riziko na několika místech, kde se jednotlivé pruty součásti spojují. Tyto místa je nutné upravit, nebo přidat podpory. Z důvodu názornosti jsou hlavní místa, kde je zvýšené riziko kontaktu recoateru s tištěným dílem nebo podporou, zobrazeny mimo jiné i šipkami.



Obr. 44 - Simulace procesu tisku- riziko recoateru

Shrink Line

Shrink Line znamená v překladu smršťovací čára, kdy se v důsledku spékání laserem a následného ochlazení materiál smršťuje. Jednotlivé vrstvy tisku jsou na součásti většinou vidět. Co ale není úplně žádoucí, je viditelná a hmatatelná oblast tohoto smrštění, což může mít za příčinu prasknutí součástí v tomto místě. Tato možná místa vzniku defektu zobrazuje na obrázku č. 42 zelená barva, přitom největší pravděpodobnost na smrštění a vznik vad indikuje barva červená, která se na simulované součásti nevyskytuje.



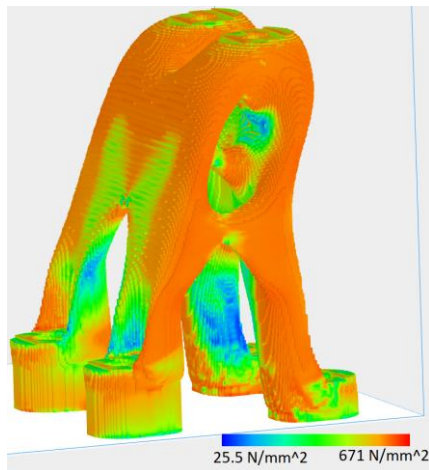
Obr. 45 - Simulace procesu tisku –
čára smrštění

Efektivní plastické napětí a ekvivalentní elastické napětí

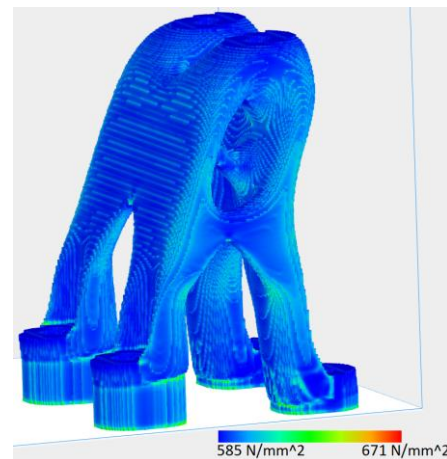
Deformace je odezva zatěžovaného systému po aplikování zatížení. Pokud je materiál zatížen silou, vzniká napětí, které následně způsobí deformaci. Přetvoření je definováno jako velikost deformace ve směru síly, dělená délkou materiálu před jeho zatížením. Experimenty ukazují, že deformace se dá rozdělit na dvě části, na plastickou a elastickou deformaci. Ekvivalentní elastická deformace definuje, že deformované těleso se po odstranění deformační síly vrátí do svého původního tvaru a velikosti. Efektivní plastická deformace nám definuje velikost stálé deformace. Plastická deformace je charakterizována nevratným plastickým pnutím, které začíná na mezi kluzu materiálu.

Napětí Von Mises a napětí na mezi kluzu

Napětí Von Mises neboli stress, je fyzikální veličina, která zobrazuje sílu na plochu v hmotném bodě. Napětí lze měřit v bodě jeho aproximací jako malé krychle v kartézském souřadném systému. Napětí lze rozdělit na tři složky, jedna složka je kolmá k ploše a zbývající dvě jsou tečné k ploše. Napětí, které působí kolmo na plochu, se nazývá normálové napětí, zatímco další tečná napětí se nazývají smyková napětí. Normálové napětí má náchyllost měnit délku prvku (prodloužení či stlačení). Smykové napětí má tendenci měnit tvar prvku. Napětí Von Mises je skalární hodnota napětí, kterou lze vypočítat z Cauchyho tenzoru napětí. Materiál se začne přizpůsobovat, když napětí dle Von Mises dosáhne hodnoty známé jako mez kluzu. Napětí Von Mises se využívá k odhadu meze kluzu materiálů při celkovém zatížení z výsledků jednoosých tahových zkoušek. Napětí Von Mises splňuje vlastnost, kdy dva stavy napětí se stejnou energií deformace mají stejné von Mises napětí. Yield napětí neboli napětí na mezi kluzu materiálu, se označuje jako přechod z elastického chování do plastického chování materiálu. Je to minimální hodnota napětí, kdy materiál projde trvalou deformací bez významného zvýšení zatížení nebo vnější síly. [17] Simulace nám odhaluje velikosti napětí a různé napěťové špičky. Jak je z obrázku č. 43 simulace procesu na mezi kluzu patrné, nevyskytují se zde napěťové špičky označené červenou barvou.



