

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav technologie obrábění projektování a metrologie



3D tisk segmentu pro rám jízdního kola

3D print of bicycle frame segment

Diplomová práce

Autor práce

Bc. Jan Kraus

Vedoucí práce

Ing. Jan Šimota

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kraus** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **411099**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

3D tisk segmentu pro rám jízdního kola

Název diplomové práce anglicky:

3D Print of bicycle frame segment

Pokyny pro vypracování:

3D tisk (využití, metody, výhody, nevýhody)
Konstrukční návrh spojovacích částí
Optimalizace tvaru dílu pro využitelnost pracovního prostoru zařízení s ohledem na zachování funkčnosti dílu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Šimota, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v příloze této práce.

V Praze 19. července 2019

.....

Jan Kraus

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá zavedením aditivních technologií do výroby jízdního kola. V teoretické části práce je popsána historie vývoje jízdních kol a materiálů používaných na jejich stavbu. Dále práce popisuje principy aditivních technologií se zaměřením na kovový tisk. V praktické části je popsán postup návrhu a výroby konkrétní části rámu. V závěru je zhodnocena použitá technologie, včetně ekonomického hlediska.

Klíčová slova

aditivní technologie, 3D tisk, rapid prototyping, topologická optimalizace, AISI 316L, jízdní kolo

Abstract

The diploma thesis deals with the introduction of additive manufacturing technologies into the production of a bicycle. The first part describes a history of bicycle development and materials used for their construction. Following chapter is aimed at the principles of additive manufacturing technologies with a focus on metal printing. The experimental part describes a procedure of design and production of a specific part of bicycle frame. The conclusion contains an evaluation of used technology with summarization of economic aspects.

Keywords

additive manufacturing, 3D print, rapid prototyping, topology optimization, AISI 316L, bicycle frame

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Janu Šimotovi za předané znalosti a zkušenosti, a především za trpělivost a ochotu které mi věnoval v průběhu zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval společnosti Repete Industry s.r.o. za možnost realizace této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, která mě neúnavně podporovala po celou dobu mého studia.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	8
Seznam tabulek	10
Seznam obrázků	11
1 Úvod.....	14
2 Historie jízdních kol	15
2.1 Materiály.....	16
2.1.1 Ocel.....	17
2.1.2 Titanové slitiny	18
2.1.3 Slitiny na bázi hliníku	19
2.1.4 Kompozitní materiály	20
3 Aditivní technologie.....	22
3.1 Rapid prototyping	24
3.2 Postup výroby	26
3.3 STL formát.....	27
3.4 Technologičnost konstrukce	28
3.4.1 Konstrukce	28
3.4.2 Optimalizace	29
3.5 Technologie tisku	33
3.5.1 Kovový tisk.....	33
3.5.2 DED - Direct Energy Deposition	41
3.5.3 Tisk nekovových materiálů	44
3.6 Používané materiály	47
3.6.1 Polymery.....	47
3.6.2 Kovové materiály	50
3.6.3 Jiné materiály	57

4	Výroba tištěného segmentu.....	59
4.1	Repete cycles	60
4.2	Materiál	61
4.3	Výběr segmentu	61
4.3.1	Zadní patky	61
4.3.2	Středová spojka.....	61
4.3.3	Hlavová trubka	62
4.3.4	Sedlová spojka	62
4.3.5	Popis varianty.....	63
4.4	Tisk prototypu	64
4.5	Výrobní zařízení.....	66
4.6	Tisk dílů	66
4.6.1	Příprava tisku	66
4.6.2	Postup výroby	70
4.7	Měření dílu.....	74
4.8	Optimalizace modelu	77
4.9	Tisk optimalizovaného dílu	80
4.9.1	Příprava programu	80
4.9.2	Tisk.....	81
4.9.3	Postprocessing	82
4.10	Hodnocení druhého dílu a návrh zlepšení	83
5	Ekonomické zhodnocení	85
5.1	Výpočet nákladů.....	86
6	Závěr	89
	Seznam zdrojů a použité literatury	90

Seznam zkratek a symbolů

3DP		Three-Dimensional Printing
ABS		Akrylonitril–butadien-styren
AF		Additive fabrication
AM		Additive manufacturing
CF_P	<i>hod</i>	Časový fond pracovníka
C_M	€	cena materiálu
C_S	€	Cena stroje
DED		Direct energy deposition
DM		Direct Metal Deposition
DMLS		Direct Metal Laser Sintering
DMP		Direct Metal Printing
DSPC		Direct Shell Production Casting
EBAM		Electron Beam Additive Manufacturing
EBM		Electron Beam Melting
FDM		Fused Deposition Modeling
HNS_P	€/hod	Hodinová nákladová sazba pracovníka
HNS_S	€/hod	Hodinová nákladová sazba stroje
K	<i>hod</i>	Kapacita
k_s		Suppfactor
LENS		Laser Engineered Net Shaping
LOM		Laminated Object Manufacturing
MJM		Multi-Jet Modeling System
MJS		Multiphase Jet Solidification
N_c	€	Celkové náklady
N_m	€	náklady na materiál
NND	€	Náklady na náhradní díly

N_O	€	Náklady na obsluhu
N_P	€	Náklady na plochu
N_{RP}	€	Celkové roční provozní náklady
N_S	€	Strojní náklady na ks
N_U	€	Náklady na údržbu
O_S	€	roční odpisy
PBW		Powder bed fusion
PC		Polykarbonát
PET		Polyetyléntereftalát
PLA		Kyselina polymléčná
PLT		Paper Lamination Technology
PVA		Polyvinylalkohol
RM		Rapid manufacturing
RN_P	€	Celkové roční náklady na pracovníka, včetně odvodů
RP		Rapid prototyping
RT		Rapid tooling
SCS		Solid Creation Systém
SGC		Solid Ground Cudiny
SLA		Stereolitography Aparatur
SLM		Selective Laser Melting
SLS		Selective Laser Sintering
SOUP		Solid Object Ultraviolet-Laser Printer
STL		Standard Triangle Language, Standard Tessellation Language
T_B	hod	celkový strojní čas
T_P	hod	čas pracovníka strávený u stroje
V_S	hod	Odhadované průměrné denní využití stroje
z_s	roky	životnost stroje

Seznam tabulek

Tabulka 1.1 - Parametry vybraných trubek pro jízdní kola.....	17
Tabulka 1.2 - Parametry vybraných titanových slitin.....	18
Tabulka 1.3 - Přehled vlastností nepoužívanějších hliníkových slitin	19
Tabulka 1.4 - Porovnání vlastností uhlíkových vláken Torayca	21
Tabulka 2.1 - Přehled metod a výrobců RP.....	24
Tabulka 2.2 - Výrobci a technologie kovového 3D tisku	34
Tabulka 2.3 - Materiály používané metodami DMLS a SLM.....	39
Tabulka 2.4 - Porovnání mechanických vlastností vybraných polymerů	48
Tabulka 2.5 - Chemické složení AISI 316L.....	52
Tabulka 2.6 - Mechanické vlastnosti AISI 316L.....	52
Tabulka 2.7 - Chemické složení 17-4PH A.....	52
Tabulka 2.8 - Mechanické vlastnosti 17-4PH A.....	52
Tabulka 2.9 - Chemické složení AlSi10Mg	54
Tabulka 2.10 - Mechanické vlastnosti AlSi10Mg.....	54
Tabulka 2.11 - Chemické složení	54
Tabulka 2.12 - Mechanické vlastnosti	54
Tabulka 2.13 - Chemické složení Ti6Al4V	55
Tabulka 2.14 - Mechanické vlastnosti Ti6Al4V	55
Tabulka 2.15 - Chemické složení Inconel 625	56
Tabulka 2.16 - Mechanické vlastnosti Inconel 625	56
Tabulka 2.17 - Chemické složení Inconel 718	57
Tabulka 2.18 - Mechanické vlastnosti Inconel 718	57
Tabulka 3.1 - Chemické složení 25CrMo4.....	61
Tabulka 4.1 - Parametry součástí.....	85
Tabulka 4.2 - Parametry materiálu	85
Tabulka 4.3 - Parametry stroje.....	85
Tabulka 4.4 - Náklady na údržbu.....	85
Tabulka 4.5 - Parametry procesu	86

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 - Porovnání K-faktoru pletenin (3K, 12K, UD)	21
Obrázek 3.1 - Rozdělení aditivních technologií.....	22
Obrázek 3.2 - Porovnání výrobních nákladů aditivních a konvenčních technologií	22
Obrázek 3.3 - Porovnání součásti vyrobené konvenční a aditivní technologií.....	23
Obrázek 3.4 - Porovnání CAD modelu a STL sítě.....	27
Obrázek 3.5 - Porovnání kvality povrchu v závislosti na hustotě STL sítě	27
Obrázek 3.6 - Příklad složité podpůrné konstrukce	28
Obrázek 3.7 - Optimalizační proces	30
Obrázek 3.8 - Princip technologií PBF	35
Obrázek 3.9 - Výrobek vytvořený technologií PBF.....	35
Obrázek 3.10 - Průběh vytváření tavné lázně při výrobě technologií PBF	36
Obrázek 3.11 - Vliv velikosti rozteče průchodu paprsku laseru.....	36
Obrázek 3.12 - Vliv velikosti překrytí na průchodu tepla	36
Obrázek 3.13 - Ukázka hloubky průchodu tepla	37
Obrázek 3.14 - Princip technologie SLM.....	38
Obrázek 3.15 - Princip metody EBM	40
Obrázek 3.16 - Princip technologií DED.....	41
Obrázek 3.17 - Porovnání rychlosti výroby vybraných technologií	42
Obrázek 3.18 - Výroba technologií EBAM	42
Obrázek 3.19 - Schéma technologie LENS	43
Obrázek 3.20 - Princip technologie SLA.....	44
Obrázek 3.21 - Schéma technologie FDM	45
Obrázek 3.22 - Princip technologie LOM.....	46
Obrázek 3.23 - Poměr materiálů používaných aditivními technologiemi	47
Obrázek 3.24 - Schéma výroby prášku plynovou atomizací	50
Obrázek 3.25 - Schéma výroby prášku plasmovou atomizací	51
Obrázek 3.26 - Topologicky optimalizovaný držák pro vesmírný výzkum	53
Obrázek 3.27 - Princip výroby tavením skleněného vlákna CO ₂ laserem	58
Obrázek 4.1 - Rám Bastion.....	59
Obrázek 4.2 - Model sedlové spojky	62

Obrázek 4.3 - Parametry použité sedlové trubky	63
Obrázek 4.4 - Model prototypu v SW GrabCAD	64
Obrázek 4.5 - Vytisknutý plastový prototyp	64
Obrázek 4.6 - Plastový prototyp s podporami (1)	65
Obrázek 4.7 - Plastový prototyp s podporami (2)	65
Obrázek 4.8 - Plastový prototyp (1)	65
Obrázek 4.9 - Plastový prototyp (2)	65
Obrázek 4.10 - Plastový prototyp.....	65
Obrázek 4.11 - Pohled na pracovní prostředí SW NX 12	66
Obrázek 4.12 - Umístění součásti na pracovní paletě.....	67
Obrázek 4.13 - Automaticky vygenerované podpory	67
Obrázek 4.14 - Úprava stavebních podpor	68
Obrázek 4.15 - Ukázka designu stavebních podpor	68
Obrázek 4.16 - Původní návrh podpor	69
Obrázek 4.17 - Upravený návrh podpor	69
Obrázek 4.18 - Prohlížeč vygenerovaného programu.....	69
Obrázek 4.19 - Ovládací panel tiskárny	70
Obrázek 4.20 - Tisk součásti.....	71
Obrázek 4.21 - Součást po dokončení tisku.....	71
Obrázek 4.22 - Součást po TZ (1)	72
Obrázek 4.23 - Součást po TZ (2)	72
Obrázek 4.24 - Součást po odstranění podpor (1)	72
Obrázek 4.25 - Součást po odstranění podpor (1)	72
Obrázek 4.26 - Dokončená součást.....	73
Obrázek 4.27 - Detailní pohled na dokončenou součást.....	73
Obrázek 4.28 - Upnutí součásti při měření.....	74
Obrázek 4.29 - Měření kruhovitosti sedlové trubky	75
Obrázek 4.30 - Měření kruhovitosti zámku sedlovky.....	75
Obrázek 4.31 - Měření tvaru plochy.....	76
Obrázek 4.32 - Detail poškození sedlové vzpěry	77
Obrázek 4.33 - Detail vady spojky (1).....	78
Obrázek 4.34 - Detail vady spojky (2).....	78

Obrázek 4.35 - Odlehčená vnitřní struktura	78
Obrázek 4.36 - Návrh šestiúhelníkové struktury	79
Obrázek 4.37 - Model s dutými sedlovými vzpěrami	80
Obrázek 4.38 - Změna natočení součásti	80
Obrázek 4.39 - Konstrukce podpor v oblasti sedlových vzpěr.....	81
Obrázek 4.40 - Součást po tepelném zpracování.....	82
Obrázek 4.41 - Druhá vytištěná spojka.....	82
Obrázek 4.42 - Detail vady druhého výtisku.....	83
Obrázek 4.43 - Návrh změny vnitřní struktury	84

1 Úvod

Aditivní technologie zažívají v posledních letech nebývalý rozvoj. Především zásluhou cenově dostupných 3D tiskáren, které jsou svou jednoduchostí a překvapivou kvalitou oslovily širokou veřejnost. Návrh prototypů, či kusová výroba se tak značně zjednodušila a zlevnila. To se bavíme převážně o plastových výrobcích. Kromě této kategorie se však vyvinul i směr, téměř výlučně průmyslové aplikace a tím je kovový 3D tisk. Za posledních zhruba 25 let prodělal obrovský pokrok a jeho aplikace se dají nalézt v kosmických technologiích, dopravních letadlech, osobních automobilech, lékařském průmyslu nebo sportovním vybavení. A právě tímto směrem se ubírá tato diplomová práce.

Stejně jako v oboru aditivních technologií, i v oblasti cyklistické techniky dochází k neustálému a často velmi prudkému rozvoji. Zatímco na počátku tisíciletí vážila kola běžně přes 10 kg, nyní se nejlehčí stroje hravě dostávají pod hranici 6 kg, přičemž nárůst mechanických vlastností těchto kol je naprosto neporovnatelný. Začaly se běžně používat materiály, do té doby vyhrazené pro letectví, jako jsou uhlíkové kompozity, titan, lehké hliníkové slitiny a mnoho dalších. Kola se běžně testují v aerodynamických tunelech, jsou vybavena bezdrátovým elektronickým řazením, či hydraulickými kotoučovými brzdami.

Přes všechna tato vylepšení stále existuje nemalá skupina zákazníků, kteří neocení, že jejich bicykl je vyroben v tisícikusové sérii. Nezáleží jim na dokonalé aerodynamice a nehoní každý gram hmotnosti. Dávají přednost malým společnostem, které vyrábí kola pro konkrétní zákazníky, kola s příběhem. Používají nejmodernější materiály i postupy, které kombinují s precizním ručním zpracováním. Přesně do této kategorie spadá i společnost Repete, v jejíž spolupráci bude tato diplomová práce řešena.

První část práce seznámí čtenáře se stručnou historií jízdních kol a používaných materiálů. Dále popíše aditivní technologie, jejich historii a principy. V praktické části se věnuje konkrétní aplikaci technologie kovového 3D tisku na rám jízdního kola.

2 Historie jízdních kol

Historie výroby jízdních kol sahá do 2. poloviny 19. století. Existuje celá řada typů, modelů, výrobců, které se objevovali v před rokem 1900. Jejich popis by však vydal na samostatnou knihu, proto zmíním pouze nejdůležitější milník a tím byl v roce 1886 Swift Safety Bicycle. Ten se stal prvním kolem designu, který známe dodnes. [1]

Vývoj dále probíhal v průběhu 20. století, více či méně důležitými patenty. V meziválečném období se uchytilo několik důležitých komponent jako byl rychloupínák, či přehazovačka. Rozvoj nastal po 2. světové válce, kdy kola pomalu začala dostávat podobu, jakou známe dnes. Pravděpodobně nejbouřlivější vývoj byl v 70. letech, kdy především vlna mountainbikingu v USA rozšířila jízdní kola mezi nejširší masu zákazníků.

S postupným vývojem technologií se zlepšovaly vlastnosti rámců i komponentů kol a zároveň klesala jejich hmotnost. V počátečních dobách vážila běžně kola okolo 30 kg, hmotnost současných jízdních kol se pohybuje na hranici 10 kg, nejlehčí silniční kola váží i pod 6 kg.

Zejména po roce 2000 začíná trend přesunu výroby do asijských zemí. Většina světové produkce tak probíhá na Taiwanu, v Číně nebo ve Vietnamu. Na evropském kontinentu či v USA tak zůstala produkce buď nejvyšších modelů značek, nebo kusová výroba.

Právě ruční výroba kol se stává v posledních zhruba 10 letech velmi významnou částí cyklistického obchodu. Tato kola zpravidla nedosahují nejlepších mechanických vlastností ani nejnižší hmotnosti, ale dovolují zákazníkovi odlišit se od hlavního proudu. Je vidět, že tento princip funguje a počet „garážových“ výrobců po celém světě neustále roste.

2.1 Materiály

Na stavbu jízdního kola se používá celá škála materiálů, které se liší svými vlastnostmi i užitím. Jiné materiály se používají na stavbu rámu a jiné na zbylé komponenty. V následujícím výčtu se budu věnovat jen materiálům využívaným pro rámy jízdních kol.

Historicky prvním používaným materiálem byly ocelové slitiny. V průběhu let se objevily nové materiály i nové výrobní postupy, jako např. ztenčované trubky, avšak ocel jako dominantní materiál vydržela prakticky až do 90. let 20. století. V 70. a 80. letech došlo k vývoji rámu na bázi hliníkových slitin. Jako průkopníka můžeme označit Garyho Kleina, který ještě jako student MIT poprvé přišel s myšlenkou hliníkových trubek velkých průřezů, které značně zlepšovaly mechanické vlastnosti jeho rámu. Hliníkové slitiny se staly hlavním stavebním materiálem v průběhu celých 90. let 20. století. [1]

Ve zhruba stejném období docházelo i k rozvoji kompozitových materiálů, zejména uhlíkových. Vlastnosti těchto kol však nebyly mnohdy ani na úrovni hliníkových slitin, a proto se dá hovořit o nástupu kompozitových bicyklů až zhruba po roce 2000.

Současně se objevovaly i další exotické materiály, jako jsou titanové, hořčíkové nebo skandiové slitiny. Tyto materiály však stály na okraji a nikdy nedošlo k jejich masovému rozšíření.

V dnešní době se dá říci, že drtivá většina jízdních kol je vyrobena buď z hliníkových slitin, nebo z uhlíkových kompozitů. S přesunem výroby do Asie rapidně klesla cena kompozitových kol a nejlevnější modely se dnes dají koupit již okolo 20 000 Kč.

V zakázkové výrobě, do které můžeme řadit i rám řešený v praktické části práce, je situace pestřejší. Své obrození zažila ocel, která je dnes velmi hojně využívána. Zatímco ocelové rámy můžeme spatřit i v nejnižších cenových hladinách výrobců, titanové slitiny se používají výhradně pro kusovou výrobu.

2.1.1 Ocel

Ocel je původní konstrukční materiál bicyklů. Počátky používání sahají hluboko do 19. století. V současné době se používá pro dvě, zcela odlišné kategorie jízdních kol.

První kategorií jsou ta nejlevnější kola, často nabízená v hypermarketech. Na výrobu je použita konstrukční ocel, trubky nejsou nijak dále zpracované, a i kvalita svařování je na velmi nízké úrovni. Cena takového rámu se pohybuje pouze ve stovkách korun.

Druhou kategorií jsou naopak velmi drahá kola, zpravidla stavěná ručně a na míru. Pro výrobu se používají zeslabované trubky, které se spojují pájením nebo svařováním. Klade se důraz na kvalitu zpracování a hodnota těchto rámu se pohybuje v desítkách tisíc korun. Výrobci si pečlivě střeží přesné chemické složení i následné tepelné zpracování svých výrobků. Avšak ve velké míře se vychází z nízkolegovaných ušlechtilých chrom–molybdenových ocelí 25CrMo4. Některé společnosti, jako např. britský Reynolds, vyrábí i z vysokopevnostních maraging ocelí, kde pevnost v tahu dosahuje hodnot i 2000 MPa. Tyto trubky mohou mít stěnu pouze 0,3 mm a výsledkem je nízká hmotnost rámu. [1]

Mezi největší výrobce ocelových trubek se řadí Italský Columbus a Dedacciai, či již zmíněný Reynolds. Dodavatelé zpravidla nabízí několik řad od základních až po třikrát zeslabované, jednoduchého kruhového průřezu, či složitějších tvarů. Výběr nepoužívanějších sad trubek je uveden v *tabulce 1.1*

Tabulka 2.1 - Parametry vybraných trubek pro jízdní kola

Název		Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]
Columbus	XCr	1450	210	>10
	Niobium	1250	210	>14
	25CrMo4	900	205	12
	Cromor	750	205	≥12
	Omnicro	1300	210	>15
Dedacciai	Zero 25	1350	210	6 - 10
Reynolds	953	1750 - 2050	207	15
	931	1200 - 1350	207	11
	853	1250 - 1400	207	14

Přestože má ocel jako materiál pro výrobu rámu, řadu pozitivních vlastností, ve výkonnosti cyklistice byla již dávno překonána ostatními materiály. Nabízí však velmi dobrý poměr mezi pevností a pružností, přičemž moderní oceli dovolují vyrobit i kola s přijatelnou hmotností. Velkou výhodou ocelových rámu také je jejich snadná opravitelnost, která se ve velké míře využívá při konstrukci cestovních kol.

2.1.2 Titanové slitiny

Tento velmi exkluzivní materiál si našel cestu i do cyklistického průmyslu. Podobně jako ocel byl ve výkonnosti sféře dávno nahrazen jinými materiály, ovšem při zakázkové stavbě se jedná o velmi ceněné zboží. Titanové slitiny nabízí výborné mechanické vlastnosti, především kombinaci vysoké pevnosti, nízké hmotnosti, životnosti a korozní odolnosti. Nevýhodou zůstává velmi vysoká cena a obtížná zpracovatelnost. Ta ve svém důsledku znamená pouze omezené možnosti profilace trubek. Titanové rámy jsou tak snadno rozpoznatelné menšími kruhovými průřezy trubek.

V současné době se nejčastěji používají dva typy slitin Ti6Al4V a Ti3Al2,5V. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v *tabulce 1.2*

Tabulka 2.2 - Parametry vybraných titanových slitin [2]

Název	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Tvrdość [HRC]
Ti6Al4V	1020	950	120	14	33
Ti3Al2,5V	790	690	115	15	24

Mezi nejznámější výrobce titanových rámu patří Litespeed, Lynskey, Mosaic či Van Nicholas. V minulosti patřilo mezi průkopníky výroby titanových rámu české Morati. Jako jediní na světě dokázali vyrábět kromě titanových rámu i vidlice ze stejného materiálu, to si nedovolili ani výrazně větší společnosti. Přestože byly výrobky Morati úspěšné i ve sportovním světě (jen z cyklokrosového Mistrovství světa v Táboře v roce 2001 si odvezli jezdci na těchto kolech dva tituly mistra světa), nedokázaly obstát v tvrdém konkurenčním prostředí a společnost ukončila v roce 2005 výrobu. [3]

2.1.3 Slitiny na bázi hliníku

Rozvoj ráků ze slitiny hliníku začal na konci 80. let. Především díky společnostem Klein, Cannondale a Trek, které byly průkopníky s tímto materiálem. Charakteristickým znakem byl výrazně větší průměr trubek a také nižší hmotnost, v porovnání s ocelovými rámy. S hliníkem jako stavebním materiálem pro rámy, se experimentovalo i v minulosti. První pokusy se objevily v roce 1942. Většího rozšíření se dočkal díky italské společnosti Alan v 70. letech, ta však vyráběla rámy pomocí lepení hliníkových trubek do spojek. [1]

Hliník se používá v podobě slitin, nejčastěji řad 6000 a 7000, jak ukazuje *tabulka 1.3*. Nejpoužívanější jsou pak zejména 6061, 7005, 7020 a 7075. Řada 6xxx obsahuje legury hliníku a hořčík, je tím pádem lépe svařitelná a lehčí na zpracování. Řada 7xxx je nejvíce legována zinkem. Dosahuje vyšší pevnosti, což dovoluje použít tenčí stěnu trubek a z toho vyplývá nižší hmotnost. Oproti 6xxx je však dražší.

