

Konstrukce dílů s ohledem na aditivní výrobu a ověření jejich funkčnosti

Diplomová práce

Studijní program: Studijní obor:

Autor práce: Vedoucí práce:

Konzultant práce:

N2301 Strojní inženýrství Výrobní systémy a procesy

Bc. Filip Véle Ing. Jiří Šafka, Ph.D. Katedra výrobních systémů a automatizace

Ing. Michal Ackermann, Ph.D. Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace





Zadání diplomové práce

Konstrukce dílů s ohledem na aditivní výrobu a ověření jejich funkčnosti

Jméno a příjmení:	Bc. Filip Véle
Osobní číslo:	S18000237
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní systémy a procesy
Zadávající katedra:	Katedra výrobních systémů a automatizace
Akademický rok:	2019/2020

Zásady pro vypracování:

- 1. Seznámení se s aktuálními postupy a zákonitostmi návrhu součástí v aditivní výrobě.
- 2. Vytipování referenčního dílu a vhodné aditivní technologie.
- 3. Provedení návrhu dílu, jeho výroba a otestování.
- 4. Vyhodnocení výsledků a závěr.

Rozsah grafických prací: Rozsah pracovní zprávy: Forma zpracování práce: Jazyk práce: dle potřeby 60 stran textu včetně příloh tištěná/elektronická Čeština



Seznam odborné literatury:

[1] LI, W. a S. LI. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. Materials Science and Engineering [online]. 2016, 26., (663), 116-125 [cit. 2019-09-06]. ISSN ISSN 0921-5093. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509316303033?via%3Dihub Materials Science and Engineering

[2] YADROITSEV, I. Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Lambert Academic Publishing, 2009. ISBN-13: 978-3838317946
[3] SEABRA, M. et al. Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes. Procedia Structural Integrity, 2016, 1: 289-296

Vedoucí práce:	Ing. Jiří Šafka, Ph.D. Katedra výrobních systémů a automatizace			
Konzultant práce:	Ing. Michal Ackermann, Ph.D. Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace			
Datum zadání práce:	20. listopadu 2019			

L.S.

Předpokládaný termín odevzdání: 20. května 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld děkan Ing. Petr Zelený, Ph.D. vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

9. června 2020

Bc. Filip Véle

Konstrukce dílů s ohledem na aditivní výrobu a ověření jejich funkčnosti

Abstrakt

Cílem této diplomové práce byla konstrukce dílu s ohledem na aditivní výrobu a ověření jeho funkčnosti. V rámci vybraného tématu byla provedena topologická optimalizace představce horského kola v software Siemens NX 12. Výsledný design byl použit pro simulaci procesu stavby technologie Selective Laser Melting v software Ansys Additive Suite. Následovala fáze tisku představce z materiálu AlSi10Mg s využitím technologie SLM a testování funkčnosti představce dle normy ČSN EN ISO 4210-5:2014. Hlavním výstupem bylo ověření funkčnosti aditivně vyráběného představce horského kola s využitím technologie SLM. Další cenné informace vychází z provedené simulace SLM procesu. Doba výpočtu výrazně narůstá se složitostí geometrie a nižší velikostí prvku sítě. Výsledky pak mohou sloužit jako důležitý návod k případným úpravám podpůrných struktur před započetím stavby.

Klíčová slova: Selective laser melting, SLM, Topologická optimalizace, Představec, Simulace SLM procesu

Design of new parts with regard to additive manufacturing and evaluation of their functionality

Abstract

The aim of this diploma thesis was design of new part with regard to additive manufacturing and evaluation of its functionality. In this thesis, topology optimization of bicycle stem was done with the use of Siemens NX 12 software. The final design was used for SLM process simulation in Ansys Additive Suite software. Then the bicycle stems were manufactured on SLM 280HL machine from AlSi10Mg alloy. Printed stems were tested under ČSN EN ISO 4210-5:2014 standard. The main finding was verification of using topology optimization and SLM technology for additively manufactured bicycle stem. Important information is also provided by SLM process simulation. Time consumption of the simulation grows significantly with shape complexity of a part and lower element size. The outcomes can be a good guide for modification of individual support structures before the part is fabricated.

Keywords: Selective laser melting, SLM, Topology optimization, Bicycle stem, Simulation of SLM process

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D. a také Ing. Michalu Ackermannovi, Ph.D. za odborné konzultace, předávání zkušenosti a vstřícný přístup během psaní této práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Jakubu Macháčkovi, za výpomoc při skenování dílů. Dále bych chtěl poděkovat všem ostatním, kteří se nepřímo podíleli na této práci a také děkuji kolegům z laboratoře a své rodině za podporu během studia.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2019-5012.

Obsah

	Sezr Sezr	nam zkratek	10 11							
1	Úvo 1.1	od Motivace a cíle práce	12 12							
2	Adi	tivní technologie	14							
	2.1	Práškové technologie	14							
		2.1.1 Tisk pomocí vysokoenergetického paprsku	15							
		2.1.2 Tisk s využitím kapalného pojiva	15							
	2.2	Technologie využívající materiál ve formě struny	16							
	2.3	Technologie využívající tekuté fotopolymery	17							
3	Kor	nstrukce dílu pro aditivní technologie	19							
	3.1	Geometrická pravidla konstrukce pro aditivní design	19							
	3.2	Pravidla pro redukci objemu dílu	20							
	3.3	Topologická optimalizace	20							
		3.3.1 Metoda SIMP	21							
		3.3.2 Metoda ESO	21							
4	Tec	hnologie SLM	23							
	4.1	Oblasti použití technologie SLM	24							
	4.2	Strategie výplně vrstvy								
	4.3	Procesní parametry technologie SLM	26							
		4.3.1 Výkon laseru	26							
		4.3.2 Vzdálenost mezi drahami laseru	27							
		4.3.3 Skenovací rychlost	27							
		4.3.4 Tloušťka vrstvy	27							
	4.4	Rozměrová přesnost technologie SLM	27							
		4.4.1 Skenovací strategie a jejich vliv na rozměrovou přesnost	28							
		4.4.2 Vliv hraničních kontur na rozměrovou přesnost	30							
		4.4.3 Vliv podpůrných struktur na rozměrovou přesnost	30							
5	Zpr	acování materiálu AlSi10Mg procesem SLM	32							
	5.1	Výzkumné směry materiálu AlSi10Mg	33							
	5.2	Tepelné zpracování materiálu AlSi10Mg	34							
		5.2.1 Tepelné zpracování na uvolnění vnitřního pnutí	34							

Pì	filohy	7	87			
Po	Použitá literatura 85					
8	Závě	ěr	78			
	7.3 7.4	7.2.3Únavové zkoušky na vytištěných představcíchPorovnání aditivních představců s běžným představcemCenová rozvaha7.4.1Finanční náročnost výroby	73 76 76 76			
	7.2	7.1.2 Analyza predstavce po zbaveni podpurných struktur Výsledky zatěžovacích zkoušek	09 70 71 72			
7	Výs 7.1	ledky Rozměrová analýza představců	6 7 67 67			
	6.10 6.11	Vyroba predstavcu	62 65 65			
	6.8 6.9 6.10	6.7.3 MKP analyza pro unavove zkousky	57 57 58 62			
	6.7	6.6.2 Vysledký topologické optimalizace MKP analýza navrženého designu	50 51 53 54			
	6.6	 6.5.3 Únavové zkoušky	47 48 48			
	6.4 6.5	Mechanické vlastnosti materiálu AlSi10Mg	42 42 46 46 46			
6	Pral 6.1 6.2 6.3	ktická část Plán práce	37 37 38 41			
		 5.2.2 Tepelné zpracování HIP	35 36			

Seznam zkratek

$3\mathrm{D}$	Trojrozměrný
BESO	Biderectional Structural Optimisation
CAD	Computer aided design
ČSN	Česká technická norma
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
\mathbf{EBM}	Electron Beam Melting
\mathbf{EN}	Evropské normy
ESO	Evolutionary Structural Optimisation
\mathbf{FFF}	Fused Filament Fabrication
\mathbf{FS}	Fakulta strojní
HDD	Hard Drive Disc
HIP	Hot Isostatic Pressing
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
\mathbf{LCD}	Liquid crystal display
\mathbf{MJF}	Multi Jet Fusion
$\mathbf{M}\mathbf{K}\mathbf{P}$	Metoda Konečných Prvků
PA11	Polyamid 11
PA12	Polyamid 12
\mathbf{PC}	Polycarbonát
\mathbf{PP}	Polypropylen
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
\mathbf{SLA}	Stereolitografie
\mathbf{SLM}	Selective Laser Melting
\mathbf{SLS}	Selective Laser Sintering
\mathbf{SR}	Stress Relief - uvolnění vnitřního pnutí
\mathbf{SSD}	Solid State Disc
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
\mathbf{STL}	Standard Triangle Language
то	Topologická optimalizace
\mathbf{TUL}	Technická univerzita v Liberci
TZ	Tepelné Zpracování
ULTEM	Obchodní označení firmy Sabic, PEI - Polyetherimid
\mathbf{UV}	Ultrafialové světlo

Seznam symbolů

ν	Poissonova konstanta	[-]
ε_b	Poměrné prodloužení při přetržení	[%]
$\varnothing d$	Průměr vzorku	[mm]
E	Objemová hustota energie	$[J/mm^3]$
E	Youngův modul pružnosti	[mm]
F	Síla	[N]
h	Vzdálenost mezi drahami laseru	[mm]
p	Penalizační koeficient	[-]
P	Výkon laseru	[W]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
Ra	Střední hodnota profilu povrchu	[µm]
Rz	Výška nerovnosti povrchu	[µm]
t	Tloušťka vrstvy	[mm]
v	Skenovací rychlost	[mm/s]

1 Úvod

Aditivní technologie jsou progresivně se rozvíjející výrobní postupy, které stále častěji nalézají své uplatnění v průmyslové výrobě. Díky vývoji nových typů technologií a materiálů se použití aditivní výroby přesouvá od prototypů k plně funkčním komponentům se speciálními vlastnostmi. Hlavní výhoda aditivních technologií oproti konvenčnímu obrábění je téměř neomezená volnost v designu nových dílů. V dnešní době se bohužel převážná část konstrukce řeší s využitím standardních modelovacích nástrojů. To vede ke vzniku tvarů, které jsou vhodné pro konvenční postupy výroby jako jsou frézování, soustružení atd. Pro 3D tisk jsou často tyto postupy nevhodné, protože takové díly obsahují přebytečné množství materiálu a různé technologicky nevhodné plochy. Pro maximální využití možností aditivní výroby existují různá pravidla pro úpravu dílu. Tato pravidla jsou obsažena v pojmu aditivní design.

Velkým krokem vpřed bylo použití metod topologické optimalizace pro aditivní výrobu, protože umožňuje konstruktéry nasměrovat k tvorbě designu vhodného pro aditivní technologie. Při aplikování topologických optimalizací je třeba znát přesné mechanické vlastnosti použitých materiálů, vnější zatížení součásti a určité technologické limity vzniklé použitou technologií a strojem, na kterém je prováděna výroba. V současné době se topologická optimalizace začíná implementovat do konstruktérských nástrojů. Tím může být docíleno rozšíření této metody návrhu komponentů mezi širší skupinu konstruktérů. Nyní jsou na trhu k dispozici takové nástroje na topologickou optimalizaci, které dokáží vytvořit design vhodný pro přímou výrobu. Tato funkcionalita velmi šetří čas, který je nutný pro konstrukci nového komponentu.

1.1 Motivace a cíle práce

Motivací k volbě tématu bylo prohloubení znalostí o využití topologické optimalizace při návrhu dílu. Cílem práce není pouhé zmapování použití topologické optimalizace, ale i zhodnocení časové náročnosti celého procesu a výroba funkčních prototypů včetně jejich reálných testů. Dále také zjištění, zda aditivně jsou vyráběné díly konkurenceschopné.

Jako referenční díl byl zvolen představec horského kola. Tato komponenta je zajímavá z hlediska statického a dynamického zatížení, která v komponentě vznikají při samotné jízdě. V normě ČSN EN ISO 4210-5:2014 jsou navíc jasně vymezeny postupy testování této komponenty, včetně zatěžovacích sil a je tak možné provést optimalizaci tvaru představce s ohledem na definované zatížení. Pokud se zaměříme

na konstrukci představce, jedná se o velmi lehký komponent s tenkou tloušťkou stěn. Z tohoto důvodu bylo zajímavé zjistit, zda je možné upravit tvar tak, aby měl díl nižší hmotnost a lepší mechanickou odolnost než konvenčně vyrobený díl.

S ohledem na volbu referenčního dílu byla jako výrobní metoda zvolena aditivní technologie Selective Laser Melting (SLM) v kombinaci s hliníkovou slitinou AlSi10Mg.

2 Aditivní technologie

Základní myšlenkou aditivních technologií je přidávání jednotlivých vrstev stavebního materiálu na sebe, a tím vytváření požadovaného dílu. Tímto postupem se zásadně odlišují od subtraktivních technologií, u kterých se materiál odebírá z bloku materiálu.

Aditivními technologiemi lze zpracovat široké spektrum materiálů. Například různé druhy termoplastů, kovů a jejich slitin a dále pak beton, sklo, keramiku, fotopolymery a další. Aditivní technologie jsou velmi dobrým nástrojem pro výrobu prototypů. Konstruktér si tedy může vytisknout větší množství návrhů a ty patřičně otestovat. Aditivní technologie se dají využít i při výrobě funkčních dílů, které jsou geometricky složité a jejich výroba je konvenčními způsoby nemožná, případně finančně nákladná. Výroba dílů, které jsou konvenčně obrobitelné není efektivní, protože cena za obrábění bude v tomto případě vždy nižší než při použití aditivní technologie.

Aditivní technologie je možné rozřadit do skupin dle použité technologie, použitého materiálu, případně principu spojování jednotlivých vrstev. Rozdělení dle formy použitého materiálu vstupujícího do procesu:

- Práškové materiály
- Ve formě struny
- Ve formě kapaliny

2.1 Práškové technologie

V anglické literatuře nazývané "Powder Based". Tyto technologie jsou založeny na přesném nanášení vrstvy prášku po celé stavební ploše. To znamená, že díl je při tisku kompletně obklopen nezpracovaným práškem. V tomto ohledu jsou všechny technologie spadající pod tuto skupinu stejné. Liší se pouze v použitém materiálu a mechanismu spojování vrstev prášku ve výsledný díl.

Práškové technologie využívají několik druhů materiálů, mezi které patří polymer, kov či písek. Prášek, použitý při výrobě, musí mít definovanou frakci odpovídající vrstvě. Spojování jednotlivých vrstev je realizováno převážně dvěma metodami, které jsou popsány dále.

2.1.1 Tisk pomocí vysokoenergetického paprsku

Tato metoda využívá laser případně elektronový paprsek, který taví, případně spéká, danou vrstvu. Rozdíl mezi tavením a spékáním je v množství energie, které je práškem absorbováno. Při tisku s využitím polymerního prášku je využito spékání, avšak pro kovové materiály je využíváno obou přístupů.

Představitelem spékacích technologií je Selective Laser Sintering (SLS) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Tyto technologie se vyznačují pouze natavením hranic zrn a jejich spojení. Tento princip je zobrazen na obrázku 2.1a). Z tohoto důvodu není potřeba pro spékání tak velký výkon laseru.

Představitelem pro tavení materiálu jsou technologie Selective Laser Melting (SLM) a Electron Beam Melting (EBM). Tyto technologie jsou používány pro kovové materiály. Pro tavení kovového prášku je důležitá dostatečná energie pro překonání teploty taveniny. Při pohybu laseru nebo elektronového paprsku vzniká útvar, který lze přirovnat ke svarové housence. Tento princip je zobrazen na obrázku 2.1b).



Obrázek 2.1: Princip spojování zrn technologie SLS a SLM [1].

2.1.2 Tisk s využitím kapalného pojiva

První metoda je "Binder Jet", při které dochází k nanesení kapalného pojiva do polymerního prášku. Výsledný díl je soudržný díky vytvoření vazby mezi polymerem či kovem a kapalným pojivem. Tato technologie je vhodná pouze pro vytváření prototypů, protože po určitém čase, daném použitým pojivem dochází k uvolnění vazeb a drolení dílu. Tuto technologii dnes ve větším měřítku využívá firma ExOne pro tisk pískových forem, keramiky nebo kovových dílů.

Druhá metoda používá kapalnou pryskyřici a tepelné zářiče pro spojení zrn prášku. Hlavním představitelem této technologie je Multi Jet Fusion (MJF), která je použitelná pro práškové polymery, jako například Polyamid 12 (PA12), Polyamid 11 (PA11) a Polypropylen (PP). V technologii je využito tepelné absorpce pojiva, které přenese tepelnou energii z infra zářičů pouze na místo, kde bylo naneseno. Spojování zrn u této technologie je znázorněno na obrázku 2.2. Velkou výhodou této technologie oproti SLS je vyšší produktivita, která není ovlivněna množstvím dílů, které jsou v jedné vrstvě stavěny. Důvodem je stále konstantní rychlost nanášení kapaliny oproti skenování (vypalování) plochy pomocí laseru. Při skenování laserem je pohyb realizován po úsečkách, jejichž délka se může v průběhu tisku měnit a to způsobuje rozdílnou dobu stavby jednotlivých vrstev.



Obrázek 2.2: Princip spojování zrn technologie MJF [2].

2.2 Technologie využívající materiál ve formě struny

V literatuře označované jako Fused Filament Fabrication (FFF). Tato technologie je využívána především pro různé druhy polymerů ve formě struny. Principem technologie je nanášení nataveného polymerního materiálu, vytlačeného z extrudérové trysky na stavební podložku. Ta může být předehřáta na určitou teplotu, přičemž předehřev je u většiny polymerů velmi důležitý z důvodu přilnavosti první vrstvy. Provázanost vrstev je docílena díky přilnavosti nataveného polymeru na vrstvu, která již byla nanesena. Princip technologie je zobrazen na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Princip spojování vrstev technologie FFF [3].

