

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využitelnost 3D tisku pro malosériovou výrobu

Autor: Bc. Karel Bauer

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bauer** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **439126**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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:

Využitelnost 3D tisku pro malosériovou výrobu

Název diplomové práce anglicky:

Usability of 3D print for small series production

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše používaných materiálů pro technologie FDM a DMLS.
2. Technologická pravidla aditivní výroby.
3. Příprava dat a realizace tisku.
4. Analýza výsledků.

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: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce:



Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce



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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Využitelnost 3D tisku pro malosériovou výrobu** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne*27.7.2020*.....

Bauer
.....

Bc. Karel Bauer

Poděkování

Děkuji panu **Ing. Janu Šimotovi** za jeho užitečné rady a vstřícný přístup při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Antonínu Vymětalovi a Ing. Veronice Káplové za možnost tuto práci psát pro potřeby firmy KŽV s.r.o. a financování tisku. Děkuji také své rodině, přítelkyni a přátelům za neustálou podporu ve studiu.

VYUŽITELNOST 3D TISKU PRO MALOSÉRIOVOU VÝROBU

Anotace

V rámci této diplomové práce je nejprve formou literární rešerše popsána problematika 3D tisku, jeho pravidla a různé druhy technologií. Následně jsou popsány metody FDM a DMLS spolu s používanými materiály. V praktické části byl vyráběn jeden model třemi metodami – 3D tiskem kovu, 3D tiskem plastu a konvenční metodou. Jelikož se jednalo o součást pro vozík na měření geometrických parametrů kolejí, byly všechny součásti prakticky vyzkoušeny. Metodou 3D tisku kovu, která je v tomto směru nejvíce inovativní, byl následně vyroben optimalizovaný díl. Vyrobené součásti byly porovnány z hlediska naměřených dat, ale i z hlediska ekonomického.

Klíčová slova:

Additivní technologie, 3D tisk kovu, Optimalizace, Měřicí vozík Krab

Summary

Within this diploma thesis are first described the issue of 3D printing, its rules and various types of technologies, in the form of a literature search. Subsequently, the FDM and DMLS methods are described together with the used materials. In the practical part, one model was produced by three methods - 3D metal printing, 3D plastic printing and conventional method. As it was a component for a trolley for measuring the geometric parameters of the rails, all components were practically tested. An optimized part was subsequently produced using the 3D metal printing method, which is the most innovative in this respect. The manufactured components were compared in terms of measured data, but also in terms of economics.

Key words:

Additive Manufacturing, 3D metal print, Optimization, Measuring trolley Krab

Obsah

1. Úvod	5
2. Technologie 3D tisku	7
2.1. Rozdělení technologie 3D tisku.....	7
2.1.1. Rozdělení podle materiálu	7
2.1.2. Rozdělení podle formy.....	7
2.2. 3D tisk kovu	10
2.2.1. PBF	11
2.2.2. DED	12
2.3. Používané materiály u technologie FDM.....	13
2.3.1. ABS.....	13
2.3.2. ABS-ESD7	14
2.3.3. PC	14
2.3.4. Ultem 9085	14
2.4. Používané materiály u technologie DMLS.....	14
2.4.1. Hliník.....	14
2.4.2. Nerezová ocel	15
2.4.3. Titan.....	15
2.4.4. Inconel.....	15
2.4.5. Kobalt/chrom	16
3. Součásti z 3D tisku pro malosériovou výrobu	17
3.1. KŽV	17
3.2. Součást	19
3.3. Optimalizace dílu a požadavky pro 3D tisk	20
3.3.1. Požadavky pro tisk	20
3.3.2. Optimalizační proces	22
4. Praktická výroba vzorků	23
4.1. Konvenční způsob.....	23
4.1.1. Materiál pro výrobu.....	23
4.1.2. Vlastní výroba	24
4.2. 3D tisk plastu.....	28
4.2.1. Materiál pro výrobu.....	28
4.2.2. Vlastní výroba	29
4.3. 3D tisk kovu	31

4.3.1.	Materiál pro výrobu.....	31
4.3.2.	Vlastní výroba	32
4.3.3.	Optimalizace a výroba druhého domku	35
5.	Porovnání a měření.....	38
5.1.	Porovnání a kalibrace	38
5.2.	Měření	38
5.3.	Zhodnocení měření	40
6.	Vyhodnocení	41
6.1.	Vyhodnocení měření.....	41
6.2.	Ekonomické vyhodnocení	45
7.	Závěr	49
8.	Seznam obrázků.....	50
9.	Seznam grafů.....	51
10.	Seznam tabulek	51
11.	Zdroje	52

1. Úvod

Jednou z nejzásadnějších technologií, která se v minulé dekádě dostala do popředí, je bezpochyby 3D tisk. Jak již samotný název vypovídá, jedná se o tvorbu třídimenzionálních objektů. Tato technologie si během několika let našla uplatnění v mnoha odvětvích, mnohdy až diametrálně rozdílných, než pro které byla vyvinuta. To svědčí o velké výhodě oproti klasickým technologiím – je velmi univerzální a přizpůsobivá. Lze tak ve stavebnictví spatřovat návrhy budov vytvořené pomocí 3D tisku, ve zdravotnictví využívat při operacích části kostí a čelistí vytvořené touto metodou. Jednoznačně největší zastoupení v použití této aditivní technologie má ale průmysl.

Vznik technologie 3D tisku je datován do roku 1986, kdy si Charles Hull nechal patentovat technologii stereolitografie. Jedná se o první případ využití principu, kdy je postupným vrstvením dosaženo cílového produktu. Stereolitografie je proces, při kterém se pomocí vlnových délek (obvykle UV záření) vytvrzuje polymer. První model, který byl nabídnut veřejnosti, se nazýval SLA-250. Firma 3D Systems, ve které Charles Hull pracoval, se stala na trhu zcela dominantní. Roku 1993 si Massachusettský technologický institut nechal patentovat technologii trojrozměrných technik, která využívala práškový materiál a tekutý spojovač. V roce 2003 však vypršely některé patenty a spolu se vzrůstající konkurencí se na trhu se objevili nové technologie. Znamenalo to obrovský boom 3D tisku, který se velmi rychle rozšířil po celém světě.

Hlavními výhodami, kterými tato technologie disponuje, jsou velmi snadná obsluha, minimální odpad při výrobě a znatelné snížení hmotnosti výsledného produktu. Jednou z velkých předností je fakt, že pomocí 3D tisku se dá vyrobit prvek téměř libovolného tvaru. Mohou tak vznikat designové věci, které by konvenčními metodami byly nedosažitelné. 3D tisk se velmi často používá i ve vývoji a na výrobu prototypů, protože velmi rychle ukáže možné technologické a konstrukční nedostatky, navíc se zachováním minimálních nákladů. Nízká pořizovací cena a široká dostupnost přínos této technologie jenom podtrhují. V dnešní době jsou už pro metodu 3D tisku vytvářeny i speciální materiály, jako jsou různé druhy odolných či pružných plastů, kovů, sádrových kompozitních prášků, plastů se skelnými či karbonovými vlákny.

3D tisk je fenoménem dnešní doby a dá se očekávat, že jeho využití a rozsah výrobků se bude dále rozrůstat. Lze také predikovat využití i v oborech, ve kterých není zatím 3D tisk používán. Díky lepším vlastnostem materiálů pro 3D tisk, budou vlastnosti výrobků srovnatelné s původními technologiemi a pomocí 3D tisku bude umožněno snížit potřebu využití manuální výroby. Jeden operátor, jenž bude moci obsluhovat více strojů, bude schopen na každé tiskárně vyrábět jiný díl. Vzhledem ke značné flexibilitě této technologie lze hodnotit technologii 3D tisku jako velmi atraktivní a proto bude hlavním předmětem této diplomové práce.

V první části práce je formou literární rešerše provedeno rozdělení technologií 3D tisku. Po základním rozdělení technologií je práce zaměřena na metody FDM a DMLS, které jsou v praxi nejrozšířenější. Diplomová práce je psaná ve spolupráci s firmou Komerční železniční výzkum, spol. s r.o. (dále jen KŽV) za účelem zjištění využitelnosti 3D tisku v malosériově výrobě, proto další kapitola zahrnuje popis firmy a jejich výrobků. Z jejich běžné produkce byla také

zvolena součástka vhodná pro optimalizaci a následně pro samotnou výrobu, provedenou v rámci této diplomové práce.

Druhá část je věnována praktické výrobě vzorků a to hned několika způsoby. Jsou popsány 3 metody výroby – konvenčně, plastový 3D tisk a kovový 3D tisk. Všechny součástky jsou poté vyzkoušeny v reálném provozu a jejich výsledky porovnány. Vyrobené kusy jsou zhodnoceny na základě několika základních parametrů. Důležitými faktory jsou přesnost měření, pevnost a tuhost dílu, kvalita povrchu. Ekonomické hledisko je samozřejmě považováno jako jeden z podstatných a nejdůležitějších faktorů.

Výroba 3D tisku z kovu probíhala ve spolupráci FS ČVUT v Praze a Českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky, ČVUT v Praze (CIIRC), konvenční výroba byla uskutečněna ve Střelských Hořticích s pomocí firmy AVS Vojík a 3D tisk plastu byl realizován ve firmě KŽV v Praze. Cílem této práce je získat porovnání výroby různými technologiemi a prověřit, zda by měla technologie 3D tisku kovu uplatnění i v malosériové výrobě.

Závěry této práce byly poskytnuty všem zúčastněným pro jejich vlastní potřeby.

2. Technologie 3D tisku

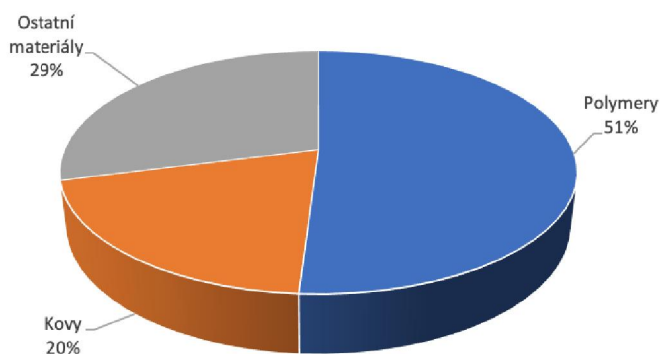
Jak bylo zmíněno, technologie 3D tisku je velmi inovativní a s notnou dávkou nadhledu lze tvrdit, že to je technologie budoucnosti. V současné době se technologie 3D tisku dá primárně rozdělit podle použitého materiálu a formy, ve které je materiál dodáván (např. struna nebo prášek). Na základě těchto základních parametrů lze jednoznačně určit, o jakou technologii se jedná. [1,2]

2.1. Rozdělení technologie 3D tisku

2.1.1. Rozdělení podle materiálu

Z hlediska použitého materiálu lze 3D tisk rozdělit na materiál kovový, plastový a ostatní. Mezi ostatní materiály jsou většinou uváděny keramika a kompozity, v současnosti jsou ale pro tisk využívány sklo, čokoláda, vosk, beton a dokonce i organické látky. [1,2,6]

Všechny tyto materiály otevírají pole působnosti pro 3D tisk. Procentuální využití materiálů je patrné na Obrázku 1.