Tabulka 2.3 - Přehled vlastností nejpoužívanějších hliníkových slitin

Název		Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Tvrdość [HRC]
6061	AlMg1SiCu	310	276	68,9	10	40
7005	AlZn4,5Mg1,5Mn	350	290	72	13	40
7020	AlZn4,5Mg1	350	280	70	10	40
7075	AlZn5,5MgCu	572	503	72	11	55

V *tabulce 1.3* je uvedena hodnota pevnosti ve stavu T6, tím je myšleno po tepelném zpracování. Při svařování trubek dochází k lokálnímu ohřevu a vytvoří se zde tepelně ovlivněná oblast, která se projevuje např. sníženou pevností. Pro dosažení původních vlastností v celém rámu je nutné aplikovat tepelné zpracování. Proces umělého stárnutí se skládá z ohřevu na teplotu 195 °C a výdrži po dobu 3 hodin. Po této době dojde ke znovunabytí mechanických vlastností.

Zajímavé je také zmínit dnes už slepou uličku vývoje, kterou bylo použití skandia a hořčíku. Průmyslové využití skandia se poprvé objevilo v sovětském svazu. Přidáním do hliníkových slitin dojde ke zvýšení pevnosti. Původně se takto vylepšená hliníková slitina používala pro pláště raket. Po pádu Sovětského svazu zakoupila licenci pro výrobu

společnost Easton sports, která používala tuto slitinu pro výrobu ráků a dalších komponent. V porovnání s čistě hliníkovými slitinami dosahovaly vyšší pevnosti a nižší hmotnosti.

Skandium jako takové je však velmi drahé, a to se odráželo i v ceně výrobků. Objevovalo se tak výhradně u závodních ráků a dílů. S postupným rozvojem uhlíkových kompozitů tak bylo upozaděno.

Podobná situace byla i s použitím hořčíku. Ten má zhruba o třetinu nižší hustotu než hliník a nabízela se tak možnost výroby lehčích ráků. Hořčík je však velmi reaktivní a jeho zpracování energeticky náročné. Je také velmi náchylný na korozi, což byl častý problém, kdy rám korodoval skrytě zevnitř a výsledkem bylo až zničení rámu.

2.1.4 Kompozitní materiály

V cyklistickém průmyslu se používají kompozity jako kombinace uhlíkové pleteniny a epoxidové pryskyřice. Získává se tak optimální poměr pevnosti, pružnosti a hmotnosti. V minulosti se experimentovalo i použitím jiných druhů vláken, zejména lněných či kevlarových, ovšem tento směr se ukázal jako nevhodný. Uhlíkové kompozity se objevily poprvé v průběhu 80. let, ovšem trvalo ještě 10 – 15 let, než vývoj pokročil do takové fáze, aby začal pomalu vytlačovat ostatní materiály. Na přelomu 21. století se dá říct, že většina špičkové produkce jízdních kol je tvořena kompozitovými materiály. [1]

Pro výrobu ráků jízdních kol se používá několik technik, které přímo ovlivňují formu, v jakém se používá základní materiál. Nejrozšířenějším způsobem je výroba rámu technologií monocoque. Spočívá v kladení jednotlivých vrstev prepregů do připravené formy. Tloušťka materiálu se ovlivňuje množstvím použitých vrstev. Forma se následně uzavře a za sníženého tlaku dochází v autoklávu k reakci za zvýšené teploty. Tímto způsobem se vyrábí odhadem 90 % světové produkce kompozitových ráků.

Další technologií je tzv. „Tube to tube“. Zde dochází k lepení jednotlivých trubek přímo na sebe, následně se spoj laminuje vrstvou pleteniny. Tato technologie je velmi pracná a využívá se v kusové výrobě. Výhodou je 100 % kontrola nad vlastnostmi trubky po celé délce a možnosti měnit způsob náviny, čímž dochází ke změnám mechanických vlastností trubky. Nevýhodou je omezená možnost tvarování jednotlivých trubek. Touto technologií vyrábí rámy např. česká Festka nebo americké Parlee.

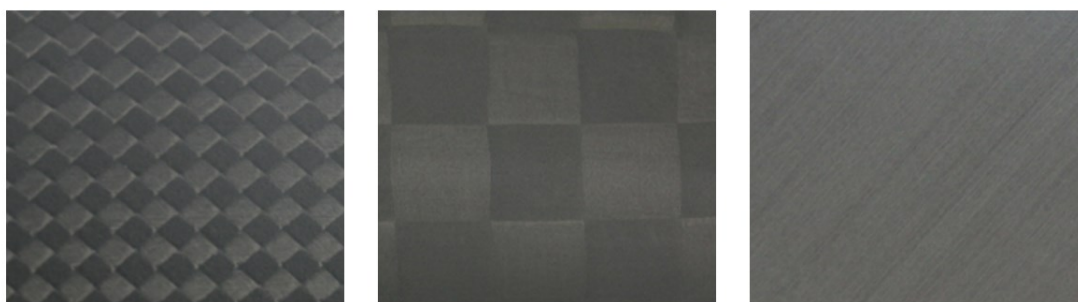
Poslední možností je lepení trubek do hliníkových nebo jiných spojek. Tato technologie se využívala v počátcích, ovšem v současné době je již překonaná a téměř se nevyužívá.

Většina velkých výrobců si pečlivě střeží své výrobní postupy a zveřejňují pouze obchodní označení použitého materiálu, jako například americký FELT, který využívá švédského dodavatele TeXtreme. Výrobci, kteří jsou otevřenější, nejčastěji hovoří o vláknech Torayca japonské společnosti Toray. Z široké nabídky tohoto výrobce se v cyklistickém průmyslu užívají především vlákna T700, T800 a T1000

Tabulka 2.4 - Porovnání vlastností uhlíkových vláken Torayca [4]

Název	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Hustota [g·cm ⁻³]
T700SC	4900	230	2,1	1,8
T800SC	5880	294	2	1,8
T800HB	5490	294	1,9	1,81
T1000GB	6370	294	2,2	1,8
T1100GC	7000	324	2	1,79

Jedním z důležitých parametrů samotné uhlíkové pleteniny je tzv. K-faktor. Ten udává množství vláken v jednotlivém pramenu. Nejčastěji se setkáváme s 1K, 3K, 12K. Číslo znamená počet vláken v tisících. Rozdíl je patrný na *obrázku 2.1*. Další možností jsou tzv. UD pleteniny, kde jsou vlákna orientována v jednom směru. I když se vlastnosti jednotlivých pletenin liší, výrobci je často používají pouze na poslední, pohledovou vrstvu, a ovlivňují tak v zásadě jen design výrobku. Často nabízí zákazníkovi možnost volby pleteniny, bez ohledu na mechanické vlastnosti výrobku.



Obrázek 2.1 - Porovnání K-faktoru pletenin (3K, 12K, UD) [5]

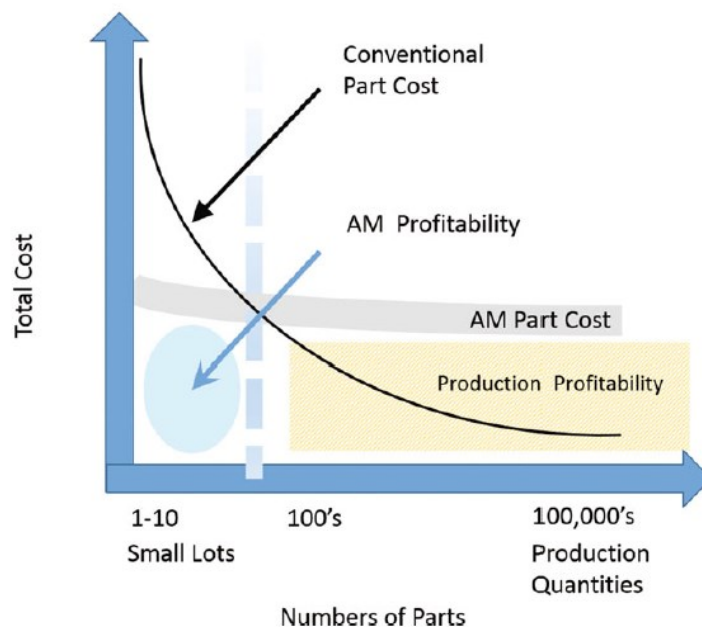
3 Aditivní technologie

Pojem aditivní technologie označuje souhrn výrobních postupů, kdy k dochází k postupnému nanášení jednotlivých vrstev materiálu. Jedná se prakticky o opak konvenčních technologií, kdy k realizaci výsledného tvaru dochází zpravidla odebráním materiálu. Aditivní technologie (Additive fabrication) se dále dělí na technologie Rapid prototyping (RP), Rapid tooling (RT) a Rapid, či Additive Manufacturing (RM, AM) [6]



Obrázek 3.1 - Rozdělení aditivních technologií

Technologií Rapid prototyping se vyrábí prototypy, ať už designové nebo funkční. Rapid tooling slouží k výrobě hotových součástí, které se následně využívají jako nástroje, např. pro tváření, slévání atd. Poslední kategorií je Additive Manufacturing, kde hotové výrobky slouží svému konečnému účelu. Nejčastěji jsou to díly leteckého průmyslu, kloubní náhrady atp.



Obrázek 3.2 - Porovnání výrobních nákladů aditivních a konvenčních technologií [7]

Jak je vidět na *obrázku 3.2* největší finanční efekt použití AF je při malých výrobních sériích, kde produkce konvenčními technologiemi je velmi náročná a nákladná. AF se proto nejčastěji používá pro výrobu prototypů a velmi složitých výrobků v kusové, či malosériové výrobě. Typickým představitelem jsou kloubní či jiné medicínské náhrady, které se vyrábí pro konkrétní potřeby pacienta.

Další oblastí užití AF je letecký a kosmický průmysl. V tomto odvětví je enormní tlak na snižování hmotnosti komponent. AF umožňuje optimalizovat tvar tak, že na výsledné součásti bude jen nezbytné minimum materiálu, které zaručí správné fungování. Těchto vlastností využívá např. společnost Airbus. Na *obrázku 3.3* je vidět křídlová konzola z rodiny letadel A350 XWB. Použitím optimalizace designu došlo k úspoře 30 % materiálu, které vedlo ke snížení hmotnosti a tím pádem i úspoře paliva. [8]



Obrázek 3.3 - Porovnání součásti vyrobené konvenční a aditivní technologií [8]

Rapid tooling umožňuje výrobu nástrojů, které není možné vyrobít konvenčními technologiemi. Hojně se používá při konstrukci forem, ve kterých je možné vyrobít chladicí kanály. Používá se také pro výrobu obráběcích nástrojů, kdy odlehčenou vnitřní strukturou dochází k eliminaci setrvačných momentů. [7]

Při výrobě aditivními technologiemi je možné pracovat s celou škálou materiálů. Od plastů, po kovové materiály, keramiku, sklo, ale například i dřevo, papír, či kompozitní materiály. Nevýhodou výroby aditivními technologiemi je časová náročnost, která plyne z technických možností. Zároveň je překážkou i zatím stále vysoká vstupní investice do výrobního zařízení [7]

3.1 Rapid prototyping

Technologie rapid prototyping se používá pro okamžitou výrobu prototypů. Proces nejčastěji zahrnuje návrh designu v prostředí CAD editoru, exportu dat do SW obsluhující tiskové zařízení a výrobu modelu. Nejběžnější materiály pro výrobu prototypů jsou polymery. Výhodou technologie RP je především rychlost a nízké náklady pro výrobu modelu. Na modelu je následně možné ověřit tvarové možnosti, design a do jisté míry i funkční vlastnosti. Je důležité podotknout, že takto zhotovené modely jsou většinou vyrobeny z odlišného materiálu než konečný výrobek, a proto nelze počítat se shodnými mechanickými vlastnostmi. Pro ověření většiny parametrů však postačují.

Tabulka 3.1 - Přehled metod a výrobců RP

Rapid Prototyping			
Základní materiál	Výrobce	Název	Zkratka
Tekutý	3D Systems	Stereolithography Aparatur	SLA
	Cubital	Solid Ground Cudiny	SGC
	Sony	Solid Creation Systém	SCS
	CMET	Solid Object Ultraviolet-Laser Printer	SOUP
	Autostrade	E-Darts	
Prášek	3D Systems	Selective Laser Sintering	SLS
	Z Corp.	Three-Dimensional Printing	3DP
	Optomec	Laser Engineered Net Shaping	LENS
	Soligen	Direkt Shell Production Casting	DSPC
	Fraunhofer	Multiphase Jet Solidification	MJS
	Acram	Elektron Beam Melting	EBM
Pevný	Cubic Technologies	Laminated Object Manufacturing	LOM
	Stratasys	Fused Deposition Modeling	FDM
	Kira Corporation	Paper Lamination Technology	PLT
	3D Systems	Multi-Jet Modeling System	MJM

Pro výrobu prototypů se nejčastěji používají metody FDM, 3DP, LOM, INKJET, SLA, SLS. Použití kovového tisku pro výrobu prototypů není vhodné, především pro svou vysokou cenu a relativně pomalou výrobu. Přehled technologií a vybraných výrobců, které je používají ukazuje *tabulka 2.1*.

Samotné prototypy se mohou rozdělit do několika kategorií.

- **Konstrukční prototypy** jsou určeny pro ověření geometrie a možností montáže. Materiál většinou nehraje roli, důležité je dodržení rozměrů, ale například i vlastnosti povrchu.
- **Designové prototypy** slouží k ukázce výsledné podoby výrobku. Mohou být vyrobeny ve skutečnosti nebo v měřítku. Vlastnosti materiálu ani jeho typ nejsou nejdůležitější parametr. Jde především o tvar a celkový design.
- **Funkční prototypy** se používají k ověření např. aerodynamických vlastností při testování ve větrném tunelu, opět mohou být vyrobeny v různém měřítku. Používají se podobné nebo shodné materiály jako má výsledný výrobek.
- **Technické prototypy** se mohou lišit výrobním procesem, ale většina funkčních rysů je shodná.

3.2 Postup výroby

CAD

- Prvním krokem je vytvoření 3D modelu, který popisuje vyráběnou součást. Model může být získán jeho vytvořením, nebo např. pomocí reverzního inženýrství

STL

- Pro práci s modelem se používá formát STL, který model převede to trojúhelníkové síť

Import

- Následuje importování STL modelu do paměti stroje

Nastavení

- Zvolí se nastavení výrobních parametrů

Výroba

- Samotný tisk součásti

Vyjmutí

- Po dokončení výroby je nutné součást vyjmout a očistit od zbytků základního materiálu

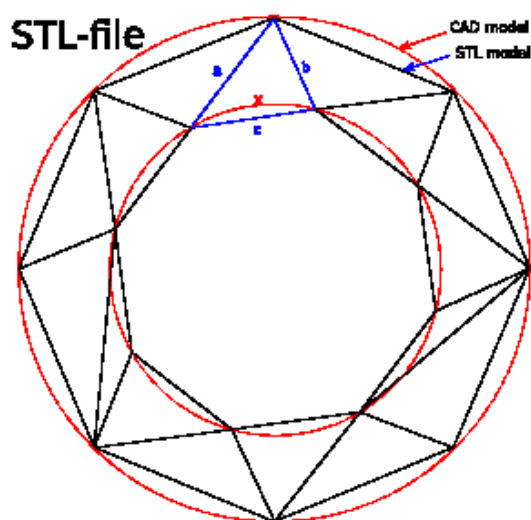
Postprocessing

- Hotový výrobek je nutné zbavit stavebních podpor a dalších přebytečných částí. Do této kategorie spadá i teplené zpracování.

Hotová součást

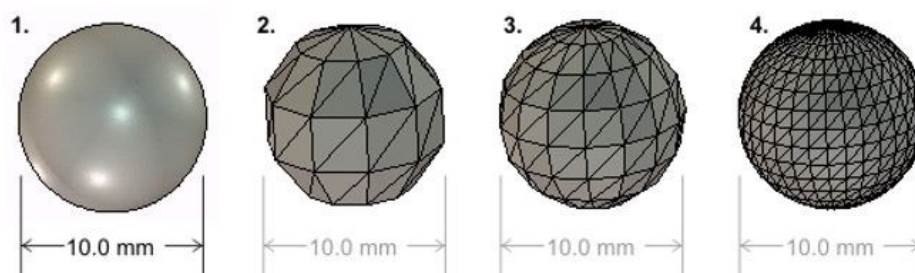
3.3 STL formát

Pro převod CAD dat do podoby využívané SW obsluhující tiskové zařízení se používá formát STL (Standard Triangle Language, Standard Tessellation Language). Tento formát je hojně používaný napříč SW od různých výrobců a nabízí tak širokou použitelnost. Popisuje model jako trojúhelníkovou síť. Převodem tvaru, který je primárně tvořen křivkou do podoby trojúhelníkové sítě dochází k zjednodušení tvaru a z toho plynoucí chyby. Rozdíl mezi CAD a STL modelem ukazuje *obrázek 3.4*. [7]



Obrázek 3.4 - Porovnání CAD modelu a STL sítě [9]

Tyto vady je možné do jisté míry eliminovat hustotou a velikostí sítě. Při použití menších trojúhelníků dochází k dokonalejšímu popisu plochy, avšak roste velikost souboru a nároky na HW. Rozdíl mezi jednotlivými sítěmi je vidět na *obrázku 3.5*



Obrázek 3.5 - Porovnání kvality povrchu v závislosti na hustotě STL sítě [10]

Z výše uvedeného je zřejmé, že převod modelu do formátu STL je jednosměrný proces. Při převodu dochází ke ztrátě části informací jako jsou: materiál, fyzikální vlastnosti, historie úprav apod.

3.4 Technologičnost konstrukce

3.4.1 Konstrukce

Již při návrhu samotné konstrukce součásti, je nutné brát ohled na technologii výroby. 3D tisk kovových materiálů nabízí celou škálu možností, ale na druhou stranu má řadu omezení. Je nutné brát v potaz orientaci modelu v prostoru, sklon rovin, umístění dutin atd. Například při použití technologií PBF, kde se pracuje s práškovým ložem, není možné vyrobit v modelu dutinu. Po vypálení zůstane v této dutině prášek, který není možné odstranit. Je proto nutné s tím počítat, a konstrukci navrhnout tak, aby mohlo dojít k odstranění prášku.

Asi nejvíce charakteristickým prvkem výrobků z aditivních technologií jsou stavební podpory. Při použití většiny technologií jsou tyto podpory nutné pro výrobu složitějších konstrukcí. Obecně lze říci, že všechny roviny, které svírají se svislou osou úhel menší než 45°, je nutné konstruovat s podporami.



Obrázek 3.6 - Příklad složité podpůrné konstrukce [11]

Jednodušší situace je v případě polymerního tisku, kde se na podpůrné konstrukce používá rozložitelného materiálu. Hotový model se pak vloží buď do vody, nebo do roztoku hydroxidu sodného a následně dojde k jejich rozpuštění.

U kovového tisku je situace komplikovanější, jelikož podpory jsou ze stejného materiálu jako samotný výrobek. Musí tak následovat nejprve operace oddělení od stavební podložky a následně odstranění jednotlivých podpor. Vzhledem ke složitosti konstrukcí se tyto operace zpravidla dělají ručně. Obrábění a další metody postprocesingu se používají až pro dokončovací operace, jako je např. obrábění uložení pro ložiska apod.

Při návrhu stavebních podpor je možné zvolit celou řadu tvarů a konstrukcí. Podpory se mohou směrem vzhůru zmenšovat, mohou mít odlehčenou konstrukci, která šetří materiál, mohou být pod úhlem atd. SW, které slouží k návrhu tisku, obsahují nepřeberné množství designu těchto podpor. Příklad velmi složité podpůrné konstrukce je vidět na *obrázku 3.6*

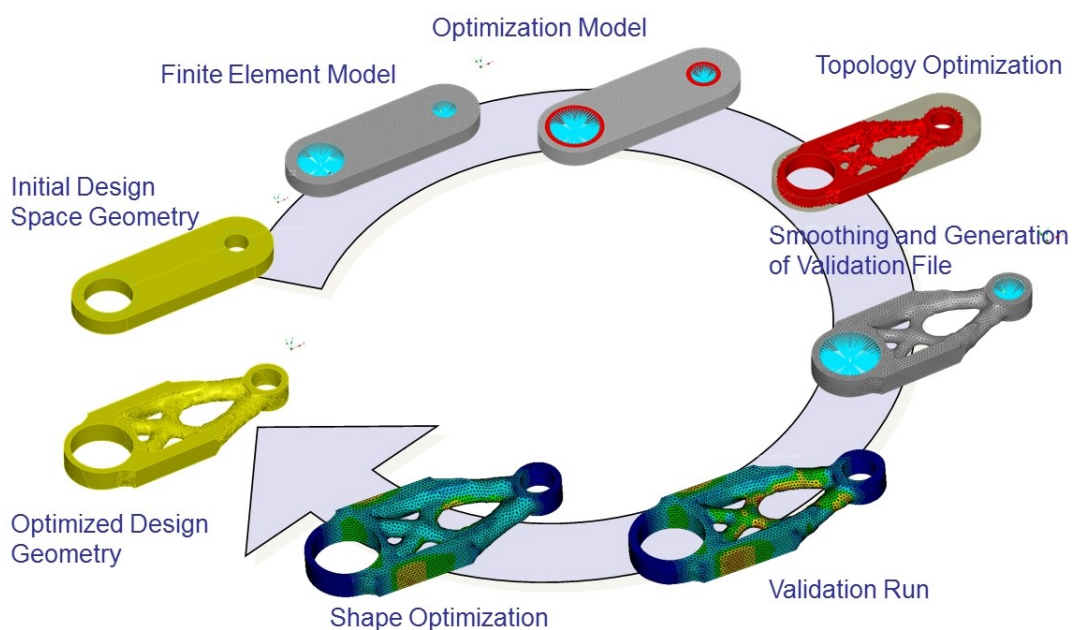
Další, neméně důležitou vlastností podpor je odvod přebytečného tepla. Jelikož se pracuje při teplotách, kdy se taví kovový prášek, dochází k obrovské akumulaci tepla. Toto teplo je navíc drženo okolním práškem, který působí jako izolant. Stavební podpory tak slouží k odvodu tohoto tepla, které může způsobit vnitřní pnutí. V konečném důsledku by mohlo dojít k deformaci materiálu, nebo ke vzniku trhlin.

3.4.2 Optimalizace

Aditivní technologie umožňují výrazně svobodnější konstrukci jednotlivých dílů. Při návrhu pro výrobu konvenčními technologiemi jsou konstruktéři do značné míry omezeni možnostmi výroby. Tyto omezující podmínky mohou způsobit, že výsledná konstrukce nekoresponduje s požadavky na rozložení napětí, tuhost, hmotnost aj. V případě aditivních technologií, toto omezení do jisté míry odpadá.