Tato technologie je velmi často využívána při ověření návrhu designu, protože je velmi rychlá, levná a samotné tiskárny jsou velmi levné a snadné na použití a údržbu.

Existují i tiskárny, které dokážou zpracovat materiály s vyšší mezí pevnosti a jsou vhodné pro tisk zatěžovaných součástí. Příkladem mohou být materiály Polykarbonát (PC) a nebo Polyetherimid (PEI - Ultem). V nedávné době byly na trh uvedeny tiskárny FFF, které jsou schopny využívat kombinaci polymeru a karbonových vláken, např. firma MarkForged. Velkou pozornost mají i tiskárny, které dokáží zpracovat kovový prášek smíchaný s polymerem. Jedná se např. o společnosti Desktop Metal či MarkForged, které nabízejí kompletní tiskové řešení. Při správném sintračním procesu vzniká kovový model s určitou mírou smrštění. Velikost modelu před sintrováním musí být zvětšena v intervalu 10 až 20% oproti původním CAD datům, aby bylo docíleno správné geometrie po sintrování [4].

2.3 Technologie využívající tekuté fotopolymery

Hlavním zástupcem těchto technologií je SLA (Stereolitografie). Tato technologie je jednou z nejstarších používaných aditivních technologií. Zároveň se jedná o průkopnickou technologii, díky které se aditivní technologie začaly rozšiřovat. Technologie SLA je založena na principu působení laserového paprsku uvnitř nádoby s fotopolymerem. Vlivem tohoto působení laseru dochází k vytvrzování polymeru v místech, definovaných CAD daty. Tento princip je znázorněn na obrázku 2.4. Modifikací technologie SLA je technologie DLP. U této technologie je využit LCD projektor místo laseru, který osvítí kompletní vrstvu, a též dochází k vytvrzování polymeru. Tento proces je znázorněn na obrázku 2.5. Hlavním benefitem tohoto postupu je rychlost procesu [5].



Obrázek 2.4: Princip spojování vrstev technologie SLA [6].



Obrázek 2.5: Princip spojování vrstev technologie DLP [7].

Další velmi často využívanou technologií je PolyJet. U této technologie je stavba realizována pomocí tiskových hlav, které nastřikují kapičky polymeru do stavěné vrstvy a vytvrzování probíhá pomocí UV lamp. Tento proces je znázorněn na obrázku 2.6. Výhodou této technologie je tisk s podpůrnými strukturami, které jsou z materiálu rozpustitelného ve vodě. Tato technologie umožňuje tisk plně barevného modelu a také vytváření dvoukomponentních dílů při jedné operaci.

Technologie zpracovávající fotopolymerní materiály jsou využívány zejména pro výrobu různých forem na odlévání silikonů, výroby průhledných a průsvitných dílů a designových návrhů.



Obrázek 2.6: Princip technologie PolyJet.

Pro technologie SLA a DLP je možné namíchat libovolný materiál simulující například pryže a nebo velmi tvrdý plast, protože jediným omezujícím faktorem těchto technologií je vlnová délka světla, která způsobí polymerizaci materiálu [5].

3 Konstrukce dílu pro aditivní technologie

Návrh dílu pro aditivní technologie má odlišná pravidla konstrukce oproti navrhování dílu pro konvenční technologie. Prvně by se měl konstruktér seznámit s aditivní technologií, která bude využita pro výrobu dílu. Tato fáze je velmi důležitá pro využití maximálního potenciálu, který daná technologie nabízí. Zároveň je vhodné při návrhu dílu myslet na skutečnost, že při stavbě je materiál přidáván. Z tohoto důvodu je vhodné si klást otázku, zda navržený design obsahuje opravdu jen nezbytné množství materiálu pro přenesení zatížení. Aditivní technologie mají velký potenciál pro tvorbu vnitřního odlehčení, struktur a obecných ploch, které jsou konvenčně nevyrobitelné. Je tedy vhodné této skutečnosti využívat v co největší míře.

3.1 Geometrická pravidla konstrukce pro aditivní design

Pro aditivní design jsou ustavena základní geometrická pravidla, které je doporučeno používat. Míra vlivu těchto pravidel na vyráběný díl je různá s ohledem na použitou aditivní technologii.

Prvním takovým pravidlem je volba tloušťky stěny. Nejmenší tloušťka stěny je závislá na použité technologii. Je nutné volit tloušťku stěny tak, aby jí bylo možné vyrobit s využitím dané technologie. Obecně platí, že s rostoucí tloušťkou stěny roste doba stavby a s tím i finanční náklady na výrobu. S prvním pravidlem souvisí i další doporučení o vhodné výšce dílu. Volbu výšky dílu je vhodné volit dělitelnou beze zbytku výškou vrstvy. Toto doporučení je vhodné aplikovat, pokud se jedná o tisk finálního dílu, který má obsahovat přesné rozměry a nebude provedeno další dokončování ploch [8].

Druhým pravidlem je tvorba zaoblení místo ostrých rohů a koutů. Pokud je toto pravidlo implementováno do designu, výrazně se snižuje napětí, které v těchto koncentrátorech napětí vzniká během stavebního procesu. Toto pravidlo platí převážně pro aditivní technologie využívající laser jako zdroj energie [9].

V případě, že je nutné vytvářet v designu převislé plochy, je vhodné je volit pod úhlem minimálně 45° a větším. Pokud jsou převislé plochy s kratší délkou, je možné je vyrábět bez použití podpůrných struktur, protože jsou samonosné [10].

Jestliže design dílu obsahuje otvory, je nutné vědět jak bude daný díl orientován při samotné stavbě. Na obrázku 3.1 jsou zobrazeny dva případy orientace válcové díry vůči stavební platformě. V prvním případě leží osa otvoru na rovině kolmé na stavební rovinou. V tomto případě nedochází k deformaci. Ve druhém případě je osa otvoru umístěna v rovině rovnoběžné se stavební platformou a zde už dochází k deformaci tvaru kružnice. Tento jev lze částečně redukovat vytvořením podpůrných struktur, které zabrání větší deformaci otvoru během stavby [9].



Obrázek 3.1: Model s válcovými otvory.

Důležitý pravidlem je vůle pro následnou montáž více tištěných dílů v jeden celek. Velikost vůle je závislá na použité technologii, stroji a orientaci dílu vůči stavební platformě.

3.2 Pravidla pro redukci objemu dílu

Snížení objemu může být docíleno vytvořením dutiny uvnitř dílu. Zde však platí několik pravidel, které je nutné dodržet, aby byla výroba dílu úspěšná a finančně méně nákladná. Vytvořená dutina může být buď prázdná nebo vyplněná vnitřní strukturou, která zvýší tuhost celého dílu. Tvorba dutiny je závislá na použité technologii. Například při použití technologie FFF je možné dutinu uzavřít ze všech stran. Pokud je průřez velký nemusí dojít ke správnému uzavření dutiny a nebo se vytvoří propadlina v dané ploše. Pokud je však dutina vyplněna vnitřní strukturou k tomuto selhání nemusí dojít, protože struktura tvoří styčné plochy pro přichycení vrchní vrstvy [11].

Je-li použita technologie využívající prášek jako stavební materiál, je nutné v designu vytvořit otvory, kterými se daný prášek vysype. Zde je nutné zohlednit, o jaký prášek se jedná. Některé prášky, jak kovové tak i plastové mají rozdílnou sypkost a může se stát, že v místě otvoru vytvoří shluk a poté není snadné takový prášek vysypat. Z tohoto důvodu je třeba vytvořit otvor odpovídající danému prášku.

3.3 Topologická optimalizace

Dalším přístupem jak vytvářet design vhodný pro aditivní technologie je s využitím topologické optimalizace (TO). Jedná se o metodu, která využívá matematických rovnic pro optimalizaci množství materiálu, který je nutný pro přenesení zatížení působícího na definovaný původní objem optimalizovaného dílu. Při této metodě je nutné stanovit okrajové podmínky a zatěžovací síly, které odpovídají reálnému dílů. Topologická optimalizace se využívá například ve stavebnictví při tvorbě konstrukcí. Dále pak v automobilovém a leteckém průmyslu pro snižování hmotnosti výsledných dílů.

Výsledky topologické optimalizace je nutné upravit tak, aby výsledný model odpovídal technologii, kterou bude vyráběn. Pro aditivní technologie neexistuje téměř žádné tvarové omezení, které by mohlo vzejít z TO. Využití TO v aditivní výrobě má velké množství benefitů. Jedním z těchto benefitů je tisk dílů s nižší hmotností materiálu potřebného pro přenesení sil, než při použití konvenčních metod výroby. Dalším benefitem je geometrie, která je generována softwary na TO. Tato geometrie ve většině případů nevyžaduje velké množství podpůrných struktur. Toto tvrzení platí pouze při správné orientaci dílu vůči stavební platformě. Tisk s minimem podpůrných struktur se projevuje ve velké úspoře času při samotné stavbě [12].

V topologické optimalizaci se používají dvě hlavní metody, konkrétně Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) a Evolutionary Structural Optimisation (ESO). Další používané metody vycházejí z těchto dvou. Úprava nových metod bývá často pouze v pozměnění kriteriální funkce optimalizace.

3.3.1 Metoda SIMP

Tato metoda dokáže předpovídat vhodné rozložení materiálu při daném zatížení a okrajových podmínkách definovaných pro topologicky optimalizovaný díl. Metoda SIMP využívá sítě konečných prvků a každému prvku může být přiřazena hodnota od 0 do 1. Přičemž 0 značí prvek, který neobsahuje materiál a 1 značí takový prvek, kde je materiál při daném zatížení nezbytný. Pokud je danému prvku přiřazena hodnota v intervalu (0;1) je použita penalizace takového prvku. Penalizováním takového prvku je docíleno změny hodnoty prvku a přiklonění se buď k 0 nebo k 1. Vliv penalizace je znázorněno na obrázku 3.2 [13]. Penalizování je prováděno po každém



Obrázek 3.2: Vliv penalizace u SIMP metody [14]. a) p=1, b) p=2, c) p=6, d) p=8.

iteračním cyklu. Hodnota penalizačního koeficientu p přímo ovlivňuje výsledky, časovou náročnost optimalizace a její citlivost. Bendsoe [15] ve své práci zjistil, že při hodnotě p = 3 dochází k nejlepším výsledkům optimalizace.

3.3.2 Metoda ESO

Tato metoda je založena na odebírání elementů, které jsou dle kriteriální funkce nepotřebné. Hodnocení těchto elementů může být pomocí tlakových a tahových napětí. Tato metoda odebírá v každé iteraci přesné množství elementů, které je zvoleno. Metoda ESO může být velmi agresivní při vytváření topologicky optimalizovaného designu. Proto je nevhodná pro optimalizace designu pro aditivní výrobu. Z důvodu agresivního přístupu byla tato metoda upravena na Bidirectional Structural Optimization (BESO), která dokáže v každé iteraci přidat elementy všude, kde jsou potřeba [16] a je tedy vhodná pro aditivní design. Na obrázku 3.3 jsou zobrazeny jednotlivé fáze topologické optimalizace designu, u kterých lze sledovat přidávání a odebírání elementů v průběhu optimalizace.



Obrázek 3.3: Metoda BESO, postup optimalizace a) až f.) [17]

4 Technologie SLM

Technologie SLM se řadí mezi práškové aditivní technologie. Tato technologie využívá laser jako zdroj energie k tavení kovového prášku. Schéma technologie je znázorněno na obrázku 4.1. Princip technologie je založen na nanesení tenké vrstvy kovového prášku v řádu desítek mikrometrů. Přesné nanesení vrstvy je realizováno tzv. recoaterem. Zařízení je z násypky materiálu naplněno požadovaným množstvím prášku, potřebného na pokrytí celého pracovního prostoru. Materiál je pomocí tenké gumové stěrky rovnoměrně roznesen po stavěné vrstvě a je vytvořena souvislá vrstva prášku. Poté dochází ke skenování (vypalování) laserovým paprskem požadované plochy, vycházející z CAD dat. Následuje technologická pauza v řádu jednotek vteřin na ochlazení povrchu a filtraci vnitřní atmosféry od spalin, vzniklých během skenování. Během této pauzy stavební platforma klesá o výšku zvolené vrstvy. Celý proces nanášení, skenování a sjíždění stavební platformy se opakuje až do chvíle, než je požadovaný díl hotov. V poslední fázi dochází k chladnutí stavební komory, prášku a samotného dílu na teplotu okolí.



Obrázek 4.1: Princip technologie SLM [18].

Technologie SLM přináší různé benefity oproti konvenčním technologiím. Mezi tyto benefity patří například téměř neomezená tvarová rozmanitost. V designu je možná integrace odlehčených struktur, což vede ke snižování hmotnosti dílu s přijatelnou změnou mechanických vlastností.

V současně době lze jako nevýhodu SLM procesu uvést výslednou drsnost povrchu při tisku. Při návrhu dílu je nutné brát v úvahu, které plochy budou obráběny. Je nutné zajistit, aby byly plochy přístupné pro obráběcí nástroje a nehrozila kolize při jejich obrábění se samotným dílem. Další nevýhoda je tvarová nepřesnost způsobená polohováním tištěného dílu na stavební platformě. Při nevhodné orientaci dílu dochází například ke zhoršení kruhovitosti děr a tvarovým změnám, způsobeným vlivem vnitřního pnutí v dílu. Další výraznou nevýhodou je nutnost použití robustních podpůrných struktur, protože okolní prášek neposkytuje stavěnému dílu dostatečnou oporu. Pokud tedy není díl přímo spojen se stavební platformou, je nutná pečlivá definice jednotlivých prvků podpůrných struktur. Důvodem je, aby se předešlo vystoupnutí části dílu z vrstvy prášku a případné kolizi recoateru se stavěným dílem.

4.1 Oblasti použití technologie SLM

SLM technologie nalézá své využití ve výrobě prototypů, ale díky svým vlastnostem se používá zejména pro výrobu plně funkčních dílů v automobilovém a leteckém průmyslu. Uplatnění nachází také v medicíně k výrobě individuálních implantátů ze slitin titanu a slitiny Co-Cr [19]. Velmi často je technologie SLM použita k výrobě vstřikovacích forem a obráběcích nástrojů s konformním chlazením.

Další použití se nabízí při opravách nástrojů, kdy se obrobí plocha poškozeného tvářecího nástroje nebo formy. Dále se upne na stavební platformu a pomocí laseru a kovového prášku dojde k navaření nové vrstvy, případně větší části dílu na stávající díl. Tento postup se dá aplikovat u velmi namáhaných částí tvářecích nástrojů, které jsou drahé na výrobu a tento způsob opravy je v daném případě finančně a kvalitativně vyhovující.

Samotná výroba pomocí technologie SLM je náročná na přípravu dat pro tisk, údržbu tiskárny a její provoz. Pokud je tedy možné obrobit díl konvenčně, je téměř jisté, že cena aditivního dílů bude řádově vyšší. Proto je důležité, aby konstruktéři co nejvíce využívali možný potenciál aditivních technologií. Na obrázku 4.2 je zobrazen příklad dílu, který využívá potenciálu aditivních technologií.

4.2 Strategie výplně vrstvy

Každá vrstva se skládá ze setu vektorů, po kterých je veden laserový bod. Typy a souslednost těchto vektorů určuje tzv. skenovací strategie. Použitá strategie přímo ovlivňuje kvalitu vnitřní částí dílu, jeho mechanické vlastnosti, drsnost povrchu a rozměrovou přesnost [21]. Skenovacích strategií existuje velké množství. Některé z nich jsou znázorněny v kapitole 4.4.1.



Obrázek 4.2: Aditivně vyrobený díl [20].

Typický případ strategie, používané pro SLM technologii, je znázorněna na obrázku 4.3. Tisk každé vrstvy je vždy zahájen první a druhou hraniční konturou, které uzavřou vnější část dílu. Následuje skenování vyplňovacích vektorů a tisk dané vrstvy je zakončen provazovací konturou, která vytvoří spojení mezi vyplňovacími vektory a hraničními konturami [22].



Obrázek 4.3: Kontury [22].

Mezi nejpoužívanější strategie se řadí šachovnice a šrafy. Šachovnicová strategie může snižovat pnutí, které vzniká v dílu během stavby. Výhodou je skenování malé oblasti, která po protavení chladne rychleji. Avšak při rozdělení plochy na čtvercové segmenty může docházet k nedostatečnému provázání hranic těchto segmentů a zvýšení porozity. Při použití šrafové strategie může docházet k pnutí v díle a deformacím, vzniklým postupným skenováním plochy [22].

4.3 Procesní parametry technologie SLM

Technologie SLM umožňuje editaci více než 150-ti procesních parametrů, které se týkají laseru, inertní atmosféry, teploty, stavební strategie atd. Každý z parametrů má specifický vliv na kvalitu výsledného vytištěného dílu [23]. Mezi základní parametry se řadí:

- výkon laseru P[W]
- skenovací rychlost $v \,[\text{mm/s}]$
- tloušťka vrstvy t [mm]
- vzdálenost mezi drahami laseru $h \ [\mathrm{mm}]$

Kombinace těchto čtyř parametrů se vyskytuje v rovnici 4.1 hustoty energie E [J/mm³] využívané pro porovnávání vstupních parametrů tisknutých dílů vůči sobě.