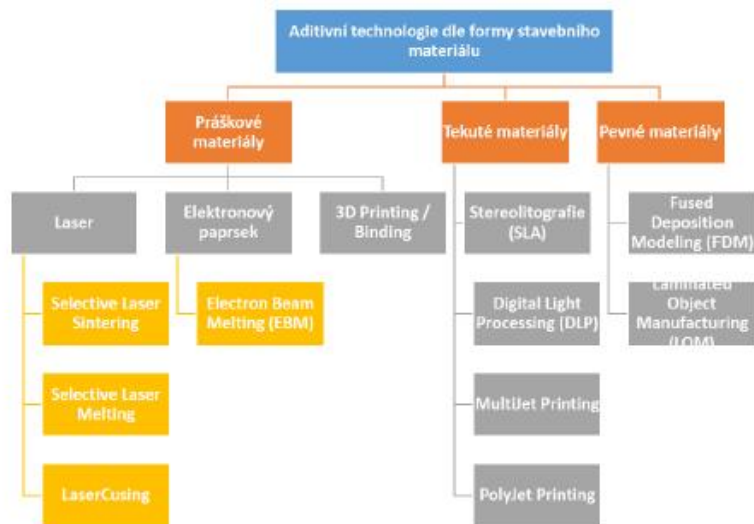


Obrázek 1: Využití materiálů pro 3D tisk [3]

Zde je zřejmá evidentní převaha využití plastových materiálů. Ta je zapříčiněna nízkou cenou a dobrými mechanickými vlastnostmi. Jelikož se už z principu musí jednat o termoplasty, je možnost zpětné recyklace výrobků. Nejčastěji používanými materiály jsou ABS (Akrylonitril Butadien Styren) a PLA (kyselina polylaktónová). [3]

2.1.2. Rozdělení podle formy

Pokud budeme 3D tisk rozdělovat podle formy, ve které je materiál dodáván, lze mluvit o třech možnostech. Nejméně častá je tekutá forma, využívaná hlavně při technologiích SLA a DLP. Pevná i prášková forma jsou velmi běžné a v praktickém provozu již velmi rozšířené. Rozdělení technologií v závislosti na vstupující formě materiálu je viditelné na Obrázku 2. [3,8]



Obrázek 2: Rozdělení technologií podle formy [8]

Tekuté materiály jsou využívány pro technologii stereolitografie (SLA), jakožto nejstarší technologii 3D výroby a pro technologii DLP. Rozdíl v těchto technologiích je při vytváření, zatímco u SLA je vytvářeno laserem, u modernější DLP je fotopolymerní tekutý materiál nasvícován obloukovou lampou s panelem s tekutými krystaly. Přesnost je u DLP větší než u SLA, rozdíl je vidět na Obrázku 3. Nejčastějším materiálem pro technologii SLA i DLP je fotopolymerní epoxidová pryskyřice. U zbývajících dvou moderních technologií, využívající tekutý materiál (MultiJet Printing a PolyJet Printing), je na tisknoucí hlavě několik trysek, které fungují současně. Vytváření probíhá UV zářením. Rychlost výroby je mnohem větší než u předcházejících metod. Společnou výhodou těchto technologií je velmi kvalitní povrch a vysoká přesnost výroby. Obrovskou nevýhodou je časová nestálost výrobků, díky reakci materiálu se světlem výrobek postupem času degraduje. [3,5,8]



Obrázek 3: Porovnání SLA a DLP [5]

Práškové materiály jsou používány při spékání materiálu ve formě prášku pomocí laseru, neboli technologií Selective Laser Sintering (SLS). Tloušťka vrstvy je cca 0,1 mm, záleží ale na materiálu, který je spékán. Pro metodu SLS lze používat plast (*Laser Sintering – Plastic*), kov

(*Laser Sintering – Metal*), písek (*Laser Sintering – Foundry Sand*) a keramiku (*Laser Sintering – Ceramic*). Stejný princip využívá EBM (Electron Beam Melting), kdy místo laseru je usměrněný tok elektronů směřován obvykle do titanového prachu. Právě kvůli náročnosti není tato technologie příliš rozšířená. SLM (Selective Laser Melting) využívá laser pro roztavení kovového prášku v místech po sobě jdoucích vrstev. Práškové kovové materiály je nutno při výrobě chránit inertními plyny. Obecně lze tvrdit, že ochrana zdraví při použití materiálu v prášku je nutností, zejména kvůli miniaturním rozměrům zrněk prášku, které by mohly způsobit zdravotní potíže a dýchací problémy. Výhodou jsou dobré mechanické vlastnosti a poměrně dobrá rychlost tisku. [3,5,8]

Pevný materiál je využíván u metod FDM (Fused Deposition Modeling) a LOM (Laminated Object Manufacturing). Zatímco při metodě LOM je materiál dodáván ve formě plastového listu, u FDM se jedná o filament ve formě struny. Princip LOM spočívá ve vrstvení plastových listů na sebe, přičemž vrstvy jsou nažehlovány nebo slepovány. U FDM se jedná o natavení filamentu pomocí extruderu a dopravení rozežhátého materiálu na podložku. Výhodou těchto technologií je bezproblémová doprava a manipulace materiálu, nevýhodou u LOM je velký podíl odpadu a u FDM dlouhá doba tisku. [3,5,8]

Obecně se dá tvrdit, že neexistuje univerzální technologie, která by se mohla používat pro všechny okolnosti a požadavky na výrobu. Pro zjednodušení typu technologie a používaného materiálu je velmi názorný Obrázek 4.

Process categories	Technology	Materials
Binder Jetting	3D Printing	Metal Polymer Ceramic
	Ink-jetting	
	S-Print	
	M-Print	
Direct Energy Deposition	Direct Metal Deposition	Metal: powder and wire
	Laser Deposition	
	Laser Consolidation	
	Electron Beam Direct Melting	
Material extrusion	Fused Deposition Modeling	Polymer
Material Jetting	Polyjet	Photopolymer Wax
	Ink-jetting	
	Thermojet	
Powder bed fusion	Selective Laser Sintering	Metal Polymer Ceramic
	Selective Laser Melting	
	Electron Beam Melting	
Sheet lamination	Ultrasonic Consolidation	Hybrids Metallic Ceramic
	Laminated Object Manufacture	
Vat photopolymerization	Stereolithography	Photopolymer Ceramic
	Digital Light Processing	

Obrázek 4: Rozdělení technologií a materiálů [4]

Je velmi zřejmé, že ne všechny metody se dají použít na stejný druh výrobku. Stejně tak je evidentní, že existují výhody a nevýhody aditivní výroby. Mezi hlavní výhody a nevýhody patří:

Efektivita procesu

Pojem efektivita v sobě spojuje více vlastností. Jednak se jedná o velmi šetrnou výrobu, protože odpad vzhledem k vyráběnému dílu je minimální, ne-li nulový. Rychlost výroby je výhodou zejména při tvorbě prvních kusů nebo prototypů. Při této výrobě se jedná, v porovnání s výrobou konvenční, o mnohem levnější výrobu, neboť nejsou potřeba žádné speciální přípravky a nástroje.

Použitý materiál

Materiál pro 3D tisk je, jak bylo zmíněno, téměř neomezený. Obrovskou výhodou je možnost kombinace rozdílných materiálů (plast + kov), čímž je umožněno dosažení speciálních vlastností. Nevýhodou je omezená variabilita zvoleného materiálu. Velmi často nelze využívat lepších a kvalitnějších typů materiálu, obvykle je pro 3D tisk upraven základní a nejběžnější typ materiálu. Materiály speciální s požadovanými vlastnostmi jsou nákladné a jejich úprava pro aditivní technologie by byla obtížná a výrobu by neúměrně prodražila.

Vyráběný díl

3D tisk se uplatňuje hlavně u tvarově složitých, menších výrobků. Tvarová složitost není pro tuto technologii problém, ba naopak, je to jedna z hlavních výhod. Bohužel při srovnání kvality povrchu nedosahuje 3D tisk tak dobrých výsledků jako konvenční technologie, i když vývoj a technologický pokrok pomáhá ke zlepšení tohoto parametru. Velmi často je potřeba výrobky ručně upravit, či jinak sekundárně opracovat. Rozměrově je technologie omezena velikostí podložky dané tiskárny, větší díly nelze vyrábět. 3D tisk se nehodí ani na velkosériovou výrobu, kde výhodnější a levnější jsou jiné formy výroby.

Automatizace a variabilita

Výhodou oproti jiným technologiím je fakt, že touto metodou lze vyrábět více kusů zároveň. A to i v případě, že každý kus je odlišný. Žádná jiná metoda toto neumí. Při vlastní výrobě není zapotřebí přítomnost obsluhy, tisk probíhá automaticky.

2.2. 3D tisk kovu

Jelikož prvek, vybraný pro výrobu v rámci této diplomové práce, by měl být primárně vyroben z kovu, dále bude rozebírán pouze 3D tisk kovu. Technologie na tisk kovu se rozdělují na několik druhů, jak je zřejmé z Tabulky 1. [4,6]

Tabulka 1: Technologie na tisk kovu [3]

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

Jak je vidět, dochází k rozdělení procesů podle způsobu výroby na PBF a DED, tyto dvě metody budou následně blíže specifikovány.

2.2.1. PBF

Metoda *Power Bed Fusion* spočívá v natavování prášku na platformě. K natavení je využíván laser (PBF – L) nebo elektronový paprsek (PBF – EB). Díky spékání je vytvářena homogenní vrstva na úrovni jedné hladiny. Po nanesení vrstvy prášku je opět spékána další vrstva. Tloušťka nanášené vrstvy je jedním ze základních parametrů metody PBF. Spékáním vrstvy musí být natavena i vrstva spodní, aby došlo k homogennímu materiálu. Příliš velká tloušťka by měla za výsledek studené spoje, neprůvary ke spodním vrstvám a tím iniciaci míst, náchylnějších na vznik trhlin nebo dalších vad materiálu. Další z důležitých parametrů je výkon zařízení a jeho fokusace přesně na vrstvu, která je spékána. Při rozostření zdroje energie do jiných míst by byl natavován prášek v jiných hladinách, což by mělo za následek například větší vnos tepla a větší velikost tavné lázně. Správné zaostření je předpokladem dobré výroby. Protože se jedná o spékání materiálu ve formě prášku, dalším z předpokladů je dobrá kvalita prášku, jeho zrnitost a minimální vlhkost. [3,4,8]

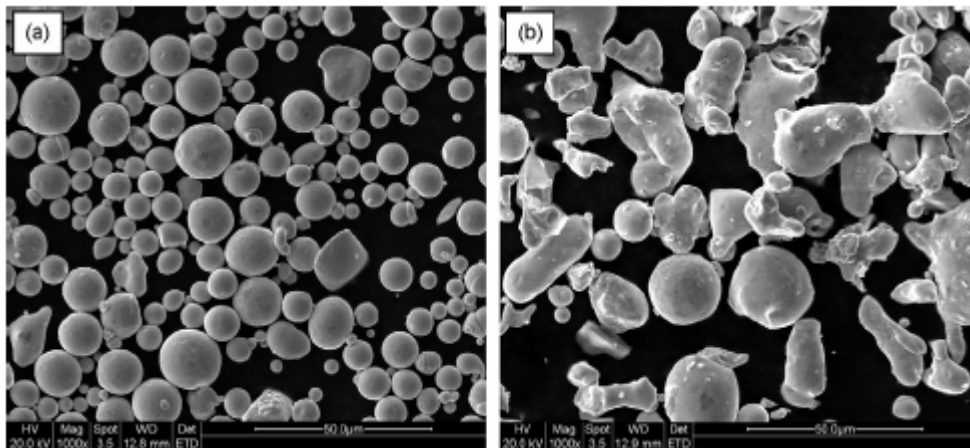
Prášek je do komory vpravován nanašečem, který nahrne potřebnou dávku prášku ze zásobníku. Po spečení vrstvy je znovu nanášena další vrstva, která přesně odpovídá posunu zásobníku v ose z, o kterou byl zásobník automaticky posunut. Přebytečný prášek je odstraněn do sběrného místa. Zároveň s tím je pracovní platforma v ose z posunuta o danou velikost, aby zaostření probíhalo pořád na stejné hladině. Tento proces se opakuje až do vytvoření potřebného dílu. [3,17]

Kovový prášek se nejčastěji vyrábí atomizací neboli rozstříkem taveniny. Toho je docíleno kolíží roztaveného kovu s tekutinou nebo plynem. Speciálním případem je výroba pomocí odstředivých sil. Ochlazením částic rozstříknutého kovu v okolním prostředí se následně vytvoří prášek. Jeho tvar a velikost jsou závislé na použité metodě, podmínkách ochlazení a teplotách při procesu. [17]

Při atomizaci taveniny vodou dochází ke styku kapky vody s povrchem taveniny. Vzájemným kontaktem je kapka vody přeměněna na vodní páru, která v místě dotyku odděluje

minimální množství taveniny a vytváří se tak prášek. Využívá se vysoké hustoty vody, díky které je dosaženo vysoké kinetické energie a hybnosti. Výhodou oproti dalším metodám je vysoká produktivita (až 30t/h) a nízká cena vody. Nevýhodou, která tuto metodu velmi omezuje, je geometrická nepravidelnost vzniklého prášku. [17]

Atomizace taveniny plynem se používá při výrobě prášků z materiálů, které jsou vysoce legovány. Dalším materiálem, který je takto vyráběn, je hliník, u kterého není vhodná atomizace vodou z důvodu možnosti samovznícení. Plyn, který z trysek proudí směrem do taveniny, narušuje její celistvost. Běžně jsou používány plyny jako dusík, argon, vzduch nebo helium. Během tří fází oddělení se z taveniny finálně oddělují kapky o střední velikosti 20-300 μm . Velikost a kvalita je ovlivněna materiálem, typem plynu, tlakem plynu, rychlostí taveniny a její viskozitou, ale také i geometrií trysek, kterým je plyn vháněn do taveniny. Výhodou této metody je poměrně dobrá geometrická podobnost vzniklého prášku. Na Obrázku 5 je patrné porovnání atomizace plynem a vodou. Tvarová odlišnost je zcela zřejmá. [17]



Obrázek 5: Atomizace taveniny - (a) plynem, (b) vodou [17]

Atomizace odstředivými silami se rozděluje na jednostupňovou nebo dvoustupňovou. Rozdílem je konečná velikost částic, kdy u jednostupňové je dosahováno 150-200 μm , u dvoustupňové atomizace je střední velikost částic 80-90 μm . Základní jednostupňové metody jsou PREP (Plazma Rotating Electrode Process) a REP (Rotation Electrode Process). Obě tyto metody pracují na principu průchodu elektrického oblouku mezi dvěma elektrodami. U metody REP je anoda vyrobena z potřebného materiálu a katoda je wolframová. Průchod elektrického proudu způsobuje natavení povrchu anody a rotací této elektrody je dosaženo odtržení kapek nataveného materiálu. Ty jsou zachyceny na chlazený plášť. U metody PREP je elektrický oblouk nahrazen heliovým plazmovým obloukem, díky kterému je dosaženo vyšší čistoty prášku. Tato metoda se používá pro titanové slitiny. [17]