Procesem optimalizace lze dosáhnout bionických tvarů, které mohou působit poněkud exoticky, ovšem přesně sledují požadovaný cíl. Celý proces počítá se zadanými okrajovými podmínkami. Těmi mohou být funkční požadavky součásti, požadavky na tuhost, hmotnost, rozložení napětí, hmotnost, zástavbové rozměry atd. Cílem optimalizace nemusí být nutně jen úspora hmotnosti, ale také zvýšení tuhosti, změna rozložení hmoty, nebo polohy těžiště. [12] [13]

Optimalizaci je možné rozdělit na topologickou a tvarovou. Topologická sleduje změnu rozmístění a množství materiálu při zachování funkčnosti součásti. Dochází zpravidla k odebrání materiálu a tím snižováním objemu, ovšem při zachování mechanických vlastností. Při topologické optimalizaci je nutné pečlivě volit okrajové podmínky, použitím špatných hodnot dojde k vytvoření designu, který nebude odpovídat požadované zátěži. Tvarová optimalizace je pak zpravidla na konci optimalizačního procesu. Jejím cílem je úprava povrchových ploch, tak aby došlo k odstranění koncentrátorů napětí, jako jsou vruby apod. Optimalizační proces popisuje *obrázek 3.7* [12] [13]



Obrázek 3.7 - Optimalizační proces [14]

Optimalizace nemusí sledovat jen samotnou konstrukci součásti, ale také její orientaci v pracovním prostoru. I orientace může mít vliv na výsledné rozložení napětí a způsobené deformace. V současné době již existují i SW, které na základě zadaných parametrů spočítají deformace výsledné součásti a nabídnou takové změny tvaru, aby po deformaci měl výrobek ideální tvar.

Další optimalizační kategorií jsou pak stavební podpory, které mají vliv na výsledný tvar součásti a také na odvod tepla, které může způsobit vady v konečné struktuře.

3.4.2.1 Optimalizační proces

3.4.2.1.1 Počáteční geometrie

Při optimalizaci se vychází z počáteční geometrie, ta je zpravidla vytvořena s ohledem na výrobu konvenčními technologiemi. Podkladem bývají statické návrhové výpočty s přihlédnutím k jistě míře bezpečnosti. Výsledná součást splňuje funkční požadavky, ovšem nevyhovuje z hlediska poměru tuhosti k hmotnosti. Současné trendy ovšem vedou ke snižování hmotnosti. Proto dojde k optimalizaci tvaru modelu, znamenající odebrání, nebo přemístění materiálu, tak aby došlo ke snížení objemu materiálu a tím pádem i hmotnosti, při zachování funkčních vlastností součásti. Konečná součást může být nákladnější na výrobu, ovšem v koncovém použití může znamenat např. úsporu paliva a tím i nákladů. Důležitým faktorem je zvolená přesnost a funkční únosnost, ta se nesmí změnit ani po optimalizačním procesu. Může se jednat např. o tolerance uložení. [12]

3.4.2.1.2 Model metody konečných prvků

Z výchozí geometrie se vytvoří model pomocí metody konečných prvků (MKP). Těleso je uloženo v prostoru pomocí okrajových podmínek a následně zatíženo. Zatížení sleduje reálný stav při použití součásti. Například místo osamělých sil se doporučuje použít spojitého zatížení. Podle základní geometrie se vytvoří MKP síť. Hotový MKP model je pak připravený pro výpočet v řešiči. [12]

3.4.2.1.3 Optimalizační model

Zadáním cílové (optimalizační) funkce se definuje cíl optimalizace. Tím může být minimalizace nebo maximalizace zvolených výsledků MKP analýzy. Cílem může být dosažení dané hmotnosti, redukováného napětí, deformace atd. Multikriteriální optimalizací lze sledovat více parametrů. Pro hodnocení důležitosti jednotlivých parametrů se používá váhové kritérium. Dále se definují omezení, kterými mohou být maximální posun, minimální objem, případně geometrické omezení. [12]

3.4.2.1.4 Optimalizace topologie

První a nejzásadnější změna tvaru a objemu součásti. V oblastech s nízkou napjatostí dochází ke snižování hustoty a tuhosti jednotlivých elementů. V oblastech nepotřebné hmoty jsou tyto elementy postupně vypínány a na konci výpočtu jsou zcela odstraněny. Proces se snaží dosáhnout předem stanovených cílů, za dodržení zvolených okrajových podmínek. Jedná se o iterativní proces, který se postupně opakuje, dokud nejsou splněny všechny podmínky. [12]

3.4.2.1.5 Generování nové geometrie

Výsledkem topologické optimalizace je nerovná, velmi hrubá struktura, plná vrubů a potenciálních koncentrátorů napětí. Nová geometrie je proto vyhlazena, aby došlo k odstranění těchto nežádoucích prvků. [12]

3.4.2.1.6 Výpočet nové geometrie

Nově vzniklá geometrie se podrobí kontrolnímu výpočtu. Na jejich základě lze porovnat, zda optimalizace proběhla úspěšně. Může se hodnotit např. rozložení napjatosti v součásti, tuhost či hmotnost. Nutné je také ověřit všechna optimalizační omezení, jakými může být [12]

3.4.2.1.7 Optimalizace tvaru

Jedná se zpravidla o poslední krok optimalizace. Výchozí podmínky jsou obdobné jako při topologické optimalizaci. Přemístováním povrchových uzlů výpočtové sítě dochází k úpravám povrchu součásti. Důležitým parametrem je hustota sítě, čím je jemnější, tím je provedený výpočet přesnější. Cílem tvarové optimalizace je homogenizace povrchového napětí součásti. [12]

Výsledkem optimalizačního procesu je součást, která využívá minimum materiálu za splnění všech vstupních podmínek. To je důležitý podotknout, jelikož takto vytvořený design součásti nijak nezhoršuje jeho vlastnosti, naopak mnohdy dochází k vylepšení více jak jednoho parametru. [13]

3.5 Technologie tisku

Aditivní technologie umožňují pracovat s nejrůznějšími materiály. Ať už to jsou plasty, kov, keramika, sklo nebo třeba i dřevo. Tato práce je primárně zaměřena na kovový tisk, ovšem je zde zmíněn částečně i princip tisku ostatních materiálů. [6]

Kromě samotného druhu materiálu se jednotlivé technologie dělí také podle formy, v jaké je základní materiál. Může být buď kapalný, práškový nebo pevný.

Kapalný základní materiál používá se fotopolymerních materiálů, nejčastěji pryskyřic. Pracovní prostor je naplněn kapalinou, která je ozářena zdrojem světla a dochází k vytvrzování kontur modelu. Zdrojem světla může být UV záření, laser, elektronový paprsek a další.

Práškový základní materiál princip je obdobný jako v podobě kapalin, kdy dochází k spékání prášku rozprostřeného v pracovní komoře, případně může být prášek přiváděn přímo tryskou. Touto technologií se vyrábí výrobky z plastů, kovů, keramiky či speciálních písků.

Pevný základní materiál, nejčastěji v podobě drátu, je veden pracovní hlavou, kde je natavován a následně se vrství na pracovní podložku. Tento systém je hojně využíván při tisku plastů. Další možností je lepení vrstev jednotlivých řezů pevného materiálu, nejčastěji papíru. [6]

3.5.1 Kovový tisk

Technologie kovového tisku se dělí do několika různých kategorií. Konfigurace systému se liší potřebným zdrojem tepla, které může být realizováno laserem, hořákem nebo elektronovým svazkem. Dále se rozlišuje, zda je materiál podáván v podobě prášku, nebo drátu. A v neposlední řadě se liší samotná velikost zařízení, jelikož se rozměry mohou pohybovat od milimetrů až řádově po metry. Každá technologie má svá pro a proti a je nutné správně zvolit vhodný systém pro konkrétní aplikaci. [7]

V posledních 20 letech se rozvinuly dvě základní kategorie výroby pomocí AM. Jedná se o PBF (Power Bed Fusion), což se dá přeložit jako „spékání práškové vrstvy“ a DED (Direct Energy Deposition), v překladu znamenající „přímé energetické nanášení“. Výrobci zařízení obě hlavní kategorie dále vyvíjeli a výsledkem je celá řada technologií, které se od sebe velmi liší. Přehled současných technologií a jejich výrobců ukazuje *tabulka 2.2.* [7]

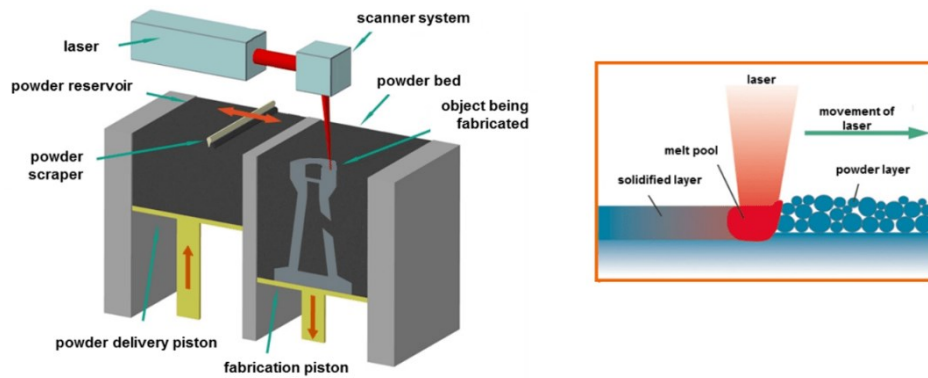
Tabulka 3.2 - Výrobci a technologie kovového 3D tisku

Proces	Název procesu	Výrobce	ASTM kategorie
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	EOS	PBF-L
SLM	Selective Laser Melting	SLM Solution	PBF-L
DMP	Direct Metal Printing	3D Systems	PBF-L
LaserCUSING	Laser Cusing	Concept Laser	PBF-L
EBM	Electron Beam Melting	Arcam AB	PBF-EB
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing	Sciaky Inc.	DED-EB
LENS	LENS	Optomec	DED-L
DM	Direct Metal Deposition	DM3D Technology LLC	DED-L

V literatuře a pracích se často ukazuje pouze několik vybraných způsobů výroby. Technologie PBF a DED jsou však natolik odlišné, že je důležité nejdříve popsat jejich principy obecně rovině.

3.5.1.1 PBF - Powder bed fusion

Technologie PBF používá vysoce výkonný laser (PBF – L) nebo elektronový svazek (PBF – EB), který obkresluje jednotlivé řezy výrobku do vrstvy kovového prášku. Dochází k natavení nebo spékání materiálu, který vytvoří konturu v dané hladině. Po dokončení vrstvy dojde k odstranění přebytečného prášku a nahrne se další vrstva materiálu. Pracovní platforma se posune v Z souřadnici o danou vzdálenost a proces se opakuje, dokud není výrobek hotový. Nejčastější technologie využívající laser PBF-L se nazývají: Direct metal laser sintering (DMLS), selective laser melting (SLM) nebo selective laser sintering (SLS). Použití elektronového svazku PBF – EB se vyvinula technologie electron beam melting (EBM). [7]



Obrázek 3.8 - Princip technologií PBF [15]

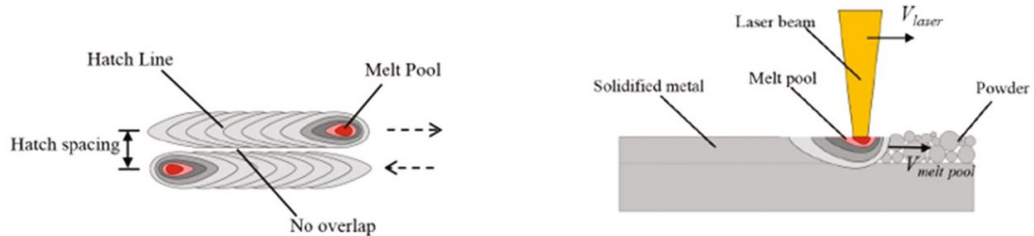
Jednotlivé technologie se od sebe liší, ovšem základ zůstává u všech stejný. Touto technologií je možné zpracovávat širokou škálu materiálů, jako jsou slitiny železa, niklu, kobaltu či titanu.



Obrázek 3.9 - Výrobek vytvořený technologií PBF [16]

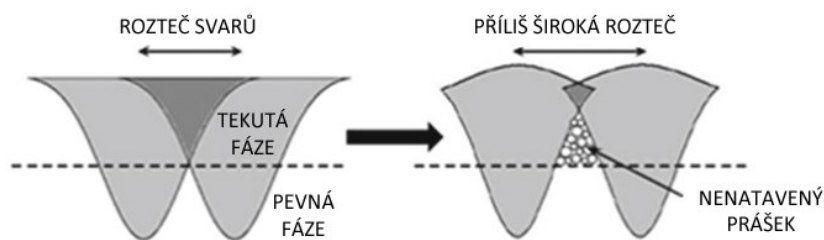
Výhodou technologií používajících práškového lůžka, je možnost vyrábět najednou více různých součástí. Nevýhodou pak může být nutnost použití podpůrné konstrukce a nemožnost vyrábět skryté dutiny. Zároveň je možné pracovat pouze s jedním materiálem.

Při výrobě je nutné sledovat celou řadu parametrů jako je: velikost tavné lázně, tloušťka vrstvy prášku, výkon laseru nebo rozteč jednotlivých svarů. Nedodržením některého z uvedených parametrů může dojít k nedokonalostem v součásti.



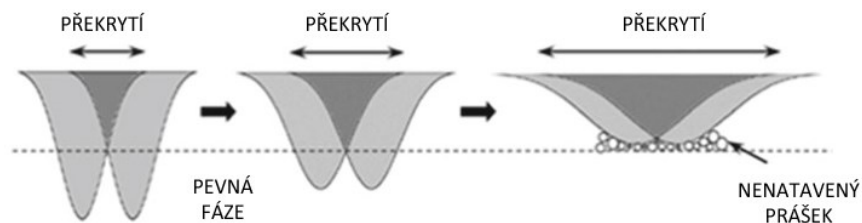
Obrázek 3.10 - Průběh vytváření tavné lázně při výrobě technologií PBF [7]

Jak je vidět na obrázku 3.10, je velmi důležité, aby každá další vrstva procházela vrstvou předchozí. Pokud tomu tak není, a rozteč je příliš velká, dochází k vytvoření neprovařených oblastí, kde se nachází prášek v surovém stavu. Tyto oblasti způsobují zhoršení mechanických vlastností a mohou vést v konečném důsledku ke vzniku trhlin. [7]



Obrázek 3.11 - Vliv velikosti rozteče průchodu paprsku laseru [7]

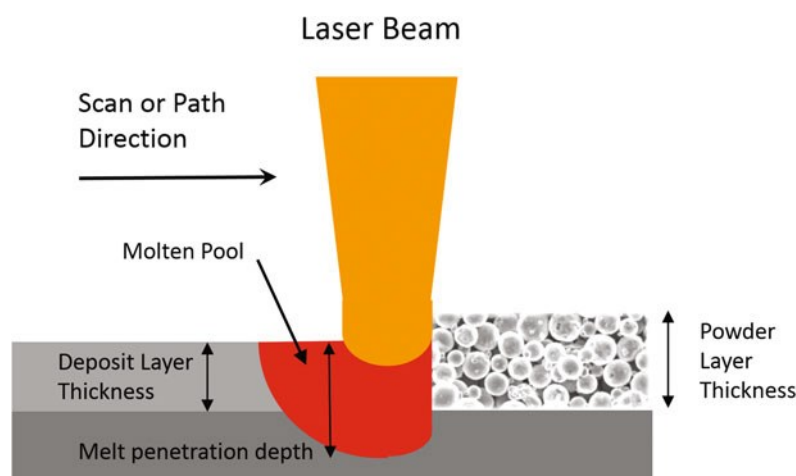
Na dalším obrázku 3.11 je vidět, že teplo musí proniknout i do spodních vrstev, jinak nedojde ke správnému natavení materiálu a opět vnikají neprůvary. V ideálním případě je hloubka průchodu tepla větší, než je tloušťka vrstvy. Dochází k průchodu často 3 a více již hotovými vrstvami materiálu. [7]



Obrázek 3.12 - Vliv velikosti překrytí na průchodu tepla [7]

Požadavky vedoucí k dokonalému spojení všech vrstev a vytvoření 100% hustoty materiálu jsou v přímém rozporu s rychlostí procesu. Musí se proto hledat optimální nastavení, aby byla zohledněna jak technologická, tak ekonomická stránka.

Vlivem gravitace dochází k pěchování prášku, důvodem je jeho rozdílná zrnitost. Menší kuličky propadávají níže a vrchní vrstvy mohou být řidší. Navíc tavením materiálu dochází k jeho dalšímu roztékání a výsledná deponovaná vrstva je nižší než vrstva nanesená. Tento jev ukazuje *obrázek 3.13*. [7]



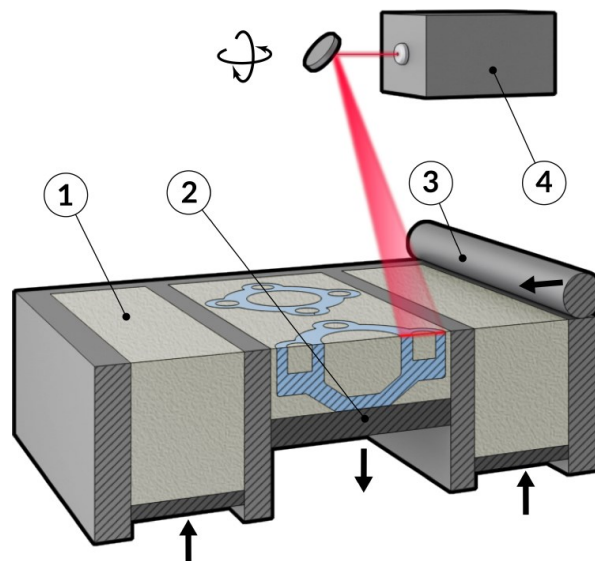
Obrázek 3.13 - Ukázka hloubky průchodu tepla [7]

Velmi důležité hledisko je rozměr výrobku. Největší běžně používané tiskárny pracují s prostorem o rozměrech do 500 mm. S velikostí pracovní komory rostou extrémně nároky a náklady na manipulaci s práškem. Je proto nutné vhodně zvolit velikost zařízení a případně v co největší míře zaplnit pracovní prostor. Potřebu na množství prášku do jisté míry snižují systémy na recyklaci odhrnutého materiálu. Zároveň je nutné počítat i s hmotností prášku a výsledného výrobku. Například pro výrobu koule o rozměru 20 cm z titanu, v krychlové komoře se stěnou 20 cm je potřeba 8000 cm^3 prášku, který váží zhruba 36 kg. Zvětšením výrobku na 40 cm však stoupne hmotnost na 288 kg. [7]

3.5.1.1.1 SLM - Selective Laser Melting

Způsob výroby, kdy základním materiálem je velmi jemný prášek. Ten je nataven pomocí výkonného laseru, zpravidla ytterbiového vláknového. Natavením prášku na velmi vysokou teplotu dochází k dokonalému spojení s předchozími vrstvami a je možné vytvořit součást s až 100% hustotou. Mechanické vlastnosti jsou stejné, nebo dokonce lepší jak při použití konvenčních metod. Pohyb laseru je řízen soustavou zrcadel, která umožňuje rychlé směřování v osách X a Y. Pohyb v ose Z je realizován posuvným stolem pracovního prostoru. Proces probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu, nejčastěji He, Ar. [17] [18] [19]

Velkou výhodou metody SLM je možnost výroby široké škály materiálů: slitiny hliníku, titanu, niklu, kobaltu, mědi či železa. Kromě kovů je možné touto technologií zpracovávat i celou řadu polymerů. Mezi další výhody patří relativně nízké náklady na výrobu samotných součástí.



Obrázek 3.14 - Princip technologie SLM [17]

① Zásobník prášku, ② pohyblivá platforma, ③ nanašeč prášku, ④ laserová hlava

Na druhou stranu má technologie i několik nevýhod. Samotné zařízení je velmi drahé, a proto je vstupní investice relativně vysoká. Proces je časově náročný a spotřebuje velké množství prášku. Také manipulace s práškem a jeho recyklace je do jisté míry náročná. Limitací je i velikost součástí. [17] [18] [19]

3.5.1.1.2 DMLS - Direct metal laser Sintering

Technologie DMLS byla původně vyvinuta společnostmi Rapid Product Innovations (RPI) a EOS (Electro Optical System) v roce 1994. Jako první metoda Rapid prototypingu umožňovala vyrobit kovovou součást z jednoho kusu.

Při výrobě technologií DMLS se používá výkonného laseru, zpravidla CO₂, který vytváří potřebné teplo k slinování prášku. Hlavním rozdílem oproti SLM je pracovní teplota. Při spékání nedochází k plnému natavení materiálu. Teplota se pohybuje od 0,6 do 0,9 teploty tání používaného kovu. Princip je podobný jako při práškové metalurgii. Samotná výroba součásti probíhá stejně jako metodou SLM.

Na rozdíl od SLM je tato technologie určena výlučně pro zpracování kovů. Používané materiály zahrnují obvyklou škálu kovových slitin železa, titanu, hliníku, kobaltu nebo niklu. Vyráběné součásti nacházejí uplatnění při výrobě medicínských implantátů, dílů pro letecký a kosmický průmysl a mnoho dalších. [7] [19]

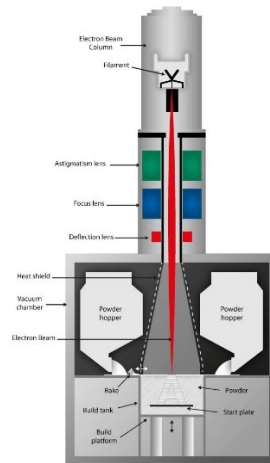
Materiály používané metodami DMLS a SLM ukazuje *tabulka 2.3*.