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \tag{4.1}$$

4.3.1 Výkon laseru

Vhodně zvolený výkonu laseru zabezpečuje vytvoření tavné lázně a tím protavení dostatečného množství prášku. Tento parametr je stěžejní pro kvalitní výtisk, protože absorbování energie z laseru je u kovových prášků vyšší než je tomu u plného materiálu [24]. Dále je potřeba brát ohled na skutečnost, že laserový paprsek nepůsobí v jednom bodě, ale v rádiusu okolo idealizovaného bodu. Prakticky dochází k tepelnému ovlivnění oblasti v okolí idealizovaného bodu. Při zvětšující se vzdálenosti od středu tato tepelná energie slábne [25]. Na obrázku 4.4 je zobrazena ovlivněná oblast laserovým paprskem.



Obrázek 4.4: Ovlivněná oblast při tavení [25].

4.3.2 Vzdálenost mezi drahami laseru

Tento parametr určuje rozestup mezi drahami laseru. Správná volba je důležitá pro spojení s předešlou drahou. Pokud je vzdálenost mezi drahami laseru příliš velká může nastat situace, při které nedochází k zaručenému spojení sousedních drah. Tato skutečnost má za následek nehomogenní vrstvu a zvýšení porozity dílu [26]. Volba tohoto parametru je prováděna s ohledem na efektivnost výroby.

4.3.3 Skenovací rychlost

Skenovací rychlost je parametr, který výrazně ovlivňuje rychlost stavby tištěného dílu. Zároveň však musí být zvolen s ohledem na výkon laseru, aby nedocházelo k přehřívání tavné lázně a nebo k nenatavení vlivem vysoké rychlosti. Nevhodná volba tohoto parametru má za následek vytváření velkých pórů, případně kuliček [27].

4.3.4 Tloušťka vrstvy

Tloušťka vrstvy je parametr, který přímo ovlivňuje kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost a čas stavby. Tento parametr je možné volit v rozmezí od 20 µm do 75 µm. Pokud jsou všechny ostatní parametry optimalizované na požadovanou homogenitu materiálu, tak není možné tento parametr měnit. Při změně tloušťky vrstvy musí nastat hledání nových procesních parametrů pro danou tloušťku vrstvy [28]. Nejčastěji se k materiálu použitému u technologie SLM dodává jedno nastavení tloušťky vrstvy a to 30 µm nebo 50 µm. Pokud je požadována jiná tloušťka s ohledem na urychlení tisku nebo zpřesnění detailu, je nutné provést zkušební tisky jedné dráhy a poté zkušební výbrusová tělesa pro dosažení stejné homogenity. Vhodnější řešení pro zrychlení tisku je zvýšení výkonu laseru a skenovací rychlosti nebo osazení stroje více lasery.

4.4 Rozměrová přesnost technologie SLM

Důležitým aspektem každé aditivní technologie je rozměrová, geometrická přesnost s jakou zvládne produkovat výsledné díly. K tomu účelu slouží kalibrační modely, které se vytisknou na dané technologii a provede se jejich hodnocení pomocí optického skeneru nebo souřadnicového měřícího zařízení. Kalibrační model, který je na obrázku 4.5 obsahuje celou škálu tvarů, které jsou vhodným ukazatelem pro kvalitu dané technologie a použitého stroje [29].

U technologie SLM je důležitá rozměrová přesnost, protože je vhodné následně obrábět co nejméně ploch z důvodu šetření času a finančních prostředků při výrobě. Modely, které jsou pro aditivní výrobu konstruovány, mají optimalizovaný tvar na mechanické zatěžování na ně působící a proto je dobré vědět jaká bude výsledná kvalita a přesnost povrchu. Může nastat situace, při které dojde k selhání dílu vlivem hrubého povrchu, který vyvolá trhlinu. Vliv na rozměrovou přesnost má kombinace základních procesních parametrů jako je výkon laseru, vzdálenost mezi drahami



Obrázek 4.5: Kalibrační model [29].

laseru, rychlost laseru a výška vrstvy. Nevhodná volba těchto parametrů má za následek smrštování během tisku a zhoršení kvality povrchu. Na rozměrovou přesnost má vliv použitá skenovací strategie a s ní související nastavení kontur okolo modelu [30]. Rozměrová přesnost je též ovlivněna podpůrnými strukturami, které musí být dostatečně pevné, aby se díl během tisku nezbortil. Zároveň musí být dostatečně subtilní, aby bylo možné tyto podpory odstranit z povrchu dílu. Pokud jsou podpory příliš masivní může nastat situace kdy tvorba podpůrné struktury je časově náročnější než samotná stavba dílu [31]. Dalším důležitým aspektem pro správnou geometrickou přesnost je i kvalita vstupní STL sítě (Standard Triangle Language) [32]. Pokud je jemnost STL sítě nevhodně zvolena, není možné vytisknout díl, který se bude přibližovat rozměrům v CAD datech.

4.4.1 Skenovací strategie a jejich vliv na rozměrovou přesnost

Skenovací strategie jsou nedílnou součástí volby tiskových parametrů. Volba vhodné strategie má vliv na tvarovou přesnost výrobku a také na zbytkové napětí nacházející se uvnitř dílu. U technologie SLM se využívá několika druhů strategií, přičemž výzkum v této oblasti se posouvá stále kupředu a snahou je najít ideální skenovací strategii, která by neměla ovlivňovat mechanické vlastnosti, rozměrovou přesnost a homogenitu materiálu při tisku [33]. V současné době se převážně využívají strategie zobrazené na obrázku 4.6.

Práce Bo Chenga [30] se věnuje zjištění zbytkového napětí při použití rozdílné skenovací strategie. V této práci jsou znázorněny simulační modely zbytkového napětí a odchylky od ideálního testovacího tvaru. Na obrázku 4.7 je možné vidět vliv skenovací strategie na odchylky, způsobené během tisku. Tato simulace je provedena pouze na několika vrstvách. Sám autor článku předpokládá zhoršující se trend v průběhu tisku dalších vrstev.

Práce Hana [34] a jeho týmu se věnovala stejnému tématu. Jejich přístup se lišil

ve vytisknutí kalibračního modelu s různou skenovací strategií. Kalibrační výtisky byly dále zpracovány pomocí 3D skenování a data jednotlivých skenů byla porovnána. Výsledek práce bylo zjištění, že při použití strategie dle obrázku 4.6g) dochází k menšímu ovlivňování okrajových částí modelu, a tím se redukuje průhyb v těchto místech. Zároveň bylo zjištěno, že i drsnost povrchu je v tomto případě lepší než při použití strategie 4.6b), e).



Obrázek 4.6: Stavební strategie [30]. a) šachovnice, b) šrafy, c) šrafy pod úhlem 45°, d) rotace šrafů po 45°, e) rotace šrafů po 90°, f) rotace po 67°, g) vnitřní spirála, h) vnější spirála.



Obrázek 4.7: Vliv strategie [30] a) šachovnice, b) šrafy, c) šrafy pod úhlem 45° , d) rotace šrafů po 45° , e) rotace šrafů po 90° , f) rotace po 67° , g) vnitřní spirála, h) vnější spirála.

4.4.2 Vliv hraničních kontur na rozměrovou přesnost

V každé vrstvě bývají obvykle aplikovány 2 až 3 hraniční kontury, navazující na sebe. Tyto kontury mají velký vliv na rozměrovou přesnost, protože při tavení laserem vzniká tavná lázeň a tyto kontury slouží jako zábrana proti natavení okolního prášku mimo skenovanou plochu [22]. Dvě kontury jsou znázorněny na obrázku 4.8. Je zde patrné, že při vytváření kontury vzniká výstupek, který poté ovlivňuje rozměrovou přesnost. Práce Yasana [35] se věnovala zjištění vlivu absence hraničních kontur na kvalitu povrchu. Výsledkem bylo zjištění, že při absenci kontur vznikal menší výstupek, ale zhoršila se kvalita povrchu. Tento závěr potvrdil i Tian [36], který zkoumal vliv absence kontur na drsnost povrchu. Výsledkem jeho práce bylo zjištění, že kontury jsou nezbytné pro kvalitnější povrch, protože jejich absence měla na následek roztavení okolních zrn a jejich přichycení na povrch.



Obrázek 4.8: Vliv kontury [22].

4.4.3 Vliv podpůrných struktur na rozměrovou přesnost

Při stavbě dílů, který není napevno navařen ke stavební platformě se používají podpůrné struktury. Tyto struktury je nezbytné použít, pokud se v modelu vyskytují plochy, které jsou nakloněny méně než 45° od stavební platformy.

Je nutné brát ohled i na výšku vrstvy, protože při vyšší vrstvě vzniká tzv. schodový efekt, který má za následek nekvalitu povrchu [37]. Podpůrné struktury slouží pro pevné přichycení stavěného dílu ke stavební platformě. Při samotné stavbě vzniká velké množství tepla v místě tavení a podpůrné struktury toto teplo zvládají transportovat mimo díl. Díky tomu vzniká menší pnutí v dílech a tvarová a geometrická přesnost je v požadované toleranci [38].

Podpůrné struktury jsou generovány na díl již při vytváření dat pro tisk. Je možné si vybrat z velkého množství tvarů podpor nebo vytvořit nové. Při návrhu je nutné vědět, které plochy jsou funkční a snažit se díl v prostoru natočit tak, aby nebylo nutné podpůrné struktury na tyto plochy umístovat. Při výběru podpůrných struktur a jejich aplikaci na model je vhodné zvážit hustotu těchto podpor a jejich tvar. Může nastat situace kdy při nevhodné orientaci dílu a zbytečně robustních podporách bude stavební čas podpůrných struktur delší než čas potřebný pro stavbu dílu. Tato skutečnost by měla konstruktéry směřovat k návrhu designu, který je tzv. samonosný a není potřeba velké množství podpůrných struktur. Po tisku je nutné tyto podpůrné struktury z objektu odstranit, proto je vhodné na tuto skutečnost myslet již při návrhu a přizpůsobit tomu jejich rozměry.

Sulaiman [31] se ve své práci věnuje hodnocení základním typům struktur, které mezi sebou porovnává. Testoval je při tisku s převisem a bez převisu. Výsledky práce jsou hodnoty deformace povrchu po odstranění podpůrných struktur pro obě situace. Z těchto dat lze říci, že nejlepší podpory na zamezení pohybu jsou blokové podpory s menšími rozestupy mezi stěnami. Dle hodnocení odstranitelnosti podpor preferuje podpory s fragmenty, které snižují jejich pevnost a lze je tím pádem snáze odstranit z povrchu dílu.

5 Zpracování materiálu AlSi10Mg procesem SLM

Slitina hliníku AlSi10Mg, která se řadí do skupiny siluminů, je používána pro odlévání dílů s tenkými stěnami a velmi komplexní geometrií. S přihlédnutím k dobré pevnosti, tvrdosti a dynamickým vlastnostem je používána pro výrobky s vyšším silovým zatížením. Tato slitina se používá při aplikacích v leteckém i automobilovém průmyslu a to kvůli dobrým mechanickým vlastnostem a nízké hmotnosti. Chemické složení AlSi10Mg je znázorněno v tabulce 5.1. Tato slitina je svařitelná, leštitelná, ale vykazuje horší obrobitelnost [39]. Fázový diagram materiálu AlSi10Mg je znázorněn na obrázku 5.1. Jedná se podeutektoidní slitinu s teplotou likvidu okolo 600 °C.

prvek	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
[%]	balance	9,00 až 11,00	$0,\!55$	$0,\!05$	$0,\!45$	0,20 až 0,45
prvek	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	ostatní
[07]	0.10	0.45	0.05	0.05	0.05	0.15

Tabulka 5.1: Chemické složení práškové slitiny hliníku AlSi10Mg



Obrázek 5.1: Fázový diagram materiálu AlSi10Mg [40].

Slitina AlSi10Mg v práškové podobě je používána pro technologie 3D tisku z kovových materiálů. Mechanické vlastnosti práškové verze tohoto materiálu používané pro aditivní technologie jsou rozdílné od mechanických vlastností odlévaného dílu. Velkou roli zde hrají procesní parametry použité při tisku a také použité tepelné zpracování a v neposlední řadě orientace dílu v při tisku.

Na obrázku 5.2 je znázorněna topologie prášku AlSi10Mg z elektronového mikroskopu. Přičemž velikost zrn se pohybuje v rozmezí od $15 \,\mu\text{m}$ do $50 \,\mu\text{m}$.



Obrázek 5.2: Topologie prášku AlSi10Mg [41].

5.1 Výzkumné směry materiálu AlSi10Mg

Slitina AlSi10Mg je velmi dobře prozkoumána výzkumnými týmy po celém světě. Velké množství publikací věnujících se této slitině obsahuje i ověřování mechanických vlastností. Díky tomu je možné si udělat představu o použitých parametrech při tisku. Dále pak o výsledných mechanických vlastnostech, které lze daným nastavením dosáhnout. Publikace zabývající se touto slitinou dále zkoumají vlivy tepelného zpracování a jeho vliv na mechanické vlastnosti.

V práci K. Kempena [42] jsou uvedeny mechanické vlastnosti při hustotě materiálu 98,5 %. V práci byly porovnávány dvě orientace vzorků, a to horizontální a vertikální bez použití tepelného zpracování. Bylo zjištěno, že vertikální vzorky mají nižší prodloužení o přibližně 2 %. Dále upozorňuje na skutečnost, že při vertikální stavbě vzniká zvýšená porozita v hraničních liniích tisknutého dílů v tzv. konturách. Tato skutečnost může mít za následek vyvolání trhliny, a tím i zhoršení mechanických vlastností při porovnání s horizontálně tištěným vzorkem.

Buchbinder [43] ve své práci zmiňuje malou produktivitu tištění dílů z materiálu ALSi10Mg. Jeho práce je zaměřena na porovnání různé velikosti výkonu a rychlosti skenování na porozitě výrobku. Hodnotícím kritériem byla homogenita povrchu. V této práci bylo zjištěno vhodné nastavení procesních parametrů pro dané výkony laserů.

5.2 Tepelné zpracování materiálu AlSi10Mg

Tepelné zpracování (TZ) je řízený proces, při kterém dochází ke změně struktury materiálu a tím se mění mechanické vlastnosti. Tyto postupy umožňují změnu tažnosti, pevnosti, tvrdosti atd. Tepelné zpracování této slitiny je velmi často aplikováno z důvodu zvýšení tažnosti na úkor pevnosti. Tuto skutečnosti lze pozorovat napříč všemi články zmíněnými v tabulce 5.2. Mezi nejčastěji využívané druhy TZ se řadí Stress relief (SR - Snížení vnitřního pnutí) a Hot Isostatic Pressing (HIP) [44]. V tabulce 5.2 jsou uvedeny výsledky tahových zkoušek získaných z rešerše literatury. Zkušební tělesa v tabulce byla tisknuta horizontálně a vertikálně. V této tabulce je možné sledovat vývoj mechanických vlastností v závislosti na tepelném zpracování. V tabulce 5.2 jsou též uvedeny hodnoty mechanických vlastností pro konvenčně používaný způsob zpracování této slitiny.

Tabulka 5.2: mechanické vlastnosti materiálu AlSi10Mg. Teploty pro TZ HIP 1) teplota 326 °C, 2) teplota 526 °C, 3) teplota 250 °C, 4) teplota 500 °C.

Orientace	E [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$\varepsilon_{b} [\%]$	ΤZ
Horizontální[42]	68 ± 3	-	391 ± 6	$5,5 \pm 0,4$	-
Vertikální[42]		-	396 ± 8	$3,4 \pm 0,6$	-
Horizontální[45]	-	322 ± 8	$434.2{\pm}10.7$	5.3 ± 0.2	-
Horizontální[45]	-	196.5 ± 3.6	282.3 ± 6.1	$13.4{\pm}0.5$	450 °C
Horizontální[45]	-	126.0 ± 2.1	213.7 ± 4.6	23.5 ± 0.8	$500^{\circ}\mathrm{C}$
Horizontální[45]	-	90.5 ± 1.6	168.1 ± 2.4	23.7 ± 0.8	$550^{\circ}\mathrm{C}$
Horizontální[46]	71.3	168	267	8.6	SR
Vertikální[46]	70.3	170	272	7.8	SR
Vertikální[44]	75 ± 3	243 ± 38	407 ± 31	$3.9{\pm}1.1$	-
Vertikální[44]	71±2	207 ± 1	319 ± 0	7 ± 0.1	SR
Vertikální[44]	74±4	161 ± 1	$254{\pm}1$	$9.6{\pm}0.6$	HIP (1)
Vertikální[44]	$66{\pm}4$	109±11	163 ± 8	13.5 ± 4	HIP (2)
Vertikální[47]	-	186 ± 5	233 ± 7	22 ± 2	SR + HIP (3)
Vertikální[47]	-	115 ± 5	124 ± 8	35 ± 3	SR + HIP (4)
Tlakové lití [42]	71	_	330-365	3-5	Т6

5.2.1 Tepelné zpracování na uvolnění vnitřního pnutí

Je velmi využíváno u technologie SLM, a to z důvodu vzniku pnutí mezi jednotlivými vrstvami během tisku. To je způsobeno rychlým předáním energie v místě působení paprsku laseru a následného velmi rychlého chladnutí daného místa [48]. Nastavení procesu tepelného zpracování pro SR většinou dodává výrobce prášku určeného pro aditivní technologie. Výrobce prášku použitého v této diplomové práci doporučuje ohřev na 300 °C za 1h a poté výdrž 3 h na této teplotě. Poté následuje volné chladnutí v komoře pece. Diagram průběhu tohoto TZ je znázorněno na 5.3. TZ SR bylo zkoumáno [49] s teplotami 200 °C, 300 °C a 400 °C s výdrží na teplotě 2 h. Autor

článku dospěl k závěru, že při zvyšující se teplotě při TZ dochází ke snížení tvrdosti v porovnání se vzorkem, který nebyl tepelně zpracován.



Obrázek 5.3: Graf tepelného zpracování pro uvolnění vnitřního pnutí (SR).