Nejznámější metody na principu PBF jsou metody SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a EBM (Electron Beam Melting). První dvě jsou spékány laserem, u poslední je jako zdroj energie využit elektronový paprsek. [3,17]

2.2.2. DED

Oproti PBF je metoda Direct Energy Deposition (DED) zcela jinak technologicky vyřešena. Materiál není na stavební platformě, ale je přiváděn do místa tisku. Zdroje energie jsou opět

laser a elektronový paprsek, je také ale využíván plazmový hořák. Předností této metody je nanášení materiálu přímo do potřebného místa, rychlost výroby, ekonomické hledisko, ale současně i větší variabilita použitelných materiálů a jejich cenová dostupnost. Jelikož je materiál dopravován do místa lázně, je tato metoda téměř 100%, co se týče využití materiálu. Neoddiskutovatelnou výhodou je fakt, že při tisku principem DED nejsou potřebné stavební podpory a výrobek roste do prostoru samovolně. Lze také vyrobit slitiny kovů, kdy se společně přidává víc typů materiálů a vytváří se tak místa s lepšími vlastnostmi. Exponovaná místa se tak dají lépe chránit před porušením nebo případnými vadami. Materiál je při metodě DED přiváděn většinou jako drát, občasně se využíván materiál ve formě prášku. V porovnání ceny drátu a prášku je znatelný rozdíl, drát je při podobných vlastnostech i o 50 % levnější. Tím je tato metoda ekonomicky výhodnější, ovšem je nutné uvažovat i znatelně horší kvalitu povrchu. Po výrobě je tedy potřebné ještě obrobení nebo tepelné zpracování k odstranění pnutí. [3]

Technologie, které využívají principu DED, jsou Laser Metal Deposition (LMD), Direct Metal Deposition (DMD) a Laser Engineered Net Shape (LENS). Všechny tyto technologie využívají laser, elektronový paprsek je využíván u technologie Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). [3]

2.3. Používané materiály u technologie FDM

Technologie Fused Deposition Modeling (zkráceně FDM) je jedním z nejrozšířenějších technologií 3D tisku. Jedná se o nekovový tisk, kdy materiál je dopravován do extruderu v podobě filamentu. Tam je nataven a vytlačován na podložku. Pohybem trysky a podložky se vytváří potřebný model vrstvu po vrstvě. Výhodou této metody je jeho univerzálnost, velká škála použitelných materiálů a jejich barevných odstínů, rychlost a přesnost výroby a možnost současně vyrobit odlišné součástky. Všechny tyto přednosti, spolu s cenovou dostupností technologie, tvoří základní podmínky pro rozšířenost a masové používání metody FDM. Materiály, které bývají nejčastěji používány, jsou ABS, PC, PLA, PET, PP a další. V následujících odstavcích byly podrobněji rozebrány ABS a PC, jako dva nejrozšířenější materiály. Spolu s tím byl popsán materiál Ultem 9085, který je novinkou ve světě FDM. [8]

2.3.1. ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (zkráceně ABS) je velmi oblíbený a široce využívaný konstrukční termoplast s vysokou odolností. Vzhledem ke svým vlastnostem je velmi často používán jako materiál pro výrobu prototypů. Snadno ale může být využit pro výrobu finálních produktů pro funkční aplikace, různé podavače a upínací přípravky. Jelikož se jedná o neprůhledný termoplast, pro designové věci existuje mnoho barevných variant. [21]

Mechanické vlastnosti ABS jsou opět nejlépe určeny pevností v tahu 22MPa, pevností v ohybu 41 MPa a tažností 6 %. Obvyklá tloušťka vrstvy je udávána 0,25 mm. Jelikož je ABS základním materiálem pro metodu FDM, byly postupem času vyvinuty speciální materiály pro konkrétní využití. [21]

ABSi je termoplast typu ABS, který byl vyvinut pro farmaceutický a lékařský průmysl. Má větší odolnost a pevnost než standardní ABS, zároveň se jeví jako průsvitný. Skrze něj lze tedy pozorovat potřebné jevy a přenos světla. Materiál ABS-M30 má zvýšené vlastnosti v oblasti

pevností. Pevnost v tahu 36 MPa a v ohybu 61 MPa jsou využívány pro namáhanější součástky, které lépe vystihují reálné podmínky. [21]

2.3.2. ABS-ESD7

Speciálním případem ABS je ABS-ESD7. Tento materiál je odolný a zároveň rozptyluje statickou elektřinu. Využíván je tedy v elektrotechnice a elektronice, kdy je velmi vhodná eliminace statického náboje, který by mohl mít negativní vliv na účinnost zařízení. Obecně se dá využít stejně jako ABS pro koncové díly, upínače a různé přípravky. [21]

2.3.3. PC

Polykarbonát (zkráceně PC) je termoplast, který je využíván pro namáhané části v náročném prostředí. Jeho unikátní vlastností je velká rázová a teplotní odolnost. Pevnost v ohybu je uváděna 104 MPa, pevnost v tahu 68 MPa. [21]

Stejně jako u ABS i PC je základní materiál a je základem pro výrobu speciálních materiálů. Kombinací PC a ABS vznikl PC-ABS. Tento materiál v sobě obsahuje sílu a teplotní odolnost polykarbonátu a pružnost ABS. Je to ideální materiál, kde je zapotřebí vysoká pevnost v rázu a teplotní odolnost, zároveň dostatečná pružnost a ohebnost. Využitím jsou zamykací mechanismy, koncové komponenty a koncepční modely pro zkoušky tvaru a funkčnosti. Dalším materiálem je PC-ISO, který je zdravotně nezávadný a je uplatňován v potravinářství a při výrobě obalů. Opět je využíván pro lékařské účely a jako biokompatibilní materiál pro výrobu tělních implantátů a lékařských přístrojů. [21]

2.3.4. Ultem 9085

Tento inovativní materiál se teprve dostává na trh, ale svými vlastnostmi výrazně převyšuje dosavadní materiály. Je očekáváno, že se stane termoplastem číslo jedna pro většinu uplatnění v leteckém průmyslu, ale i v ostatních využitích. Jeho předností je vynikající poměr pevnosti k hmotnosti, dále má výbornou tepelnou odolnost a vysokou rázovou pevnost. Oproti ostatním materiálům je HDT (Heat Deflection Temperature) Ultemu 9085 při 1,81 MPa poměrně vysokých 173 °C, u ABS je to maximálně 100 °C. Současně je Ultem 9085 nehořlavý a splňuje normu UL 94-V0. Tento materiál zachovává také sledovatelnost výrobku, ale i suroviny, ze které byl vyroben. Splňuje tím požadavky pro letecký a automobilový průmysl, kde zpětná dohledatelnost je jedním z požadavků. [21]

2.4. Používané materiály u technologie DMLS

Materiály, které jsou nejčastěji používané technologií DMLS jsou hliník, nerezová ocel, titan, inconel a kobalt/chrom. Všechny tyto materiály byly krátce popsány s důrazem na mechanické vlastnosti. [18]

2.4.1. Hliník

Hliník je jedním z nejdůležitějších materiálů dnešní doby, dostává se do popředí díky skvělým vlastnostem, jako jsou výborné mechanické a tepelné vlastnosti, dobrá elektrická vodivost, nízká hustota. Další výhodou je flexibilní možnosti následného zpracování. Všechny tyto vlastnosti jsou zásadní pro odvětví, jako je automotive nebo letectví. Ve všech těchto důležitých odvětvích hraje hliník a jeho slitiny zásadní roli. [18]

Nejčastějším typem hliníku, který je technologií DMLS používán, je $AlSi_{10}Mg$. Jedná se o hliníkovou slitinu s pevností v tahu 460 MPa a tažnost 5%. Díky kombinaci slitiny křemík-hořčík vede ke zlepšení pevnosti a tvrdosti. [19]

Hliník je jedním ze základních kovových materiálů, které lze vyrábět aditivní technologií. V čistém stavu je ale velmi reaktivní, takže v přítomnosti vzduchu se okamžitě povrchová vrstva oxiduje a vytváří se Al_2O_3 . S hliníkem pro zajištění čistoty je potřeba pracovat v inertní atmosféře. [18,19]

2.4.2. Nerezová ocel

Nerezová ocel, která je obvykle používána technologií DMLS, je nízkouhlíková ocel SS316L. Tento materiál je také označován dle evropské normy jako 1.4404 a používá se v potravinářství, lékařství, jako součásti výrobních strojů a nástrojů. [18,20]

Jeho výhodou je velmi dobrá odolnost vůči korozi, obsah chromu je 17-19%, nikl je obsažen v rozmezí 13-15%. Má vynikající houževnatost a tažnost, zároveň je odolný vůči kyselinám. Odolnost vůči kyselinám se využívá v potravinářství, tažnost až 47% je velmi vhodná pro letectví a energetice. Hodnota meze pevnosti je 590MPa a mez kluzu 500 MPa. Další výhodou tohoto materiálu je vysoká tvrdost a svařitelnost, čímž je zvýšeno uplatnění tohoto materiálu i pro konstrukčně náročnější produkty. [18,19]

2.4.3. Titan

Jedním z neznámějších materiálů pro 3D tisk kovu je rozhodně Titanium 64 (Ti_6Al_4V). Má vynikající mechanické vlastnosti vzhledem k jeho měrné hustotě. Hustota je udávána $4,41 \text{ g/cm}^3$, spolu s tím je pevnost v tahu 1055 MPa a mez kluzu 945 MPa. Porovnáním hmotnosti k mechanickým vlastnostem z titanu činí špičkový materiál pro použití v leteckém průmyslu. Současně má velmi dobrou odolnost vůči korozi a opotřebení. [18,19]

Titan je současně díky jeho dobré biokompatibilitě a dobré odolnosti vůči opotřebení velmi často používán jako materiál pro implantáty a různé náhrady. Normálními metodami je zpracování titanu technologicky velmi náročné a ekonomicky extrémně náročné, proto 3D tisk práškového titanu se dostal velmi rychle do popředí. [18,19,20]

2.4.4. Inconel

Názvem Inconel je míněna niklová superslitina, která je nejčastěji používána ve vysokoteplotních aplikacích. Současně má ale potenciál pro použití v kryogenních aplikacích, díky tomu se z Inconelu stal ideální materiál na extrémní teploty. Existují rozdílné typy Inconelu, nejběžnější pro 3D tisk jsou IN625 a IN718. Inconel 718 má mez pevnosti 1020 MPa a tažnost 29%, Inconel 625 disponuje mezí pevnosti 920 MPa a tažností 40%. IN718 vykazuje i mimořádnou tepelnou odolnost do 700°C , spolu s vysokou odolností proti korozi. Spolu s tím dosahuje výborných mechanických vlastností a odolnosti proti tečení. [18,19,20]

Podobně jako u titanu je klasická výroba velmi náročná a 3D tiskem práškového Inconelu je usnadněno jeho použití v potřebných aplikacích. Využití Inconelu je primárně v částech turbín, raket a motorů, tedy všude, kde je uplatněna vynikající tepelná odolnost. Dále je použit v leteckém a automobilovém průmyslu, při výrobě potrubí a tepelných výměníků. [18,19,20]

2.4.5. Kobalt/chrom

Superslitiny kobaltu-chromu jsou vynikající pro svou biokompatibilitu, velmi vysokou tvrdost spolu s vynikající schopností odolávat korozi. I přes to, že neobsahuje nikl (méně než 0,1%), má tento materiál vynikající schopnosti při zvýšených teplotách (500 – 1000°C). Hotový výrobek z tohoto materiálu lze následně i upravovat a tepelně zpracovávat. [18,19,20]

Tato superslitina je dále charakterizována jemnou, rovnoměrnou strukturou krystalových zrn. Nejrozšířenější jsou dva druhy této superslitiny, SP2 a MP1, kdy použitím a vlastnostmi se poměrně zásadně odlišují. U SP2 je mez pevnosti 1350 MPa a tažnost 3%. Je používán výhradně na zubní lékařství a to jako zubní výplň a spolu s keramikou na výrobu zubních můstků a korunek. Materiál MP1 má mez pevnosti 1100 MPa a tažnost minimálně 20 %. Využíván je hlavně v letectví a obecně ve zdravotnictví, kde je velkým bonusem jeho biokompatibilita. [18,19,20]

3. Součásti z 3D tisku pro malosériovou výrobu

V této kapitole bude představena samotná součást, která poté bude vyráběna a porovnávána s původní. Jako nejvhodnější díl byl vybrán blok z měřicího vozíku KRAB S-Light firmy KŽV, se kterou byla tato práce konzultována a výsledky této práce jí byly předány pro další účely.