Tabulka 3.3 - Materiály používané metodami DMLS a SLM [20]

	Materiál	Popis
Kovy a slitiny	Oceli	Hot-work steel
		Nerezová ocel
		Martenzitická ocel
		Nástrojová ocel
		Maraging ocel
	Titan	Ti6Al4V
		Ti6Al7Nb
	Nikl a jeho slitiny	Inconel 718
		Inconel 625
	Měď	Měď
Zlato	Zlato	
Hliník a jeho slitiny	A6061	
	AlSi12 a AlSi12Mg	
	AlSi10Mg	
Kompozity	MMC	Fe-grafit, Ti-grafit/diamat, Ti-SiC, AlSi-SiC, AlMg-SiC, Co-WC, Fe-SiC a Cu, Ni, Ti, C, Al ₄ 5Cu3Mg-SiC
		CMC

3.5.1.1.3 EBM - Electron Beam Melting

Tato technologie vychází z výše popsaných metod. Dochází ke spékání materiálu v podobě prášku, který je rozložen v pracovní komoře. Rozdílem je způsob přiváděného tepla. Na rozdíl od předchozích metod, kdy byl používán laser, se u technologie EBM používá elektronový paprsek. Celý proces probíhá ve vakuu a prášek se udržuje při teplotě 600°C. [6]



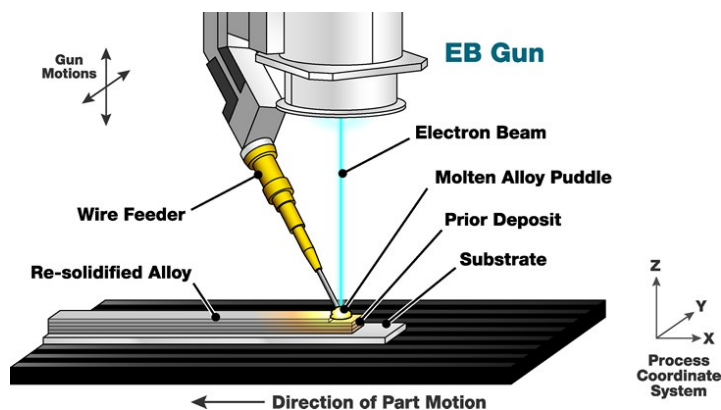
Obrázek 3.15 - Princip metody EBM [21]

Pro optimalizaci procesu je nutné pracovat s celou řadou parametrů: síla, rychlost, zaostření, průměr paprsku, rozteč průchodů paprsků, předehřev materiálu, strategie konturování a další. Celý proces je složitější na nastavení než předchozí technologie, a je určen pro materiály Ti grade 2, Ti6Al4V, Inconel 718, CoCrMo. Výroba je pomalejší, a proto i výrobky jsou dražší. Na druhou stranu je EBM schopné pracovat s křehčími materiály než SLM. Materiály s nižší teplotní roztažností jsou náchylnější na prudké ochlazování, proto se pracuje ve vyhřívaném prostoru a následně musí docházet k velmi pomalému ochlazování. Pokud by byly součásti ochlazovány příliš rychle, docházelo by k velkému vnitřnímu pnutí, které by mohlo vést až k praskání. [6] [18] [22]

Technologií EBM se primárně vyrábějí lékařské implantáty nebo součásti pro letecký a kosmický průmysl.

3.5.2 DED - Direct Energy Deposition

Technologie DED nepoužívá pracovního lože s práškem, ale přivádí materiál přímo do místa tisku. Pro vytvoření tavné lázně se používá laserový paprsek, elektronový svazek nebo plazmový hořák. Vytváří se tak přímo prostorový objekt, který nepotřebuje stavební podobory. Technologie využívající laser se nazývají: Laser engineered net shape (LENS), Direct metal deposition (DMD) a Laser metal deposition (LMD). Elektronový svazek se používá u technologií: Electron beam freeform fabrication (EBF3) a Electron beam additive manufacturing (EBAM). [7]

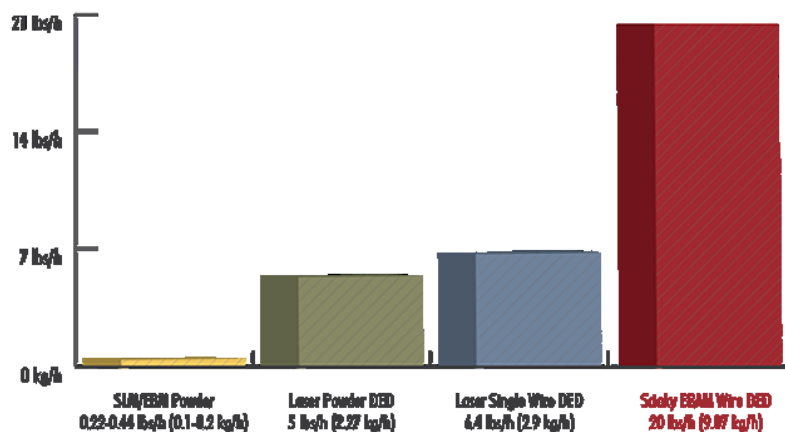


Obrázek 3.16 - Princip technologií DED [23]

3.5.2.1.1 EBAM

Technologie Electron Beam Additive Manufacturing je aditivní technologií využívající elektronového paprsku. Materiál je přiváděn v podobě drátu, pod elektronovým paprskem dochází k jeho natavení a následnému vytvoření součásti. Celý proces musí probíhat ve vakuu. Rozměry součástí se mohou pohybovat od milimetrů až po metry, v závislosti na velikosti vakuové komory. Princip metody je zobrazen na obrázku 3.16. [23]

Velkou výhodou této technologie je vysoká rychlost celého procesu, která dosahuje až 9,07 kg/hod. Porovnání s ostatními technologiemi je uvedeno na obrázku 3.17.



Obrázek 3.17 - Porovnání rychlosti výroby vybraných technologií [17]

Další velkou výhodou je téměř 100% využití materiálu. V porovnání s ostatními aditivními technologiemi, které používají práškové lože, se také snižuje celková potřeba základního materiálu. Při použití prášku je potřeba až jeho pětinasobek oproti samotnému objemu součásti. Použitím drátu a přímého přívodu materiálu do místa tavení je také možné pracovat s více materiály najednou. Je dokonce možné vytvářet slitiny kovů, a to pouze v určitých částech součásti. Škála vyráběných materiálů je výrazně větší než při práci s práškem, jedná se o řádově stovky různých materiálů. Taktéž cena drátu je v porovnání s práškem i o 50% nižší. [6] [23]

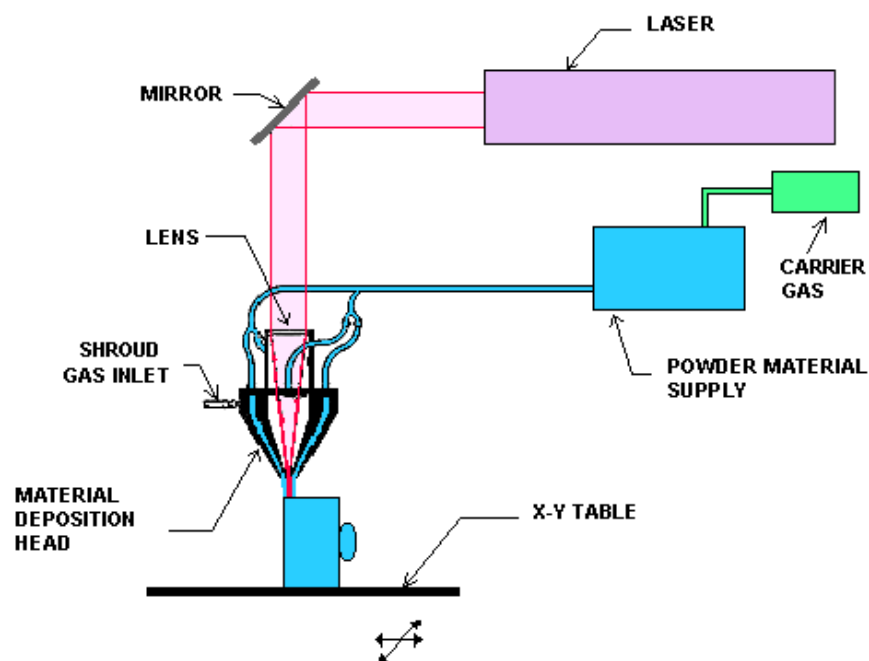


Obrázek 3.18 - Výroba technologií EBAM [23]

Možnost vyrobit značně velké součásti se užívá při konstrukci leteckých motorů, strukturálních konstrukcí či závěsů křídel.

3.5.2.1.2 LENS

Laser Engineered Net Shaping je technologie pracující s vysoce výkonným laserem (3 – 4 kW), který slouží k natavení práškového materiálu a přímé tvorbě třírozměrných výrobků. Proces probíhá v ochranné atmosféře Argonu, přičemž množství kyslíku se pohybuje do 10 ppm. Tím se zabraňuje oxidaci a výsledkem je čistá součást. Materiál je přiváděn pracovní hlavou, která zajišťuje přesný proud prášku. Umožňuje také kombinaci různých materiálů. [6]



Obrázek 3.19 - Schéma technologie LENS [24]

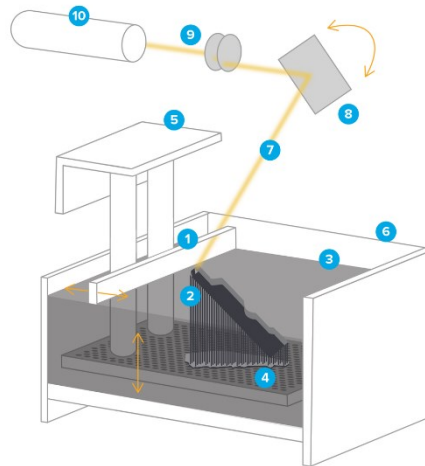
Pro tuto technologii je charakteristická horší kvalita povrchu, která vyžaduje následné obrábění nebo leštění. Velkou nevýhodou je také značné vnitřní pnutí, které je způsobeno střídáním teplot v průběhu výroby. Musí tak zpravidla následovat ještě tepelné zpracování. Často se technologie LENS používá např. pro opravu lopatek turbín. [6]

3.5.3 Tisk nekovových materiálů

Kromě kategorií DED a PBF je zde ještě kategorie nekovového tisku. Stereolitografie (SLA), Fused Deposition modeling (FDM) a Laminated object modeling (LOM) jsou natolik specifické, že je nutné je uvést odděleně.

3.5.3.1 SLA - Stereolitografie

Jedna z prvních metod aditivních technologií. Princip je podobný PBF, rozdíl je však v použitém materiálu i způsobu vytvrzení. K výrobě se používá kapalná fotopolymerní pryskyřice. Působením laseru nebo UV záření dochází k vytvrzování v jednotlivých vrstvách. Stejně jako u ostatních metod i u SLA je nutné pro složitější konstrukce vytvářet podpůrné struktury.



Obrázek 3.20 - Princip technologie SLA [25]

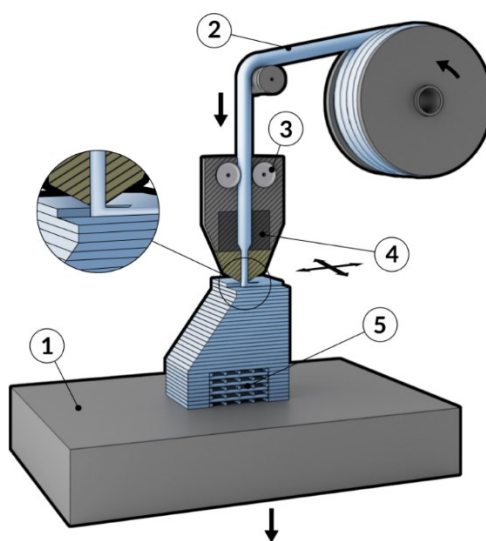
① *sweeper*, ② *tištěná součást*, ③ *fotopolymerní náplň*, ④ *základní deska*, ⑤ *pohyblivá platforma*, ⑥ *nádrž na kapalinu*, ⑦ *laserový paprsek*, ⑧ *X,Y polohovací zrcadlo*, ⑨ *čočky*, ⑩ *zdroj UV/laseru*

Výhodou této technologie je možnost vyrábět rozměrné součásti s přijatelnými mechanickými vlastnostmi. Nevýhodou je pak vyšší cena zařízení a také vyšší spotřeba materiálu, jelikož reaktivní pryskyřice má omezenou životnost a po vytištění je zpravidla znehodnocená a nelze ji opakovaně použít jako prášek při PBF.

3.5.3.2 FDM - Fused Deposition Modeling

FDM je jedna z nejrozšířenějších metod tisku polymerních výrobků. Představena byla v roce 1988 společností Stratasys. Patentová ochrana vypršela v roce 2009 a od té doby je tato technologie dostupná pro všeobecné použití. Výsledkem bylo prudké rozšíření technologie mezi širokou veřejnost.

Principem je vytváření jednotlivých vrstev materiálu pomocí speciální tiskové hlavy. Do tiskové hlavy je přiváděn základní materiál v podobě drátu a následně je v polotekutém stavu vytlačován do místa tisku. [26]



Obrázek 3.21 - Schéma technologie FDM [26]

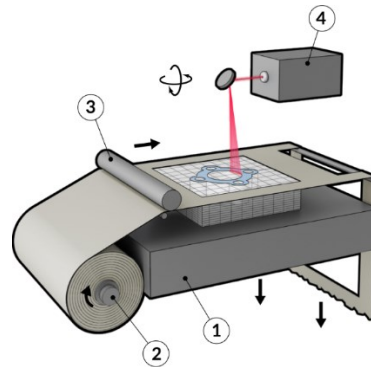
- ① základní deska, ② přívod materiálu, ③ podavač drátu, ④ vyhřívaná tisková hlava, ⑤ vytisknutá součást

Tisková hlava má zpravidla 2 tiskové trysky pro stavební materiál, který je použitý k tisku součásti a podpurný materiál, který je využíván pro stavební podpory. V současné době už ale nejsou výjimkou i tiskové hlavy s více tryskami, kombinující různé stavební materiály.

Tisk se provádí na pracovní podložku, ta je buď pevná a pohyb ve všech osách je řízen pouze tiskovou hlavou. Nebo se pohybuje v ose Z a pohyb v osách X a Y je realizován tiskovou hlavou. Pro zmenšení případných deformací vlivem tepla, jsou stavební podložky vyhřívané. Jejich teplota se určuje podle použitého materiálu a rozměrů výrobku. Princip je znázorněn na obrázku 3.21. [26]

3.5.3.3 LOM - Laminated Object Manufacturing

Princip spočívá ve vyřezávání jednotlivých vrstev materiálu, které jsou na sebe následně laminovány. Metoda byla vyvinuta společností Helisys, Inc v roce 1988. Princip technologie je zobrazen na *obrázku 3.22*.



Obrázek 3.22 - Princip technologie LOM [27]

① základní deska, ② zásobník materiálu, ③ zahřívací roller, ④ laserová hlava

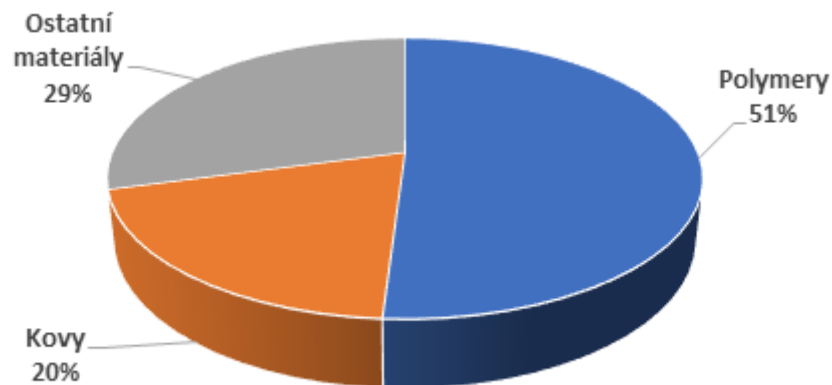
Výroba probíhá na pohyblivém stole (1), ten zajišťuje pohyb ve svislé ose. Materiál je přiváděn ze zásobníku (2), následně je veden pod zahřívacím rollerem (3) do pracovního prostoru. Jednotlivé vrstvy jsou vyřezány laserem (4), případně nožem, v závislosti na materiálu a použitém zařízení. Po vytvoření řezu je vrstva přitlačena a dochází ke spojení. Po dokončení se výrobek vyjme a dále se zpracovává obdobně jako v případě ostatních technologií. Je možné ho obrábět klasickými metodami. [27]

Technologií LOM je možné zpracovávat řadu materiálů jako je papír, dřevo, plasty, kov, kompozity. V případě papírových a dřevěných výrobků je nutné je ošetřit silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem, kvůli ochraně před navlháním a tím pádem změnou rozměrů.

Výhodou této technologie jsou minimální náklady, možnost zpracování širokého spektra materiálů, relativně rychlá výroba a možnost vyrábět i velmi rozměrné výrobky. Nevýhodou je nízké využití materiálu, které dosahuje jen cca 50%, dále nutnost použití dokončovacích operací a také nevhodnost pro tenkostěnné výrobky. [27]

3.6 Používané materiály

Jak již bylo zmíněno, při výrobě je možné použít širokou škálu materiálů. Ve strojírenství to jsou nejčastěji kovy, a to jak ve formě čistých kovů, tak slitin. Plastové výrobky jsou nejčastěji využívány jako prototypy. Mezi další materiály patří kompozity, keramika, vosky, ale také sklo, papír nebo dřevo.



Obrázek 3.23 - Poměr materiálů používaných aditivními technologiemi [28]

3.6.1 Polymery

Nejrozšířenější nekovové materiály určené pro aditivní technologie. Jejich využití je především v prototypové výrobě. Nabízejí nízkou cenu vstupních surovin v kombinaci s přijatelnými mechanickými vlastnostmi. Zároveň umožňují jednoduché zpracování hotových součástí a jejich recyklovatelnost.

Pro samotný tisk se výlučně používají termoplasty. Důvodem je fakt, že materiál prochází opakovaně roztavením a následným tuhnutím, což reaktoplasty neumožňují. Reaktoplasty se tak používají jen při výrobě technologií SLA. [29-32]

Výhodou tisku z polymerních materiálů je také při návrhu a výrobě podpůrných struktur. Ty mohou být vyrobeny z materiálu, který je následně rozpuštěn ve vodném roztoku za použití ultrazvuku. Dochází ke zrychlení výroby a zjednodušení následných operací. Zároveň se podpůrný materiál snadno odstraní i z hůře dostupných vnitřních míst.

Tabulka 3.4 - Porovnání mechanických vlastností vybraných polymerů

Název	Pevnost v tahu [MPa]	Poměrné prodloužení na mezi kluzu [%]	Pevnost v ohybu [MPa]	Teplota skleného přechodu [°C]	Hustota [kg/m ³]
ABS	22	6	41	105	1045
PLA	50	6	80	69	1250
PVA	78	9,9		60	1270
PET	140	2,5	80	76	1350
PC	68	4,8	104	161	1310

ABS - Akrylonitril–butadien-styren

Jeden z nejpoužívanějších termoplastických materiálů pro použití v 3D tiskárnách. Existuje v různých podobách jako ABS plast, ABSi, ABSplus, ABS-M30i, ABS-ESD7. Jednotlivé druhy se liší svými vlastnostmi, avšak základ zůstává stejný. Je velmi pevný, s výbornou tepelnou odolností až do 100 °C. ABS je rozpustný v acetonu, čehož se využívá při lepení výtisků, které stačí naleptat a následně spojit. Acetonovými výparry je taktéž možné ABS výtisky vyhladit do lesklého povrchu.

Teplota trysky při tisku se pohybuje okolo 255 °C a je nutné používat podložku vyhřátou na 100 °C. Vzhledem k tomu že je vyroben z ropy, při tisku značně zapáchá. Zároveň může vytvářet kouřové emise. [29]

3.6.1.1 PLA - Kyselina polyléčná

Biologicky plně odbouratelný materiál, vyráběný z bramborového nebo kukuřičného škrobu, případně cukrové třtiny. Vedle ABS se jedná o nejpoužívanější materiál pro tisk extruzí. Kromě biologické odbouratelnosti je jeho výhodou v rozpustnosti v hydroxidu sodném. Obdobně jako ABS existuje v mnoha modifikacích: PLA – D, Steel PLA, Magnetic Iron PLA, PLA/PHA.

Oproti ABS jsou výrobky méně pružné a jsou náchylnější na zvýšenou teplotu, kdy již při 69°C dochází k měknutí. Na druhou stranu není PLA tolik náchylný na deformace vlivem chladnutí a nevyžaduje ve většině případů vyhřívanou podložku. Teplota tisku se pohybuje od 185 do 235 °C. [30]

3.6.1.2 PVA - Polyvinylalkohol

Používá se jako podpurný materiál, je vhodný v kombinaci s PLA a Nylonem. Výhodou je biologická odbouratelnost a snadná rozpustnost ve vodě. Vhodný pro použití ve více tryskových hlavách. Vyniká vysokou pevností v tahu a pružností.

Tisk probíhá při teplotách do 200 °C, teplota podložky se volí 0 – 50 °C. Při tisku nevzniká zápach. [31]

3.6.1.3 PET - Polyetylentereftalát

Houževnatý termoplastický materiál s dobrou tepelnou odolností, je poměrně tvrdý a odolný proti otřesům. Má malou tepelnou roztažnost, a proto nedochází k deformaci ani velkých dílů. Vhodný je pro výrobu mechanických součástí s venkovním i vnitřním použitím. V původním stavu je vlákno průhledné, až následným ohřátím nebo chladnutím mění svou transparentnost.

Teplota tisku se pohybuje od 210 do 260 °C, podložka není třeba přehřívat.

Obdobně jako ostatní materiály existuje v několika modifikacích. PETG obsahuje navíc glykol, čímž získává větší odolnost proti kyselinám a rozpouštědlům, vysokým i nízkým teplotám. Na rozdíl od běžného PET je však nutné přehřívat podložku na 80 – 100°C. PETG/CF obsahuje navíc uhlíkové vlákno, díky němu získává charakteristickou černou barvu, ale především větší pevnost a tuhost. [32]

3.6.1.4 PC - Polykarbonát

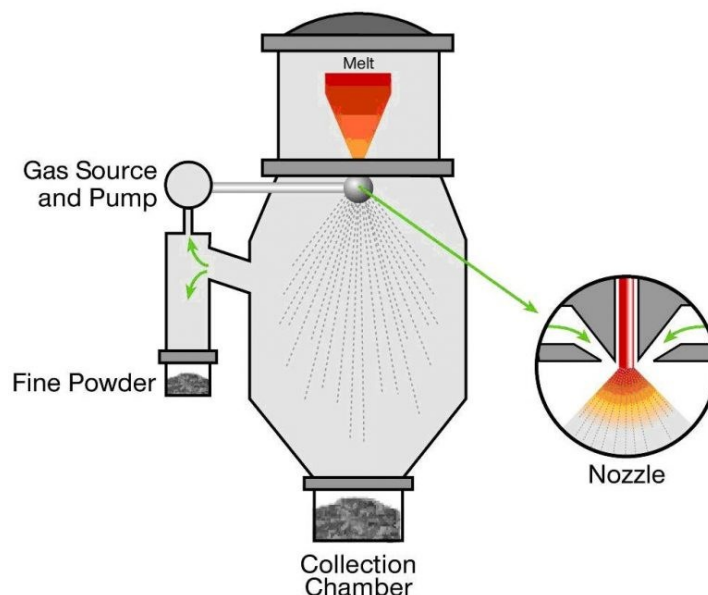
Pravděpodobně nejtvrdší termoplast používaný pro 3D tisk. Vyniká velmi dobrou odolností proti nárazům a také teplotní odolností. Nevýhodou však je vysoká tepelná roztažnost, z čehož plyne náchylnost na deformaci větších výrobků. Hodí se tak zejména pro menší součásti. Zároveň se řadí mezi nejobtížněji zpracovatelné materiály. Při tisku je nutné používat teplotu až 280 °C. Pro zlepšení jeho vlastností a zjednodušení tisku se používají příměsi ABS. [33]

3.6.2 Kovové materiály

Pro výrobu se nejčastěji používají slitiny kovů ať už nerezové oceli, nejčastěji AISI 316L, tak titanové, hliníkové, niklové nebo kobalt chromové slitiny. Základní materiál je dodáván v podobě prášku, kdy rozměry zrněk jsou v řádu desítek až stovek mikrometrů. Práškový materiál se vyrábí buď plynovou nebo plazmovou atomizací.