5.2.2 Tepelné zpracování HIP

Principem tohoto TZ je působení vyššího tlaku a teploty na tepelně zpracovávaný díl. Teploty se u tohoto TZ mohou pohybovat až okolo 2000 °C a tlak dosahuje hodnot až 200 MPa. U slitiny AlSi10Mg se teplota pohybuje okolo 500 °C a tlak je volen kolem 100 MPa. Tato metoda TZ je používána pro snížení porozity u velmi namáhaných součástí, například pro letecký průmysl. Při snižování porozity vlivem tlaku dochází ke smrštění součásti a proto je nutné zvětšit součást o velikost smrštění. Při použití HIP je také možné zrychlit proces tisku na úkor vyšší porozity, které se dá částečně zbavit následným TZ. Při tisknutí z kovového prášku není vždy možné tisknout z nového prášku. Použitý prášek pro tisk bývá několikrát přeset a zbaven nečistot. Tuto skutečnost vzal v úvahu Tradowsky [50] a ve svém článku využil použitý prášek na stavbu zkušebních těles a naměřil větší hodnoty porozity s porovnání s nepoužitým práškem. Naměřené hodnoty byly 0,26 % z plochy pro čerstvý prášek ku 2 % z plochy pro použitý prášek. V závislosti na tomto článku lze říci, že tepelné zpracování HIP je vhodné pro vícekrát použitý prášek, jelikož během TZ dochází k eliminaci velkého množství pórů, vzniklých při tisku.

V práci Wei Li [45] jsou uvedeny vlivy tepelného zpracování na mechanické vlastnosti slitiny ALSi10Mg. V práci jsou porovnány vzorky hned po procesu tisku se vzorky po tepelném zpracování, které bylo zvoleno od 450 °C do 550 °C s trváním dvou hodin. Při zvyšující se teplotě TZ dochází ke snížení meze kluzu a pevnosti v tahu, ale zároveň roste tažnost. Tento vliv změny mechanických vlastností přikládá ke zvětšujícímu se zrnu Si. Práce Rosenthala [44] se také zabývá vlivem TZ na mechanické vlastnosti. V tomto případě se jedná o porovnání vzorků po výtisku bez TZ se vzorky s provedeným TZ HIP s nastavením 100 MPa a teplotou v rozmezí od 326 °C do 526 °C. Třetí skupinu vzorků byla zpracována s TZ SR. Hodnoty mechanických vlastností, které byly dosaženy jsou znázorněny v tabulce 5.2. Při použití TZ HIP bylo dosaženo zvýšení tažnosti na úkor meze kluzu a pevnosti v tahu.

5.2.3 Cyklické testování slitiny hliníku AlSi10Mg

Cyklické testování slitiny AlSi10Mg je dobře zmapováno v práci od Brandla [51]. Ten se ve své práci věnoval porovnání cyklického namáhání zkušebních těles tisknutých pod úhly 0°, 45° a 90° spolu s předehřátou stavební platformou na 300 °C a nepředehřátou platformou u jednotlivých serií zkušebních těles. Dále vybranou část vzorku tepelně zpracoval postupem T6. Cyklickým zkouškám se věnoval i Naor Elad Uzan [47], který porovnával zkušební tělesa bez TZ a s použitím TZ pro snížení vnitřního pnutí a HIP. Zkušební tělesa, která byla tepelně zpracována pomocí HIP 500 °C vykazovala nejnižší odolnost proti cyklickému namáhání. Nejlepší odolnost vykazovaly vzorky, které nebyly tepelně zpracovány.
6 Praktická část

Předmětem této diplomové práce je konstrukce topologicky optimalizovaného dílu s ohledem na aditivní technologie.

Zvolena byla technologie SLM, která byla použita pro výrobu dílu. Jako vhodný díl pro úpravu konstrukce byl zvolen představec horského kola. Materiál představce byl zvolen AlSi10Mg z důvodu podobnosti mechanických vlastností s konvenčně používaným materiálem pro horská kola Al6061 (viz tabulka 6.3). Dalším důvodem volby tohoto materiálu byly dostupné znalosti o jeho zpracování v Laboratoři prototypových technologií a procesů na TUL. Návrh konstrukce byl realizován pomocí topologické optimalizace se zatížením, které jsou vyžadovány normou pro testování komponent horských kol. V poslední fázi bylo provedeno testování funkčnosti tištěného dílu a finanční rozvaha takto vyráběného představce.

6.1 Plán práce

Praktická část této práce je rozdělena do pěti částí.

- 1. Volba dílu, materiálu, zjištění mechanických vlastností
- 2. Topologická optimalizace referenčního dílu
- 3. MKP analýza optimalizovaného představce
- 4. Simulace procesu stavby technologie SLM
- 5. Výroba a testování představců

V současné době vývoj představců směřuje ke snižování váhy s využitím lehčích a pevnějších materiálů oproti využití slitin hliníku. Na to navazuje i velmi komplexní zatížení, které se na představec vyvozuje během jízdy. Na základě těchto dvou skutečností byl vybrán představec jako referenční komponenta pro topologickou optimalizaci a reálnou výrobu. Parametry zvoleného představce byly: délka 100 mm a úhel stoupání/klesání 6°.

V další části byla zvolena slitina hliníku AlSi10Mg pro výrobu aditivního představce. Materiál byl zvolen z důvodu podobnosti mechanických vlastností s Al6061, který se používá při výrobě komponent na horská kola.

Po volbě referenčního dílu a materiálu bylo nutné zvolit skenovací strategii, která bude použita při tisku. Volba byla provedena s ohledem na velikost porozity zjištěné při výbrusech na zkušebních tělesech. Zvolena byla strategie, která vykazovala nejmenší velikost porozity. Toto hodnotící kritérium je důležité s ohledem na zatížení, která mohou být na představci vyvozena.

Dále byla vytisknuta tělesa pro testování mechanických vlastností a porovnána s výsledky z literatury. Důvodem tohoto kroku je vliv použité tiskárny, dodavatele prášku a dalších aspektů, ovlivňujících mechanické vlastnosti výrobku. Po vyhodnocení mechanických testů byla tato data použita v nastavení materiálu pro topologickou optimalizaci v simulačním software.

Na topologickou optimalizaci byl použit software NX 12 s modulem Topology Optimization. Zatěžovací silové stavy byly použity z normy ČSN EN ISO 4210--5:2014. Zatížení, zmíněná v této normě, musí vydržet každý představec, který je prodáván na evropském trhu.

Topologická optimalizace byla omezena velikostí oblasti, ve které může algoritmus odebírat nepotřebný materiál. Výsledkem optimalizace v NX12 byla STL síť, omezená okrajovými podmínkami zadanými před simulací. Výsledná síť nebyla ve vhodném stavu pro přímý tisk a tudíž bylo nutné tato data upravit do tisknutelné podoby. Na tento krok byl použit velmi silný nástroj Altair Inspire s funkcí Polynurbs. Tento nástroj byl použit na otrasování jednotlivých prutů designu, a díky tomu bylo možné vygenerovat STEP soubor, který byl dále upraven v software Geomagic DesignX. V tomto software bylo domodelováno uchycení pro šrouby a došlo k úpravě designu upínacích částí. Dále byl vytvořen přídavek na obrábění pro funkční plochy.

Vstupními daty pro MKP simulaci v Ansys Mechanical byl představec bez přídavků na obrábění. Simulace zatížení byla provedena se zátěžovými stavy dle normy ČSN EN ISO 4210-5:2014.

Po výpočtové fázi následovala fáze přípravy dat pro samotný tisk. Tato data byla použitá při simulování procesu stavby v software Ansys additive suite.

Další fází byl tisk představců a jejich tepelné zpracování a následné zbavení podpůrných struktur. Následovalo skenování představců a zhodnocení simulačních modelů z Ansysu. Poté bylo provedeno testování dle normy ČSN EN ISO 4210-5:2014 ve Strojírenském zkušebním ústavu, s.p. Jablonec nad Nisou, který se zabývá testováním strojních součástí. Posledním krokem bylo určení ceny aditivně vyráběného představce.

Na obrázku 6.1 je znázorněn celý postup, který byl proveden v této diplomové práci

6.2 Volba referenčního dílu

Referenčním dílem byl zvolen představec horského kola. Při rešeršní části bylo zjištěno, že návrhem cyklo komponentů pro aditivní výrobu se věnuje například společnost Empire Cycles zabývající se vývojem komponentů pro sjezdová kola. V současné době nelze tvrdit, že v dohledné době budou takto vyrobené komponenty nahrazovat konvenčně vyráběné. Přestože TO přináší úsporu hmotnosti při zachování tuhosti, cena takového komponentu je příliš vysoká. Takto vyrobené komponenty jsou



Obrázek 6.1: Postup práce.

převážně pro závodníky, kteří pocítí jakoukoliv úsporu hmotnosti a nebo zlepšení mechanických vlastností.

Představec je komponent na kolo, který spojuje hlavovou trubku vidlice a řidítka. Na tento komponent jsou kladeny velké zatěžovací nároky, protože při selhání může dojít ke zranění uživatele. Volba představce se provádí podle dvou hlavních parametrů. Prvním parametrem je délka představce a druhým parametrem je sklon představce od vodorovné roviny. Tyto parametry jsou znázorněny na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Rozměry představce.

Existuje několik druhů představců, které jsou používány na odlišné druhy cyklistiky. Rozlišují se dva základní druhy představců a to se závitem a bez závitu, které budou rozepsány níže.

Představec se závitem je zobrazen na obrázku 6.3. Toto řešení představce je u horských kol spíše výjimečné. Princip je založen na vsunutí představce do hlavové trubky a pomocí šroubu, který prochází skrze celý představec, se ve spodní části dotahuje matice, která přitáhne zkosený válec ke stěně hlavové trubky a tím zajistí svojí pozici.



Obrázek 6.3: Představec se závitem [52].

Představec bez závitu je zobrazen na obrázku 6.4. Toto řešení je v současné době nejrozšířenější. Upnutí představce na hlavovou trubku je pomocí objímky, která je stažena okolo hlavové trubky šrouby. Výhodou tohoto řešení je snadná výměna představce, ale zároveň jeho otočení a vytvoření stoupacího, případně klesajícího představce. Seřízení vůle tohoto představce je realizováno pomocí hlavového složení. Existují i speciální stavitelné představce, které umožňují změnu sklonu bez nutnosti představec otáčet.



Obrázek 6.4: Představec bez závitu.

6.3 Měření porozity vzorku

U zvolené technologie SLM je možné definovat skenovací strategii tisku. Volba správné strategie je důležitým krokem pro úspěšný tisk. Pro hodnocení vhodné strategie je potřeba zvolit hodnotící kritérium. V této práci byla zvolena porozita vzorku jako hodnotící kritérium.

Pro měření porozity byla vyrobena testovací tělesa o rozměrech $10 \times 10 \times 10$ mm s rozdílnou strategií tisku. Zvoleny byly strategie šachovnice a šrafy. U poloviny testovacích těles bylo provedeno tepelné zpracování na snížení vnitřního pnutí (SR) a druhá polovina byla ponechána "As built". Tepelné zpracování testovacích těles bylo provedeno na stavební platformě.

Tělesa byla rozříznuta na metalografické kotoučové pile 3 mm od okraje vzorku skrze všechny vrstvy. Dále byly vzorky zality do pryskyřice a proběhlo jejich vybroušení do stavu použitelného pro optickou mikroskopii. Takto připravený vzorek je zobrazen na obrázku 6.5.

Vzorky byly nasnímány pomocí mikroskopu a bylo provedeno vyhodnocení snímků pomocí softwaru na vyhodnocení porozity. Na obrázku 6.6 jsou výsledky z měření porozity. Menší porozita byla naměřena na vzorcích se strategií šrafy, proto bude použita pro další práci.



Obrázek 6.5: Vybroušený vzorek pro měření porozity.



Obrázek 6.6: Měření porozity vzorků.

6.4 Mechanické vlastnosti materiálu AlSi10Mg

Mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg jsou známé a popsány v tabulce 5.2. Všechny výsledky jsou získány na obráběných vzorcích, které nereflektují povrch vyrobeného dílů pomocí technologie SLM. Pro porovnání mechanických vlastností byla vyrobena zkušební tělesa na tahovou zkoušku dle normy ISO 6892-1 s kruhovým průřezem. Výsledky z těchto zkoušek byly porovnány se vzorky obrobenými, aby bylo možné sledovat případné rozdíly v mechanických vlastnostech.

6.4.1 Tahová zkouška

Zkouška byla provedena dle normy ISO 6892-1 [53] s rychlostí posuvu 5 mm/min s použitím extenzometru MLF 800B na univerzálním trhacím zařízení TiraTest. V této práci bylo rozhodnuto o provedení tahových zkoušek na tělesech, která nebyla strojně obráběna. Po procesu tisku došlo pouze ke sražení výstupků pomocí brusného papíru o zrnitosti 320 zrn/cm². Důvodem tohoto rozhodnutí je skutečnost, že povrch po tisku není hladký a skutečné díly nebývají obráběny na všech plochách. Tělesa byla tištěna ve vertikální a horizontální rovině. Celkem bylo vyrobeno 6 sad vzorků s parametry obsaženými v tabulce 6.1.

Číslo sady	Orientace	TZ	Obrábění	Počet vzorků
1	Vertikální	SR	Ne	5
2	Vertikální	-	Ne	5
3	Horizontální	SR	Ano	3
4	Horizontální	-	Ano	3
5	Horizontální	SR	Ne	5
6	Horizontální	-	Ne	5

Tabulka 6.1: Varianty tahových těles.

Pro testování s absencí závitu na vzorku bylo nutné zhotovit speciální tvarové čelisti na trhací zařízení. Tyto čelisti jsou vyobrazeny na obrázku 6.7. Záznam zkoušky byl spuštěn při dosažení předpětí $150 \,\mathrm{N}$.

V sadě vzorků označené "Vertikální As built" došlo k prokluzu čelistí extenzometru. Graf je ve své lineární části deformován. Z tohoto důvodu nebylo možné určit hodnotu modulu pružnosti. Ostatní sady vykazovaly stabilní průběhy. Tento trend je možné vidět na grafu 6.8. Výsledné hodnoty meze kluzu, meze pevnosti, prodloužení a modulu pro všechny vzorky ze sérií jsou zobrazeny v příslušných grafech a tabulkách v příloze A.



Obrázek 6.7: Tahová zkouška.

Při porovnání výsledků z tabulky 5.2 a grafů 6.9 a 6.10 tahových zkoušek, provedených v této práci je možné sledovat rozdíl mezi obrobenými a neobrobenými vzorky pouze při vertikální orientaci. Důvodů může být několik, například rozdílná výstupní struktura materiálu, vzniklá v průběhu stavby. Dále rozdílné tiskové parametry včetně skenovací strategie.



Obrázek 6.8: Graf průběhu tahové zkoušky s vertikální orientací a TZ SR.



Obrázek 6.9: Graf meze pevnosti a meze kluzu získaný z tahové zkoušky.



Obrázek 6.10: Graf poměrného prodlouženi získaný z tahové zkoušky.

V tabulce 6.2 jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu pro porovnání s obráběnými vzorky. Drsnost byla měřena přístrojem Mahr MarSurf PS1. Výsledná drsnost u jednotlivých těles v sadě je s minimální odchylkou. Při porovnání s obráběnými vzorky je drsnost neobrobených o řád vyšší. Pro tahové zkoušky má drsnost povrchu malé vlivy na velikosti mechanických vlastností, avšak pro cyklické zatěžování je drsnost povrchu velmi důležitá. Pokud povrch není leštěn, může snadno dojít k vyvolání trhliny vycházející z vyšší drsnosti povrchu.

Tabulka 6.2: Drsnost povrchu zkušebních tahových těles. V - vzorek tištěný ve vertikální poloze. H - vzorek tištěný v horizontální poloze. AB - vzorek bez TZ. SR vzorek s TZ SR. O - strojně obrobený vzorek.

	Ra [µm]	Rz [µm]
V_AB	$5,\!43{\pm}0,\!65$	$28,08{\pm}2,49$
V_SR	$6,04{\pm}0,39$	$31,24{\pm}3,70$
H_AB	$3,18{\pm}0,73$	$18,\!64{\pm}4,\!38$
H_SR	$2,52{\pm}0,43$	$13,70{\pm}1,89$
H_AB_O	$0,58{\pm}0,10$	$4,18{\pm}0,81$
H_SR_O	$0,58{\pm}0,07$	$4,\!49{\pm}0,\!31$

Volba tepelného zpracování SR byla provedena s ohledem na nejhorší možný případ, který nastal při vertikální orientaci bez TZ. V tomto případě byla dosažena tažnost pouze 1,5%. TZ bylo zvoleno z důvodů zabránění vzniku takového stavu.

Dále bylo nutné stanovit mechanické vlastnosti pro výpočtové modely. Jelikož představec je komponenta, která je orientována převážně v horizontálním směru, byla hodnota vycházející z tahové zkoušky přiblížena k výsledkům horizontální zkoušky s tepelným zpracováním. Zvolené hodnoty jsou mez kluzu $R_{p0,2} = 220$ MPa, mez pevnosti $R_m = 340$ MPa, modul pružnosti E = 68 GPa.

6.5 Testování představců dle normy

Testování představců je popsáno v normě ČSN EN ISO 4210-5:2014. Touto normou se musí řídit všichni výrobci cyklo komponent, prodávajících na území Evropské unie, a to včetně Spojeného království. Tato norma je koncipována tak, aby přispěla k co nejvyšší bezpečnosti při provozování kol. V této normě jsou popsány zkoušky, které musí představce úspěšně absolvovat. V této práci bylo rozhodnuto o provedení třech zkoušek. Dvě jsou statické s nejhoršími možnými zatíženími, které lze na představce vyvinout. Třetí zkouška je dynamická, kde se zkoumá cyklické namáhání. Pokud všechny tři zkoušky mají kladné výsledky, je daný představec připraven pro reálné použití na horském kole.