Obr. 46 - Simulace procesu tisku napětí
Von Misses



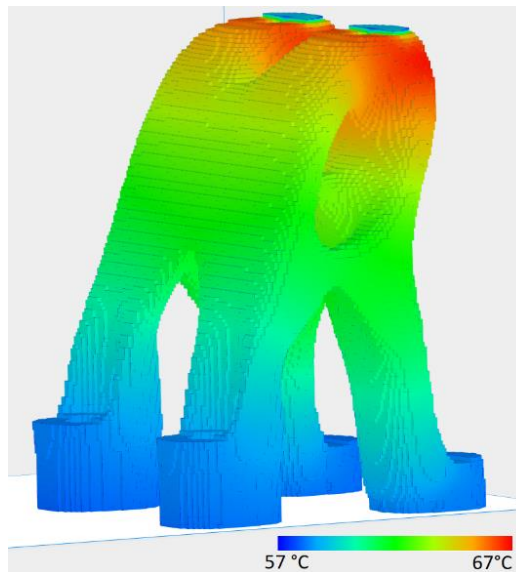
Obr. 47 - Simulace procesu tisku napětí na
mezi kluzu

3.2.18 Termální simulace

Náhled na termální simulaci je relativně stejný, jako náhled na mechanickou simulaci. Tato simulace byla spuštěna s odlišnými parametry než u mechanické simulace, jelikož je tato simulace náročnější na čas i výkon, než mechanická simulace. Z toho důvodu byla velikost voxelu upravena na $1,5 \times 1,5 \times 1,5$, jak je již zmíněno v textu výše. Tepelná simulace je rozdělena do 121 vrstev a každá vrstva obsahuje 3 možnosti zobrazení. Prvním zobrazením je začátek spékání, v této části dosahuje teplota svého maxima. Další částí je predikce teploty po ukončení spékání, tedy na konci procesu vytváření jednotlivých vrstev. Poslední fází je ochlazování. Tato fáze probíhá s depozicí další vrstvy kovového prášku. Trvání této simulace bylo po dobu 4,7h. Čas je kratší z důvodu větší velikosti voxelu o 50%. Termální simulaci je možno rozdělit na tři části. První částí je predikce teploty v každé vrstvě či po ukončení procesu tisku. Další částí je odhalení míst s maximální teplotou, která je zachycena v každé vrstvě. Třetí částí je zobrazení přehřátí.

Teplota

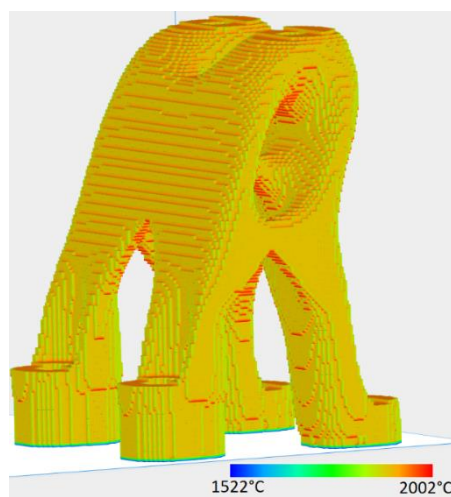
Teplota je jedním ze základních výstupů z termální simulace. Na obrázku je vidět celková teplota výtisku. Po ukončení tisku fungují podpory jako pasivní chladiče, dále teplo přestupuje do kovového prášku, ale efektivita přestupu je nižší než do podpor. Na obrázku je vidět, že spodní části dílu neindikují významnou akumulaci teploty, ale navrchu je teplota vyšší. To je způsobeno časovým faktorem, spodní části dílu již stihly vychladnout. Také je potřeba brát v potaz, že objem materiálu je v horní části dílu vyšší než ve spodní. Tudíž i akumulovaná teplota bude taky vyšší.