3.6.2.1 Plynová atomizace

Při výrobě plynovou atomizací je roztavený materiál přiváděn tryskou do pracovní komory, kde je rozptýlen proudem plynu, dusíku či argonu. Výsledkem jsou částičky ve tvaru kuliček, které dopadají na dno komory, kde jsou následně sbírány. [34]

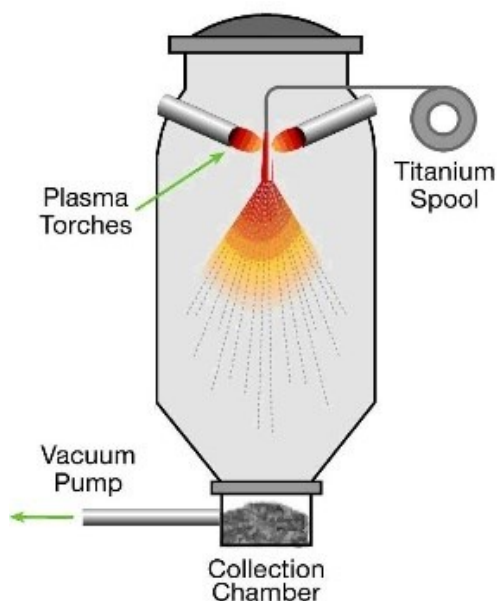


Obrázek 3.24 - Schéma výroby prášku plynovou atomizací [34]

Konečné vlastnosti prášku závisí na mnoha faktorech, jako je: typ, tlak, teplota, viskozita a rychlost plynu, geometrie trysek, typ slitiny apod. Velikost částic prášku se pohybuje od 20 až 300 μm . Tento typ výroby prášku se používá např. pro železné kovy či hliníkové slitiny [35]

3.6.2.2 Plazmová atomizace

Plazmová atomizace se naopak používá pro těžko tavitelné materiály, jako jsou titanové či niklové slitiny. Materiál v podobě drátu je přiváděn mezi plazmové hořáky. Působením plazmového oblouku dochází k atomizaci prášku do podoby kuliček, které dopadají na dno komory. Výsledný rozměr částic prášku se pohybuje od 0 do 200 μm . [34]



Obrázek 3.25 - Schéma výroby prášku plazmovou atomizací [34]

3.6.2.3 Nerezové slitiny

Díky svým vlastnostem jsou hojně využívány v automotive, strojírenské výrobě, potravinářství i medicíně. Vynikají svojí tvrdostí, pevností v tahu, tvárností a odolností vůči nárazu. Mezi nejpoužívanější patří AISI 316L a 17-4PH.

3.6.2.3.1 AISI 316L

Austenitická, extra nízkouhlíková, nerezová ocel. Vyniká velmi dobrými mechanickými a antikorozními vlastnostmi. Zároveň má dobrou odolnost proti chloru, tudíž je vhodná pro použití v mořských aplikacích. Použití nachází také při konstrukci vodíkového potrubí a chladicích zařízení. Své vlastnosti si zachovává i při velmi nízkých teplotách. Je velmi dobře svařitelná a zpracovatelná většinou konvenčních metod. [36] [37]

Tabulka 3.5 - Chemické složení AISI 316L [37]

Cr	Ni	C	Mn	Mo	N	Si	P	S
16,5 – 18,5	10 – 13	≤ 0,03	≤ 2	2 – 2,5	≤ 0,11	≤ 1	≤ 0,045	≤ 0,03

Tabulka 3.6 - Mechanické vlastnosti AISI 316L [37]

Hustota [g/cm ³]	Rp [MPa]	Rp 0,2% [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Tvrдость [HRB]
7,8	485 – 595	380 - 560	180	25-55	89

3.6.2.3.2 17-4PH A

Jedná se o chrom nikl měděnou, precipitačně vytvrzovanou, martenzitickou nerezovou ocel s přídavkem niobu. Kombinuje vysokou pevnost a tvrdost s dobrou korozní odolností. Není vhodná pro aplikace nad 300 °C, nebo naopak v mrazu. Ideálních vlastností dosahuje po tepelném zpracování při 482 °C. [38] [39]

Tabulka 3.7 - Chemické složení 17-4PH A [38]

Cr	Ni	Cu	C	Mn	P	S	Si	Nb + Ta
15 – 17	3 - 5	3 – 5	0,07	1	0,04	0,03	1	0,15 – 0,45

Tabulka 3.8 - Mechanické vlastnosti 17-4PH A [38]

Hustota [g/cm ³]	Rp [MPa]	Rp 0,2% [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Tvrдость [HRC]
7,75	1100	790	190 - 210	5	35

3.6.2.4 Hliníkové slitiny

Uplatnění hliníkových slitin je již tradičně v letectví, kosmonautice, automotive a obecně tam, kde je požadavek na nízkou hmotnost součástí při zachování pevnosti. Dalšími výhodami je také dobrá korozní a únavová odolnost. Tištěné výrobky z hliníkových slitin tvoří jemnozrné struktury, které jsou svými vlastnostmi téměř shodné s tvářenými díly. Poslední výzkumy ukazují, že pro 3D tisk jsou použitelné i další slitiny, včetně řad 6061 a 7075. [40]



Obrázek 3.26 - Topologicky optimalizovaný držák pro vesmírný výzkum [41]

Nízká hmotnost částic hliníkového prášku paradoxně způsobuje i problémy. Obdobně jako u titanových slitin je velmi komplikovaná manipulace s práškem. Jelikož jsou částice velmi jemné a lehké, snadno by mohlo dojít k vdechnutí částic prášku. Navíc může docházet k pronikání prášku do těla skrz kožní póry. Při práci s těmito materiály se tak musí dodržovat přísná bezpečnostní pravidla, jako je použití speciálních obleků apod.

3.6.2.4.1 AlSi10Mg

Slitina typicky využívána ve slévárenství. Používá se na výrobky se složitou geometrií a tenkými stěnami. Je charakteristická dobrou pevností, tvrdostí a schopností snášet dynamické zatížení. Může být obráběna, jak třískově, tak elektroerozivně, svářena, leštěna. Pro zlepšení svých mechanických vlastností se používá tepelné zpracování. [42]

Tabulka 3.9 - Chemické složení AlSi10Mg [42]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
9 – 11	≤ 0,55	≤ 0,05	≤ 0,45	0,2 – 0,45	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,15

Tabulka 3.10 - Mechanické vlastnosti AlSi10Mg [42]

Hustota	Rp	Rp 0,2%	Modul pružnosti	Tažnost	Tvrdost
[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[HBW]
2,67	≈ 460	≈ 270	≈ 70	9 ± 2	119

3.6.2.4.2 AlSi12

Jedna z nejoblíbenějších slévárenských slitin. Vyniká nízkým bodem tání, relativně nízkým smrštěním, nízkou cenou, dobrou korozní odolností a vysokou pevností v poměru k nízké hmotnosti. Díky své nízké teplotě tání se hojně využívá také při pájení a jako přídavný materiál pro svařování hliníkových slitin s obsahem křemíku nad 7 % metodami TIG i MIG. Díky vyššímu obsahu křemíku oproti AlSi5 má zlepšenou tekutost a nižší smršťování. Není tepelně vytvrzovatelná. Nejčastější aplikace v tepelných výměnících, klimatizacích či chladících zařízeních automobilů nebo pro výrobu pístů spalovacích motorů. [43] [44]

Tabulka 3.11 - Chemické složení [43]

Mn	Si	Cu	Mg	Zn	Ti	Pb	Fe
0,42	11,2	0,1	0,1	0,12	0,1	0,1	0,45

Tabulka 3.12 - Mechanické vlastnosti [43]

Hustota	Rp	Rp 0,2%	Modul pružnosti	Tažnost	Tvrdost
[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[HB]
2,65	240	140	75	1 - 3	60

3.6.2.5 Titanové slitiny

Rozsah využití titanových slitin je velmi široký. Uplatnění nachází v leteckém a kosmickém průmyslu, jako části turbín, v chemickém průmyslu, nebo jako části závodních automobilů, především komponenty motoru a převodovek. Titan je navíc biokompatibilní, což ho předurčuje k aplikaci v medicíně, jako části kloubních či kostních náhrad.

V oblasti aditivních technologií se nejčastěji používá slitina Ti6Al4V. Díky 6 % hliníku a 4 % vanadu získává slitina vysokou pevnost v tahu i při extrémních teplotách. Je navíc svařovatelná, tepelně zpracovatelná a poskytuje dobrou korozní odolnost. Díky rychlému chladnutí kovové svarové lázně vyniká tato slitina taktéž jemnozrnnou a vysoce hustou strukturou.

Vylepšení představuje slitina Ti6Al4V ELI, která obsahuje nižší procento uhlíku, železa, kyslíku a dusíku. Díky snížení obsahu těchto prvků dosahuje slitina lepší tažnosti a lomové houževnatosti. Pro svou velmi dobrou korozní odolnost se používá v zařízeních pro těžbu ropy a plynu z mořského dna. [2]

Tabulka 3.13 - Chemické složení Ti6Al4V [2]

Al	V	C	Fe	O	N	H
6	4	0,03	0,1	0,15	0,01	0,003

Tabulka 3.14 - Mechanické vlastnosti Ti6Al4V [2]

Hustota [g/cm ³]	Rp [MPa]	Rp 0,2% [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Tvrdost [HC]
4,42	1020	950	120	14	33

3.6.2.6 Niklové slitiny

Slitiny na bázi niklu vynikají extrémní korozní odolností a jsou schopny pracovat i při velmi vysokých teplotách. Používají se proto především v petrochemickém, leteckém a kosmickém průmyslu jako části motorů, turbín, jako části závodních automobilů, či v potravinářství. Teplotní rozsah použitelnosti niklových slitin se pohybuje od -200 do 700 °C. Nejrozšířenější jsou slitiny Inconel 625 a 718. [45] [46]

3.6.2.6.1 Inconel 625

Jedná se o vysoce pevnou nikl – chromovou slitinu s velmi dobrou korozní odolností a schopností pracovat od záporných teplot až po teploty nad 1000 °C. Pevnost slitina dosahuje díky zpevňujícímu efektu molybdenu a niobu v nikl – chromové matici, díky čemuž není nutné precipitační vytvrzování. Tato kombinace zaručuje velmi dobré antikorozní vlastnosti včetně vysokoteplotních efektů, jako je oxidace a nauhličování. Tyto t předurčují Inconel 625 pro použití v mořských aplikacích, jelikož vyniká odolností proti štěrbinové korozi a pitiingu. Používá se pro výrobu dílů ponorek, dílů podmořského kabelového vedení, částí turbín a motorů v leteckém a kosmickém průmyslu. [45]

Tabulka 3.15 - Chemické složení Inconel 625 [45]

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Co
≥ 58	20 - 23	≤ 5	8 -19	3,15 – 4,15	≤ 0,1	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 1

Tabulka 3.16 - Mechanické vlastnosti Inconel 625 [45]

Hustota [g/cm ³]	Rp [MPa]	Rp 0,2% [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Tvrдость [HBW]
8,44	Až 1100	Až 750	200	Až 50	Až 240

3.6.2.6.2 Inconel 718

Vysoce pevná a korozně odolná vytvrditelná slitina, na bázi nikl - chromu. Zároveň vykazuje dobrou odolnost proti tečení při teplotách do 700 °C. Je dobře svařitelná a odolná proti praskání. Korozí odolává i v prostředí kyseliny sírové a chlorovodíkové. Používá se pro výrobu částí leteckých motorů, plynových turbín, v petrochemickém průmyslu. 3D tiskem se hojně vyrábí součásti závodních motorů, které musí odolávat vysokým teplotám a zároveň vysokému zatížení. [46]

Tabulka 3.17 - Chemické složení Inconel 718 [46]

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Co
≥ 58	20 -23	≤ 5	8 -19	3,15 – 4,15	≤ 0,1	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 1

Tabulka 3.18 - Mechanické vlastnosti Inconel 718 [46]

Hustota [g/cm ³]	Rp [MPa]	Rp 0,2% [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Tvrdost [HB]
8,19	Až 1300	Až 1100	205	12	331

3.6.3 Jiné materiály

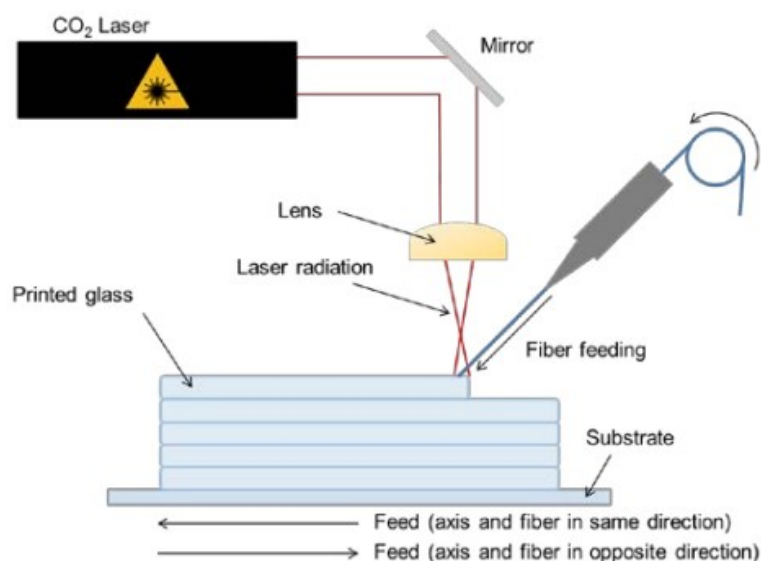
Kromě výše zmíněných materiálů, které se do jisté míry mohou označit za konvenční, se používají i materiály o poznání exotičtější.

3.6.3.1 Medicína

V oblasti lékařství se tisk využívá pro výrobu kloubních náhrad, zubů apod. Ty jsou však většinou vyráběny z konvenčních materiálů. V posledních letech se však rozšiřuje i výzkum v oblasti tisku samotných orgánů. Využívá se k tomu bio-inkoustu, který je tvořen kmenovými buňkami. Dobrých výsledků bylo taktéž dosaženo při tisku kostí. Nedochozí k tisku celé nové kosti, ale kombinací kmenových buněk a sloučenin fosforečnanu vápenatého, zinku a křemíku dochází ke stimulaci růstu kosti. Vytisknutý materiál je následně odstraněn.

3.6.3.2 Sklo

Teplota tavení křemenného skla je více jak 2000 °C. To dělá z tohoto procesu velmi komplikovanou záležitost, především pro svojí energetickou náročnost. Tisk pomocí SLM se ukázal jako nevhodný, jelikož výrobky jsou velmi porézní. Další metodou je výroba pomocí tavení skleněného vlákna CO₂ laserem. Princip je znázorněn na obrázku 3.27. Tímto způsobem jsou vyráběny součásti pro lékařství. [47]



Obrázek 3.27 - Princip výroby tavením skleněného vlákna CO₂ laserem [47]

Vývoj také směřuje k výrobě tzv. „kapalného skla“. Nedochozí k tavení na vysokou teplotu, ale skleněné částice jsou rozptýleny v polymerní suspenzi, která je následně tisknuta na 3D tiskárně. Po vytištění se materiál zahřeje v peci, čímž dojde k vytvrzení skla a vypálení přebytečného plastu. Předchozí pokusy o tisk taveného skla vedly k porozitě a hrubému povrchu. Tato technologie najde uplatnění při výrobě malých a složitých optických komponent. [48]

3.6.3.3 Vosk

Tisk z vosku se používá pro výrobu vytavitelných modelů, pro následné odlévání. Své uplatnění nachází především ve šperkařství a také při výrobě malých, tvarově složitých odlitků. Své uplatnění najde také v medicíně.

4 Výroba tištěného segmentu

Jak již bylo zmíněno, i cyklistický průmysl prošel prudkým rozvojem. Nejběžnějším materiálem se stal uhlíkový kompozit, který kombinuje nízkou hmotnost s výjimečnými mechanickými vlastnostmi a v poslední době i nízkou cenu.

Také do cyklistického průmyslu již pronikly aditivní technologie. Australská společnost Bastion vyrábí 3D tištěné titanové spojky, které jsou následně spojeny kompozitovými trubkami. Kromě samotných kol jejich společnost vyrábí i další díly. Například jejich 3D tištěný představec používá Australský národní tým. Pro příklad se však nemusí chodit daleko, jelikož pro českou společnost Festka vyrábí 3D tištěné titanové patky Metal 3D



Obrázek 4.1 - Rám Bastion [49]

Použití kombinace uhlíkových trubek a lepeného spoje může mít do budoucna problémy. Proto se společnost Repete rozhodla zaměřit vývoj na kombinaci tištěných rámových spojek a svařovaného spoje. Tímto směrem směřuje vývoj i britská společnost Reynolds, specialista na ocelové trubky. Ovšem prozatím se jeho výrobky neobjevili v širší produkci. Tento směr je tak stále ve světě velmi unikátní.

Použití předem vytištěného segmentu přináší mnoho výhod. Předně je to možnost optimalizace místa spoje trubek. V segmentu může být předem vyrobené vedení kabeláže k řazení a brzdám. V našem konkrétním případě zde může být i předem vyrobené uložení pro zámek sedlovky, které se konvenčním způsobem vyrábí pájením. Kromě uvedených konstrukčních výhod je zde i výhoda montážní. Při standardním způsobu výroby dochází ke zkracování trubek pod úhlem. Tím se kladou vysoké nároky na přesnost, jelikož trubky musí na sebe přesně pasovat. Při použití tištěné spojky, by mohly být trubky zkracovány kolmým řezem, v ideálním případě objednávané od výrobce v dané délce. Zároveň i potřebný svar by byl výrazně jednodušší. Výsledkem by tudíž bylo zkrácení doby výroby a zmenšení počtu potřebného vybavení. Poslední výhodou je určitá exkluzivita, která plyne z použití této unikátní technologie.

4.1 Repete cycles

Repete Industries s.r.o. bylo původně založeno v roce 2012 jako firma specializující se na renovace a stavbu kol na zakázku. Odtud plyne i název, který odkazuje na vracení života starším kolům. Postupem času však začal probíhat i vývoj vlastních produktů. Informace a zkušenosti čerpali od předních českých rámařů, především Roberta Štěrbý, Martina Kovaříka a mnohých dalších. Několikaletý vývoj byl zakončen prvním vlastním kolem, kterým bylo silniční kolo Reborn. Následoval cyklokrosový model Grizzly a dráhový Falcon. Všechny tři tyto modely se představili v roce 2015 na mezinárodním veletrhu ručních výrobců NAHBS v Louisville ve státě Kentucky. V konkurenci více jak dvou set výrobců nejen z USA ale také z Kanady, Dánska, Francie, Německa, Velké Británie, Itálie, Japonska či Nizozemí se prosadil model Reborn, který zvítězil v kategorii silničních kol.

Všechna kola Repete jsou vyráběna ručně z trubek Columbus. Původní tři modely byly vyrobeny metodou pájení. Vývoj však pokračoval dále a musel mimo jiné reagovat na prudký nástup kotoučových brzd a kategorie Gravel Bike. Proto se v létě 2019 představil silniční model Reason a gravel model Verne. Oba jsou vybaveny kotoučovými brzdami, pevnými osami, vnitřním vedením kabeláže. Rámy jsou opět vyrobeny z trubek Columbus HSS, ovšem nyní již svařovány metodou TIG.

4.2 Materiál

Pro řešení práce byl vybrán ocelový silniční rám vyrobený z trubek společnosti Columbus, konkrétně model HSS. Jedná se o nerezové, tenkostěnné, zeslabované trubky. Materiál vychází z (25CrMo4), ovšem společnost Columbus provádí jejich tepelné zpracování podle vlastních parametrů, které nejsou veřejně známé.

Tabulka 4.1 - Chemické složení 25CrMo4 [50]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,20 – 0,31	0,43	0,56 – 0,94	≤ 0,03	≤ 0,04	0,85 – 1,25	0,12 – 0,33

Pro výrobu samotné spojky byl zvolen materiál AISI 316L-A LMF od společnosti TRUMPF.

4.3 Výběr segmentu

4.3.1 Zadní patky

Při výběru vhodného segmentu se nabízí několik možností. Jedna z možných variant je výroba zadních patek, do kterých je uchycené zadní kolo. Na jedné straně je uchycen třmen kotoučové brzdy, na pravé straně rámu pak přehazovačka s vedením kabeláže. Tato část rámu však již byla optimalizována pro výrobu technologií odlévání.

4.3.2 Středová spojka

Z pohledu složitosti dílu a její následné optimalizace vychází výhodně středová spojka. Jedná se o nejmasivnější díl, ve kterém se stýká spodní rámová trubka, sedlová trubka a řetězové vzpěry. Zároveň středovou spojkou prochází vedení kabeláže k řazení a zadní brzdě. Standart T47, který je použit u rámu dovoluje vedení kabeláže uvnitř rámu v prostoru mezi osou a stěnou spojky. V současném stavu je ve středové spojce otvor, do kterého je vytvořeno uložení s plastovou vložkou. Použitím vytištěného segmentu by odpadla nutnost do spojky vytvářet otvory a následně pájet uložení pro vedení kabeláže.

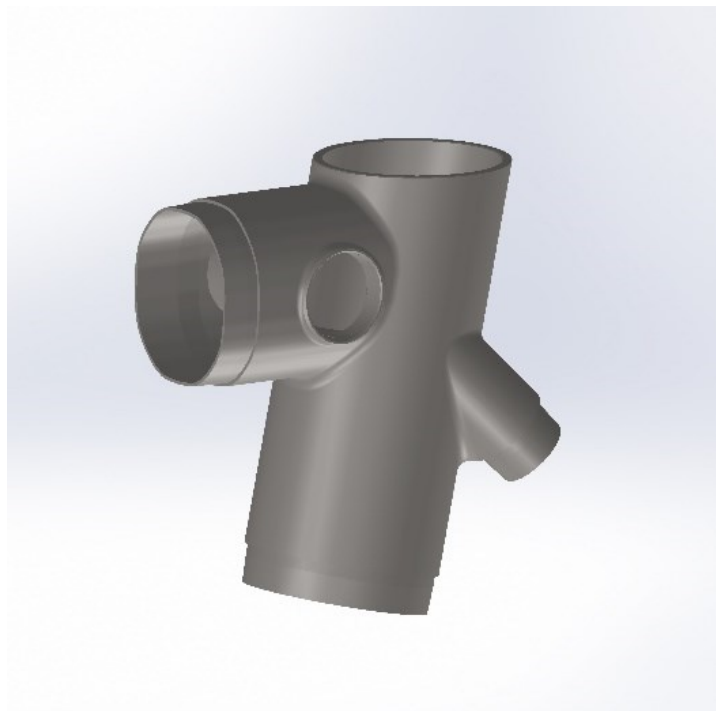
S ohledem na pracovní prostor použité tiskárny není tento díl vhodný pro demonstrační tisk, proto byl vytvořen pouze návrh v CAD.

4.3.3 Hlavová trubka

Další možností je použít segment v oblasti hlavové trubky. Výhodou tohoto segmentu by bylo vytvoření přesného uložení pro ložiska hlavového složení. Při konvenčním způsobu výroby se hlavová trubka soustruží a následně dochází ke spojení s horní a spodní rámovou trubkou. Dalším benefitem by bylo vytvoření uložení pro vnitřní vedení kabeláže. Obdobně jako u středové spojky je tento segment příliš velký pro pracovní prostor použité tiskárny.