6.5.1 Zkouška bočním ohybem

První zátěžová zkouška, bočním ohybem, je znázorněna na obrázku 6.11. Při této zkoušce je představec upnut do přípravku, který nahrazuje hlavovou trubku. Dotažení představce k hlavové trubce je realizováno pomocí šroubů, utažených momentem 5 Nm. Dále jsou připevněna řidítka pomocí objímky a šroubů se stejným momentem. Zatížení pro horská kola je aplikováno 50 mm od okraje řidítek pouze na jedné straně s velikostí síly $F_2 = 1\,000$ N. Pokud představec vydrží bez známky prasknutí a velké deformace tuto statickou sílu po dobu 1 min, je zkouška brána jako úspěšná. Maximální přípustný posuv v místě působení síly s použitými řidítky je v tomto případě 15 mm.



Obrázek 6.11: Schéma působení sil při bočním ohybem [54].

6.5.2 Zkouška ohybem vpřed

Druhá zátěžová zkouška, ohybem vpřed, je znázorněna na obrázku 6.12. Při této zkoušce je ustavení představce a řidítek stejné jako u zkoušky s bočním ohybem. Rozdíl je ve způsobu zatěžování, které má působiště uprostřed představce v části pro upnutí řidítek. Tato zkouška je rozdělena na dvě úrovně. Při první úrovni je zatěžovací síla $F_3 = 1\,600\,\text{N}$ s výdrží 1 min, a pokud nedojde k destrukci nebo průhybu větším než 10 mm plynule se přechází na $F_4 = 2\,600\,\text{N}$ se stejným působištěm

po dobu 1 min. Pokud představec vydrží obě tato zatížení, je zkouška brána jako úspěšná.



Obrázek 6.12: Schéma působení sil při zkoušce ohybem vpřed [54].

Únavové zkoušky 6.5.3

Třetí zátěžová zkouška je cyklická únavová a její schéma je znázorněno na obrázku 6.13. Upnutí představce a řídítek je stejné jako u předchozích zkoušek. Tato zkouška obsahuje dvě etapy, přičemž první je s opačným zatížením, silou $F_6 = 270$ N a působištěm 50 mm od konce řidítek na obou jejich stranách. Toto zatížení vyvolává na představci cyklický krut. Ve druhé etapě jsou aplikovány síly $F_7 = 450$ N se shodným směrem. Toto zatížení vyvolává na představci cyklický ohyb. Pokud je u první etapy dosaženo 100000 cyklů přechází se na druhou etapu a pokud i ta je úspěšná je test považován za úspěšný.



b) Etapa 2 - Shodné zatížení

Obrázek 6.13: Schéma působení sil při cyklickém namáhání [54].

6.6 Topologická optimalizace

V této kapitole je popsáno nastavení topologické optimalizace a výsledky v software Siemens NX 12 s modulem Topology optimization. Tento software byl vybrán z důvodu inženýrského přístupu k topologickým optimalizacím. Software využívá výpočtové jádro Nastran.

6.6.1 Nastavení topologické optimalizace v software NX 12 Topology optimization

Pro topologickou optimalizaci je nutné definovat objem, který bude algoritmus výpočtu uvažovat jako "Design space". Referenční představec byl zvolen s délkou 100 mm a úhlem stoupání 6°. Proto byl vytvořen "Design space" o velikosti $100 \times 80 \times 80$ mm, který je zobrazen na obrázku 6.14. V tomto "Design space" byly vytvořeny dvě válcové plochy, reprezentující dosedací plochy pro řidítka a hlavovou trubku. Dále byly vytvořeny díry pro šrouby.

Topologické optimalizace jsou velmi časově náročným úkolem a tudíž je vhodné je provádět na menších objemech s větší velikostí prvku. Tento přístup zajistí rychlejší výsledky, které mohou být v dalších iteracích zpřesňovány zmenšováním velikosti elementů.



Obrázek 6.14: Počáteční objem použitý pro topologickou optimalizaci.

Modul pro topologické optimalizace dokáže pracovat s jakýmkoliv modelem ve formátu STEP. Vhodnější je však provést konstrukci dílů přímo v software Siemens NX12, protože modul topologické optimalizace dokáže využívat a parametricky měnit vytvořené entity. Na tyto prvky lze pak aplikovat síly, zatížení a vazby. V této práci bylo provedeno vymodelování "Design space" přímo v software Siemens NX12. Dále byla vymodelována trubka, která simulovala řidítka. V této práci bylo rozhodnuto, že zatěžování bude realizováno přes další tělesa a ne pouze jako odvozené zatížení působící na plochy designu. Nastavení topologické optimalizace je definováno v několika krocích. Nejprve je nutné zvolit, které těleso bude bráno jako optimalizované. Dále pak zvolit to, které bude nosičem sil a jiných namáhání. Mezi těmito modely je nutné provést nastavení kontaktních vazeb, aby algoritmus správně vypočítal vzniklé napětí, vyvozené silami. V tomto případě byla zvolena pevná vazba uvnitř objímky válcové plochy pro hlavovou trubku a dále vazba dotyku pro uchycení řidítek.

Dalším krokem je nastavení chování topologické optimalizace. V tomto kroku byla zvolena rovina symetrie, podle které bude algoritmus provádět výsledné výpočty. Dalším nastaveným parametrem byla procentuální hladina, s jakou má algoritmus provádět rozmístění materiálu. Tato hodnota byla nastavena na 43 %. Čím vyšší hodnota, tím více ve výsledné optimalizaci vznikají prutové struktury. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na výsledky všech provedených optimalizačních pokusů. Toto nastavení mělo pozitivní vliv na výsledné vnitřní napětí a hmotnost simulovaného představce.

Následovalo definování zatěžujících sil. Zatěžovací stavy představce byly vzaty z normy pro testování představců ČSN EN ISO 4210-5:2014, která je detailně popsána v podkapitole 6.5. Tyto síly byly rozděleny do dvou zatěžovacích stavů. Prvním stav obsahoval sílu $F_2 = 1\,000$ N působících 50 mm od okraje řidítek a druhý stav byl definován silou $F_4 = 2\,600$ N působící pod 45° v rovině symetrie na místo, kde jsou připevněna řidítka.

Posledním krokem pro správné definování optimalizačního modelu byla definice použitých materiálů a jejich mechanických vlastností. Materiál pro představec je slitina hliníku AlSi10Mg a pro řidítka byl zvolen běžně používaný materiál Al6061. Pro materiál AlSi10Mg bylo nutné definovat mez kluzu, mez pevnosti, modul pružnosti tyto hodnoty byly použity z výsledných mechanických vlastností, popsaných v podkapitole 6.4. Poissonovo číslo ν bylo použito ze software Ansys, kde je materiál AlSi10Mg předdefinován. V tabulce 6.3 jsou uvedeny hodnoty pro oba použité materiály.

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [GPa]	ν [-]
AlSi10Mg	220	340	68	0,33
Al6061 [55]	280	310	68,9	0,33

Tabulka 6.3: Mechanické vlastnosti materiálu použitého pro topologickou optimalizaci.

Jakmile je TO definována, je nutné zvolit velikost elementu, který bude použit pro výpočet. V prvních iteracích optimalizace je vhodné použít velký element, který se bude postupně zmenšovat v dalších iteracích, až je dosaženo požadované přesnosti.

Po nastavení veškerých parametrů modelu je možné přejít k nastavení požadovaných cílů optimalizace. Optimalizaci je možné provádět dvěma přístupy. Prvním je použití bezpečnostního koeficientu pro návrh a druhým je optimalizace na hmotnost.

6.6.2 Výsledky topologické optimalizace

Nejprve byly provedeny simulace, které měly konvergovat k bezpečnosti 2,3,4. Bohužel ani jedna z těchto simulací nebyla schopna konvergovat ke zmíněným koeficientům bezpečnosti. Výsledky simulací se pohybovaly v okolí bezpečnosti k = 8 až 10 s váhou představce okolo 500 g. Jelikož komerčně vyráběná těla představců se pohybují v hmotnosti v rozmezí od 100 g do 140 g, byla zvolena cílová hmotnost 100 g. Toto rozhodní se opírá o skutečnost, že síly, které jsou popsány v normě ČSN EN ISO 4210-5:2014 jsou velmi předimenzovány.

Výsledná optimalizace, která je zobrazena na obrázku 6.15 trvala 8 hodin a 10 minut na počítači s konfigurací dle tabulky D.1. Algoritmus optimalizace byl schopen se přiblížit k hmotnosti 98 g, čímž byl splněn požadavek cílové hmotnosti. Velikost prvku při závěrečném výpočtu byla 5 mm.



Obrázek 6.15: Výsledný topologicky optimalizovaný design.

Konečný design, který byl vytvořen v Siemens NX 12 v modulu Topology optimization obsahuje určitá zjednodušení a také místa, kde došlo ke vzniku velkého napětí, které překračuje mez pevnosti materiálu. Z tohoto důvodu bylo nutné dodatečně upravit design do tisknutelného stavu. Pro tento krok byl použit software Altair Inspire s využitím funkce Polynurbs. Jejichž používání lze během krátké chvíle ovládnout a natrasovat daný design pomocí této funkce. Na obrázku 6.16 je zobrazena polovina upravených prutů.

Vytvořená část byla zrcadlena z důvodu zajištění symetrie obou částí. Výstupní data ze softwaru Altair Inspire jsou ve formátu STEP, která je možné dále upravovat. Další úpravy jako odlehčení objímek a tvorba výstupků pro šrouby, byly provedeny v software Geomagic DesignX. Poslední úpravou bylo vytvoření přídavků na obrábění válcových ploch, které slouží k upnutí řidítek a hlavové trubky.



Obrázek 6.16: Úprava prutů v software Altair Inspire.

6.7 MKP analýza navrženého designu

Pro vytvořený model bylo nutné provést pevnostní analýzu pomocí metody konečných prvků (MKP) v software Ansys mechanical. Ověření bylo provedeno pouze pro statické zatěžování, dle normy ČSN EN ISO 4210-5:2014. Zatěžovacími stavy byly ohyb představce vpřed a boční ohyb představce. Model pro MKP simulaci byl vytvořen tak, aby co nejvíce odpovídal skutečné sestavě představce s řidítky. Tento model s popisem jednotlivých části je zobrazen na obrázku 6.17.



Obrázek 6.17: Popis modelu MKP.

Řidítka, která byla zvolena a vymodelována jsou Force Basic H4.2 s příklonem 6° směrem k jezdci. Šířka řidítek je 680 mm. Model řidítek byl zkrácen o 50 mm na každé straně z důvodu zjednodušení měření posuvu v místě působiště sil. Dalším krokem bylo definování mechanických vlastností materiálů použitých pro tuto simulaci. Tyto vlastnosti pro jednotlivé komponenty sestavy jsou popsány v tabulce 6.4.

Součást	Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [GPa]	ν[-]
Představec	AlSi10Mg	220	340	68	0,33
Objímky	AlSi10Mg	220	340	68	0,33
Řidítka	Al6061 [55]	280	310	69	0,33
Šrouby	Ocel tř. 8.8 [56]	640	800	200	0,30

Tabulka 6.4: Mechanické vlastnosti použité pro kontrolu MKP.

Vazby mezi dílčími součástmi simulované sestavy byly typu "bonded" a v jednom případě "no separation". Tato vazba byla aplikována mezi řidítky a objímkou v případě, že by během simulace docházelo k posuvu součásti. Generování sítě bylo provedeno s nastavením, popsaným v tabulce 6.5. Vytvořená síť obsahuje 686 156 elementů, přičemž optimalizovaný představec včetně objímek obsahuje 515 317 elementů.

Název komponenty	velikost elementu	typ elementu
Představec	$1\mathrm{mm}$	čtyřstěn
Objímky	$1\mathrm{mm}$	čtyřstěn
Řidítka	$2\mathrm{mm}$	čtyřstěn
Šrouby	$2\mathrm{mm}$	čtyřstěn

Tabulka 6.5: Nastavení elementů MKP.

V posledním kroku bylo provedeno nastavení sil, které mají být aplikovány na simulační model. Simulace byla rozdělena do dvou kroků. V prvním kroku je aplikováno předpětí, které je vyvozeno ve šroubech a v druhé fázi probíhá zatížení pomocí definovaných sil, vycházejících z normy ČSN EN ISO 4210-5:2014. Tyto zatěžovací stavy jsou znázorněny na obrázku 6.18.



Obrázek 6.18: Postup zatížení v MKP.

Vyhodnocení simulace bylo provedeno na základě ekvivalentního napětí Von Mises. Jednotlivé zkoušky z normy obsahují informace o maximálním průhybu při zatěžovací síle, proto byla hodnocena i celková deformace sestavy představce s řidítky.

6.7.1 MKP analýza bočního ohybu

Při této zkoušce je aplikována síla $F_2 = 1\,000$ N ve vertikálním směru ve vzdálenosti 50 mm od konce řidítek. Tato zkouška je omezena maximálním posuvem 15 mm v místě působení síly. Na obrázku 6.19 je zobrazeno působení zatížení pro zkoušku bočním ohybem. Na obrázcích 6.20 a 6.21 jsou zobrazeny výsledky simulace. Celkový čas výpočtu byl 681 s. Průhyb vycházející z kontrolního výpočtu v místě působení síly je 13,402 mm.



Obrázek 6.19: Zatížení při bočním ohybu představce.

Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2 Max: 448,16 Min: 5,3965e-7



Obrázek 6.20: Rozložení napětí při bočním ohybu.



Obrázek 6.21: Rozložení deformace při bočním ohybu.

6.7.2 MKP analýza ohybu vpřed

Síla, která při této zkoušce působí na představec je znázorněna na obrázku 6.22. Zatížení je realizováno ve dvou etapách. Při první působí síla $F_3 = 1\,600\,\mathrm{N}$ a při druhé $F_4 = 2\,600\,\mathrm{N}$.



Obrázek 6.22: Zatížení při ohybu vpřed.

Na obrázcích 6.23 a 6.24 jsou zobrazeny výsledky simulace pro první etapu. Na obrázcích 6.25 a 6.26 jsou zobrazeny výsledky simulace pro druhou etapu. Tato zkouška je úspěšná pokud nedojde k průhybu představce o více než 10 mm v působišti síly. Posunutí vycházející z kontrolního výpočtu v místě působení síly je 0,928 mm.



Obrázek 6.23: Rozložení napětí při ohybu vpřed pro etapu 1.



Obrázek 6.24: Rozložení deformace při ohybu vpřed pro etapu 1.



Obrázek 6.25: Rozložení napětí při ohybu vpřed pro etapu 2.



Obrázek 6.26: Rozložení deformace při ohybu vpřed pro etapu 2.

6.7.3 MKP analýza pro únavové zkoušky

Simulace cyklického namáhání nebyla provedena, ale byly simulovány stavy při jednom cyklu. Tyto simulace byly provedeny pro kontrolu, zda při zatížení nevznikají velké koncentrátory napětí, které mohou mít za následek selhání představce. Výsledky těchto simulací jsou v příloze.

6.8 Příprava dat pro tisk představců

Konečný design představce včetně objímek a přídavků na obrábění byl importován do software Materialise Magics 24. Zde byla provedena orientace dílu v prostoru, která napomohla k tisku některých ploch bez podpůrných struktur. Poté bylo provedeno vygenerování podpůrných struktur včetně pinů na místech, které byly kritické pro eliminaci deformací dílu během stavby. Podpůrná struktura byla vybrána bloková perforovaná s tloušťkou stěny 0,45 mm a vzdáleností dvou stěn 1,6 mm. Na obrázku 6.27 je znázorněn díl s piny a s přiřazenými blokovými podporami.

Důvodem zvolené geometrie těchto struktur bylo snadnější odstranění podpor z ploch, na které byly aplikovány. Na obrázku 6.28 je znázorněno rozmístění čtyř představců včetně objímek na stavební platformě. Poté bylo provedeno nastavení tiskových parametrů, které jsou uvedeny v tabulce 6.6. Následně byl vygenerován tiskový soubor, který byl nahrán do tiskárny SLM 280HL od SLM Solutions se specifikacemi stroje, uvedenými v příloze C.1.



Obrázek 6.27: Generování podpůrných struktur pro tisk představců.



Obrázek 6.28: Rozložení představců na stavební desce.

Tabulka 6.6: Procesní parametry tisku pro materiál AlSi10Mg.

Výkon laseru	$350\mathrm{W}$
Skenovací rychlost	$980\mathrm{mm/s}$
Vzdálenost mezi drahami laseru	$0,12\mathrm{mm}$
Tloušťka vrstvy	$0,05\mathrm{mm}$

6.9 Simulace procesu stavby

V poslední době je simulace stavebního procesu pro práškové technologie na vzestupu, a proto byla provedena simulace stavby představce v software Ansys additive

suite. Tento software byl zapůjčen od společnosti SVSFEM s.r.o. Brno.

Proces samotné simulace je rozložen do několika po sobě jdoucích kroků. V prvním kroku je nutné definovat použitý materiál. V Knihovně materiálů, které poskytuje Ansys je předdefinovaný materiál AlSi10Mg, který byl zvolen jako výchozí materiál pro simulaci. V dalším kroku probíhá vložení CAD dat s designem, který bude simulován. V tomto kroku je nutné vytvořit stavební platformu, na kterou je model virtuálně umístěn. Následně je nutné pomocí funkcí v Ansysu přiřadit materiál k jednotlivým tělům simulačního modelu. Další nastavení je prováděno pomocí funkce průvodce, implementovaného v Ansysu. Pomocí tohoto průvodce probíhá nastavení ploch, které mají kontakt mezi dílem a stavební platformou. Dále probíhá generování podpůrných struktur, pokud již nejsou vygenerovány s modelem ve druhém kroku. V této práci byly podpory modelovány pomocí nastavení v Ansysu, jelikož CAD soubor s podpůrnou strukturou použitou pro tisk nebylo možné importovat do software kvůli své velikosti. STL soubor měl velikost 240 MB.