3.1. KŽV

Firma Komerční železniční výzkum, spol. s r.o. (zkráceně KŽV) vznikla v roce 1992. Zakladateli této firmy byli Ing. Josef Turek CSc., Ing. Daniel Singer, Ing. Vladimír Pátý a Ing. Antonín Vymětal, kteří společně pracovali ve Výzkumném Ústavu Železničním, a.s. v Praze. Své znalosti a získané poznatky dokonale využili a firma si začala velmi rychle nacházet své zákazníky.



Obrázek 6: Logo firmy KŽV

Hlavním produktem firmy jsou od počátku do současnosti přístroje na měření geometrických parametrů kolejí. Nejrozšířenějším typem vozíků je KRAB, který je v současné době k dispozici ve 4 základních variantách - KRAB 84.09, KRAB Light, KRAB S-Light a KRAB U-Light. Varianty se liší vybaveností, hmotností a tím pádem maximální pojízdnou rychlostí, ale také konstrukčními změnami, ke kterým postupem času docházelo.

Obvykle jsou měřeny a vyhodnocovány veličiny, charakterizující železniční trať a samotné měření. Jsou to rozchod koleje, výška koleje, směr, převýšení a zborcení koleje. Dále je zaznamenávána dráha měření. Měřicí vozík také může být konstruován na měření dvou typů rozchodu koleje (např. 760 – 1435 mm), což je pro využití velmi praktické. Rychlost přestavby na jiný rozchod je v řádech jednotek minut. K vozíkům existuje mnoho příslušenství a přídatných zařízení, jako je bezkontaktní měření profilu kolejnice, průjezdnost tratí v tunelech, měření výhybek, možnost tažení vozíku za drezínou spolu s automatickým odpojením v případě vykolejení.



Obrázek 7: Model Kraba S-Light



Obrázek 8: Reálný vozík Krab S-Light

Pro potřeby zákazníků po celém světě byly vyrobeny i další speciální přístroje. Do Francie T-vozík, který měří vzdálenost daného objektu od osy koleje, do Číny vozík Gekon na měření vlnkovitosti kolejnic, pro měření tramvajových tratí byla vyvinuta speciální kola. 15 vlastních patentů dokazuje, že firma má v oblasti kolejové dopravy veliké zkušenosti, které se snaží naplno využívat a potenciální mezery na trhu okamžitě řešit. Zástupci firmy v 10 zemích pomáhají k lepší komunikaci s cílovými zákazníky a získávání nových kontraktů. Výrobky jsou používány v Austrálii, v Singapurském metru, Thajsku, Malajsii, Jižní Africe, Etiopii, po celé Evropě a Jižní Americe a v dalších státech světa. Lze tvrdit, že s výjimkou Severní Ameriky, se dají

produkty firmy KŽV najít po celém světě. Dodnes si firma i přes fakt, že vyrábí světové produkty, uchovává status rodinná, neboť v ní pracuje dohromady 14 zaměstnanců.

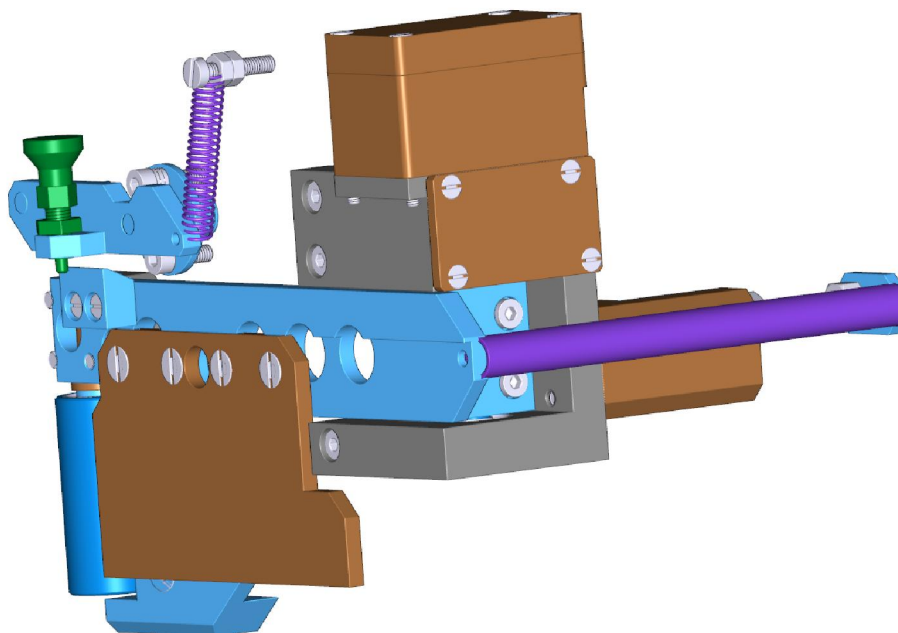
3.2. Součást

Jako vhodný díl pro 3D tisk byl zvolen blok přídavné kladky na Krabu S-Light. Tento “domek” je hlavní částí tzv. “klepeta”, díky kterému je možné měření výhybek. Pomocí těchto přídavných kladek lze měřit rozevření jazyka výhybky, šířku žlábků v přídržnici, šířku žlábků u křídlové kolejnice a v srdcovce, vodící vzdálenost. Skrz domek klepeta je celý aparát montován k měřicímu vozíku, viz Obrázek 9. Je patrné, že klepeto je pro samotný měřicí vozík velmi důležité. Proto je ideálním kandidátem na vytvoření nového dílu díky 3D tisku kovů.



Obrázek 9: Detailní pohled na levé klepeto

Samotný díl je obvykle vyráběn na CNC obráběcím centru. Po vrtání a ručních úpravách je blok chemicko - tepelně povrchově upraven černým eloxováním. Tato povrchová úprava dodává potřebný vzhled a zlepšuje funkční vlastnosti, především tvrdost, otěruvzdornost a korozní odolnost. Tím je vlastní výroba součásti ukončena. Při montáži jsou do bloku uchycena ložiska 626-2RS1 SKF, která jsou z jedné strany zajištěna pojistnými kroužky 19 mm. Samotný aparát s kladkou je poté upevněn do ložisek díky osičce s osazením, právě pro zmíněná ložiska. Axiální pohyb osy vůči ložiskům je odstraněn vymezovacími podložkami. Do vrchní části osičky je za pomoci Z-spojky upevněn rotační potenciometr. Celá soustava je velmi dobře patrná na Obrázku 10.



Obrázek 10: Sestava levého klepeta

Vychýlení kladkostroje zapříčiní otočení osy, tím pádem změnu v rotačním potenciometru. Mechanická výchylka je přenesena na elektrický puls, který je dále zpracováván a vyhodnocován. Díky tomuto jednoduchému principu lze velmi přesně měřit odchylky kolejnic i v těžko dostupných místech, jako jsou výhybky. Přítlak na hlavu kolejnice je zajištěn tažnou pružinou 1x10x60 mm, která je uchycena mezi vozík a část klepeta. Přesnost klepet je 0,1 mm.

3.3. Optimalizace dílu a požadavky pro 3D tisk

Součást, která byla vymodelována, musí před výrobou projít procesem optimalizace. V té se dosahuje snížení hmotnosti se zachováním původních vlastností. Musí být také splněny požadavky pro 3D tisk a to konkrétně pro tu technologii, kterou bude díl vyráběn. Obecně je velmi vhodné při modelování znát použití dílu v praxi, aby byla zvolena správná technologie a vymodelovaná součást splňovala dané požadavky. [3, 17]

3.3.1. Požadavky pro tisk

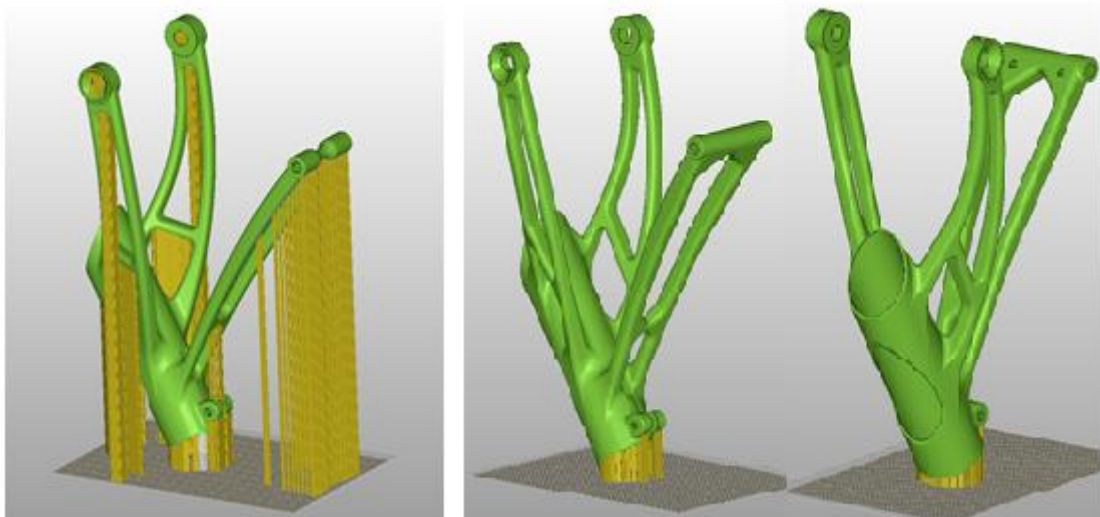
Design je často jedním z nejdůležitějších kroků k vytvoření kvalitního výrobku. Každý díl musí být ale před výrobou optimalizován z důvodu vyrobitelnosti a správné technologičnosti konstrukce. Jedním ze základních problémů při tisku jsou ostré hrany, proto je doporučeno při modelování použít zaoblení s minimálním poloměrem 0,5 mm. Při technologii spékání prášku nelze uvažovat prášek jako nosný prvek, v případě nedostatečného nanesení prášku by poté mohlo dojít ke zborcení vrstvy nebo celé konstrukce. Limitním úhlem, který zaručuje, že konstrukce je samonosná, je 45°. Do tohoto úhlu je zaručena i tvarová přesnost. Při překročení kritického úhlu je již zapotřebí podepřít konstrukci podporou. Podpory se obvykle generují velmi úzké a s malou stykovou plochou s podložkou, pro snazší odstranění od podložky. Nastavením se může regulovat i hustota a tvar tisknutých podpor. [3, 17]

Pokud má tištěný díl přímou hranu, která se tiskne rovnoběžně s hranou tiskové platformy, je model natočen tak, aby byla rovnoběžnost porušena. Tím je dosaženo natočení modelu

vzhledem k hraně podložky. Důvodem natočení je eliminace nerovnoměrného nanášení prášku. Pokud by hrana byla rovnoběžná, byla by okamžitou překážkou pro nanášecí zařízení s práškem po celé své délce, jakmile je ale model natočen, hrana části se nanáší postupně a nevytváří se tak velký odpor proti nanašeči. V případě rovnoběžné hrany by mohlo dojít k vychýlení nanášecího zařízení a degradaci celého tisku. [17]

Stejně tak při tisku štíhlých, vysokých dílů s malým průřezem, je nutné uvažovat o optimalizaci. Poměr mezi výškou a délkou podstavy by měl být maximálně 8:1, při překročení tohoto poměru se při tisku může tištěný díl vychylovat ke stranám. Nebude zaručena kolmost stěny k podložce, rovnoběžnost podložky a horní vrstvy. Optimalizační metodou, která odstraňuje vychýlení při tisku vysokých štíhlých součástí, je přidání spojovacích můstků, které spojí tyto štíhlé součásti k sobě. Tím je zabráněno vychýlení a posílena celková tuhost. Je ovšem nutné po tisku odstranit tyto spojovací můstky. [17]

Důležitost správné úpravy je patrná na Obrázku 11, kde vlevo je neupravený díl, vpravo díl po úpravě.