4.3.4 Sedlová spojka

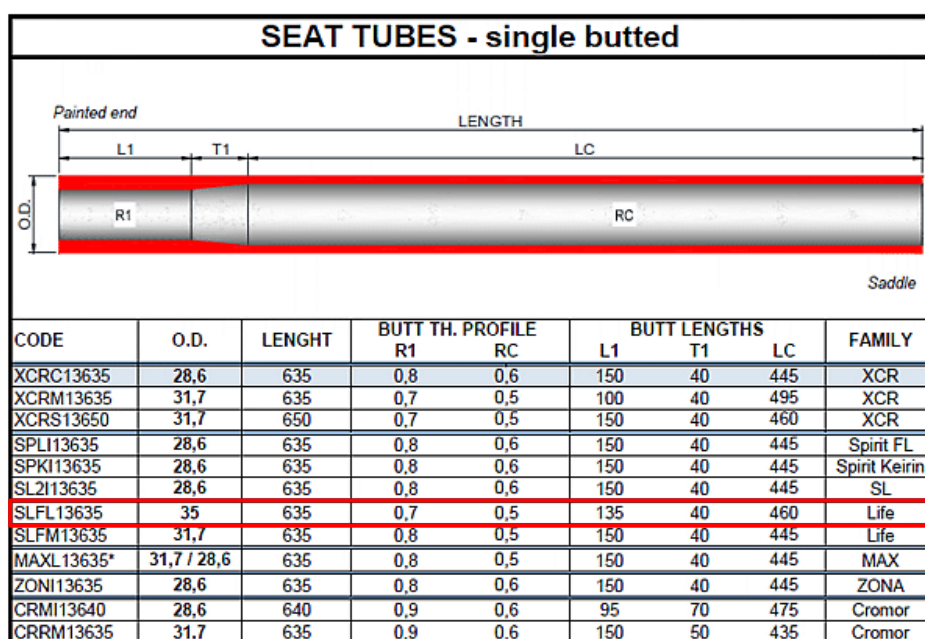
Poslední možností je spojení horní rámové trubky, sedlové trubky a sedlových vzpěr. Zároveň je v horní rámové trubce uložený integrovaný zámek sedlovky. Rozměrově se tento segment vejde do pracovního prostoru a tím pádem je nejvhodnější pro výrobu. Tvar a rozměry této spojky vychází ze spojení trubek používaných při konvenční výrobě svařováním.



Obrázek 4.2 - Model sedlové spojky

4.3.5 Popis varianty

Vnitřní průměr spojky je navržen pro sedlovku 31,6 mm. Sedlová trubka pak bude mít průměr 35 mm a v místě spojení se segmentem stěny trubky 0,5 mm. Ve spodní části, kde je trubka spojena se středovým pouzdrům je stěna trubky 0,7 mm. V části spojení s trubkou má spojka shodný průměr 35 mm, dojde tak k hladkému přechodu mezi trubkou a spojkou. Parametry této trubky jsou na *obrázku 4.3*. Ostatní trubky zůstávají stejné, jako při výrobě standartním postupem.



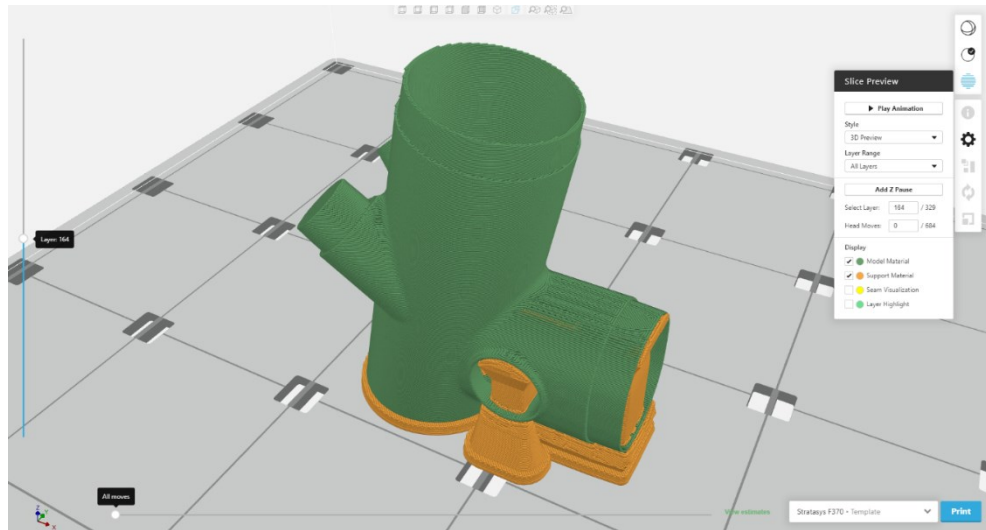
Obrázek 4.3 - Parametry použité sedlové trubky [51]

Nevýhodou této varianty by mohlo být do jisté míry limitované uložení sedlovky ve spojce, kde délka kontaktu bude zhruba 80 mm. Poté už se nebude sedlovka v rámu dotýkat sedlové trubky. Obdobné řešení se však používá při konstrukci titanových rámu, kdy se do sedlové trubky vkládá hliníková vložka o podobné délce. Funkčnost by tak neměla být ovlivněna.

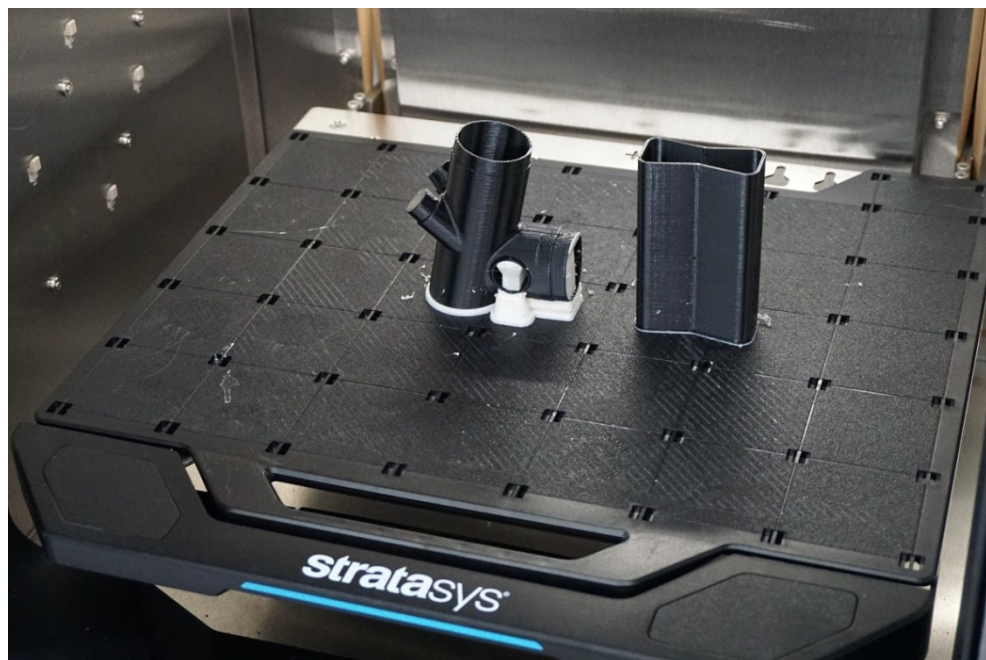
Spojení sedlovky a spojky může být realizováno dvěma způsoby a to pájením, nebo svařováním. Ukázalo se, že vhodnější způsob je svařování, jelikož právě v oblasti napojení horní rámové a sedlové trubky se zvolenými parametry kompenzují odchylky rámu při výrobě.

4.4 Tisk prototypu

Pro ověření rozměrových možností a zkušebního sestavení spojení byl vytištěn plastový prototyp. Tisk probíhal na tiskárně Stratasys F370 z materiálu ABS. Příprava tisku probíhá v softwaru GrabCAD



Obrázek 4.4 - Model prototypu v SW GrabCAD



Obrázek 4.5 - Vytištěný plastový prototyp

Po dokončení tisku je model umístěn na tiskové podložce. Na pravé straně je vidět přebytečný materiál, který tisková hlava ukládá v průběhu tisku.



Obrázek 4.6 - Plastový prototyp s podporami (1)



Obrázek 4.7 - Plastový prototyp s podporami (2)

Stavební podpory se v prvním kroku odstraní mechanicky. Ty, které jsou hluboko v modelu, se následně nechají rozpustit chemickou cestou. Využívá se k tomu roztok hydroxidu sodného. Proces je možné urychlit použitím ultrazvuku.



Obrázek 4.8 - Plastový prototyp (1)



Obrázek 4.9 - Plastový prototyp (2)

Vytištěný plastový prototyp jsem následně zkušebně spasoval s trubkami, abych zjistil reálný stav. Jak je vidět na *obrázku 4.10* sesazení je správné a tím pádem bylo možné přistoupit k tisku kovové součásti.



Obrázek 4.10 - Plastový prototyp

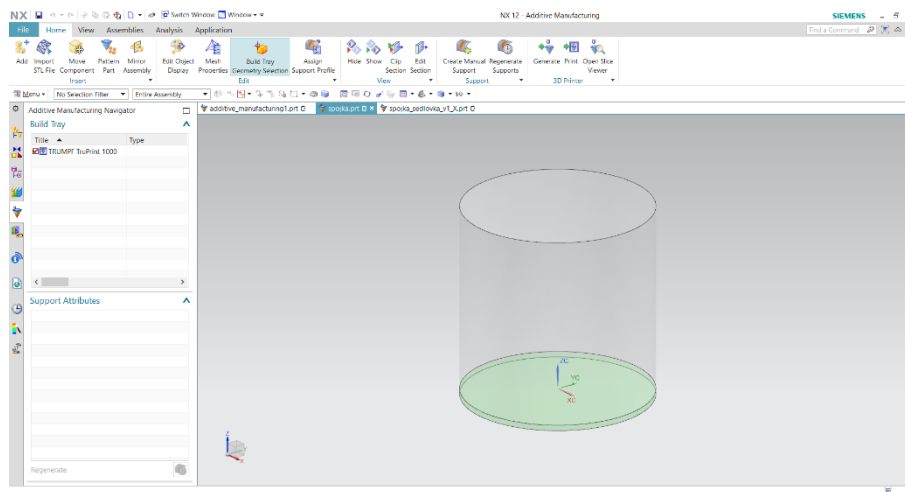
4.5 Výrobní zařízení

Výroba probíhala na tiskárně Trumpf TruPrint 1000. Pracovní komora má tvar válce o průměru 100 mm a výšce 100 mm. Kromě oceli je možné zpracovávat širokou škálu materiálů jako jsou slitiny na bázi hliníku, niklu, kobaltu s chromem, mědi, titanu nebo slitiny ušlechtilých kovů. Pro práci používá vláknový laser o výkonu 200W a vlnové délce 1070 nm. Nejvyšší dosahovaná účinnost je až 18 cm³/h. [52]

4.6 Tisk dílů

4.6.1 Příprava tisku

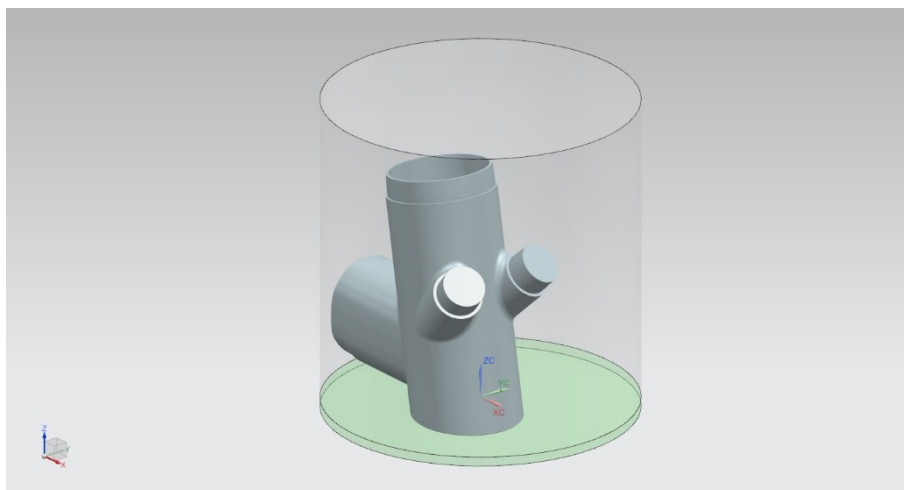
Model součásti, který se použil pro tisk prototypu se zpracoval v SW NX 12 od společnosti Siemens, konkrétně v jeho rozšíření Additive Manufacturing.



Obrázek 4.11 - Pohled na pracovní prostředí SW NX 12

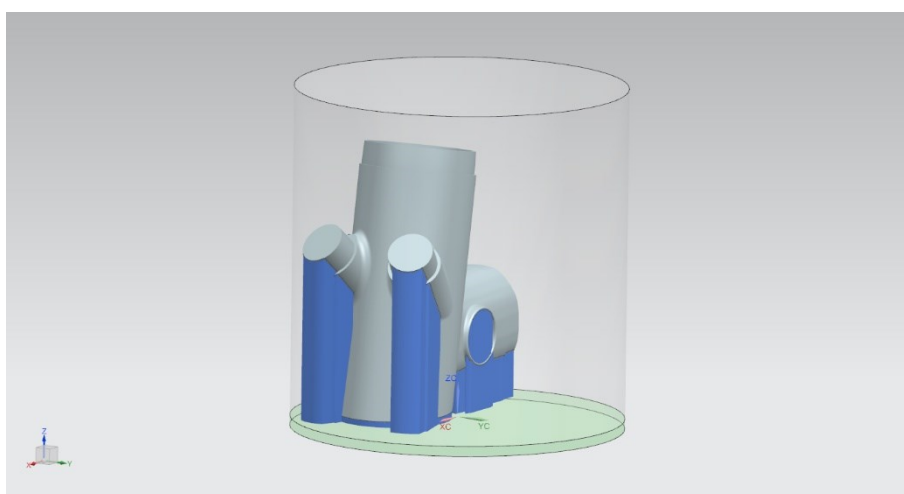
SW NX umožňuje import buď vlastních modelů, nebo pomocí modelovacího prostředí i formáty jiných programů. Ty se následně převedou do formátu *.prt*. Model je nutné správně napolohovat tak, aby bylo dosaženo vhodné technologičnosti tisku. Byla zvolena poloha otočená o 180° oproti rozložení v rámu kola. Tato orientace je především proto, aby byl minimalizován počet potřebných stavebních podpor.

Poloha na základní rovině je zvolena k levé straně. Vychází se z předchozích zkušeností tisku na konkrétní tiskárně. Při tisku dochází k nanášení prášku z levé strany.



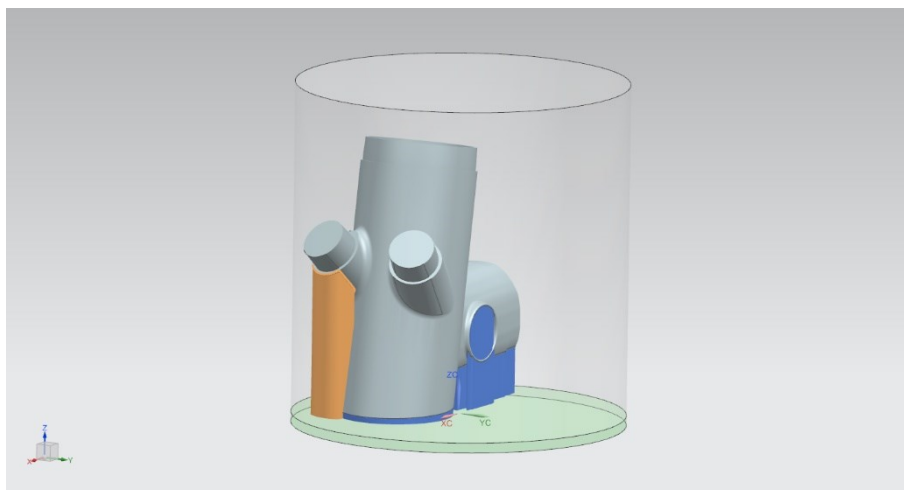
Obrázek 4.12 - Umístění součásti na pracovní paletě

Dalším krokem je vytvoření stavebních podpor. SW NX 12 umožňuje buď individuální nastavení, nebo automatické vyhledání kritických míst a návrh umístění podpor. Při tvorbě programu jsem vycházel z doporučení SW. Na obrázku 4.13 je vidět rozmístění stavebních podpor, které jsou vyznačeny modrou barvou.



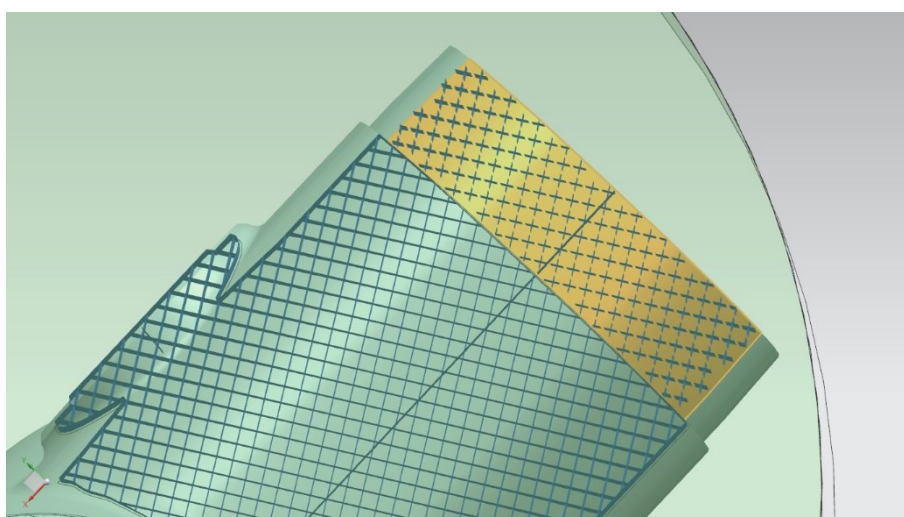
Obrázek 4.13 - Automaticky vygenerované podpory

Podpory slouží jako stavební podpora pro duté profily, nebo pro úkosity s úhlem menším než 45°. Zároveň mají funkci odvádění přebytečného tepla. Kovový prášek působí v průběhu tisku jako tepelný izolant a v místech kde dojde k natavení materiálu udržuje vysoké teploty. Bez použití podpor tak může dojít i ke spálení materiálu.



Obrázek 4.14 - Úprava stavebních podpor

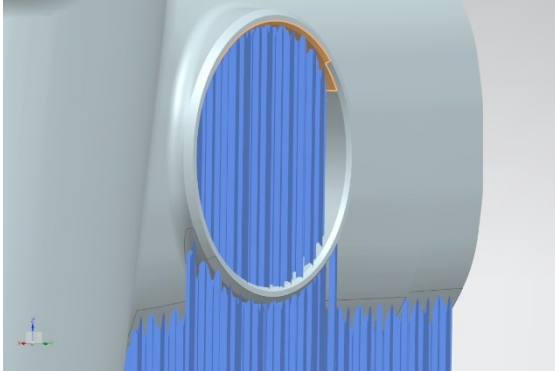
Jelikož jsou vzpěry pro sedlové trubky ostřejšího úhlu, než je 45° , stavební podpory v tomto místě byly odstraněny.



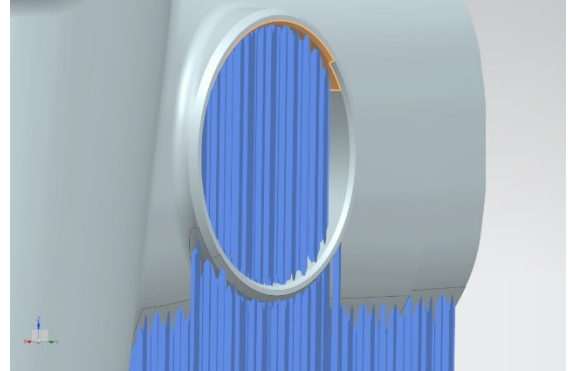
Obrázek 4.15 - Ukázka designu stavebních podpor

V nastavení programu je možné zvolit celou řadu typů a parametrů podpor. Při návrhu je nutné pracovat především s faktem, že celý pracovní prostor je zaplněn práškem. To je rozdíl především oproti „plastovému“ tisku, kde je konstrukce podpor o mnoho svobodnější. Z hotového výrobku je nutné prášek odstranit, proto byly zvoleny podpory, které mají mezi sebou rozstup, aby bylo možné prášek odstranit. Upravené nastavení podpor je znázorněno oranžovou barvou na *obrázku 4.15*. Tento tvar bude vhodný i z pohledu odstranění samotných podpor. Jelikož jsou vyrobeny ze stejného materiálu jako je výrobek, nebude možné je rozpustit, ale všechny budou muset být odstraněny mechanicky.

V místech styku se součástí se navrhují „zuby“, které zjednodušují odstranění podpor. Základní nastavení vytváří zuby pouze na vrchní straně otvorů, jak je vidět na obrázku 4.16. Na obrázku 4.17 jsou vidět upravené podpory se zuby i na spodní straně otvoru.

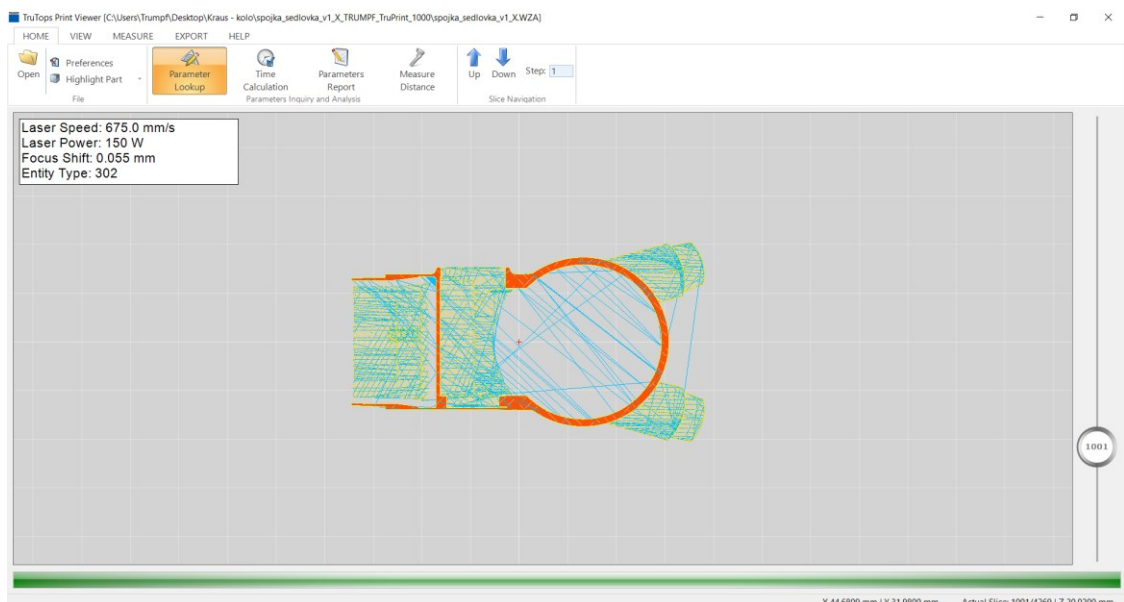


Obrázek 4.16 - Původní návrh podpor



Obrázek 4.17 - Upravený návrh podpor

Po dokončení návrhu všech parametrů tisku, je nutné vytvořit samotný program pro konkrétní tiskárnu. Hotový program je možné zobrazit v prohlížeči. Zde je možné v jednotlivých vrstvách kontrolovat parametry laseru, jeho dráhy i to, zda ve výrobku nevzniknou skryté dutiny.



Obrázek 4.18 - Prohlížeč vygenerovaného programu

4.6.2 Postup výroby

Vygenerovaný program se nahraje do paměti tiskárny. Zde je možné upravovat jednotlivé parametry tisku. V pravém sloupci na *obrázku 4.19* je vidět parametr „Oversupply Factor“. Ten určuje množství prášku, které je použito pro výrobu. 100 % znamená, že pro tisk je použito právě takové množství materiálu, které se rovná objemu komory. Vlivem gravitace však dochází k pěchování prášku, důvodem je jeho rozdílná zrnitost. Menší kuličky propadávají níže a vrchní vrstvy mohou být řidší. Navíc tavením materiálu dochází k jeho dalšímu roztékání a výsledná spečená vrstva je nižší než vrstva nanesená. Doporučuje se volit hodnotu 200 %, která zajistí správné pěchování, a navíc zaručuje jistou míru bezpečnosti.