Velmi důležité je správné nastavení tlouštky vrstvy a parametrů, které souvisí s rychlostí laseru a vzdáleností mezi jednotlivými drahami laseru. Posledním velmi důležitým parametrem je velikost prvku, který bude simulován. Tento parametr ovlivňuje časovou náročnost výpočtu, datovou velikost a přesnost. V tabulce 6.7 jsou uvedeny všechny parametry, které byly pro tuto simulaci nastaveny. Pro tvorbu sítě byla zvolena metoda Cartesian, která je vhodná pro simulování aditivních procesů výroby. Vygenerovaná simulační sít je znázorněna na obrázku 6.29. Jako výsledek simulace byla zvolena deformační mapa.

Parametr	Hodnota
Velikost elementu stavební platformy	4 mm
Velikost elementu představce	0.7 až 1 mm
Výška vrstvy	$50\mu{ m m}$
Vzdálenost mezi drahami laseru	$0,12\mathrm{mm}$
Skenovací rychlost	$980\mathrm{mm/s}$
Aplikace podpory pro převis větší než	45°
Tlouštka stěny podpory	$0,\!45\mathrm{mm}$
Mezera mezi stěnami podpor	$1,6\mathrm{mm}$
Teplota předehřevu platformy	110 °C
Okolní teplota	25 °C
Teplota tavení	570 °C
Tepelná vodivost prášku	$8,2e-005 \text{ W/(mm^2 \cdot ^{\circ}\text{C})}$ [57]

Tabulka 6.7: Nastavené parametry pro simulaci stavby.



Obrázek 6.29: Generování sítě pro simulování stavby.

V první fázi byly provedeny 3 série simulací pro rozdílné velikosti elementů a to 1 mm, 1,5 mm a 2 mm. Pro stavební desku byla zvolena velikost elementu 4 mm. U těchto tří simulací bylo provedeno hodnocení, zda simulační model vlivem velikosti elementu nezmění geometrii modelu. Z tohoto důvodu bylo upuštěno od dalšího rozvíjení simulací s velikostí elementů 2 mm a 1,5 mm. Tyto simulační modely nebyly vhodné z důvodu spojení drážky ve svěrném spojení u hlavové trubky viz. obrázek 6.30.



Obrázek 6.30: Nevhodně zvolená velikost elementu.

Ve druhé fázi byly provedeny simulace s velikosti elementu $0,9,\ 0,8$ a $0,7\,{\rm mm}.$ Výsledky těchto simulací jsou znázorněny na obrázku6.31.Změna barevných map

je u simulací s velikostí prvků v intervalu od 0,8 mm do 1 mm s minimální změnou. Avšak u simulace s velikostí prvku 0,7 mm dochází ke změně deformace v oblasti prutů, které spojují objímku pro hlavovou trubku s objímkou pro řidítka.



Obrázek 6.31: Výsledky simulace procesu stavby.

V této fázi byly provedeny i simulace pro velikosti elementů 0,6 mm a 0,5 mm, ale tyto simulace obsahovaly přes 1,2 milionu elementů. Z důvodu velkého počtu elementů nebylo možné tyto simulace dopočítat na počítači, který byl k dispozici. V obou případech došlo k zahlcení 1 TB SSD disku před dokončením výpočtu. Při použití klasického HDD s větší kapacitou se doba výpočtu pohybovala okolo 4,5 násobku času potřebného pro simulaci s využitím SSD. Časová náročnost jednotlivých simulací je popsána v tabulce 6.8.

Vzhledem k poznatkům ze simulací s většími elementy lze očekávat stabilizaci pole posuvů u elementů s velikostí 0,6 mm a 0,5 mm. Tato domněnka by měla být potvrzena budoucími simulacemi na výkonnějším počítači.

Velikost elementu [mm]	1	0,9	0,8	0,7	$0,\!5$
Počet elementů	194612	251620	344994	485325	1600000
Celkový čas výpočtu [h:m:s]	05:51:08	08:46:20	16:28:24	25:57:46	78:00:00

Tabulka 6.8: Časová náročnost výpočtu simulací stavby.

6.10 Výroba představců

Před zahájením tisku byl naplněn stroj dostatečným množstvím prášku pro stavbu a byla předehřáta stavební platforma na teplotu 110 °C. Proces stavby je založen na nesení požadované vrstvy prášku na stavební platformu pomocí recoateru. Stírací lišta urovná povrch prášku, aby byla zaručená požadovaná výška vrstvy. Poté dochází k aktivaci laseru a v místech CAD dat předává energii pro tavení prášku. Jakmile je vrstva hotová, klesne stavební platforma o výšku vrstvy a celá procedura se znovu opakuje. Tisk těchto čtyř představců trval 1 den 6 hodin a 13 minut. Po dokončení tisku představců probíhalo chladnutí ve stavební komoře. Při dosažení teploty prášku 30 °C bylo provedeno odstranění přebytečného nespečeného prášku do odpadních nádob. Tento přebytečný prášek byl přeset, vysušen a uložen pro další použití. Na obrázku 6.32 je vidět závěr procesu odstraňování prášku.

Představce, očištěné od přebytečného prášku, byly přesunuty k operaci ručního odsekání dílů od stavební platformy a zbavení podpůrných struktur. Odstraněny byly tři představce a poslední byl ponechán na stavební platformě bez opracování. Představec ponechaný na stavební platformě byl využit pro měření rozměrové přesnosti tištěného dílu.

Zbylé představce bylo nutné začistit do finální podoby k čemuž byly využity běžně dostupně nástroje. Prvně došlo k odřezání pinů pomocí oscilační brusky. Takto odřezané představce byly zbaveny podpůrných struktur pomocí kleští. Poté byly hrubé zbytky podpor začištěny pilníky. Očištěné představce byly následně opískovány z důvodu sjednocení povrchu. Na obrázku 6.33 je znázorněno odstraňování podpůrných struktur.



Obrázek 6.32: Závěr čištění představců ve stavební komoře stroje.



Obrázek 6.33: Odstranění podpůrných struktur.

Představce, zbavené podpůrných struktur, byly naskenovány pro porovnání rozměrové přesnosti s CAD daty. Následovalo tepelné zpracování představců pro uvolnění vnitřního pnutí (SR). Dalším krokem bylo obrábění všech dosedacích ploch

včetně vytvoření závitů pro šrouby. Pro snazší manipulaci při obrábění byly pomocí technologie FFF vytisknuty přípravky, které zajistily přesnou polohu představce při obrábění. Tyto přípravky jsou zobrazeny na obrázku 6.34. Přípravek se skládal ze dvou částí, které k sobě byly sešroubovány a tvořily tak jeden celek. Na obrázku 6.35 je představec po obrábění. Takto obrobené představce byly podrobeny testování funkčnosti.



Obrázek 6.34: Přípravek pro obrábění funkčních ploch.



Obrázek 6.35: Obrobený představec.

6.11 Analýza tvarové přesnosti

Po vyrobení představců bylo nutné provést analýzu tvarové přesnosti. Pro vyhodnocování byla zvolena technologie 3D skenování. Tato technologie je velmi vhodná pro hodnocení 3D tištěných komponentů, jelikož nabízí vyhodnocení všech složitých ploch, na které vidí kamery skeneru.

Skenování bylo provedeno na skeneru Range Vision Spectrum, jehož specifikace jsou uvedeny v tabulce 6.9. U tohoto skeneru je skenování prováděno na strukturované světlo s použitým malým objemem pro nejpřesnější výsledky skenů. Při skenování bylo použito referenčních bodů a funkce zpřesňování podle geometrie. U některých představců, zbavených podpůrných struktur, byl použit indexovaný rotační stůl.

Parametr	Hodnota
Rozlišení kamer	3,1 Mpx
Skenovací objem	$133 \times 100 \times 100 \mathrm{mm}$
Doporučená velikost objektu	$0,01$ až $0,4{\rm m}$
Přesnost bodu	$0,04\mathrm{mm}$
Rozlišení - hustota bodu	$0,072\mathrm{mm}$
Pracovní vzdálenost od skeneru	$0,3\mathrm{m}$

Tabulka 6.9: Specifikace skeneru Range Vision Spectrum.

6.11.1 Skenování představců

Celkem byly vyrobeny 4 představce, z nichž byl jeden ponechán na stavební desce. Na tomto představci byla provedena analýza přesnosti přímo po stavbě a po TZ. Dále bylo provedeno skenování představce s odstraněnými podporami před a po TZ. Poslední fází pro všechny 4 představce bylo skenování po zatěžovacích zkouškách.

Skenování představce na stavební desce bylo provedeno s využitím referenčních bodů. Celkem bylo vytvořeno 31 skenů z různých úhlů, aby bylo zaručeno zachycení celého představce. Výsledné mračno bodů obsahovalo 42 milionů bodů a je zobrazeno na obrázku 6.36a). Z těchto bodů byla vygenerována STL síť pro porovnání s CAD daty v softwaru GOM Inspect 2019.

Skenování představců bez podpůrných struktur bylo provedeno s využitím indexovaného rotačního stolu. Díky tomu bylo možné představce naskenovat ze všech stran. Celkem bylo vytvořeno 40 skenů, které obsahovaly 73 milionů bodů. Toto mračno bodů je znázorněno na obrázku 6.36b).



b)

Obrázek 6.36: Výstupní mračna bodů z 3D skeneru.

7 Výsledky

V této kapitole jsou popsány a diskutovány výsledky skenování představců a zhodnocení zatěžovacích zkoušek na reálných představcích. Dále je provedeno porovnání aditivně vyráběných představců s běžně prodávanými, včetně finančního zhodnocení.

7.1 Rozměrová analýza představců

Všechny představce byly naskenovány a výsledná STL síť byla použita pro porovnání s CAD daty, které byly použity pro tisk představců. Zarovnání STL sítě vůči CAD datům bylo realizováno pomocí globálního best fitu. Volba testovacích bodů, ve kterých je zkoumána odchylka, je zobrazena na obrázku 7.1. Tyto body byly zvoleny na plochách, kde se nenacházely podpůrné struktury z důvodu možného vnesení chyby do měření způsobeného nešetrným odstraňováním podpůrných struktur. Porovnání bude prováděno na představcích před TZ a po TZ.



Obrázek 7.1: Zvolené body pro měření deformace.

7.1.1 Analýza představce na stavební platformě

Představec, ponechaný na stavební platformě, byl skenován před i po TZ. Představec před TZ byl zarovnán na CAD data s odchylkou $0,07\,\mathrm{mm}$. Představec po TZ byl zarovnán s odchylkou $0,08\,\mathrm{mm}$. Barevné mapy deformací jsou na obrázcích 7.2

a 7.3. Dále je přiložena tabulka 7.1 měřených bodů pro porovnání deformací vzniklých během procesu tepelného zpracování. Z hodnot v tabulce lze sledovat pouze minimální změny v řádech setin milimetrů.



Obrázek 7.2: Mapa odchylek pro představec na desce bez tepelného zpracování.



Obrázek 7.3: Mapa odchylek pro představec na desce s tepelným zpracováním.

		Měřící bod					
	Jednotky	1	2	3	4	5	6
Bez TZ	[mm]	0,12	-0,15	0,08	0,03	-0,14	0,07
TZ SR	[mm]	0,09	-0,11	0,09	0,05	-0,08	0,09
		Měřící bod					
	Jednotky	7	8	9	10	11	12
Bez TZ	[mm]	0,06	0,07	0,11	0,14	0,15	-0,02
TZ SR	[mm]	0,08	0,13	0,18	0,21	0,14	0,04

Tabulka 7.1: Hodnoty měřených odchylek od CAD dat pro představec umístěný na stavební platformě.

7.1.2 Analýza představce po zbavení podpůrných struktur

Představec, zbavený podpůrných struktur, byl skenován před i po TZ. Představec před TZ byl zarovnán na CAD data s odchylkou 0,10 mm. Představec po TZ byl zarovnán s odchylkou 0,07 mm. Barevné mapy deformací jsou na obrázcích 7.4 a 7.5. Dále je přiložena tabulka měřených bodů pro porovnání deformací vzniklých během procesu tepelného zpracování. Z tabulky 7.2 je možné sledovat změny v řádech setin milimetrů až desetin milimetrů.



Obrázek 7.4: Mapa odchylek pro představec bez tepelného zpracování.



Obrázek 7.5: Mapa odchylek pro představec s tepelným zpracováním.

Tabulka 7.2: Hodnoty měřených odchylek od CAD dat pro představce odřezané od stavební platformy.

			Měří	cí bod			
	Jednotky	1	2	3	4	5	6
Bez TZ	[mm]	0,21	-0,17	0,06	0,02	-0,17	0,08
TZ SR	[mm]	0,22	-0,07	0,20	0,14	-0,09	0,17
	Měřící bod						
	Jednotky	7	8	9	10	11	12
Bez TZ	[mm]	0,07	0,11	0,23	0,21	0,22	-0,02
TZ SR	[mm]	0,12	0,23	0,27	0,28	0,21	0,07

Výsledky skenování po odstranění podpůrných struktur mají větší odchylky od CAD dat. Tato skutečnost je způsobena zbytkovým napětím v představcích, které bylo při odstranění podpor uvolněno a vedlo k větší deformaci. U představce na stavební platformě nemohlo dojít k takové deformaci, protože podpůrné struktury zabraňují pohybu.

7.2 Výsledky zatěžovacích zkoušek

Všechny zkoušky, uvedené v podkapitole 6.5 byly provedeny v laboratořích Strojírenského zkušebního ústavu, s.p. v Jablonci nad Nisou. Po zkoušce byly představce naskenovány a byla zhodnocena jejich trvalá deformace. Při hodnocení byla použita CAD data s obrobenými plochami. V příloze E je k dispozici protokol jednotlivých provedených zkoušek.

7.2.1 Zkouška bočním ohybem

První zkouškou byl boční ohyb. Ustavení představce do testovacího přípravku je znázorněno na obrázku 7.6.



Obrázek 7.6: Sestava řídítek a představce - zkouška bočním ohybem (ČSN EN ISO 4210-5 čl. 4.3).

Šrouby na objímkách byly dotaženy na moment 5 Nm. Síla požadována normou byla vyvozena pomocí pneumatického válce. V místě působení síly byl měřen posuv řidítek. Maximální hodnota posuvu je dána normou ČSN EN ISO 4210-5:2014. Tato hodnota je 15 mm. Výsledná naměřená deformace byla 14,72 mm. Tato zkouška byla uznána jako splněná. Hodnota posuvu, která vzešla ze simulace uvedené v části 6.7.1 je 13,4 mm. Z těchto výsledků je možné, že mechanické vlastnosti, které byly použity v simulaci pro řidítka se mírně liší od reálných mechanických vlastností dané slitiny hliníku.

Analýza deformace po této zkoušce byla provedena se zarovnání na CAD data s odchylkou 0,14 mm. Na obrázku 7.7 je barevná mapa trvalých deformací, vzniklých při testu. Při této zkoušce vznikla trvalá deformace z důvodu výskytu napětí nad mezí kluzu použitého materiálu.



Obrázek 7.7: Mapa odchylek po provedení zkoušky dle normy ČSN EN ISO 4210-5 čl. 4.3.

7.2.2 Zkouška ohybem vpřed

Druhou zkouškou byl ohyb vpřed. Ustavení představce do testovacího přípravku je znázorněno na obrázku 7.8.



Obrázek 7.8: Sestava řídítek a představce - zkouška ohybem v
před (ČSN EN ISO 4210-5 čl. 4.4).
Výsledná naměřená deformace byla 0,05 mm. Norma ČSN EN ISO 4210-5:2014 u této zkoušky stanovuje maximální průhyb 10 mm. Simulace představce v MKP předpokládala maximální průhyb 0.928 mm. Tato zkouška byla uznána jako splněná.

Při této zkoušce mají běžně vyráběné představce velké obtíže a existuje riziko selhání, způsobené větším posuvem v místě působiště síly.

Analýza deformace byla provedena se zarovnáním na CAD data s odchylkou 0,13 mm. Na obrázku 7.9 je barevná mapa trvalých deformací. Bohužel u tohoto představce nelze hodnotit deformace dosedací plochy pro řidítka z důvodu obrábění, které bylo vyoseno o 0,5 mm od požadovaného středu pro obrábění. Z tohoto důvodu lze hodnotit posuv pouze na vnější ploše objímky.



Obrázek 7.9: Mapa odchylek po provedení zkoušky dle ČSN EN ISO 4210-5 čl. 4.4.

7.2.3 Únavové zkoušky na vytištěných představcích

Třetí zkouškou byly únavové zkoušky. Ustavení představce do testovacího přípravku je znázorněno na obrázku 7.10.

Tato zkouška je rozdělena do dvou etap. Při první etapě, při které dochází ke střídavému krutu, došlo k prasknutí představce po 3022 cyklech. Norma ukládá minimální počet 100000 cyklů. Druhá etapa, kde je vyvozován střídavý ohyb, byla provedena na novém představci. Tato etapa byla úspěšná s dosaženými 100000 cykly.

Dále bylo provedeno skenování porušeného představce z první etapy a porovnáno s CAD modelem. Na obrázku 7.11 je možné vidět, jak se během této zkoušky představec zdeformoval. Představec podrobený první etapě praskl v místě špičkového napětí, zobrazeném na obrázku 7.12 ze simulace pomocí MKP. Toto selhání mohlo být způsobeno vytvořením vrubu v daném místě při ručním opracování.



Obrázek 7.10: Sestava řídítek a představce - únavová dynamická zkouška (ČSN EN ISO 4210-5 čl. 4.9).