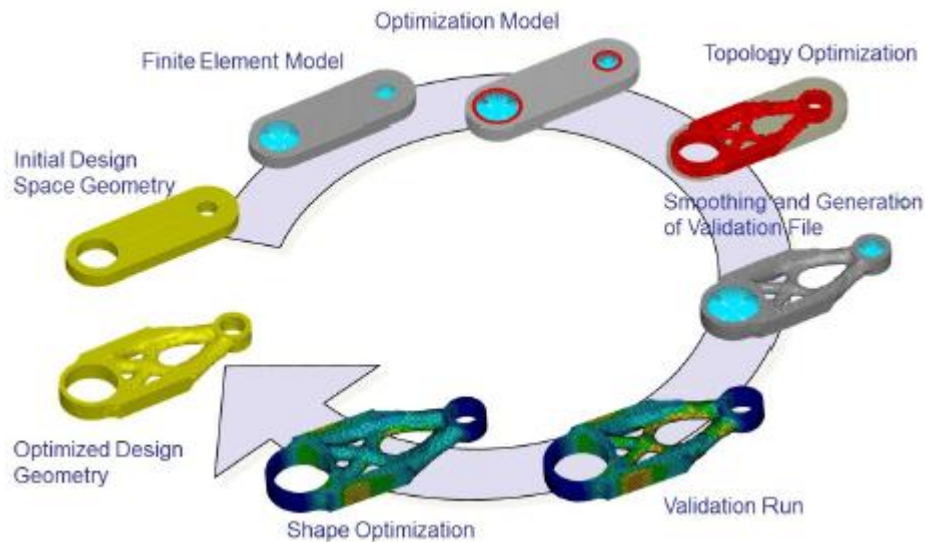
Obrázek 11: Optimalizace dílu [7]

Žlutá barva značí potřebné podpory při tisku. Ty výrobu velmi zpomalují a výrazně prodražují. Dalším problémem, jenž se v důsledku podpor musí řešit, je tzv. post-processing, neboli dodatečná úprava. Ten je nutný k odstranění podpor a získání kvalitního povrchu. Nejčastější operací post-processingu je obrábění, v některých případech lze podpory odstranit kleštěmi. Při odstraňování podpor obráběním dochází ale k přerušovanému obrábění, které má zásadní vliv na kvalitu a životnost obráběcích nástrojů. Dalším z důležitých rozhodnutí je stanovení základny. Toto rozhodnutí má vliv na kvalitu výsledného povrchu a jeho mechanickou odolnost. Volba základny by měla být spojena s plným pochopením následného využití dílu v praxi. Umístěním a natočením dílu lze modifikovat vlastnosti, které výsledný výrobek v jednotlivých směrech má. 3D tisk je anizotropický, tzn. v různých souřadnicových směrech mohou být různé hodnoty zkoumané veličiny. Právě proto je nutné vědět, jak bude díl namáhaný, či jaká strana bude pohledová. Pokud je to možné, pohledová strana je umísťována směrem k podložce, aby byla tištěna jako první. Eliminace následného namáhání je dosaženo tiskem kolmým na směr namáhání. [7]

3.3.2. Optimalizační proces

Díky programům a simulačním softwarům lze v dnešní době velmi jednoduše hodnotit daný díl z pohledu cena – výkon. Trendem moderní doby je také snižování hmotnosti na minimum, při zachování nebo dokonce i zlepšení vlastností dílu. Z toho důvodu vznikají tvarově velmi složité, avšak lehké designové věci. [15]

Optimalizační proces je souhrn několika operací, v nichž každá má svou důležitou roli. Celý proces je viditelný na Obrázku 12.



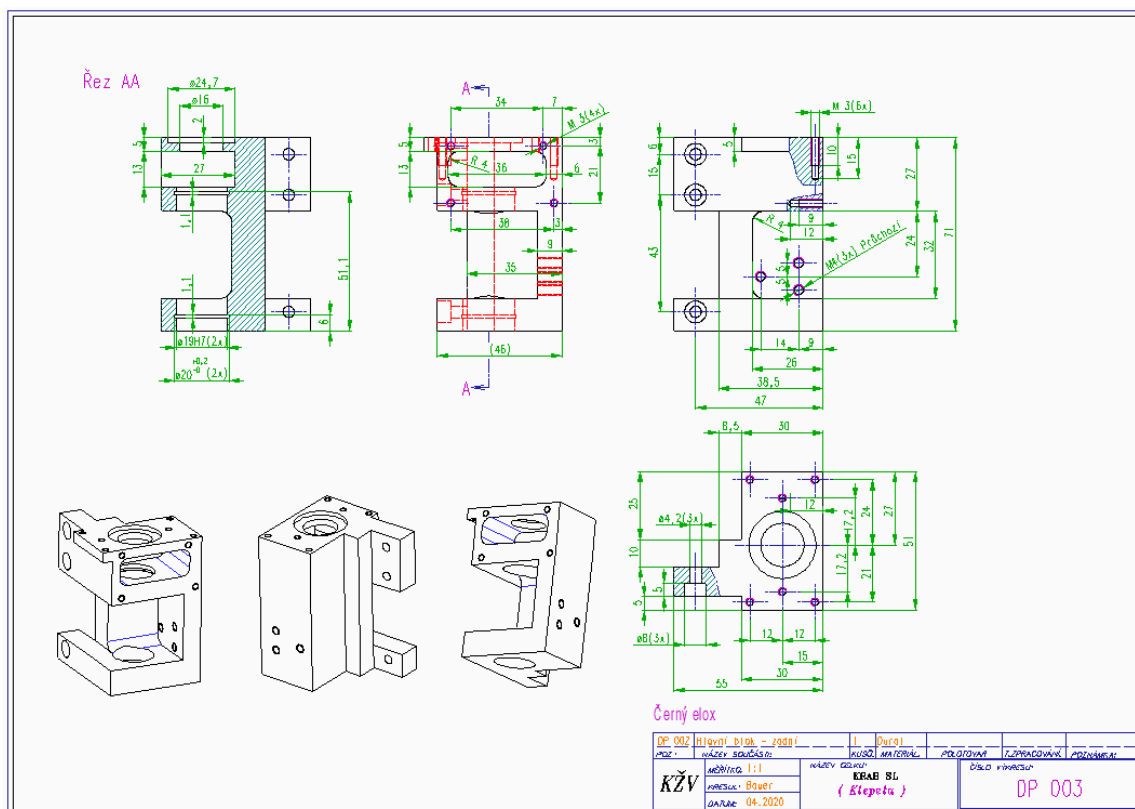
Obrázek 12: Optimalizační proces [3]

V samotném procesu jsou dvě operace, které jsou základem všech změn a optimalizací součásti. Jedná se o tvarovou a topologickou optimalizaci. Tvarová optimalizace je většinou umístěna na zadních pozicích procesu, neboť při ní se už tak výrazně nemění rozložení hmoty, poloha těžiště, ale jedná se o vyhlazení hran, odstranění potencionálních problematických míst, odstranění koncentrátorů napětí. Topologická optimalizace vytváří největší změny součásti, jak z hlediska objemu materiálu, tak z rozložení hmotnosti po součásti. Spolu s tím ale dává důraz na zachování mechanických vlastností. Operace před topologickou optimalizací pomáhají softwarově najít místa vhodná pro změny, případně místa, která nejsou pro samotný díl prospěšná a nepodílí se na složkách mechanických vlastností. Stejným způsobem operace před koncovou tvarovou optimalizací provádí analýzy kritických míst a jejich snahou je minimalizovat, v nejlepších případech odstranit místa, která by snižovala životnost součásti. Celý tento proces může být použit při výrobě libovolné součásti, nejčastěji se však tento proces využívá u výroby prototypů pro sériovou výrobu. Další možností využití jsou jednoúčelové stroje, kdy změna hmotnosti nebo polohy těžiště hraje dominantní roli. Cenově se jedná o velmi náročnou část výroby, programy a softwary pro tuto činnost jsou drahé. Je tedy zřejmé, že je potřeba znát pozadí vyráběného dílu, aby mohlo být správně rozhodnuto, jestli optimalizační proces má smysl či nikoliv. [3, 16]

4. Praktická výroba vzorků

4.1. Konvenční způsob

Výroba konvenčním způsobem byla provedena ve Střelských Hořticích. Byl vypracován výrobní výkres a technologický postup pro vyrobení dané součástky. Výkres byl upraven pro samotnou výrobu a snadnější orientaci při výrobních operacích. Samotný výkres je patrný na Obrázku 13.



Obrázek 13: Výkres součásti

4.1.1. Materiál pro výrobu

Materiálem, který byl zvolen pro výrobu součásti, je EN AW-6060. Jedná se o precipitačně vytvrditelnou hliníkovou slitinu s příměsí hořčíku a křemíku. Jejich procentuální zastoupení se dá zjistit z chemického označení této slitiny, AlMgSi0,5. Celkové chemické a mechanické vlastnosti jsou viditelné na Obrázku 14.

Chemické a mechanické vlastnosti hliníkových slitin

Označení		Složení %												
EN-AW	DIN	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Ti	poznámka	ostat	
6060	AlMgSi0,5	0,30-0,60	0,10-0,30	≤0,10	≤0,10	0,35-0,6	≤0,05	-	≤0,15	-	≤0,10	-	≤0,05	≤0,15

Označení		Tepelná vodivost	Koeficient lineární roztažnosti	Specifická hmotnost	Elektrická vodivost	Modul pružnosti v tahu	Svažitelnost ¹⁾	Vhodnost pro anodickou oxidaci			Obrobitelnost ²⁾	Dozrlost korozi proti
EN-AW	DIN	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{1}{m \cdot K} \cdot 10^{-6}$	$\frac{kg}{dm^3}$	$\frac{1}{\Omega \cdot mm^2}$	$\frac{N}{mm^2}$	TIG	MIG	technický	dekarativní	tenký	
6060	AlMgSi0,5	2,0	23,4	2,70	29	69	B	A	B	A	C	A

1) Hodnoty pro tepelnou vodivost mohou být ovlivněny stavem tvrdosti. Jsou uvedeny údaje v měkkém stavu.
 2) Při svařování hliníku a jeho slitin ve vzdušeném stavu (označení stavu Hxxx) nebo precipitačně tvrzeném stavu (označení stavu Txx) je nutno počítat s klesáním síly v přechodovém pásmu.
 3) Obrobitelnost je ve velké míře ovlivněna tvrdostí slitiny. Obrobitelnost vzrůstá úměrně s tvrdostí materiálů.

A = velmi dobrá
 B = dobrá
 C = průměrná
 D = špatná
 E = velmi špatná

Obrázek 14: Chemické a mechanické vlastnosti EN AW-6060 [9]

Tato slitina má velmi dobrou svažitelnost a odolnost proti korozi, zároveň má dobrou tvařitelnost za studena. Díky této kombinaci se slitinou hliníku typu 6060 staly jednoznačně nejpoužívanější při výrobě hliníkových profilů. Jedná se o tepelně zpracovatelnou slitinu, kde velmi důležité množství intermetalické fáze MgSi. Právě tato fáze způsobuje tepelnou zpracovatelnost. Té se využívá v potravinářském průmyslu, v komponentech pro dopravu, architekturu, jako části chladičů, rámu jízdních kol, segmentů mostních konstrukcí. Jeho všeobecné uplatnění ještě zvyšuje výborná eloxovatelnost, kdy lze dosáhnout různých barevných odstínů. Ve vytvrzeném stavu je pevnost v tahu zhruba 215 MPa, což je dostačující pro uplatnění ve výše zmíněných oborech. [9,10]

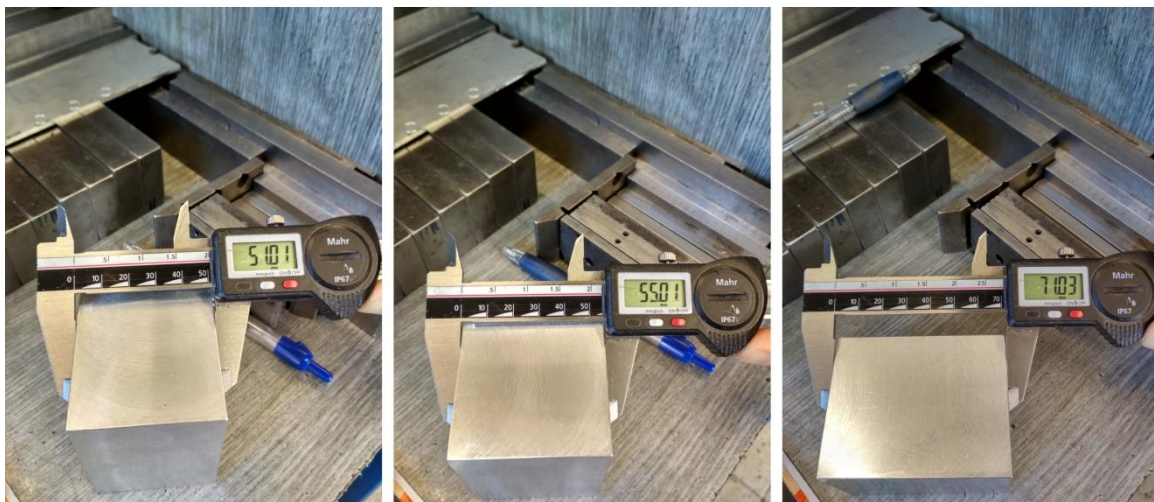
4.1.2. Vlastní výroba

Materiál EN AW-6060, nakoupený ve formě čtvercové tyče o rozměrech 60 mm x 60 mm x 3000 mm, byl nejprve nakrácen na strojní pile na požadovaný rozměr. Polotovarem pro výrobu byl hranol 60 mm x 60 mm x 75 mm. Pro bezpečnost při manipulaci byly hrany sraženy na kotoučové brusce s lamelovým kotoučem.



Obrázek 15: Řezání polotovaru

Následnou operací bylo vyfrézování přesného hranolu na univerzální konzolové frézce F2V-R od firmy TOS Olomouc. Tato frézka má vřeteník s vřetenem ve výsuvné pinole, která se dá naklápět v podélné rovině stolu až o 90°. Velikou předností tohoto stroje je vysoký krouticí moment na vřetenu a velký zdvih pinoly. Při frézování na čisto byl zvolen úběr 0,2 mm a rychlost 360 ot/min. Následně byl hranol otočen a byla zfrézována protilehlá strana pro zaručení rovnoběžnosti stěn. Stejnými parametry byl vytvořen hranol 51 mm x 55 mm x 71 mm, který byl dále rozměrově zkontrolován posuvným měřítkem, jak je zřejmé na Obrázku 16.