Součást je však natolik velká, že zabírá celý pracovní prostor. Při nastavení parametru na doporučených 200 % se spotřebuje víc prášku, než nabízí jedna zásobní komora. V takovém případě je nutné tisk přerušit, prášek doplnit a následně pokračovat. Při tom však dojde k naplnění komory kyslíkem, čímž může dojít k reakci s materiálem a tím pádem ke zhoršení vlastností povrchu. Důsledkem může být špatné napojení první nové vrstvy, vznik vnitřních vad apod. Z tohoto důvodu byla zvolena hodnota 135 %, která byla největší možná tak, aby proces proběhl najednou.



Obrázek 4.19 - Ovládací panel tiskárny

Po uzavření komory a spuštění procesu dojde napouštění komory dusíkem. Limitní hodnotou je 0,3 % objemu kyslíku, kdy je atmosféra dostatečně inertní pro výrobu. Doba tisku byla vypočítána na cca 15 hodin.

Na *obrázku 4.20* je vidět průběh tisku. Válec vlevo slouží jako zásobník prášku. Před každou vrstvou se vysune o určitou výšku, následně nanašeč nahrne prášek na tiskovou platformu, na fotce uprostřed, kde laser vytvoří kontury součásti. Po výrobě dané vrstvy se tisková platforma posune dolů a nanašeč přesune přebytečný prášek do odpadní komory vpravo.



Obrázek 4.20 - Tisk součásti

Po dokončení výroby je nutné očistit co nejvíce prášku uvnitř komory. Přebytečný prášek se přesune do výsypky, následně se přeseje a je možné ho znovu použít. Po očištění je součást vyjmuta z tiskárny. Přestože tisk proběhl v pořádku a na výrobku nejsou vidět žádné strukturální vady, má na povrchu několik defektů, které jsou rozebrány dále.



Obrázek 4.21 - Součást po dokončení tisku

Dalším krokem je tepelné zpracování, konkrétně žíhání na odstranění pnutí. Proces se skládá z postupného ohřevu na teplotu 550 °C po dobu 2 hodin, následuje výdrž 6 hodin na této teplotě. Ochlazování probíhá na vzduchu.



Obrázek 4.22 - Součást po TZ (1)



Obrázek 4.23 - Součást po TZ (2)

Po tepelném zpracování je nutné odstranit tiskovou paletu a podpůrné struktury. Tyto operace se prováděly za pomoci ručního nářadí. Podpůrná struktura je od počátku navrhována pro co nejsnazší odstranění.



Obrázek 4.24 - Součást po odstranění podpor (1)



Obrázek 4.25 - Součást po odstranění podpor (1)

Poslední operací je tryskání, které odstraní zoxidovanou vrstvu, způsobenou tepelným zpracováním, povrchové vady a sjednotí barvu výrobku pro další analýzu. Tryskání se provádělo v komoře Peenmatic 620 korundovými tělísky.

Díl po odstranění podpor a tryskání je vidět na *Obrázku 4.26* a *4.27*.



Obrázek 4.26 - Dokončená součást

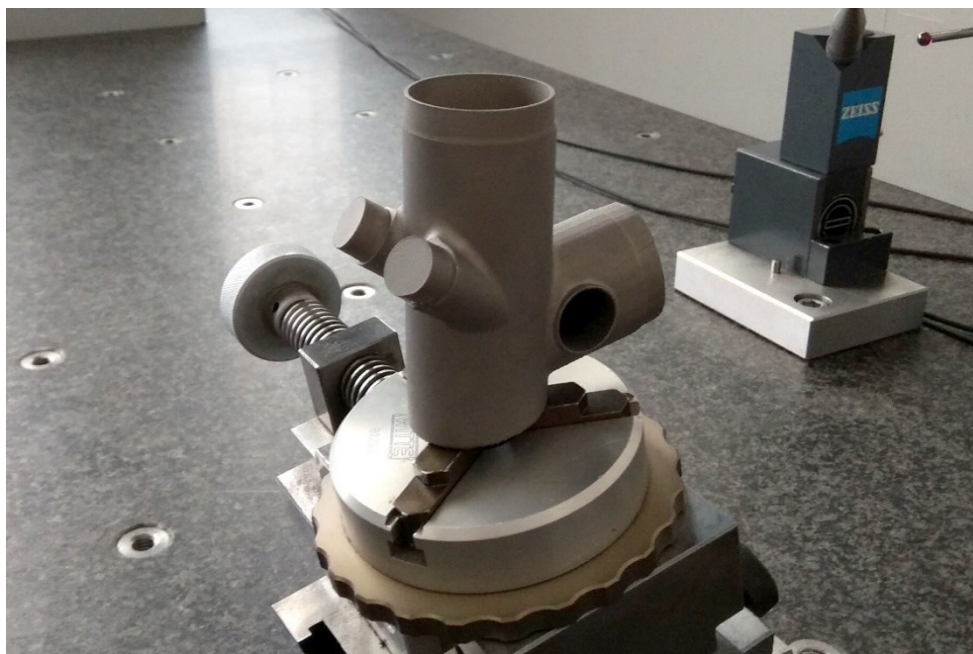


Obrázek 4.27 - Detailní pohled na dokončenou součást

4.7 Měření dílu

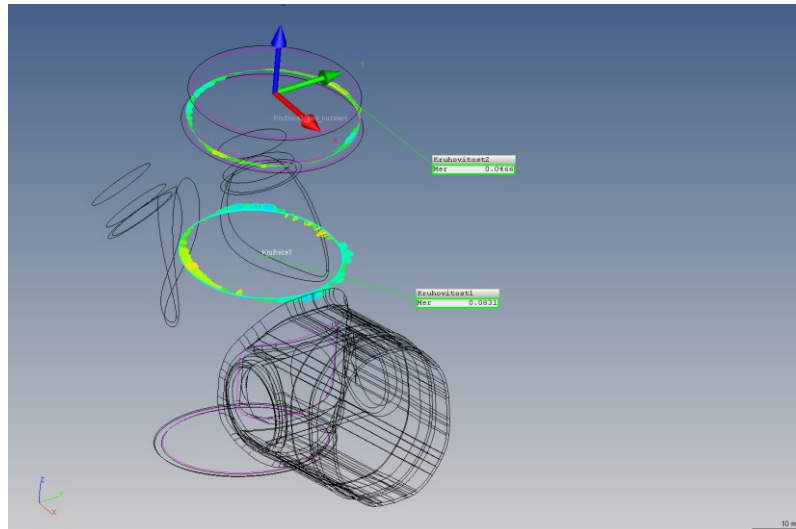
Při tisku dochází vlivem tepla k velkému pnutí, proto bylo důležité zjistit, zda se neprojeví v deformaci součásti. Zajímaly mě především funkční části, kterými jsou napojení pro jednotlivé trubky a kruhový otvor pro zámek sedlovky. Osazení pro sedlové vzpěry jsem do měření nezahrnul, jelikož byly vytvořeny z plného materiálu a v tomto místě žádnou deformaci nepředpokládám.

Měření probíhalo na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss UPMC 850 Carat. Samotný měřicí program byl vytvořen v SW Calypso, který je taktéž dodáván společností Zeiss. Součást byla upnuta do polohovatelného svěráku a následně do sklíčidla.



Obrázek 4.28 - Upnutí součásti při měření

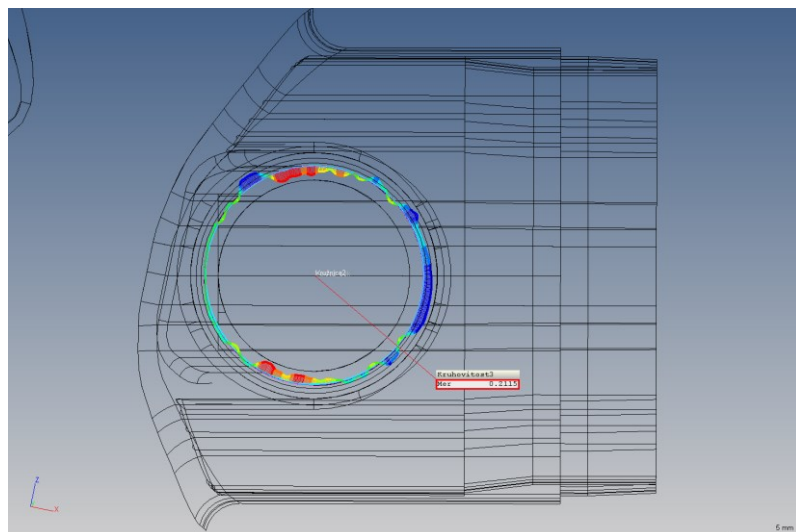
Prvním měřeným místem byl vnitřní průměr sedlové trubky. V tomto místě se měřila kruhovitost. Je to důležitý parametr, jelikož zde bude zasunuta sedlovka. Pokud by zde došlo k deformaci, nebylo by možné sedlovku správně zajistit a mohlo by doházet k protáčení a posunu.



Obrázek 4.29 - Měření kruhovitosti sedlové trubky

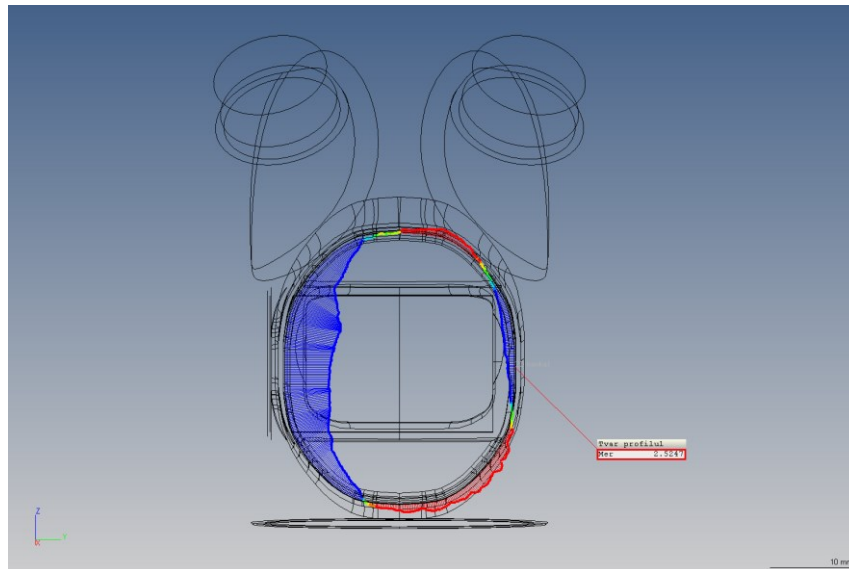
Naměřené hodnoty kruhovitosti jsou 0,0466 a 0,0831 mm na průměru 31,4948mm, přičemž jmenovitý průměr je 31,6 mm. Dle zkušeností s předchozím tiskem na použité tiskárně, se pohybují tolerance zhruba v řádu desetin milimetru. Naměřené odchylky tudíž leží pod těmito hodnotami.

Dalším místem kontroly bylo uložení pro zámek sedlové trubky. Zde se opět měřila kruhovitost. V tomto případě je naměřená hodnota 0,2115 mm. Důležité je však podotknout, že měření probíhalo ještě před finální úpravou. V tomto místě byly stavební podpory, které za sebou zanechaly hrubší povrch a měření je tím pádem částečně zkresleno. Při analýze naměřených hodnot je však patrné, že zde nedošlo k větší deformaci a po obrobení této plochy funkční bude zajištěna správná funkce.



Obrázek 4.30 - Měření kruhovitosti zámku sedlovky

Posledním analyzovaným místem bylo osazení pro horní rámovou trubku. V tomto místě je trubka složena z mnoha křivek a rádiusů, které tvoří obecný tvar. Měřil se zde proto tvar profilu.



Obrázek 4.31 - Měření tvaru plochy

Na první pohled je patrné, že zde došlo k velké deformaci a změně tvaru. Naměřená hodnota činí 2,5247 mm. Výsledky tak korespondují s vizuálním hodnocením. Vlivem špatné orientace na tiskové paletě, došlo k nevhodnému kontaktu nanašeče a materiálu a následnému posunutí. Tento problém lze odstranit změnou orientace dílu vůči nanašeči.

Z naměřených hodnot vyplývá, že nedochází k zásadním deformacím vytištěného modelu. Není proto třeba zásadně měnit konstrukci nebo polohu na tiskové paletě. Otočením modelu v Z souřadnici dojde k plynulému kontaktu nanašeče s modelem a předejde se tak deformaci v oblasti napojení horní rámové trubky.

4.8 Optimalizace modelu

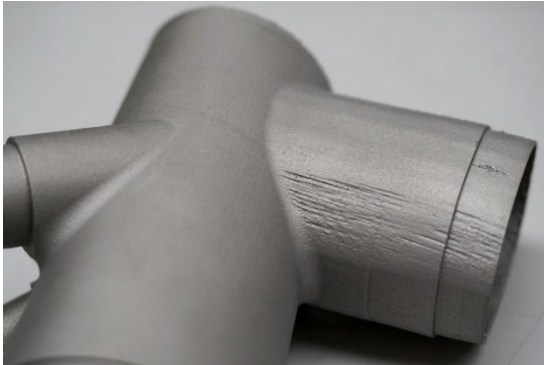
Již na první pohled bylo jasné, že bude muset proběhnout jistá optimalizace modelu. Na výrobku se nachází několik vad, které jsou způsobené nevhodnou konstrukcí i technologičností.

Nejmarkantnější je vada na levém osazení pro sedlovou vzpěru, která je vidět na *obrázku 4.32*. Došlo zde k akumulaci tepla a následnému spálení materiálu. Příčiny mohou být dvě. Prvním je velké množství materiálu v místě, jelikož osazení pro vzpěry není duté. Druhou, pravděpodobnější příčinou, je však odstranění stavebních podpor, které vygeneroval SW v automatickém návrhu. Osazení svírá úhel větší než udávaných 45°, které jsou limitní pro nutnost podpor. Předpokládal jsem tak, že podpory nebudou potřeba. Ukázalo se však, že absencí podpor nemohlo dojít k odvodu tepla a výsledkem bylo jeho nahromadění, které vyústilo v poškození výrobku.



Obrázek 4.32 - Detail poškození sedlové vzpěry

Další vada je vidět na osazení pro horní rámovou trubku. Součást byla orientována tak, že tato trubka byla rovnoběžně s nanášecem prášku. Jak se ukázalo, tato poloha není vhodná, jelikož dochází ke kontaktu nanašeče s již hotovými vrstvami v celé délce. Na *obrázku 4.33* a *4.34* je vidět nepatrné posunutí konkrétní vrstvy, které se projevuje horizontálními liniemi.



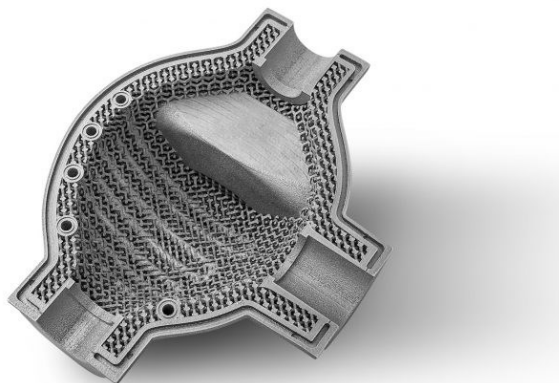
Obrázek 4.33 - Detail vady spojky (1)



Obrázek 4.34 - Detail vady spojky (2)

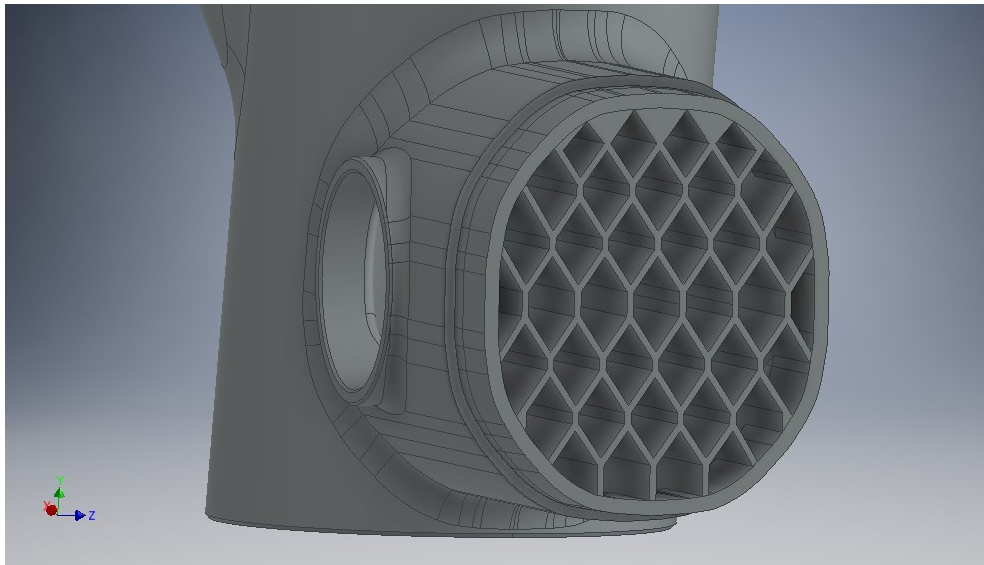
Náprava této vady spočívá v jiné orientaci vůči nanašeči. Při dalším tisku tak bude součást otočena o určitý úhel, aby při nanášení prášku docházelo k postupnému kontaktu.

Třetím bodem k optimalizaci je vnitřní uspořádání osazení pro horní rámovou trubku. V prvním případě je jeho vnitřní dutina vyplněna podporami, které je následně nutné složitě odstraňovat. Především v zadní části zůstaly podpory, které již není možné odstranit. Jelikož vnitřní prostor nebude nijak obráběn ani nebude funkčně využit, je možné konstrukci navrhnout tak, aby sama o sobě plnila funkci podpor.



Obrázek 4.35 - Odlehčená vnitřní struktura [40]

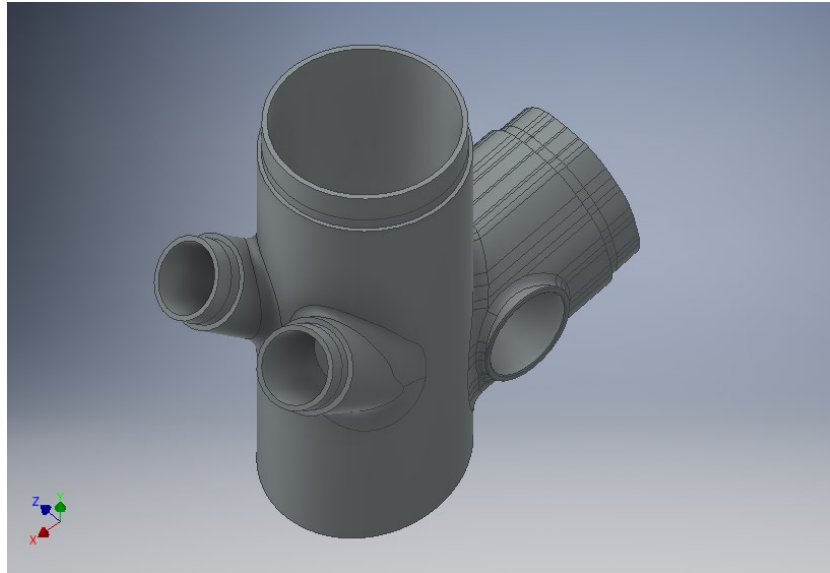
Technologie 3D tisku umožňuje vytvořit složitou vnitřní strukturu, která připomíná organické tvary. Tyto struktury jsou lehké a zároveň zlepšují mechanické vlastnosti výrobku. Automatické návrhy však nedokázaly ideálně zpracovat vnitřní plochy. Proto jsem se rozhodl pro manuální vytvoření zjednodušené vnitřní struktury, vyhnul jsem se tak nutnosti úpravy konstrukce vnitřních ploch modelu. Struktura je zobrazena na obrázku 4.36.



Obrázek 4.36 - Návrh šestiúhelníkové struktury

Jednotlivé stěny svírají se svislicí úhel vyšší než 45° . Tím bude zaručeno, že samotná síť nebude potřebovat podpory. Orientace musí být ve směru trubky, jelikož se musí počítat s odstraněním přebytečného prášku, který bude po vytištění v součásti. Rozteč jednotlivých šestiúhelníků je 4,1 mm. Tento rozměr vyšel výpočtem z šířky v daném místě. Zároveň je nutné, aby byl menší než 6 mm, které se udávají jako maximální šíře, při které není nutné používat stavební podpory. Tloušťka jednotlivých stěn je 0,5 mm. To opět vychází ze zkušeností z předchozích tisků. Vytvoření této struktury by se zároveň mělo pomoci předejít posunutí v X ose.

Poslední změnou oproti prvnímu modelu je vytvoření dutých sedlových vzpěr. Dojde tak k menší akumulaci tepla v této oblasti a zároveň k úspoře hmotnosti výsledného výrobku.

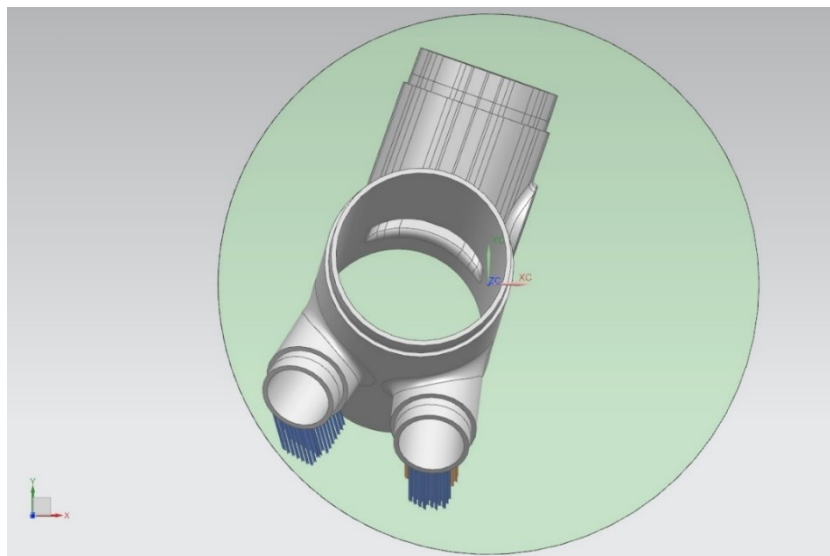


Obrázek 4.37 - Model s dutými sedlovými vzpěrami

4.9 Tisk optimalizovaného dílu

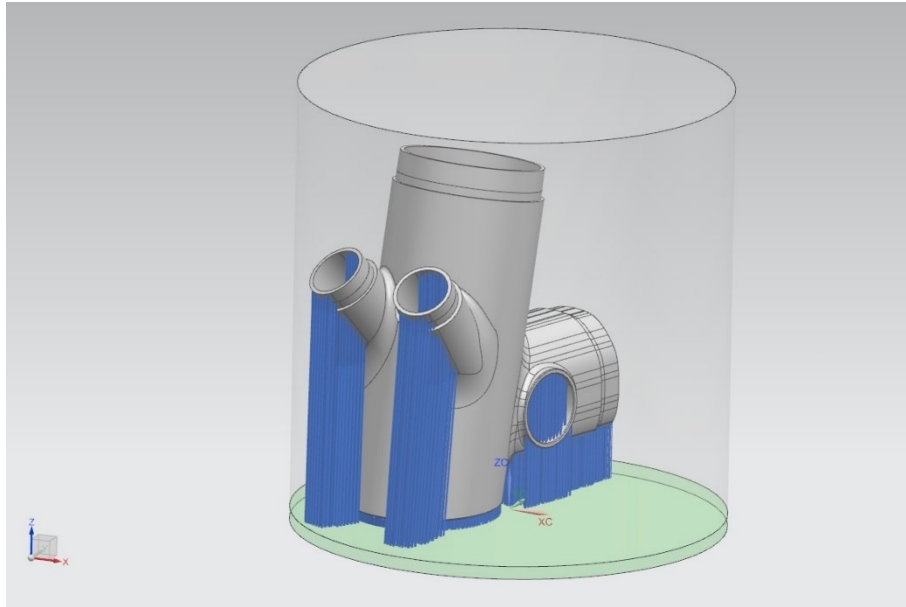
4.9.1 Příprava programu

Program byl opětně vytvořen v SW NX. Oproti předchozímu případu, byl model natočen v ose Z o 15°. Ostatní parametry polohování byly zachovány



Obrázek 4.38 - Změna natočení součásti

Dalším rozdílem pak je konstrukce podpor v oblasti sedlových vzpěr. Podpory vedou jak vnitřkem modelu, kvůli dutému profilu, tak vnějškem. Aby se podpory nedotýkaly stěny spojky, byly navrženy s odsazením. Nejsou proto vodorovné, ale stoupají pod úhlem.