Obr. 48 - Simulace procesu tisku - teplota

Maximální teplota

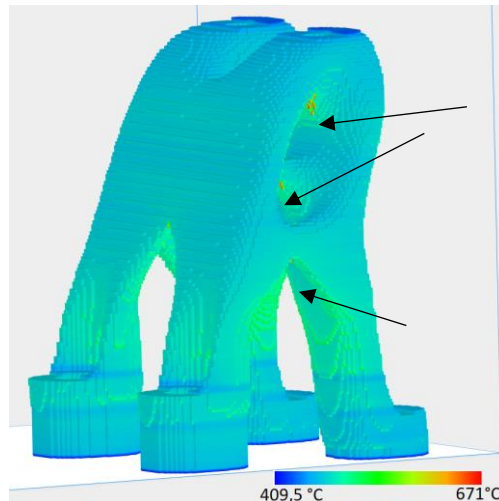
Maximální teplota neboli Peak temperature, nám zobrazuje dosaženou maximální teplotu v každé vrstvě.



Obr. 49 - Simulace procesu tisku – maximální dosahovaná teplota

Přehřátí

Jedním z nejdůležitějších výstupem z termální analýzy je zobrazení přehřátí neboli overheating. Tento typ výsledků nám pomůže odhalit přehřátá místa, kde se bude shromažďovat nejvíce tepla. Většinou se toto přehřátí vyskytuje bodově, o to více je to rizikové. Na obrázku jsou zobrazeny červenou barvou přehřátá místa. V těchto místech je zvýšené riziko vzniku deformace či jiné vady. Tento typ výsledků můžeme porovnat s výstupem z mechanické simulace recoater risk. Pokud tyto obrázky porovnáme, zjistíme, že přehřátá místa se vyskytují cca na podobných místech, jako místa možného rizika naražení recoatru. Tato místa vyplývají z toho, že mají o dost vyšší teplotu než okolní prostředí, tudíž zde vznikají větší napětí a tím i zvětšená velikost deformace. Tomuto přehřátí můžeme předcházet podporováním. Podpory odvedou přebytečné teplo mimo výslednou součást a tím sníží množství napětí v součásti. Ke zlepšení orientace v obrázku jsou šipkami vyznačeny kritická místa přehřátí.



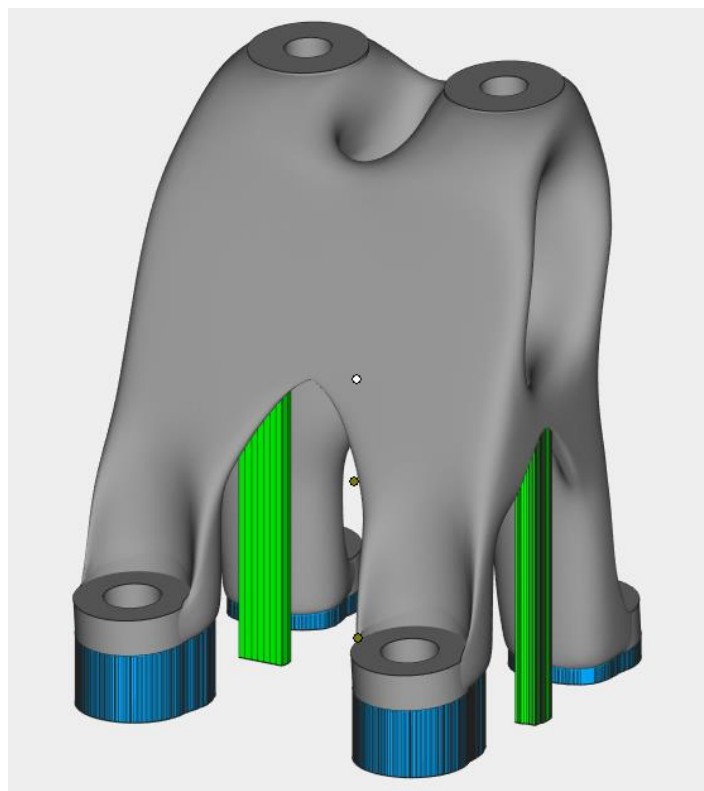
Obr. 50 - Simulace procesu tisku - Přehřátí

3.2.19 Závěr simulace

Průběh simulace se obešel bez větších překážek, přesto však simulace odhalila několik možných problémů, které jsou blíže popsány v textu výše. Mezi hlavní odhalené problémy patří například recoater risk nebo predikce deformací. Nevyřešení těchto problémů může způsobit chyby v tisku a v krajních případech neúspěšné vytištění. Tyto problémy lze odstranit přidáním podpor do kritických míst. Podpory nám slouží jako pasivní chladič, který zlepšuje výměnu tepla s okolím, a stabilizuje součást, aby nevznikala taková deformace. Simulace je ideální nástroj pro odhalení možných chyb. Simulace je hodně náročná na výpočetní výkon, proto je nutné zvolit správnou velikost voxelu. Pokud je zvolena příliš malá velikost, simulace bude trvat velmi dlouho, popřípadě simulační software vůbec nedojde k řešení. Na druhou stranu, pokud je zvolen příliš velký voxel, simulace neodhalí všechny možné problémy. Voxel je nutné volit v závislosti na velikosti součásti, popřípadě na složitosti simulovaného dílu.