Obrázek 16: Kontrola rozměrů součásti

Poté byl hranol upnut na výšku do svěráku ve vertikálním obráběcím centru Strojtos VMS 40/8. Nejprve byl sepsán program pro obrábění (viz. Obrázek 17). Jako jedna z prvních operací byla zvolena výroba průchozího otvoru, aby byla maximálně využita tuhost hranolu. Spolu s tím byly naprogramovány otvory pro rotační potenciometr a jeho kryt. Program byl následně odsimulován z důvodu správnosti výroby a zamezení kolizí, jak s vlastním materiálem,

tak s příslušenstvím obráběcího centra. Po úspěšné simulaci byl program spuštěn, zároveň s tím už začalo probíhat vytváření programu na obrábění další strany.

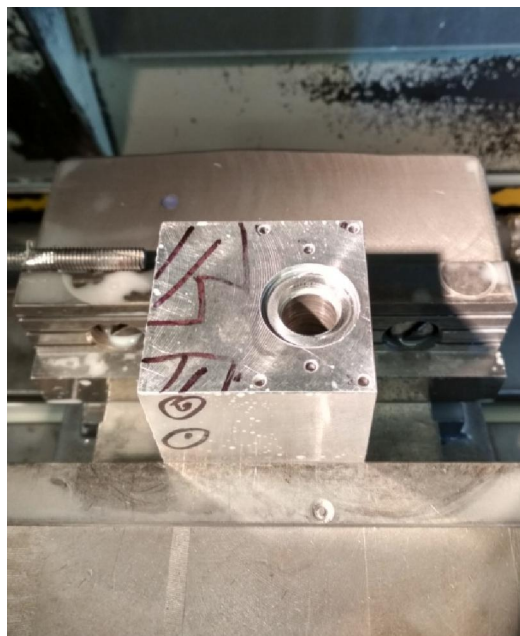
```

0 BEGIN PGM DP 003op1 MM 13 ; 21 ; 33 CYCL DEF 252 KRHOVA KAPSA -
1 BLK FORM 0.1 Z X-55 Y-51 Z-71 14 ;vr-7,5 22 ;vr-14 Q215=+1 ;ZPUSOB FREZOVANI -
2 BLK FORM 0.2 X+0 Y+0 Z+0 15 TOOL CALL 9 Z S3000 23 TOOL CALL 11 Z S1300 Q223=+16,05 ;PRUMER KRUHU -
; 16 L Z+50 RO FMAX M3 24 L Z+50 RO FMAX M3 Q368=+0 ;PRIDAVEK PRO STRANU -
4 ; ; 17 CYCL DEF 203 UNIVERSAL-VRTANI ~ 25 CYCL DEF 203 UNIVERSAL-VRTANI ~ Q207=+500 ;FREZOVACI POSUV -
; ; Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~ Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~ Q351=+1 ;ZPUSOB FREZOVANI -
5 ; ; Q201=-16 ;HLOUBKA ~ Q201=-76,5 ;HLOUBKA ~ Q201=-4 ;HLOUBKA ~
6 ;navz Q206=+100 ;POSUV NA HLOUBKU ~ Q206=+80 ;POSUV NA HLOUBKU ~ Q202=+4 ;HLOUBKA PRISUVU ~
7 TOOL CALL 2 Z S2000 Q202=+0,3 ;HLOUBKA PRISUVU ~ Q202=+10,5 ;HLOUBKA PRISUVU ~ Q369=+0 ;PRIDAVEK PRO DNO -
8 L Z+50 RO FMAX M3 Q210=+0 ;CAS. PRODLEVA NAHORE ~ Q210=+0 ;CAS. PRODLEVA NAHORE ~ Q206=+150 ;POSUV NA HLOUBKU ~
9 CYCL DEF 240 CENTERING ~ Q203=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~ Q203=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~ Q338=+0 ;PRISUV NA CISTO -
Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~ Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST Q204=+150 ;2. BEZPEC.VZDALENOST ~ Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~
Q343=+0 ;SELECT DEPTH/DIA. ~ Q212=+0 ;HODNOTA ODBERU ~ Q212=+0 ;HODNOTA ODBERU ~ Q203=+2 ;SOURADNICE POVRCHU ~
Q201=-1,4 ;HLOUBKA ~ Q213=+10 ;POCET TRISEK ~ Q213=+10 ;POCET TRISEK ~ Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST ~
Q344=-10 ;DIAMETER ~ Q205=+0,3 ;MIN. HLOUBKA PRISUVU Q205=+0,3 ;MIN. HLOUBKA PRISUVU ~ Q370=+0,8 ;PREKRYTI DRAHY NAST. -
Q206=+150 ;POSUV NA HLOUBKU ~ Q211=+0 ;CAS. PRODLEVA DOLE ~ Q211=+0 ;CAS. PRODLEVA DOLE ~ Q366=+0 ;PONOROVAT ~
Q211=+0 ;CAS. PRODLEVA DOLE ~ Q208=+99999 ;POSUV NAVRATU ~ Q208=+99999 ;POSUV NAVRATU ~ Q385=+500 ;POSUV NA CISTO -
Q203=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~ Q256=+0,2 ;ODSKOK ZLOM.TRISKY Q256=+0,2 ;ODSKOK ZLOM.TRISKY 34 L X-15 Y-27 RO FMAX M8 M99
Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST 18 N8 26 L X-15 Y-27 RO FMAX M8 M99 35 ;
10 L X-15 Y-27 RO FMAX M8 M99 19 CYCL DEF 221 RASIR V RADE ~ 27 ; 36 ;fz-10-14-cista
11 CYCL DEF 221 RASIR V RADE ~ Q225=-3 ;STARTBOD V 1.OSE ~ Q225=-3 ;STARTBOD V 1.OSE ~ 27 ; 37 TOOL CALL 8 Z S4500
Q226=-3 ;STARTBOD V 2.OSE ~ Q226=-3 ;STARTBOD V 2.OSE ~ 28 ;fz-12 38 L Z+50 RO FMAX M3
Q237=-24 ;ROZTEC V 1. OSE ~ Q237=-24 ;ROZTEC V 1. OSE ~ 29 TOOL CALL 7 Z S3500 39 CYCL DEF 252 KRHOVA KAPSA -
Q238=-45 ;ROZTEC V 2. OSE ~ Q238=-45 ;ROZTEC V 2. OSE ~ 30 L Z+50 RO FMAX M3 Q215=+1 ;ZPUSOB FREZOVANI -
Q242=+2 ;POCET SLOUPKU ~ Q242=+2 ;POCET SLOUPKU ~ Q223=+24,7 ;PRUMER KRUHU ~
Q243=+2 ;POCET RADEK ~ Q243=+2 ;POCET RADEK ~ Q368=+0 ;PRIDAVEK PRO STRANU -
Q224=+0 ;UHEL NATOCENI ~ Q224=+0 ;UHEL NATOCENI ~ Q207=+500 ;FREZOVACI POSUV ~
Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~ Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~ Q351=+1 ;ZPUSOB FREZOVANI -
Q203=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~ Q203=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~ Q201=-2 ;HLOUBKA ~
Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST Q202=+2 ;HLOUBKA PRISUVU ~
Q301=+1 ;NAJET BEZPEC.VYSKU Q301=+1 ;NAJET BEZPEC.VYSKU Q369=+0 ;PRIDAVEK PRO DNO ~
12 CYCL DEF 221 RASIR V RADE ~ 20 CYCL DEF 221 RASIR V RADE ~ Q225=-15 ;STARTBOD V 1.OSE ~
Q226=-9,8 ;STARTBOD V 2.OSE ~ Q226=-9,8 ;STARTBOD V 2.OSE ~ Q206=+150 ;POSUV NA HLOUBKU ~
Q237=-10 ;ROZTEC V 1. OSE ~ Q237=-10 ;ROZTEC V 1. OSE ~ Q338=+0 ;PRISUV NA CISTO ~
Q238=-34,4 ;ROZTEC V 2. OSE ~ Q238=-34,4 ;ROZTEC V 2. OSE ~ Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~
Q242=+1 ;POCET SLOUPKU ~ Q242=+1 ;POCET SLOUPKU ~ Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST ~
Q243=+2 ;POCET RADEK ~ Q243=+2 ;POCET RADEK ~ Q370=+0,8 ;PREKRYTI DRAHY NAST. -
Q224=+0 ;UHEL NATOCENI ~ Q224=+0 ;UHEL NATOCENI ~ Q366=+0 ;PONOROVAT ~
Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~ Q200=+2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~ Q385=+500 ;POSUV NA CISTO -
Q203=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~ Q203=+0 ;SOURADNICE POVRCHU ~ 40 L X-15 Y-27 RO FMAX M8 M99
Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST Q204=+50 ;2. BEZPEC.VZDALENOST 41 ;
Q301=+1 ;NAJET BEZPEC.VYSKU Q301=+1 ;NAJET BEZPEC.VYSKU 42 L Z+250 X+100 Y+80 RO FMAX M30
43 END PGM DP 003op1 MM

```

Obrázek 17: Program na CNC obrábění

Výsledkem tohoto kódu je obrobeký díl z vrchní strany, jak je zřejmé z následujícího Obrázku 18. Pro lepší orientaci s obrobkem byly lihovým fixem nakresleny důležité otvory a hrany.



Obrázek 18: Díl po první operaci

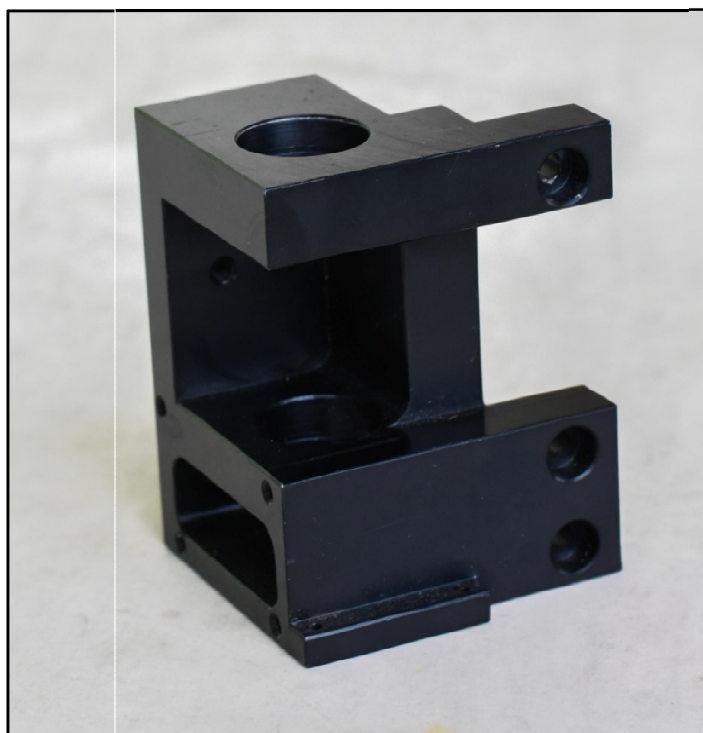
Podobným postupem byly následně obrobeny i zbývající strany. Konečný produkt byl přesunut na pracoviště kontroly, kde byla přeměřena a zkontrolována správnost výroby.

Po kladném stanovisku byl výrobek poslán do galvanovny JV Galvanovna, s.r.o. v Miroticích. Zde bylo provedeno eloxování, neboli anodizace hliníku. Eloxování je chemicko-tepelné zpracování hliníku, kdy na jeho povrchu je vytvořena ochranná vrstva. Zlepšují se tím vlastnosti jako je mechanická otěruvzdornost, drsnost povrchu a celková životnost součásti. Ohromnou výhodou je možnost získání odlišných barevných odstínů, eloxování je proto velmi oblíbená povrchová úprava pro designérství. Na vyrobeném domku bylo uskutečněno černé eloxování. Důležité parametry a technologický postup z eloxování jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2: Technologický postup eloxování

Číslo operace	Název operace	Čas [min]	Popis operace
1	Navěšení		navěšení na závěsy z titanu
2	Louhování	2-3	roztok vody (300l) a NaOH (10l) při teplotě 60°C
3	Oplach		oplach ve studené vodě
4	Vyjasnění	2-3	lázeň s roztokem studené HNO ₃ (3%)
5	Oplach		oplach ve studené vodě
6	Eloxování	65	roztok vody (1000l) a H ₂ SO ₄ (240 kg, 90%) při teplotě 20°C, v lázni proud 12V, 200A
7	Oplach		2x oplach ve studené vodě
8	Barvení	10	lázeň s vodou (100l) a barvou při teplotě 60°C
9	Oplach		2x oplach ve studené destilované vodě
10	Utěsnění	10	studená lázeň s chemikálií "Alfiseal 987/1"
11	Oplach		oplach ve studené vodě
12	Ofuk		vyfouknutí stlačeným vzduchem (hlavně slepé díry)
13	Vysušení		v peci při teplotě 70-100°C
14	Svěšení		výrobek hotov, expedice

Po přejímce výrobku z galvanovny následovala finální kontrola a opětovné čištění závitů v domku. Tím byla skončena vlastní výroba a díl přesunut na montáž. Finální produkt je vidět na Obrázku 19.