Obrázek 7.11: Mapa odchylek po provedení zkoušky dle ČSN EN ISO 4210-5 čl. 4.9.

Na obrázku 7.12 jsou znázorněna místa prasknutí struktury představce včetně napěťové analýzy. Nejdříve nastalo porušení v místě 1, které mělo za následek oddělení prutu od objímky. Následovala změna směru zatížení, které nedokázala objímka s absencí jednoho prutu vydržet a proto došlo k jejímu poškození. Na obrázku 7.13 je viditelné reálné poškození představce.



Obrázek 7.12: Kontrola napětí s využitím MKP pro zatížení dle ČSN EN ISO 4210-5 čl. 4.9 etapa 1.



Obrázek 7.13: Destrukce představce při zatížení dle ČSN EN ISO 4210-5 čl.4.9 etapa 1.

7.3 Porovnání aditivních představců s běžným představcem

Pro porovnání s běžnými představci byla zvolena hmotnost jako referenční parametr. Běžně vyráběné představce na kolo bývají již velmi lehké, avšak v této práci bylo docíleno snížení hmotnosti oproti běžně prodávanému představci od firmy Force. V tabulce 7.3 jsou uvedeny hmotnosti těl představců a objímek. Měření hmotnosti bylo provedeno na laboratorní váze Denver instruments DL-501 a šrouby byly použity pro všechna měření stejné. Snížení hmotnosti je o 8,66 % ve prospěch 3D tištěného představce.

	Hmotnost [g]			
	Tělo	Objímka	Šrouby	Sestava
Představec 1	89,6	10,1	22,8	122,5
Představec 2	89,3	10,2	22,8	122,3
Představec 3	89,0	10,3	22,8	122,1
Představec 4	88,3	10,1	22,8	121,2
Představec Force	96,7	14,1	22,8	$133,\!6$

Tabulka 7.3: Měření hmotnosti sestavy představce včetně šroubů.

Tento výsledek je velmi pozitivní s přihlédnutím na skutečnost, že komerčně vyráběné představce mají nižší odolnost při ohybu vpřed. Při tomto testu se běžně dostupné představce blíží k limitu deformace definované normou. Představec je tedy tužší oproti běžně prodávaným, což je jedna z jeho hlavních výhod.

7.4 Cenová rozvaha

Důležitým faktorem pro koupi představce není jenom jeho hmotnost, tuhost a použité materiály, ale také cena. Představce pro nenáročného koncového zákazníka se pohybují s cenou mezi 400 až 1 200 Kč. Pokud se jedná o speciální představce z lehčích materiálů s použitím titanových šroubů, případně představců vyrobených z karbonových vláken, cena se pohybuje v intervalu od 2 500 Kč do 8 000 Kč.

7.4.1 Finanční náročnost výroby

Poslední fází této práce bylo zhodnocení finanční náročnosti výroby takového představce. K výrobě byla použita technologie SLM, která se řadí mezi dražší technologie aditivní výroby a to z důvodu pořizovací ceny stroje v hodnotě 17 milionů Kč. Dále byl využit pro výrobu materiál AlSi10Mg, u kterého je cena 90 €/kg. Následně do finální ceny vstupují náklady na frézování stavební platformy, obrábění funkčních ploch představce a poměrná část ceny filtrů, potřebných pro filtraci spalin během stavby.

Celková cena za představec je dále závislá na množství dílů, které jsou vyráběny na platformě. Z tabulky 7.4 je možné vidět jak se mění cena za jeden kus při zvyšování počtu kusů na stavební platformě. Z tohoto důvodu je vhodné vyrábět co nejvíce dílů najednou, aby se náklady rozdělily mezi velké množství výrobků. V této práci byly vyrobeny 4 představce a cena jednoho představce je 10 800 Kč.

Počet kusů	\check{C} as [h:m:s]	Cena za kus [Kč]
1	18:38:00	32327
3	21:43:00	12708
4	30:13:00	10800
6	40:05:00	9400

Tabulka 7.4: Celková cena představce s různým zaplněním stavební platformy.

Pokud je však provedena změna orientace dílu na výšku, je možné tisknout až 12 kusů najednou s cenou pohybující se okolo 4 500 Kč/ks včetně obrábění. V tomto případě jsou pruty stavěny na výšku a hrozí zde výskyt horších mechanických vlastností a možné selhání představců při zkouškách dle normy ČSN EN ISO 4210-5:2014

Pro finální porovnání byla použita cena jednoho kusu při zaplněné platformě s testovanou orientací představce. Výsledná cena aditivně vyráběného představce je o 17,5 % dražší než běžně vyráběný karbonový představec. Aditivně vyráběné představce jsou konkurence schopné pouze pro nejnáročnější zákazníky, kteří se chtějí odlišit, případně hledají specifické mechanické vlastnosti, které budou vyhovovat jejich požadavkům.

8 Závěr

Cílem této práce bylo zmapovat proces návrhu dílu se zaměřením na výrobu pomocí aditivních technologií. Po úvodním seznámení s tématem a provedení rešerše na dané téma byla jako základní metoda návrhu zvolena topologická optimalizace. Tento postup nabízí maximální využití materiálu na navrhovaném dílu s ohledem na znalost vnějšího zatížení. Jako referenční díl byl zvolen představec horského kola. Optimalizovaná součást pak měla být, vzhledem ke své funkci a zatížení, vyrobena ze slitiny AlSi10Mg aditivní technologií Selective Laser Melting. Před realizací samotné stavby bylo nutné otestovat základní vlastnosti zvolené technologie a materiálu, aby se předešlo selhání dílu nedostatečnou pevností materiálu nebo jeho vysokou porozitou.

V první fázi bylo provedeno vyhodnocení mechanických testů, tepelného zpracování a použitých skenovacích strategií. Z měření porozity vzorku vykazovala menší hodnotu porozity šrafovací strategie, a proto byla použita pro další fáze této práce. Porovnáním mechanických vlastností tištěných tahových vzorků, které byly tepelně zpracovány se vzorky, u kterých nebylo provedeno tepelné zpracování bylo zjištěno nepříznivé tažnosti u vertikálních vzorků bez tepelného zpracování. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o aplikování tepelného zpracování na finální díl. Získané hodnoty mechanických vlastností byly použity při definování topologické optimalizace a kontrolních výpočtů s využitím MKP.

Topologická optimalizace byla provedena na požadovanou váhu 100 g. Výsledný optimalizovaný design byl upraven s ohledem na viditelné koncentrátory napětí převyšující mez pevnosti materiálu. Upravený design byl použit pro simulace zatížení pomocí MKP. Výsledky se pohybovaly v elastické oblasti zvoleného materiálu. Na designu vznikaly pouze lokální koncentrátory napětí převyšující mez kluzu.

Další fází byla simulace stavby daného představce. Při simulování procesu byla zjištěna téměř exponenciální závislost doby simulace na velikosti použitého elementu. Z výsledků simulace bylo možné sledovat deformace, vzniklé na představci, během samotné stavby. Ověření, zda se simulace přiblížila reálné deformaci, vzniklé na představcích, není možné přesně dokázat s ohledem na hrubost sítě. Pro hrubé ověření byla provedena digitalizace představce pomocí 3D skeneru. Odchylky skenovaného představce od vstupných dat byly stejného řádu jako odchylky simulace. Z tohoto ohledu lze přínos simulace hodnotit kladně.

Další fází bylo provedení experimentálních testů, které jsou definovány normou. Celkem byly provedeny 4 zkoušky. Obě statické zkoušky (zkouška bočním ohybem a ohybem vpřed) byly úspěšné. Při ohybu vpřed byla deformace pouhých 0,05 mm, což znamená, že použitý design vytváří velmi tuhou konstrukci. Po těchto dvou testech následovaly únavové zkoušky. V první etapě, při které dochází ke střídavému krutu, představec praskl v místě koncentrátoru napětí. Toto selhání bylo způsobeno vytvořením vrubu při odstraňování podpůrných struktur. Při dalším rozvíjení této práce bude dané místo zesíleno s ohledem na možné poškození hůře dostupného místa nástrojem na odstraňování podpůrných struktur. Pro druhý pokus na únavové zkoušky bylo rozhodnutu o vynechání první etapy a přestoupení na etapu 2. Důvodem tohoto rozhodnutí byla skutečnost, že byly vyrobeny pouze 4 představce a pokud by došlo k destrukci, nebylo by možné ověřit druhou etapu únavové zkoušky. Cyklické zatížení vyvozené ve druhé etapě představec vydržel bez vzniku praskliny.

Poslední fází bylo zhodnocení finanční náročnosti při tisku, ze které vzešla cena 9400 Kč za představec. Tato cena se vztahuje na tiskovou orientaci, použitou v rámci práce a maximálním zaplnění stavební platformy. Daná cena je konkurenceschopná pouze v nejdražším segmentu představců pro horská kola.

Použitá literatura

- KRUTH, Jean-Pierre; MERCELIS, Peter; VAERENBERGH, J Van; FROYEN, Ludo; ROMBOUTS, Marleen. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*. 2005, roč. 11, č. 1, s. 26–36.
- [2] O'CONNOR, Heather J; DICKSON, Andrew N; DOWLING, Denis P. Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 22, s. 381–387.
- [3] NOVAKOVA-MARCINCINOVA, Ludmila; KURIC, Ivan. Basic and advanced materials for fused deposition modeling rapid prototyping technology. *Manuf.* and Ind. Eng. 2012, roč. 11, č. 1, s. 24–27.
- [4] THOMPSON, Yvonne; GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin; KUKLA, Christian; FELFER, Peter. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel. Additive Manufacturing. 2019, roč. 30, s. 100861.
- [5] GIBSON, Ian; ROSEN, David W; STUCKER, Brent et al. Additive manufacturing technologies. Springer, 2014.
- [6] WANG, Jie; GOYANES, Alvaro; GAISFORD, Simon; BASIT, Abdul W. Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms. *International journal of pharmaceutics.* 2016, roč. 503, č. 1-2, s. 207–212.
- [7] VARGHESE, Giftymol; MORAL, Mónica; CASTRO-GARCÍA, Miguel; LÓ-PEZ-LÓPEZ, Juan José; MARÍN-RUEDA, Juan Ramón; YAGÜE-ALCA-RAZ, Vicente; HERNÁNDEZ-AFONSO, Lorena; RUIZ-MORALES, Juan Carlos; CANALES-VÁZQUEZ, Jesus. Fabrication and characterisation of ceramics via low-cost DLP 3D printing. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.* 2018, roč. 57, č. 1, s. 9–18.
- [8] ADAM, Guido AO; ZIMMER, Detmar. Design for Additive Manufacturing— Element transitions and aggregated structures. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2014, roč. 7, č. 1, s. 20–28.
- [9] GIBSON, Ian; ROSEN, David W; STUCKER, Brent. Design for additive manufacturing. In: Additive Manufacturing Technologies. Springer, 2010, s. 299– 332.

- [10] BIKAS, H; LIANOS, AK; STAVROPOULOS, P. A design framework for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, roč. 103, č. 9-12, s. 3769–3783.
- [11] BOOTH, Joran W; ALPEROVICH, Jeffrey; CHAWLA, Pratik; MA, Jiayan; REID, Tahira N; RAMANI, Karthik. The design for additive manufacturing worksheet. *Journal of Mechanical Design*. 2017, roč. 139, č. 10.
- [12] SIGMUND, Ole; MAUTE, Kurt. Topology optimization approaches. *Structu*ral and Multidisciplinary Optimization. 2013, roč. 48, č. 6, s. 1031–1055.
- [13] BENDSOE, Martin Philip; SIGMUND, Ole. Topology optimization: theory, methods, and applications. Springer Science & Business Media, 2013.
- [14] CARDOSO, E. L.; FONSECA, J. S. O. Complexity control in the topology optimization of continuum structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2003, roč. 25, s. 293–301. ISSN 1678-5878.
- [15] BENDSØE, Martin P; SIGMUND, Ole. Material interpolation schemes in topology optimization. Archive of applied mechanics. 1999, roč. 69, č. 9-10, s. 635–654.
- [16] TYFLOPOULOS, Evangelos; TOLLNES, Flem David; STEINERT, Martin; OLSEN, Anna et al. State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs. DS 91: Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14th-17th August 2018. 2018.
- [17] ZHAO, Fei. A nodal variable ESO (BESO) method for structural topology optimization. *Finite elements in Analysis and Design.* 2014, roč. 86, s. 34–40.
- [18] ACKERMANN, Michal; ŠAFKA, Jiří; VOLESKÝ, Lukáš. Selective Laser Melting technology and manufacturing of accurate thin structures. In: *Materials Science Forum*. 2016, sv. 862, s. 104–111.
- [19] LIVERANI, E; FORTUNATO, A; LEARDINI, A; BELVEDERE, C; SIE-GLER, S; CESCHINI, L; ASCARI, A. Fabrication of Co--Cr--Mo endoprosthetic ankle devices by means of Selective Laser Melting (SLM). *Materials & Design.* 2016, roč. 106, s. 60–68.
- [20] STACKPOLE, Beth. Materialise Takes the Pain Out of Support Generation for Metal 3D Printing. 2017. Dostupné také z: https://www. digitalengineering247.com/article/materialise-takes-the-pain-out-of-supportgeneration-for-metal-3d-printing/.
- [21] LEON, Avi; AGHION, Eli. Effect of surface roughness on corrosion fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting (SLM). *Materials Characterization.* 2017, roč. 131, s. 188–194.
- [22] CRAEGHS, Tom; CLIJSTERS, Stijn; YASA, Evren; BECHMANN, Florian; BERUMEN, Sebastian; KRUTH, Jean-Pierre. Determination of geometrical factors in Layerwise Laser Melting using optical process monitoring. Optics and Lasers in Engineering. 2011, roč. 49, č. 12, s. 1440–1446.

- [23] ALGARA MUÑOZ, Victor. Analysis of the optimal parameters for 3D printing aluminum parts with a SLM 280 machine. 2017. Diplomová práce. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [24] YAP, Chor Yen; CHUA, Chee Kai; DONG, Zhi Li; LIU, Zhong Hong; ZHANG, Dan Qing; LOH, Loong Ee; SING, Swee Leong. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*. 2015, roč. 2, č. 4, s. 041101.
- [25] KRUTH, Jean-Pierre; BADROSSAMAY, Mohsen; YASA, Evren; DECKERS, Jan; THIJS, Lore; VAN HUMBEECK, Jan. Part and material properties in selective laser melting of metals. In: *Proceedings of the 16th international* symposium on electromachining. 2010.
- [26] DI, Wang; YONGQIANG, Yang; XUBIN, Su; YONGHUA, Chen. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, roč. 58, č. 9-12, s. 1189–1199.
- [27] PENG, Tao; CHEN, Chao. Influence of energy density on energy demand and porosity of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2018, roč. 5, č. 1, s. 55–62.
- [28] NGUYEN, QB; LUU, DN; NAI, SML; ZHU, Z; CHEN, Z; WEI, J. The role of powder layer thickness on the quality of SLM printed parts. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, roč. 18, č. 3, s. 948–955.
- [29] KRUTH, Jean-Pierre; VANDENBROUCKE, Ben; VAN VAERENBERGH, Jonas; MERCELIS, Peter. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. In: Proceedings of the International Conference Polymers & Moulds Innovations PMI 2005. 2005.
- [30] CHENG, Bo; SHRESTHA, Subin; CHOU, Kevin. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. Additive Manufacturing. 2016, roč. 12, s. 240–251.
- [31] SULAIMAN, Muhammad Rafi; YUSOF, Farazila; JAMALUDIN, Mohd Fadzil Bin. Effect of Support Structure Design on the Part Built Using Selective Laser Melting. In: Advances in Material Sciences and Engineering. Springer, 2020, s. 275–286.
- [32] ZHA, Wentao; ANAND, Sam. Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015, roč. 20, s. 465–477.
- [33] ALI, Haider; GHADBEIGI, Hassan; MUMTAZ, Kamran. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A.* 2018, roč. 712, s. 175– 187.

- [34] HAN, Jitai; WU, Meiping; GE, Yanan; WU, Jianguo. Optimizing the structure accuracy by changing the scanning strategy using selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 95, č. 9-12, s. 4439–4447.
- [35] YASA, Evren; DECKERS, Jan; CRAEGHS, Tom; BADROSSAMAY, Mohsen; KRUTH, Jean-Pierre. Investigation on occurrence of elevated edges in selective laser melting. In: *International Solid Freeform Fabrication Symposi*um, Austin, TX, USA. 2009, s. 673–85.
- [36] TIAN, Yang; TOMUS, Dacian; ROMETSCH, Paul; WU, Xinhua. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2017, roč. 13, s. 103–112.
- [37] GEBHARDT, Andreas; HÖTTER, Jan-Steffen; ZIEBURA, Dawid. Impact of SLM build parameters on the surface quality. In: *RTejournal-Forum für Rapid Technologie*. 2014, sv. 2014. Č. 1.
- [38] ZAEH, Michael F; BRANNER, Gregor. Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting. *Production Engineering*. 2010, roč. 4, č. 1, s. 35–45.
- [39] ZYGUŁA, Krystian; NOSEK, Bartłomiej; PASIOWIEC, Hubert; SZYSIAK, Norbert. Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique. 2018, roč. 104, s. 462–472.
- [40] MAESHIMA, Takashi; OH-ISHI, Keiichiro. Solute clustering and supersaturated solid solution of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Heliyon.* 2019, roč. 5, č. 2, s. e01186.
- [41] LIU, Bin; KUAI, Zezhou; LI, Zhonghua; TONG, Jianbin; BAI, Peikang; LI, Baoqiang; NIE, Yunfei. Performance Consistency of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Simulating Multi Laser Beam Selective Laser Melting (SLM): Microstructures and Mechanical Properties. *Materials.* 2018, roč. 11, č. 12, s. 2354.
- [42] KEMPEN, Karolien; THIJS, Lore; VAN HUMBEECK, Jan; KRUTH, J-P. Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*. 2012, roč. 39, s. 439–446.
- [43] BUCHBINDER, D; SCHLEIFENBAUM, H; HEIDRICH, S; MEINERS, W; BÜLTMANN, JJPP. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts. *Physics Procedia*. 2011, roč. 12, s. 271–278.
- [44] ROSENTHAL, I; TIFERET, E; GANOR, M; STERN, A. Post-processing of am-slm alsi10mg specimens: Mechanical properties and fracture behaviour. Ann. Dunarea de Jos Univ. Galati Fascicle XII Weld. Equip. Technol. 2015, roč. 26, s. 33–38.