Obrázek 4.39 - Konstrukce podpor v oblasti sedlových vzpěr

Ostatní parametry podpor, jsem nechal stejné jako v prvním případě. Tudiž opět jsou tvořeny křížovou sítí, která má mezi sebou mezery, pro snadné odstranění prášku.

4.9.2 Tisk

Vytvořený program se opět nahraje do tiskárny, následuje úprava parametrů tisku. I v druhém případě byla zvolena hodnota parametru „Oversupply factor“ na 135%. Následuje vyčerpání pracovní komory a její zaplnění dusíkem. Po dosažení hodnoty 0,3% je možné zahájit proces tisku. Stejně jako v prvním případě byla doba tisku vypočítána na 15 hodin.

4.9.3 Postprocessing

Po skončení procesu následuje ruční očištění. Je nutné odstranit co nejvíce prášku, který se následně přeseje a je možné ho opět použít. Výměna podpor za šestiúhelníkovou strukturu v horní rámové trubce měla také kladný vliv na odstraňování prášku.



Obrázek 4.40 - Součást po tepelném zpracování

Očištěný výrobek se opět podrobí teplenému zpracování. Cyklus je shodný jako v předchozím případě. Následuje odříznutí tiskové palety a postupné odstraňování stavebních podpor. I v tomto případě stačí použití ručního nářadí. Posledním krokem je opět tryskání povrchu.



Obrázek 4.41 - Druhá vyčištěná spojka

4.10 Hodnocení druhého dílu a návrh zlepšení

Na první pohled bylo zřejmé, že opět došlo k drobnému poškození. Úpravy designu a parametrů tisku vedly k eliminaci předchozích nedostatků. V oblasti osazení pro horní rámovou trubku však došlo k drobnému selhání materiálu.



Obrázek 4.42 - Detail vady druhého výtisku

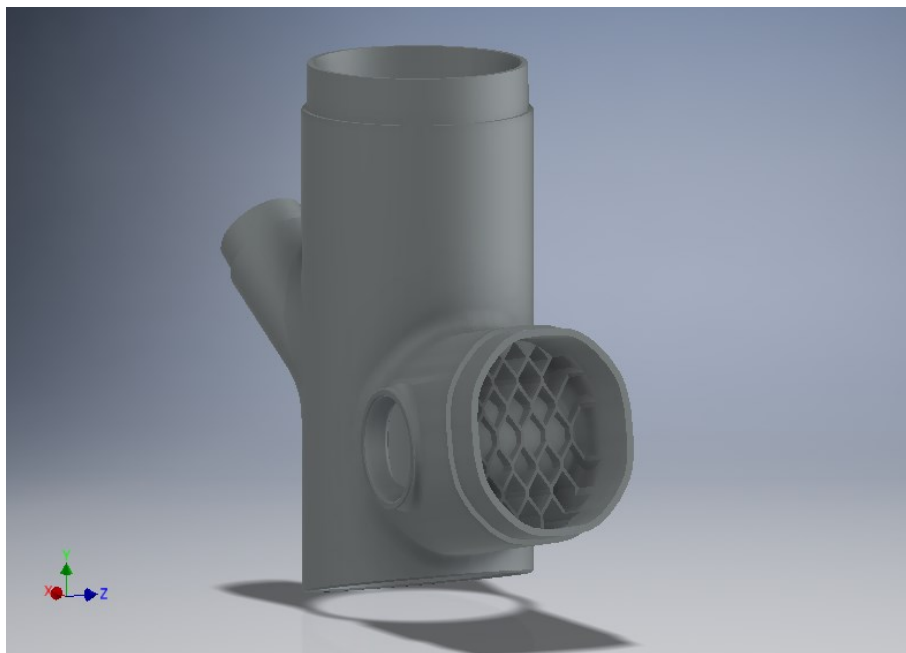
Podrobným zkoumáním jsem došel k závěru, že v tomto konkrétním místě selhaly stavební podpory a došlo k propadu materiálu. Domnívám se, že k selhání podpor mohly vést dva důvody. Prvním může být velká akumulace tepla, které vedlo k oslabení podpor. Jako pravděpodobnější příčinu však vidím nevhodný design samotných podpor. Podpory byly navrženy s mezerami tak, aby mohlo dojít k odstranění prášku. Tyto mezery však mohou vést k nedostatečné pevnosti podpor. Pravděpodobně došlo k drobnému kontaktu nanašeče s takto oslabenými podporami, který vedl k defektu výrobku.

Na druhou stranu je nutné podotknout, že stejný druh podpor je použit na celé součásti a ani při předchozím tisku nedošlo k jejich selhání. Usuzuji tedy, že design podpor není v obecném pohledu špatný a došlo pouze k nešťastné kombinaci faktorů.

Obecně se dá říct, že jakákoliv vada znehodnocuje konečný výrobek. V našem případě se defekt objevil v osazení, které slouží k usazení trubky. Důležitější je však až samotná hrana osazení, kde bude trubka usazena a následně zde bude svar. Tato hrana je však v pořádku a z funkčního hlediska by tento defekt neměl mít vliv.

Vnitřní šestiúhelníková struktura se ukázala jako vhodná, snížil se čas potřebný k odstraňování prášku a zjednodušila se následná úprava výrobku.

Tato struktura by však nemusela být v celém objemu. Při vážení obou variant se ukázalo, že i po odebrání materiálu v oblasti zadních sedlových vzpěr je hmotnost shodných 175g. Tudíž je zde nárůst hmotnosti právě vnitřní strukturou. Jako vhodnější se mi jeví vytvořit ji pouze v zadní části otvoru, kde je složité tvarování a ve zbytku nechat standardní podpory, které následně nebude tak složité odstranit. Tento návrh ukazuje *obrázek 4.43*. Výpočtem hmotnosti z CAD dat by tato varianta měla uspořit cca 30g.



Obrázek 4.43 - Návrh změny vnitřní struktury

5 Ekonomické zhodnocení

Tabulka 5.1 - Parametry součásti

Parametry součásti		
	Jednotka	Hodnota
Počet součástí na paletě	[ks]	1
Objem součásti	[cm ³]	21,99
Suppfactor (k _s)	[%]	20

Tabulka 5.2 - Parametry materiálu

Parametry materiálu – AISI 316L		
	Jednotka	Hodnota
Hustota materiálu	[g/cm ³]	7,9
Cena materiálu	[EUR/kg]	80,00

Tabulka 5.3 - Parametry stroje

Parametry stroje – Trumpf TruPrint 1000		
	Jednotka	Hodnota
Průměr stavební komory	[mm]	100
Výška stavební komory	[mm]	100
Cena stroje	[tis. EUR]	300
Životnost stroje	[roky]	5

Standartní doba odepisování výrobních strojů je 5 let. Životnost laseru, který je klíčový pro chod tiskárny je však zhruba 8 let.

Tabulka 5.4 - Náklady na údržbu

Údržba a náklady na náhradní díly		
	Jednotka	Hodnota
Náklady na údržbu	€	1 000
Náklady na plochu	€	125
Náklady na náhradní díly	€	2 000

Tiskárna jako taková nevyžaduje nákladnou údržbu. Mezi položky, které se musí zhruba jednou za rok měnit patří čidlo O₂ a filtry cirkulace plynu. Nanašeč se mění v závislosti na použitém materiálu a objemu výroby. V případě většího počtu používaných materiálů je nutné používat veškeré doplňkové vybavení pouze pro konkrétní materiál. Tiskovou paletu je možné používat opakovaně. V závislosti na její konstrukci i více jak desetkrát. Tyto náklady jsou zahrnuty do náhradních dílů.

Tabulka 5.5 - Parametry procesu

Parametry procesu		
	Jednotka	Hodnota
Doba přípravy	[hod]	0,5
Čas tisku	[hod]	12,5
Vyjmutí a očištění výrobku	[hod]	1

Proces tisku probíhá bez obsluhy. Ta je potřeba pouze při zakládání nového výrobku a spouštění tisku. Po dokončení výroby musí pracovník výrobek vyjmout a opracovat. Tiskárna může být připojena ke vzdálenému přístupu a v případě nenadálých okolností podávat hlášení. Přítomnost pracovníka při procesu tak není potřeba.

5.1 Výpočet nákladů

Materiálové náklady

$$N_M = v \cdot \rho \cdot C_m \cdot k_s \quad (5.1)$$

Kde: N_M Náklady na materiál v €

v Objem součásti v cm^3

ρ Hustota materiálu v $g \cdot cm^{-3}$

C_m Cena materiálu v Kč

k_s Suppfactor v %

$$N_M = 21,99 \cdot 7,9 \cdot \frac{80}{1000} \cdot 1,2 = 16,68€ \quad (5.2)$$

Výpočet výše ročních odpisů

$$O_S = \frac{C_S}{z_S} \quad (5.3)$$

Kde: O_S Roční odpisy v €

C_S Cena stroje v €

z_S životnost stroje v letech

$$O_S = \frac{300\,000}{5} = 60\,000 € \quad (5.4)$$

Výpočet provozních nákladů

$$N_{RP} = N_P + N_U + N_{ND} \quad (5.5)$$

Kde: N_{RP} Celkové roční provozní náklady v €

N_P Náklady na plochu v €

N_U Náklady na údržbu v €

N_{ND} Náklady na náhradní díly v €

$$N_{RP} = 125 + 1\,000 + 2\,000 = 3\,125 \text{ €} \quad (5.6)$$

Výpočet kapacity stroje

$$K = V_S \cdot 365 \quad (5.7)$$

Kde: K Roční výrobní kapacita v hod.

V_S Odhadované průměrné denní využití stroje v hod.

$$K = 8 \cdot 365 = 2\,920 \text{ hodin} \quad (5.8)$$

Hodinová nákladová sazba stroje

$$HNS_S = \frac{O_S + N_{RP}}{K} \quad (5.9)$$

Kde: HNS_S Hodinové náklady stroje v €

$$HNS_S = \frac{60\,000 + 3\,125}{2\,920} = 21,62 \text{ €/hod} \quad (5.10)$$

Strojní náklady na ks

$$N_S = HNS_S \cdot T_b \quad (5.11)$$

Kde: N_S Strojní náklady na ks v €

T_b Celkový strojní čas v hod.

$$N_S = 21,62 \cdot 14 = 302,65 \text{ €} \quad (5.12)$$

Náklady na obsluhu stroje

$$HNS_p = \frac{RN_p}{\check{C}F_p} \quad (5.13)$$

Kde: HNS_p *Hodinová nákladová sazba pracovníka v €/hod*
 RN_p *Celkové roční náklady na pracovníka, včetně odvodů v €*
 $\check{C}F_p$ *Časový fond pracovníka v hod*

$$HNS_p = \frac{16\,500}{1\,700} = 9,7 \text{ €/hod} \quad (5.14)$$

Náklady na čas pracovníka u stroje

$$N_o = HNS_p \cdot T_p \quad (5.15)$$

Kde: N_o *Náklady na obsluhu v €*
 T_p *Čas pracovníka strávený u stroje v hod.*

$$N_o = HNS_p \cdot T_p = 9,7 \cdot 1,5 = 14,56 \text{ €} \quad (5.16)$$

Celkové náklady

$$N_c = N_M + N_S + N_o \quad (5.17)$$

Kde: N_c *Celkové náklady v €*

$$N_c = 16,68 + 302,65 + 14,56 = 333,89\text{€} \quad (5.18)$$

Z uvedených výpočtů je patrné, že náklady na výrobu jedné spojky jsou příliš vysoké. Pokud by touto technologií mělo být vyráběno více částí rámu, byl by celkový produkt neprodejný. V tomto směru je použitá tiskárna nevhodná.

Největší položku tvoří hodinové náklady. Výběr zařízení tak musí mířit k co největšímu využití prostoru. V našem případě spojka zabírala jen malou část z celkového objemu pracovní komory. Pokud by se díly vyráběly v tiskárně s větším stavebním prostorem, náklady by se rozprostřely mezi víc součástí. U takového zařízení je nutné počítat s vyššími pořizovacími náklady, nicméně náklady na provoz nejsou výrazně vyšší.

6 Závěr

Tato práce byla zaměřena na zkoumání možnosti použití aditivních technologií při konstrukci rámu jízdního kola. Nejprve jsem se zaměřil na výběr vhodné části, s ohledem na rozměrové možnosti použitého výrobního zařízení. Následoval návrh konstrukce dané součásti, včetně potřebných technologických prvků, charakteristických pro danou výrobní technologii. Práce pokračovala výrobou prototypu, na kterém byly odzkoušeny rozměry a mohlo se přejít k samotnému kovovému tisku. První díl byl následně změřen pomocí souřadnicového měřicího stroje a dle výsledků jsem zpracoval návrh změn, které byly zahrnuty do výsledného modelu.

Výsledkem práce jsou dva zhotovené modely. Na prvním se projeví nevhodně zvolené technologické podmínky, které vedly ke vzniku vad. Většina těchto vad by byla v produkci nežádoucí. V případě druhého modelu se podařilo tyto vady odstranit, procesní chybou se však objevila vada nová, která byla způsobena chybou procesu a u dalších dílů by se již nacházet neměla. Po odstranění tohoto nedostatku si dovoluji tvrdit, že je tento segment připraven pro výrobu.

Použitá technologie je stále velmi nová a neustále se rozvíjí. Jelikož prozatím chybí širší zkušenosti s výrobou, došlo i v našem případě k několika chybám. Mezi vývojové stupně lze zařadit i software pro predikci tisku, který by pomohl předejít drobným vadám, které se vyskytly při realizaci práce. S tím jde ruku v ruce i úspora času a peněz.

Domnívám se, že samotná aplikace aditivních technologií v cyklistickém průmyslu má budoucnost. Nezaměřuje se na masovou výrobu, ale spíše na menší, ruční výrobce. I tato kategorie však má své zákazníky a v posledních letech doznává značného růstu.

Seznam zdrojů a použité literatury

- [1] HADLAND, Tony a Hans-Erhard LESSING. *Bicycle design: an illustrated history*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2014. ISBN 978-026-2026-758.
- [2] Ti6Al4V Titanium Alloy. In: *Arcam EBM* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>
- [3] HOFMAN, Kamil. Vzestup a pád Morati. *Velo*. 2006, 2006(2), 40-42.
- [4] High-performance carbon fiber Torayca. In: *Torayca* [online]. b.r. [cit. 2019-07-12].
- [5] The 3k 12K UD carbon fiber weave for rim and frame. In: *Light Bicycle* [online]. b.r. [cit. 2019-07-17]. Dostupné z: <https://www.lightbicycle.com/newsletter/the-3k-12k-ud-carbon-fiber-weave-for-rim-and-frame.html>
- [6] SRIVATSAN, T. a T. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton, 2016. ISBN 978-149-8714-778.
- [7] MILEWSKI, John. *Additive manufacturing of metals*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-58204-7.
- [8] KELLNER, Tomas a Yari M. BOVALINO. Laser Metalz: Bionic Design Is The Next Frontier For 3D Printing. In: *GE Reports* [online]. 2017 [cit. 2019-07-12]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/laser-metalz-bionic-design-next-frontier-3d-printing/>
- [9] The differences between CAD and STL Models. In: *Wikimedia Commons* [online]. 2014 [cit. 2019-07-12]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_differences_between_CAD_and_STL_Models.svg
- [10] Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing. In: *SOLIDWORKS Tech Blog* [online]. b.r. [cit. 2019-07-12]. Dostupné z: <https://blogs.solidworks.com/tech/2015/05/preparing-solidworks-models-3d-printing.html>
- [11] In: *Materialise* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/de/blog/interview-metal-support-generation-e-Stage>
- [12] BERKA, Ondřej a Martin DUB. *Aditivní technologie a metody revers engineering: Učební texty*. ČVUT, 2015.
- [13] SEABRA, Miguel, José AZEVEDO, Aurélio ARAÚJO, Luís REIS, Elodie PINTO, Nuno ALVES, Rui SANTOS a João PEDRO MORTÁGUA. Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016, 1, 289-296 [cit. 2019-07-19]. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.02.039. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321616000408>
- [14] TOSCA Optimization Software. In: *Caelyn* [online]. b.r. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://caelyn.com/how-tosca-optimization-software-improve-your-product-development-process/>
- [15] High Level Processes: Powder Bed Fusion. In: *Bintoa* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.bintoa.com/powder-bed-fusion/>

- [16] Understanding Design and Process Controls for DMLS. In: *Stratasys* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/resources/white-papers/metal-3d-printing-design-process-controls-dmls>
- [17] Selective Laser Melting. In: *Manufacturing Guide* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-melting-slm>
- [18] GOKULDOSS, Prashanth, Sri KOLLA a Jürgen ECKERT. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting— Selection Guidelines. *Materials* [online]. 2017, 10(6) [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.3390/ma10060672. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/672>
- [19] DAS, Suman, David BOURELL a S.S. BABU. Metallic materials for 3D printing. *MRS Bulletin* [online]. 2016, 41(10), 729-741 [cit. 2019-07-16]. DOI: 10.1557/mrs.2016.217. ISSN 0883-7694. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0883769416002177
- [20] MANFREDI, Diego, Flaviana CALIGNANO, Manickavasagam KRISHNAN et al. Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs). *Light Metal Alloys Applications* [online]. 2014 [cit. 2019-07-19]. DOI: 10.5772/58534. ISBN 978-953-51-1588-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/light-metal-alloys-applications/additive-manufacturing-of-al-alloys-and-aluminium-matrix-composites-amcs->
- [21] EBM Hardware. In: *Arcam EBM* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>
- [22] EBM - Built Materials. In: *Arcam EBM* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/materials/>
- [23] Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). In: *Additive Manufacturing* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/>
- [24] LENS Process. In: *Adina* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.adina.com/newsgH68.shtml>
- [25] Stereolithography 3D Printing: From the 1980s to Now. In: *FormLabs* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/history-of-stereolithography-3d-printing/>
- [26] Fused Deposition Modeling. In: *Manufacturing Guide* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>
- [27] Laminated Object Manufacturing. In: *Manufacturing Guide* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>
- [28] Wohlers Report shows growth rate slowing for additive manufacturing. In: *Plastic News* [online]. b.r. [cit. 2019-07-17]. Dostupné z: <https://www.plasticsnews.com/article/20170406/NEWS/170409944/wohlers-report-shows-growth-rate-slowing-for-additive-manufacturing>

- [29] Technický datový list – ABS. In: *Ultimaker* [online]. b.r. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/67613/TDS%20ABS%20v3.011-cze.pdf>
- [30] Technický datový list – PLA. In: *Ultimaker* [online]. b.r. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/67576/TDS%20PLA%20v3.011-cze.pdf>
- [31] Technický datový list – PVA. In: *Ultimaker* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/67867/TDS%20PVA%20v3.010-cze.pdf>
- [32] PET. In: *MaterialPro 3D* [online]. b.r. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [33] Technický datový list – PC. In: *Ultimaker* [online]. b.r. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/67751/TDS%20PC%20v3.010-cze.pdf>
- [34] Methods of AM metal Powder production. In: *Carpenter Additive* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.carpenteradditive.com/technical-library/powder-production/>
- [35] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie: studijní opory : učební text, scénáře, testy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.
- [36] LaserForm® 316L (A). In: *3D Systems* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-06/3D-Systems_LaserForm_316L_%28A%29_DATASHEET_USEN_2017.06.21_WEB.pdf
- [37] Stainless Steel 316L. In: *Materialise* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/stainless-steel>
- [38] Specification Sheet: Alloy 17-4PH. In: *Sandmeyer Steel* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.sandmeyersteel.com/images/17-4ph-spec-sheet.pdf>
- [39] 17-4 PH Stainless steel. In: *AK Steel* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-01/174ph201706.pdf>
- [40] Additive Manufacturing of Aluminum Alloys. *Light Metal Age* [online]. 2018, 2018(1) [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/3d-printing/article-additive-manufacturing-of-aluminum-alloys/>
- [41] 3D Systems DMP Factory 350 system. In: *TCT Magazine* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/3d-systems-metal-3d-printers-materials-polymer-application-facility/>
- [42] Material data sheet - AlSi10Mg. In: *EOS GmbH - Electro Optical Systems* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: https://gpiprototype.com/pdf/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf
- [43] LIPINSKI, Tomasz. *Mechanical properties of AlSi12 alloy with aluminium bronze* [online]. 2017, , 1064-1068 [cit. 2019-07-13]. DOI: 10.22616/ERDev2017.16.N224. Dostupné z: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2017/Papers/N224.pdf>
- [44] Technical sheet AlSi12. In: *Stella Welding* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: http://www.stella-welding.com/public/pdf/4557_AlSi12.pdf
- [45] INCONEL alloy 625. In: *Special Metals* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>

- [46] INCONEL alloy 718. In: *Special Metals* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
- [47] VON WITZENDORFF, Philipp, Leonhard POHL, Oliver SUTTMANN, Peter HEINRICH, Achim HEINRICH, Jörg ZANDER, Holger BRAGARD a Stefan KAIERLE. Additive manufacturing of glass. *Procedia CIRP* [online]. 2018, 74, 272-275 [cit. 2019-07-19]. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.109. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118308953>
- [48] KOTZ, Frederik, Karl ARNOLD, Werner BAUER, Dieter SCHILD a Nico KELLER. Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature* [online]. 2017, 544(7650), 337–339 [cit. 2019-07-19]. DOI: 10.1038/nature22061. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/nature22061>
- [49] Bastion Soulmate. In: *Bastion Cycles* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://exposure.imgix.net/production/photos/au2kzvfy726l6d0xslsz0bivkr3wnc7dhnn39/original.jpg>
- [50] Přehled vlastností oceli 25CrMo4. In: *Bolzano* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-25crmo4>
- [51] Seat tubes. In: *Columbus Tubi* [online]. b.r. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: http://www.columbustubi.com/eng/4_4_2.htm
- [52] Trumpf TruPrint 1000. In: *Trumpf* [online]. b.r. [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-aditivni-vyroby/truprint-serie-1000/