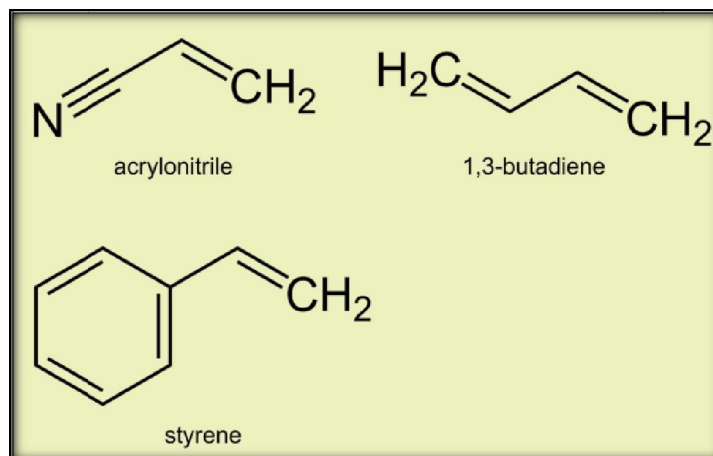
Obrázek 19: Finální díl vyrobený konvenční technologií

4.2. 3D tisk plastu

Výroba plastového dílu byla uskutečněna za podpory firmy KŽV, jelikož firma sama disponuje vybavením pro 3D tisk plastu. Vyrábí se zde prototypové součástky pro různé použití, podložky a rotační tělesa, geometricky složitější výrobky pro vylehčení měřicího vozíku a krabičky na externí baterie. Druhy materiálů, které jsou obvykle používány, jsou akrylonitrilbutadienstyren (ABS), akrylonitrilstyrenakryl (ASA), kyselina polymléčná (PLA), polykarbonát (PC) a polyethyltereftalát s uhlíkovým vláknem (PET - CF). Každý materiál má své přednosti a díky tomu je využíván v místech a mechanismech, kde nejlépe splňuje požadované vlastnosti. Pro potřeby této diplomové práce byl postačující materiál ABS.

4.2.1. Materiál pro výrobu

Akrylonitrilbutadienstyren je jeden z nejzákladnějších polymerů využívaných při 3D tisku. Jedná se o amorfnní termoplastický kopolymer, který je velmi dobře opracovatelný a odolává mechanickému poškození. Jelikož se jedná o amorfnní materiál, nelze určit bod tání. Teplota skelného přechodu je přibližně 105 °C. Struktura je vidět na Obrázku 20. Má vysokou odolnost vůči olejům, kyselinám a uhlovodíkům, je málo nasávkavý a zdravotně nezávadný. Velmi často se z něho vyrábí plastové láhve pro kojence, právě díky zdravotní nezávadnosti a odolnosti proti nízkým i vysokým teplotám. Nevýhodou je nízká odolnost proti dlouhodobému slunečnímu záření a povětrnostním podmínkám, proto tento materiál není používán pro výrobu pohledových částí, na které dopadá sluneční záření. [11]



Obrázek 20: Struktura ABS [11]

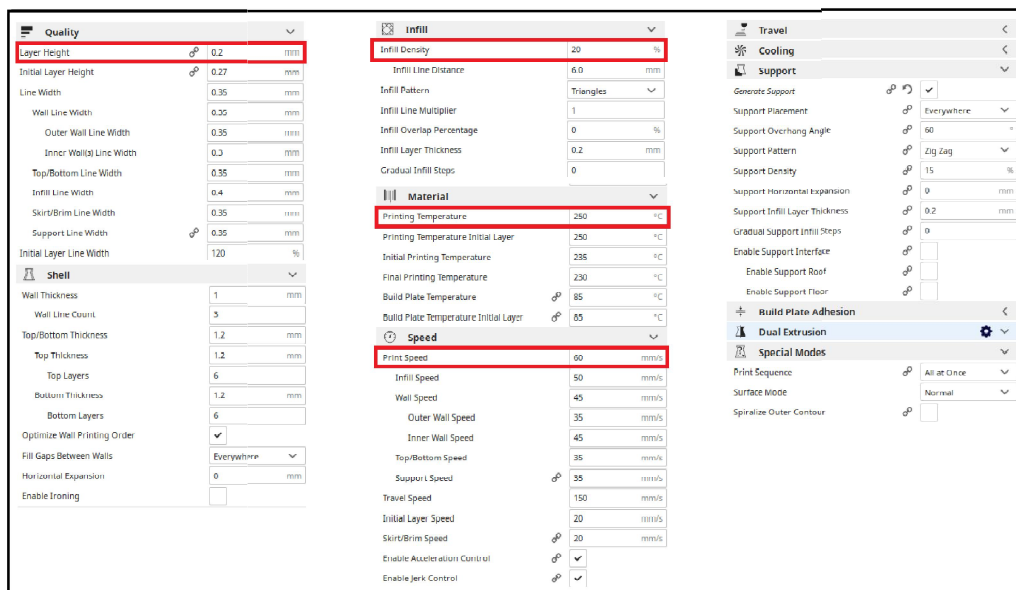
Hustota ABS je 1050 kg/m^3 a smrštění zhruba 0,5%. Náchylnost na změnu teploty lze kompenzovat pomalým chladnutím podložky při tisku, samozřejmě je vyhřívaná podložka. V případě nevyhřívané by se výrobek teplotním působením zdeformoval. Teplota tisku je 220-240 °C. Chladnutí tak probíhá v řádech minut a pro zachování kontinuity tisku je velmi vhodné mít více vyhřívaných podložek. ABS je ropný produkt, tím pádem při zahřívání se uvolňují škodlivé výpary a celý prostor je vhodné dobře odvětrávat.

Pro jeho vynikající vlastnosti je velmi často upravován záměrně pro speciální použití. Materiál ABS – ESD7 je vyvinut zcela úmyslně pro elektrotechnické a elektronické výrobky. Jeho unikátní přednost spočívá v tom, že je elektrostaticky disipativní. Nepřitahuje tedy k sobě statickým nábojem žádné částice, proto je vhodný do prašných prostředí, zároveň je umisťován do míst, kde hrozí nebezpečí poškození statickým nábojem. Dalším materiálem je například ABS – M30i, který je využíván v lékařství a potravinářství. Jedná se o biokompatibilní termoplast s dobrou pevností. Další výhodou je eliminace ručního odstraňování podpor, podpurný materiál je rozpustný. Dominantní výhodou tohoto materiálu je již zmíněná biokompatibilita, která se využívá při tisku prototypů ve farmaceutickém průmyslu a na výrobu náhrad v lékařství. [11, 12]

4.2.2. Vlastní výroba

Výroba byla uskutečněna na tiskárně Ultimaker z materiálu ABS. Vše začalo vytvořením CAD modelu součásti, který byl uložen ve formátu .stl, který byl vyžadován pro následující program tzv. "slicer". V tomto případě se jednalo o program Ultimaker Cura, ve kterém je model rozdělen na jednotlivé vrstvy a jim se dají přiřazovat vlastnosti a základní charakteristiky tisku. Prvním úkolem bylo umístit model na podložku a rotací dosáhnout požadované polohy. Model byl umístěn tak, aby pomyslný kvádr, jenž tvoří nejdůležitější část domku, byl tištěn jako první a výstupky pro montáž k měřicímu vozíku jako poslední. Osa x a y mapuje rovinu podložky, osa z je k nim kolmá a určuje výšku výrobku.

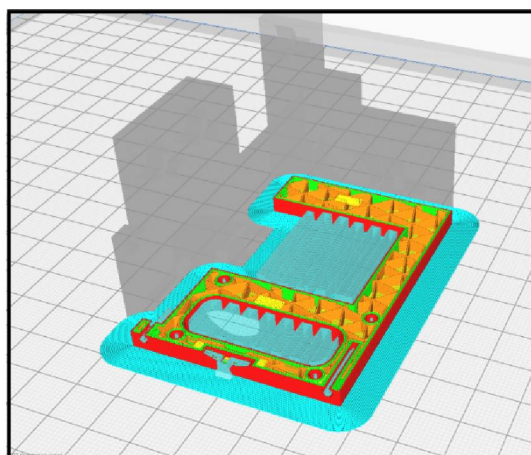
Mezi hlavní parametry nastavení tisku, nutné pro kvalitní a bezproblémový tisk, patří rozhodně nastavení materiálu, kvality tisku, typu výplně, nastavení tloušťky stěn, chlazení, typu podpor a rychlosti tisku. Detailní parametry jsou patrné na Obrázku 21. Mezi nejzásadnější zvolené hodnoty jednoznačně patří tloušťka vrstvy 0,2 mm, hustota výplně 20%, teplota tisku 250°C a rychlost tisku 60 mm/s, všechny tyto parametry jsou na obrázku 84848 zvýrazněny.



Obrázek 21: Nastavení tisku

Po správném nastavení všech parametrů byl soubor uložen ve formátu, kompatibilním s tiskárnou, konkrétně pro tiskárnu Ultimaker se jednalo o příponu .ufp. Tím byla příprava hotova a v programu byly vygenerovány výrobní podmínky pro tisk součásti, délka potřebného filamentu je 6,42 metru a odhadovaný čas 5 hodin a 14 minut. Zbývajícím krokem bylo zaslání souboru na tiskárnu a samotné spuštění tisku.

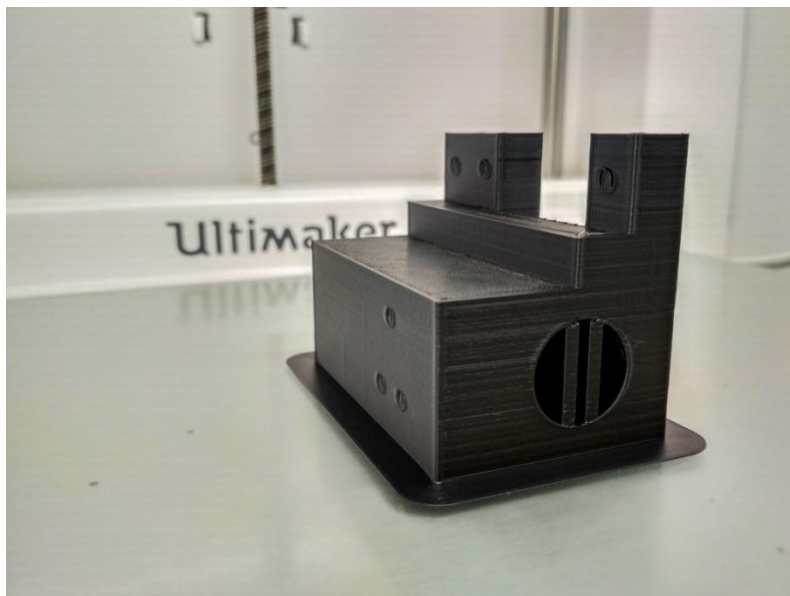
Celkově tisk obsahoval 274 vrstev, přibližně po 30 minutách výrobního procesu proběhlo porovnání modelu a reálného tisku (Obrázek 22). Na modelu jsou také patrné rozdílné druhy tisku. Modrá barva odpovídá podporám, oranžová výplni a červená povrchu součásti. Celkově tisk proběhl bezproblémově, skutečný čas odpovídal času odhadovanému. Při tisku nedošlo k žádným situacím, které by negativně ovlivnily kvalitu výsledného produktu.



Obrázek 22: Porovnání simulace a reálného výrobku

Po skončení samotného tisku, byl výrobek i s podložkou nechán v tiskárně a teplota podložky byla pomalu snižována, až na teplotu okolí. Tímto pomalým ochlazováním byla minimalizována pnutí a deformace součásti, případně i odtržení od podložky. Po vychladnutí byl

celý model odebrán z podložky, očištěn, doobroben a poté byl připraven pro montáž. Celá součást, vyrobená 3D tiskem plastu, je patrná na Obrázku 23.



Obrázek 23: Finální díl vyrobený 3D tiskem plastu

4.3. 3D tisk kovu

3D tisk kovu probíhal na Českém ústavu informatiky, robotiky a kybernetiky, ČVUT v Praze (CIIRC) pod odborným dohledem a s pomocí vedoucího diplomové práce pana inženýra Jana Šimoty. Na výběr bylo tisknutí z hliníkového nebo nerezového prášku. Po zvážení a konzultaci ve firmě byl zvolen tisk z nerezového prášku.