- [45] LI, Wei; LI, Shuai; LIU, Jie; ZHANG, Ang; ZHOU, Yan; WEI, Qingsong; YAN, Chunze; SHI, Yusheng. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A.* 2016, roč. 663, s. 116–125.
- [46] ROSENTHAL, Idan; STERN, Adin; FRAGE, Nachum. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg parts produced by the laser beam additive manufacturing (AM) technology. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2014, roč. 3, č. 6, s. 448–453.
- [47] UZAN, Naor Elad; SHNECK, Roni; YEHESKEL, Ori; FRAGE, Nachum. Fatigue of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing selective laser melting (AM-SLM). *Materials Science and Engineering: A.* 2017, roč. 704, s. 229–237.
- [48] LIU, Yang; YANG, Yongqiang; WANG, Di. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, roč. 87, č. 1-4, s. 647– 656.
- [49] ZAKAY, Amit; AGHION, Eli. Effect of post-heat treatment on the corrosion behavior of AlSi10Mg alloy produced by additive manufacturing. *Jom.* 2019, roč. 71, č. 3, s. 1150–1157.
- [50] TRADOWSKY, U; WHITE, J; WARD, RM; READ, N; REIMERS, W; AT-TALLAH, MM. Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development. *Materials & Design.* 2016, roč. 105, s. 212–222.
- [51] BRANDL, Erhard; HECKENBERGER, Ulrike; HOLZINGER, Vitus; BUCHBINDER, Damien. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design.* 2012, roč. 34, s. 159–169.
- [52] SEBASTIAN. *Titan Quill Stem.* 2019. Dostupné také z: https://www.bikemailorder.com/factory-five-titan-quill-stem.
- [53] ISO, EN. 6892-1. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature. *International Organization for Standardization*. 2009.
- [54] ČSN EN, ISO. 4210-5. Jízdní kola Bezpečnostní požadavky na jízdní kola -Část 5: Zkušební metody pro řízení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014.
- [55] *Mechanické vlastnosti Al6061*. Dostupné také z: http://asm.matweb.com/ search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6.
- [56] PŘEUČIL, Tomáš. Mechanické vlastnosti ocelových šroubů. 2019. Dostupné také z: https://www.sroubamatka.cz/cs/technicke-informace/mechanickevlastnosti-ocelovych-sroubu.html.

[57] PEI, Wei; ZHENGYING, Wei; ZHEN, Chen; JUNFENG, Li; SHUZHE, Zhang; JUN, Du. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A*. 2017, roč. 123, č. 8, s. 540.

Přílohy

Α	Výsledky mechanických vlastností	87
В	Výsledky MKP analýzy krajních stavů cyklického namáhání	92
С	Zařízení použité pro výrobu představců	96
D	Výpočetní zařízení	97
E	Protokol ze zkoušky představce dle normy ČSN EN ISO 4210- -5:2014	98

A Výsledky mechanických vlastností

Tabulka A.1: Tabulka výsledných hodnot z tahové zkoušky pro vertikální vzorky s TZ.

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$\varepsilon_{b} [\%]$	E [GPa]	$\emptyset d[\text{mm}]$
1	180	301	6,08	33,0	5,97
2	184	302	6,33	60,5	5,98
3	184	304	5,92	52,5	5,97
4	185	298	6,94	33,7	5,96
5	180	299	7,07	50,3	5,96
$\bar{x}\pm s$	$182,\!6{\pm}2,\!2$	$_{300,8\pm2,1}$	$_{6,47\pm0,51}$	$46,0{\pm}10,9$	

Tabulka A.2: Tabulka výsledných hodnot z tahové zkoušky pro vertikální vzorky bez TZ.

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$\varepsilon_{b} [\%]$	E [GPa]	
1	263	348	1,43	-	5,96
2	252	330	1,19	-	$5,\!95$
3	231	335	1,58	-	$5,\!97$
4	249	358	1,90	-	$5,\!98$
5	230	328	1,41	-	$5,\!97$
$\bar{x}\pm s$	$245,0{\pm}12,7$	$339,8{\pm}11,5$	$1,\!48{\pm}0,\!27$	-	

Tabulka A.3: Tabulka výsledných hodnot z tahové zkoušky pro obrobené horizontální vzorky s TZ.

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	ε_{b} [%]	E [GPa]	$\emptyset d[mm]$
1	208	334	$5,\!55$	92,9	6,01
2	215	332	4,81	74,0	6,00
3	216	331	4,91	57,3	6,02
$\bar{x}\pm s$	$213,0{\pm}3,6$	$_{332,3\pm1,2}$	$5,09{\pm}0,41$	$74,8{\pm}14,5$	

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$\varepsilon_{b} [\%]$	$E\left[\mathrm{GPa}\right]$	$\emptyset d[mm]$
1	257	420	5,22	82,9	6,00
2	241	429	7,84	65,9	5,99
3	257	411	4,71	64,8	6,00
$\bar{x}\pm s$	$251,7{\pm}7,5$	$420,0{\pm}7,3$	$5,92{\pm}1,68$	$71,2{\pm}8,3$	

Tabulka A.4: Tabulka výsledných hodnot z tahové zkoušky pro obrobené horizontální vzorky bez TZ.

Tabulka A.5: Tabulka výsledných hodnot z tahové zkoušky pro horizontální vzorky bez TZ.

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	ε_{b} [%]	E [GPa]	
1	223	378	4,98	54,2	6,00
2	213	381	5,70	91,6	6,01
3	217	368	4,44	66,1	6,01
4	211	376	5,63	66,8	6,03
5	221	381	5,20	66,8	6,01
$\bar{x} \pm s$	$217,0{\pm}4,60$	$376,8{\pm}4,8$	$5,\!19{\pm}0,\!51$	$69,2{\pm}12,3$	

Tabulka A.6: Tabulka výsledných hodnot z tahové zkoušky pro horizontální vzorky s TZ.

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$\varepsilon_{b} [\%]$	$E\left[\mathrm{GPa}\right]$	$\emptyset d[\text{mm}]$
1	229	362	7,33	59,1	6,01
2	223	357	6,69	63,5	6,04
3	220	350	5,85	77,3	6,05
4	227	359	7,35	48,2	6,04
5	237	356	5,32	34,4	6,03
$\bar{x}\pm s$	$227,2{\pm}5,8$	$356,8{\pm}4,0$	$6{,}51{\pm}0{,}9$	$56,5{\pm}14,5$	



Obrázek A.1: Graf průběhu tahové zkoušky s vertikální orientací bez TZ.



Obrázek A.2: Graf průběhu tahové zkoušky s horizontální orientací bez TZ.



Obrázek A.3: Graf průběhu tahové zkoušky s horizontální orientací s TZ.



Obrázek A.4: Graf tahové zkoušky obrobeno horizontální orientace bez TZ.



Obrázek A.5: Graf tahové zkoušky obrobeno horizontální orientace s TZ.

B Výsledky MKP analýzy krajních stavů cyklického namáhání



Obrázek B.1: Mapa napětí pro 1. etapu únavové zkoušky.



Obrázek B.2: Mapa deformace pro 1. etapu únavové zkoušky.



Obrázek B.3: Mapa deformace pro 2. etapu únavové zkoušky zatížení pro záporné vertikální síly.



Obrázek B.4: Mapa napětí pro 2. etapu únavové zkoušky zatížení pro záporné vertikální síly.



Obrázek B.5: Mapa deformace pro 2. etapu únavové zkoušky zatížení pro kladné vertikální síly.



Obrázek B.6: Mapa napětí pro 2. etapu únavové zkoušky zatížení pro kladné verti-kální síly.

C Zařízení použité pro výrobu představců



Obrázek C.1: Zařízení SLM 280HL (SLM Solutions AG).

Stavební prostor	$280 \times 280 \times 350 \mathrm{mm}$
Typ laseru	yb:YAG $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$
Výkon laseru	$400\mathrm{W}$
Tloušťka vrstvy	20-75 μm
Maximální rychlost skenování	$10000\mathrm{mm/s}$
Maximální předehřev platformy	$200^{\circ}\mathrm{C}$
Průtok Ar/N_2 v procesu	$2,5 \mathrm{l/min}$

Tabulka C.1: Pamametry stroje SLM 280HL

D Výpočetní zařízení

Procesor	Intel Xeon E-2146G v, 6 jader - 3,50 GHz
Grafická karta	Quadro P2000 - 5GB
Ram	64GB - DDR4
SSD	1TB

Tabulka D.1: Výpočetní stanice použita pro simulace.

E Protokol ze zkoušky představce dle normy ČSN EN ISO 4210-5:2014



Strana 1 z 3 stran



PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 39-14727/JP

Výrobek:

Představec na horská kola

Objednatel:

Výrobce:

Technická univerzita v Liberci Studentská 1402/2 460 01 Liberec, Česká republika

Není blíže specifikován

Odpovědný pracovník: Ing. Aleš Pleskot

Datum vydání protokolu: 2020-05-12

Rozdělovník:

1x SZÚ, s.p. 1x objednatel



Zkoušky byly provedeny na základě těchto dokumentů:

- Objednávka KSA/20/2400/19 ze dne 2020-04-02 (ev. č. objednávky J-69525 doručené dne 2020-04-03)

I. Popis zkoušeného výrobku

Představec na horská kola

Představec má délku 100 mm, úhel 6° a je navržen pro standardní rozměry horských kol (průměr řídítek 31,8 mm a průměr hlavové trubky 28,6 mm), AlSi10Mg, 3D tisk (utahovací moment šroubů 5 N/m) Řídítka – MTB-AL-110BTFOV6° - W680 mm

Kategorie horská jízdní kola (MTB).

Hmotnost: představec: 0,13 kg řídítko: 0,25 kg

Předmětem testování bylo ověření funkčnosti cyklistického představce vyrobeného aditivní technologií Selective laser melting (SLM) z materiálu AlSi10Mg. Jedná se o studii topologické optimalizace dílu v rámci diplomové práce. Testování bylo financováno účelovou podporou na specifický vysokoškolský výzkum v rámci studentské grantové soutěže TUL (Projekt SGS-2019-5012, Vývoj a aplikace 3D tištěných funkčních dílů v projektu Formula Student TUL).

Výroba představce byla provedena na tiskárně SLM 280 HL (SLM Solutions AG).

II. Zkoušený vzorek

Ev. č. SZÚ	Název výrobku	Datum doručení
2230.20.32655.001-004	Představec	2020-04-20 a 2020-05-07
2230.20.32656.001-002	Řidítko	2020-04-20

Prohlídku, zkoušky a ověření provedl ve zkušebně SZÚ, s. p. Lukáš Kostka.

Zkoušky byly provedeny s využitím měřicích a zkušebních zařízení s platnou kalibrací.

III. Metody, výsledky zkoušek a ověření

Metody zkoušek, výsledky zkoušek a ověření jsou uvedeny v následujícím dílčím protokolu, který tvoří nedílnou součást tohoto protokolu o zkoušce:

- Dílčí protokol č. 39-14727/1/JD
- Příloha / fotodokumentace

IV. Seznam dalších použitých podkladů

 ČSN EN ISO 4210-5:2015 Jízdní kola - Bezpečnostní požadavky na jízdní kola - Část 5: Zkušební metody pro řízení Zkušební laboratoř Pracoviště Jablonec nad Nisou, Tovární 5, PSČ 466 21 Protokol o zkoušce č. 39-14727/JP Strana 3 (celkem 3)



 ČSN EN ISO 4210-2:2018 Jízdní kola - Bezpečnostní požadavky na jízdní kola - Část 2: Požadavky na městská a trekkingová jízdní kola, na jízdní kola pro mládež, na horská a závodní jízdní kola

Protokol zpracoval: Lukáš Kostka

Protokol/schválil:

Ing. Aleš Pleskot zástupce vedoucího zkušebny č. 2201



-konec textu-

٢

Dílčí protokol č. 39-14727/1/J	D	Strana 1 (celkem 2)		
Zkoušená vlastnost(i):	Řízení			
Označení vzorku, evidenční číslo:	Představec na ho 2230.20.32655.00 2230.20.32656.00	Představec na horská kola 2230.20.32655.001-004 (představce ozn. 1-4) 2230.20.32656.001 (řídítko)		
Odpovědný zkušební technik:	Lukáš Kostka	Lukáš Kostka		
Datum zkoušky:	2020-04-28 až 2020-05-11			
Místo provedení zkoušky:	Laboratoř SZÚ			
Měřicí a zkušební zařízení:				
Název	Inventární číslo	Poznámka		
Posuvné měřítko	21-3162			
Pětimetr	OK21			
Momentový klíč	21 2032	-		
Stopky	243414	-		
Ruční siloměr s příslušenstvím	21-9349			
Zařízení na dynamické a statické zkoušky jízdních kol	ZP – 010779			
Úchylkoměr	21-9011			

Požadavek:	ČSN EN ISO 4210-2:2018, čl.4.7.1, 4.7.2.1, 4.7.3, 4.7.4, 4.7.5, 4.7.6.1.2, 4.7.6.2.2, 4.7.6.3.2, 4.7.6.3.3, 4.7.6.4, 4.7.6.5, 4.7.6.6, 4.7.7.2
Přesný název zkušebního procesu:	Zkoušky konstrukce, pevnosti, životnosti, brzd, řízení, rámů a vidlice, kol a ráfků, pohonu a pedálů, sedla a sedlovky
Metoda zkoušky:	ČSN EN ISO 4210-2:2018, čl.4.7.1, 4.7.2, 4.7.3, 4.7.4, 4.7.5, 4.7.6.1.2, 4.7.6.2.2, 4.7.6.3.2, 4.7.6.3.3, 4.7.6.4, 4.7.6.5, 4.7.6.6, 4.7.7.2 ČSN EN ISO 4210-5:2015, čl. 4.1.1, 4.1.2, 4.3, 4.4.1, 4.4.2, 4.5, 4.6, 4.7, 4.9.1, 4.9.2
Číslo akreditované zkoušky:	S 013

Výsledky zkoušky:

Název	Článek	Požadavek	Zjištění	Hodnoceni
		Etapa 1:	Vzorek 1	
Sestava řídítek a představce – Únavová dynamická zkouška	stava tek a dstavce – avová amická uška		Zkouška dle ČSN EN ISO 4210- 5:2015 čl. 4.9.1 Po 3019 cyklech (vratná síla 270 N) byly na představci zjištěny praskliny/destrukce viz foto.	-

Zkušební laboratoř Pracoviště Jablonec nad Nisou, Tovární 5, PSČ 466 21 Dílčí protokol č. 39-14727/1/JD

			Vzorek 4		
		Etapa 2: Po ukončení cyklování v počtu 100 000 cyklů (vratná síla 450 N) Nesmí být na sestavě řídítka a představce zjištěny viditelné trhliny nebo praskliny a selhání šroubu.	Zkouška d 5:2015 čl. Po ukonče 100 000 cy Nebyla na představce nebo prasł	le ČSN EN ISO 4210- 4.9.2 ní cyklování v počtu /klů (vratná síla 450 N) sestavě řídítka a e zjištěna viditelná trhlina kliny a selhání šroubu.	+
Sestava řidítka a přdstavce – Zkouška bočním ohybem	4.7.6.2.2	Nesmí být na sestavě řídítka a představce zjištěny viditelné trhliny nebo praskliny a selhání šroubu a trvalé deformace max. 15 mm.	Zkouška d 5:2015 čl. Působeno 1 minuty, 5 Po zkoušc a představ nebo prasl Trvalá defo síly: vzorek	le ČSN EN ISO 4210- 4.3 sílou o vel. 1000 N po dobu 50 mm od konce řídítek. e nebyla na sestavě řídítka ce zjištěna viditelná trhlina kliny a selhání šroubu. ormace v místě působení Trvalá deformace (mm)	+
Představec – zkouška	4.7.6.3.2	Etapa 1: Nesmí být na sestavě řídítka a představce zjištěny viditelné trhliny nebo praskliny a selhání šroubu a trvalé deformace max. 10 mm.	2 14,78 Zkouška dle ČSN EN ISO 4210- 5:2015 čl. 4.4.1 Působeno sílou o vel. 1600 N v úhlu 45° po dobu 1 minuty. Po zkoušce nebyly zjištěny viditelné trhliny nebo praskliny a selhání šroubu. Trvalá deformace v místě působení síly: vzorek		+
ohybem vpřed	4.7.6.3.3	Etapa 2: Nesmí být na sestavě řídítka a představce zjištěny viditelné trhliny nebo praskliny.	3 0,05 Vzorek 3 Zkouška dle ČSN EN ISO 4210- 5:2015 čl. 4.4.2 Působeno sílou o vel. 2600 N v úhlu 45° po dobu 1 minuty. Po zkoušce nebyly zjištěny viditelné trhliny nebo praskliny a selhání šroubu.		+

Nejistota měření:

U= 0,03 mm (rozměry) U= 0,13 % (měření síly)

Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření 2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Zkušební technik:	Lukáš Kostka	hand	
	jméno	podpis	
Přezkoumal a schválil:	Ing. Aleš Pleskot	Affer	12.5
	jméno	podpis	datur

-konec textu-

010