3.2.20 Návrh možného řešení odhalení chyb za pomoci simulace

Simulace nám ukázala určité predikce, kde bude nutné přidat podpory. Tyto přidané podpory jsou na obrázku označeny zelenou barvou pro lepší orientaci, aby výroba součásti proběhla v pořádku. Pokud do míst, kde recoater risk predikuje srážku s tištěním dílem, přidáme podpory, mohlo by se toto riziko snížit. Dalším možným řešením tohoto problému je změna typu recoateru na měkký recoater. Tento recoater je vyroben z hodně hustých kartáčů, které jsou při kontaktu s tištěním dílem schopné uhnout a tím nedeformovat součást, ale tento typ recoateru má několik nevýhod, které nám znemožňují využívat pouze tento typ. Hlavní nevýhodou je vysoká spotřeba těchto recoateru, nebo nevhodnost pro všechny druhy materiálů. Je však možné použít tento typ recoateru pouze na překlenutí těchto kritických míst a poté pokračovat se standartním tvrdým typem. Výměna recoateru je možná bez přerušení procesu tisku. Přidáním podpor se nesníží jen možné riziko kontaktu recoateru s dílem, ale také ostatní predikované problémy.



Obr. 51 - Upravené podpory

4 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na simulační techniky v procesu tisku z kovových materiálů. Zejména na topologickou optimalizaci a simulaci procesu tisku.

Teoretická část bakalářské práce byla zaměřena na funkční podstatu topologické optimalizace a simulace tisku. Pozornost byla věnována jednotlivým metodám topologické optimalizace, které se vyskytují napříč oblastmi topologických optimalizačních softwarů. Dále je zde upozorněno na možný výskyt určitých problémů při aplikaci těchto přístupů na určitou součást.

V neposlední řadě byla teoretická část zaměřena na oblast simulačních softwarů, které nám mapují průběh kovového tisku po jednotlivých vrstvách. Vzhledem k nutnosti dodržení rozsahu práce byla uvažována základní znalost v oblastech tisku z kovových materiálů.

V praktické části bakalářské práce byly navrženy dvě součásti. První součástí byl vyřezací mechanismus nástroje. Tato součást byla topologicky optimalizována z hlediska co nejnižší hmotnosti při zachování tuhosti součásti. Po provedení rozboru návrhu bylo rozhodnuto, že tato součást nebude vyrobena za pomoci aditivní technologie. Důvodem tohoto rozhodnutí byla neekonomičnost výroby.

Druhá část praktické části byla zaměřena na kompletní návrh konzoly. Tento návrh se skládal z topologické optimalizace a následného upravení dílů pro výrobu za pomoci 3D kovového tisku. Na tuto součást již byla použita simulace procesu tisku. Tato simulace nám odhalila výskyt několika problémů, které by mohly vést k neúspěšnému procesu tisku. V závěru praktické části proběhlo porovnání dílů a možného řešení odstranění chyb, které nám zobrazila simulace procesu tisku.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Stepanek3D: Co je Topologická optimalizace?. Plasticportal.eu [online]. Nitra: ICOSA s.r.o, 2020 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/stepanek3d-co-je-topologicka-optimalizace.html/c/6878/>
- [2] Topologická optimalizace a generativní design. ONE3D [online]. Mohelnice: One3D, 2021 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/topologicka-optimalizace/>
- [3] ROSINHA, Inês P., Krist V. GERNAEY, John M. WOODLEY a Ulrich KRÜHNE. Topology optimization for biocatalytic microreactor configurations. In: 12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 1463-1468 [cit. 2022-05-10]. Computer Aided Chemical Engineering. ISBN 9780444634290. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63577-8.50089-9
- [4] SIVA RAMA KRISHNA, L., Natrajan MAHESH a N.SATEESH. Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing. Materials Today: Proceedings [online]. 2017, 4(2), 1414-1422 [cit. 2022-05-10]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2017.01.163
- [5] Metoda SIMP pro optimalizaci topologie. <https://help.solidworks.com/> [online]. Dassault Systemes, 2019, s. 1-8 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm
- [6] 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. 2022-05-10]. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-010-0487-9
- [7] ABBEY, Tony. Topology Optimization Methods. Digital engineering 24/7 [online]. 2017, 2017, 1-7 [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/topology-optimization-methods/>
- [8] QUERIN, Osvaldo M., Mariano VICTORIA, Cristina ALONSO, Rubén ANSOLA a Pascual MARTÍ. . 2017. Topology Design Methods for Structural Optimization. 2017. Elsevier, 2017, 2017, s. 1-13. ISBN 9780081009161. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100916-1.00001-5
- [9] YILUN Li. Numerical methodologies for topology optimization of electromagnetic devices. Electronics. Sorbonne Université; Zhejiang University (Hangzhou, Chine), 2019. English. ffnnt : 2019SORUS228ff. fftel-03030125f
- [10] Shape and Topology Optimization by the Level Set Method [online]. In: . March 9, s. 1-5 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228755711_Shape_and_topology_optimization_by_the_level_set_method
- [11] DELISSEN, Arnoud, Fred VAN KEULEN a Matthijs LANGELAAR. Efficient limitation of resonant peaks by topology optimization including modal truncation augmentation. Structural and Multidisciplinary Optimization [online]. 2020, 61(6), 2557-2575 [cit. 2022-03-10]. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-019-02471-9
- [12] Nastavení Generátoru tvarů. <https://help.autodesk.com> [online]. Autodesk, 2021, s. 1-2 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2021/CSY/?guid=GUID-7FCAA340-EB41-4826-8A78-B3050583E473>

- [13] Altairuniversity.com. Altairuniversity.com [online]. Irvine: Altair Engineering, 2015 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://altairuniversity.com/14345-topology-optimization-practical-aspects-for-industrial-applications-2/>
- [14] D'EMILIA, Giulio, Antoniomaria DI ILIO, Antonella GASPARI, Emanuela NATALE, Roberta PERILLI a Antonios G. STAMOPOULOS. The role of measurement and simulation in additive manufacturing within the frame of Industry 4.0. In: Topology Optimization - Practical Aspects for Industrial Applications [online]. Irvine: IEEE, 2019, 2019, s. 382-387 [cit. 2022-03-22]. ISBN 978-1-7281-0429-4. Dostupné z: doi:10.1109/METRO14.2019.8792876
- [15] MAYER, Thomas, Gabriel BRÄNDLE, Andreas SCHÖNENBERGER a Robert EBERLEIN. Simulation and validation of residual deformations in additive manufacturing of metal parts. Heliyon [online]. 2020, 6(5), 1-10 [cit. 2022-05-10]. ISSN 24058440. Dostupné z: doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03987
- [16] HERMANOVÁ, Šárka, Petr ČÍŽEK, Gabriela ROŽNOVSKÁ a Jana KOSŇOVSKÁ. Effect of additive production on aisi 316l material properties. In: EFFECT OF ADDITIVE PRODUCTION ON AISI 316L MATERIAL PROPERTIES [online]. Ostrava: MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH, 2020, 2020, s. 434-439 [cit. 2022-05-10]. ISBN 978-80-87294-97-0. ISSN 2694-9296. Dostupné z: doi:10.37904/metal.2020.3499
- [17] MATERIALISE MAGICS, magics simulation manual. Dostupné z: Výzkumný ústav RTI
- [18] Topology flow diagram. In: SpringerLink [online]. pringer Nature Switzerland, 2020 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-019-09331-1/figures/14>
- [19] SIMP. In: Solidworks [online]. Dassault Systemes, 2019 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/sja1524081024797.image>
- [20] Diagram SIMP. In: Solidworks [online]. Dassault Systemes, 2019 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/xqu1524088654956.image>
- [21] Resonant peaks of the frequency. In: SpringerLink [online]. pringer Nature Switzerland, 2020 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-019-02471-9/figures/1>
- [22] Process simulation. In: Alphastarcorp [online]. Alphastarcorp, 2021 [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: <https://www.alphastarcorp.com/wp-content/uploads/2021/11/Genoa3DP-flow-Metal.png>
- [23] Schematic-of-laser-scanning-patterns. In: Researchgate [online]. 2018, 2018 [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Dan-Wang-171/publication/325091250/figure/fig1/AS:819797243748353@1572466302300/Schematic-of-laser-scanning-patterns-in-SLS-The-example-shows-the-most-common-island.png>
- [24] FERGANI, Omar. Thermal simulation [online]. In: . 2004 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Omar-Fergani/publication/308972057/figure/fig3/AS:562432968216582@1511105877473/Temperature-C-distribution-in-2D-during-the-laser-melting-of-the-power-the-heating_W640.jpg
- [25] Calibration and validation. In: Sciencedirect.com [online]. Heliyon, 2020 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402030832X#fig1>