4.3.1. Materiál pro výrobu

Materiálem, který byl zvolen jako výchozí, byl nerezový prášek 316L-A-LMF, dodávaný od firmy Trumf. Jedná se o austenitickou nerezovou ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku, s obecnou odolností proti korozi a vynikající odolností proti mezikrystalové korozi po svařování nebo odlehčení napětí. Stupeň 316L odpovídá materiálům ČSN 17349 a ČSN 17350, podle norem DIN 1.4404 a 1.4435. Chemické složení a mechanické vlastnosti příslušné těmto materiálům jsou na Obrázku 24. [13]

Chemické složení austenitické nerezové oceli

Chemické vlastnosti uvedené v tabulce jsou v souladu s normou EN 10088-1: 2005 (max. Hodnoty):

EN	AISI/ASTM	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni
14.404	316L	0,03	1	2	0,045	0,015	0,11	16,50-18,50	2,00-2,50	10,00-13,00
14.435	316L	0,03	1	2	0,045	0,015	0,11	17,00-19,00	2,50-3,00	12,50-15,00

Mechanické vlastnosti austenitické nerezové oceli v souladu s evropskými normami

Mechanické vlastnosti uvedené v tabulce jsou v souladu s normou EN 10088-1: 2005.

Grade	Rp0.2 (Mpa)	Rp1.0 (Mpa)	Rm (Mpa)	As (%)	KV (J)
14.404	220	260	520	45	60
14.435	220	260	520	45	60

Obrázek 24: Chemické složení a mechanické vlastnosti nerezové oceli [13]

Prášek je dodáván v nádobách, v každé dóze je 5 kilogramů prášku. Před jeho použitím je potřeba ho prosít v prosévačce, aby byla zaručena jeho jemnozrnnost. Největší částice, které projdou sítím, mají velikost 0,04 mm, což s sebou nese i omezení při jeho používání. Jedná se hlavně o zdravotní riziko.

4.3.2. Vlastní výroba

Před samotnou výrobou je při 3D tisku kovu velmi důležitá příprava a čistota na pracovišti. Závisí i na použitém materiálu, s ocelí se manipuluje snadněji než s hliníkem či titanem. Důvodem je jejich měrná hustota, v případě zviření prášku v místnosti by ocelový prášek klesnul k zemi během několika minut, u lehčích kovů by se jednalo o podstatně delší časový úsek. Nehledě na fakt, že se jedná o prášek s maximální velikostí 0,04 mm, prášek by byl pro lidské oko neviditelný, neboť u zdravého oka je minimální rozpoznatelnost řádově 0,05 mm. Dalším zdravotním rizikem je skutečnost, že díky malým rozměrům může prášek prostupovat kožními póry do lidského těla. Je tedy evidentní, že ochrana obsluhy při tisku kovu je důležitá a nezanedbatelná část. Při tisku jsou potřebné kombinézy, rukavice a celoobličejové štíty nebo maska.

Příprava, která je nutná před spuštěním tisku, je tedy ochrana obsluhy, vyčištění pracovní komory a následné použití vhodně zvoleného materiálu se zaručenou zrnitostí. Ochranné pomůcky byly již uvedeny, vyčištění pracovní komory je stejně tak důležitým faktorem. Je potřeba dokonale vysát celou komoru, bajonetové upnutí stavební palety, očistit a otřít těsnění kolem vstupního otvoru, celý prostor musí být čistý. Jedním z nejdůležitějších míst, která je potřeba očistit, je čočka laseru, na které by mohlo v případě neočištění z předchozího tisku dojít k napečení prášku a tím jejímu znehodnocení.

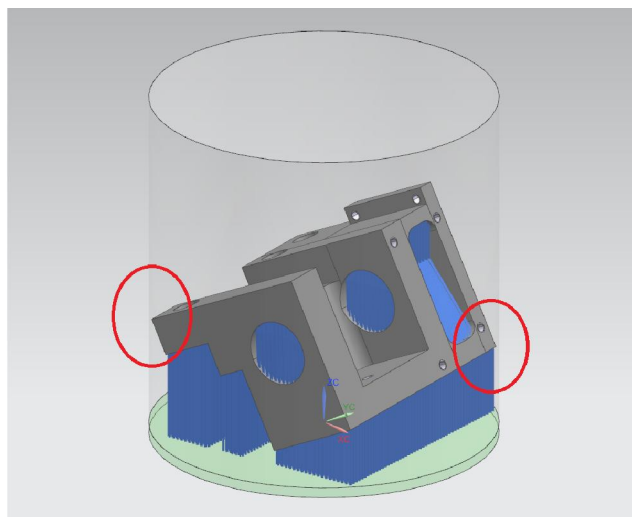
Rozdíl v použitém materiálu se projevuje i při přípravě prášku. Díky hustotě materiálu jde nerezový prášek snadněji prosít, hliníkový prášek v prosévače víří. Je nutné ho tedy usměrňovat inertní atmosférou, která usměrňuje prosévání skrz síto a zároveň zabraňuje oxidaci prášku.

Stroj, který byl používán pro tisk z nerezového prášku, byl výrobek od firmy Trumf, konkrétně TruPrint 1000. Ten využívá pro spékání laserový paprsek. V tomto případě byla zvolena strategie s parametrem spot size 55 μm , válec, ve kterém se vytváří samotný díl má průměr 100 mm a výšku 100 mm. Jedná se o nejproduktivnější stroj malého formátu, jeho rozměry jsou pouhých 1445 mm x 1680 mm x 730 mm, zřejmě je to i z Obrázku 25. Na pravé straně je viditelná dotyková obrazovka pro snadné ovládání. [14]



Obrázek 25: TruPrint 1000

Prvním krokem bylo správné nastavení modelu na stavební paletu. Tento princip je totožný ve všech metodách 3D tisku, neboť správné polohování a natočení dílu zásadně ovlivňuje jeho kvalitu a další použití. V tomto případě byl použit software Siemens NX s nadstavbou Additive Manufacturing a parametry nastavenými pro TruPrint 1000. Natočení domku bylo zvoleno z důvodu největší efektivity stavby, dále s ohledem na minimalizaci následného post-processingu. Výsledná poloha výrobku je viditelná na Obrázku 26.



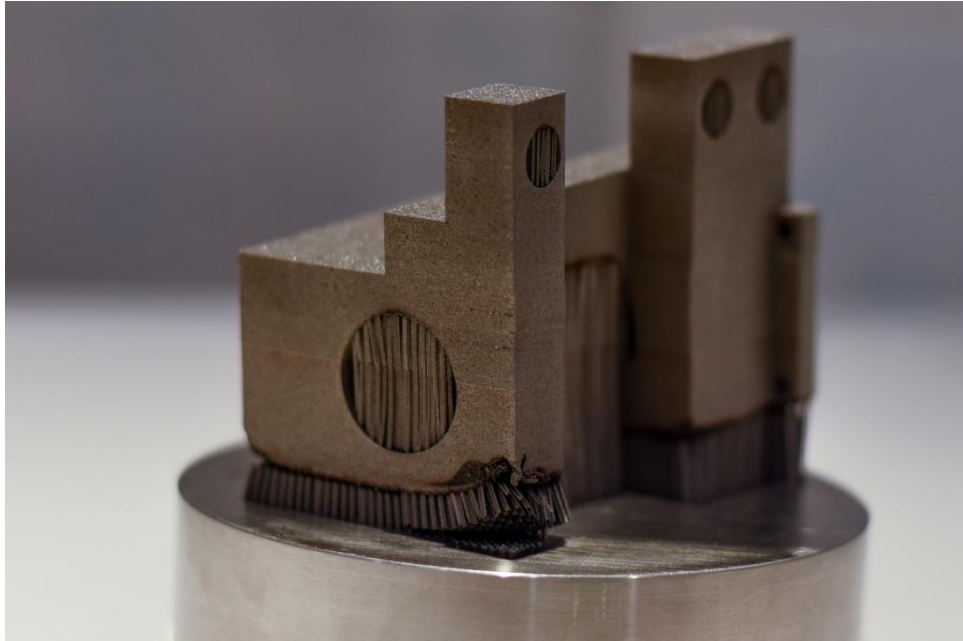
Obrázek 26: Simulace tisku na stavební paletě

Tato varianta ovšem nebyla možná z důvodu blízkosti krajů výrobku s vnitřní stěnou válce. Inkriminovaná místa jsou na Obrázku 26 zobrazena v červených elipsách. Ve skutečnosti rohy výrobku nesahaly do stěny válce, software ale určil tuto polohu a natočení jako kritické a tak proces nemohl být spuštěn. Výrobek byl proto napolohován kolmo k podložce, nebyla použita žádná rotace, pouze náklon pro lepší tisk. Celý proces byl opět překontrolován softwarem, tentokrát bez problému. Došlo k zadusíkování komory na potřebnou koncentraci a proces tisku mohl začít. Jako limitní hodnota kyslíku v komoře je 0,3 %, kdy je dosaženo inertní atmosféry. Dusík je využíván při tisku opětovně, z pracovního prostoru je odváděn přes sady filtrů, kde jsou spaliny zachyceny. Do komory je tak přiváděn opět čistý dusík, z toho důvodu při tisku větších kusů nebo při potřebě nejvyšší kvality, se díl umísťuje co nejlíže k přívodu dusíku. U tisku hliníku je tato skutečnost velmi viditelná, v případě tisku více dílů jsou kvalitnější ty, které jsou umístěny blíže k přívodu plynu.

Při tisku došlo ovšem k zastavení z důvodu nedostatku dusíku. Celý výrobek vychladnul a po opětovném nainstalování nové tlakové láhve s dusíkem byl program spuštěn. Výsledkem byla i okem patrná změna odstínu, právě z důvodu různých gradientů chladnutí. Zastavení tisku proběhlo zhruba ve dvou pětínách tisku a přibližně v polovině průchozího otvoru. Funkčnost a potřebné vlastnosti tím ale nebyly ovlivněny.

Dalším problémem a to mnohem zásadnějším, se ukázalo nedostatečné množství podpor a jejich umístění i na hranu součásti. Při tisku a chladnutí docházelo k tak velkému pnutí, že průřezově slabé podpory byly utrženy a vtaženy do samotného dílu. Zapříčiněno to bylo i faktem, že množství tištěného materiálu bylo vzhledem k množství podpor obrovské. Po celém obvodu součásti s podporami byly vidět nekvalitní hrany, pro technologické účely nepodstatné, ale pro design a estetiku velmi důležité. Obě tyto vady jsou patrné na Obrázku 27.

Po vyjmutí z komory bylo potřeba součást vyžít. Bylo provedeno žhání na odstranění pnutí s parametry postupný ohřev na teplotu 550°C po dobu 2 hodin, výdrž na teplotě po dobu 6 hodin, následně ochlazování na vzduchu.



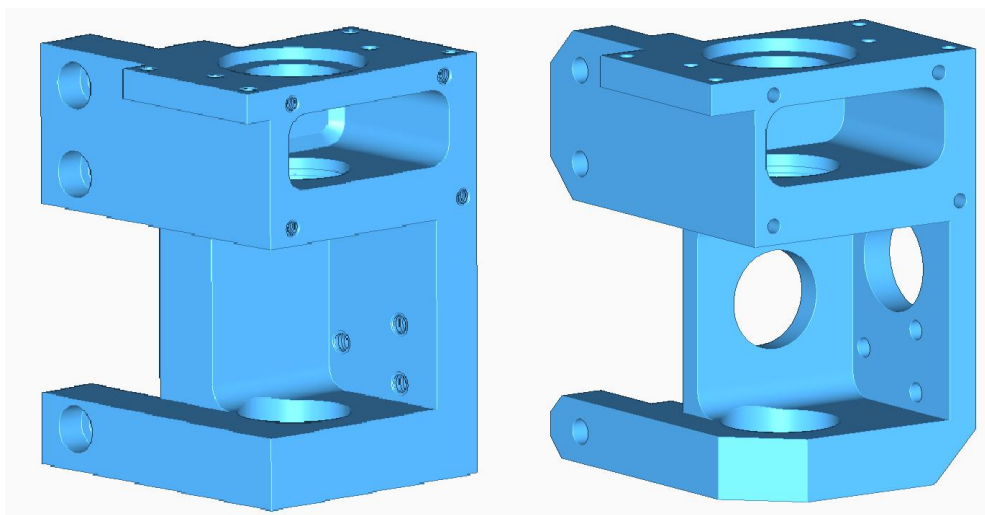
Obrázek 27: Finální díl vyrobený metodou 3D tisku kovu s vadami

Po odříznutí výrobku od palety byl předán díl na post-processing. Byly doobrobeny otvory s požadovanou přesností a vyrobeny drážky pro pojistné kroužky. Hotový díl byl předán na montáž celé sestavy.

4.3.3. Optimalizace a výroba druhého domku

Souběžně s post-processingem vytištěného dílu bylo rozhodnuto o pokusu vyrobit nový typ domku. Cílem této výroby bylo snížení hmotnosti, zlepšení technologičnosti pro tisk, lepší nastavení při tisku tak, aby došlo k odstranění vad vzniklých při prvním tisku, spolu se zachováním tuhosti a funkčnosti celého dílu.

Při snižování hmotnosti byla vedena debata s hlavním konstruktérem firmy KŽV, aby výrobek mohl být nadále funkční. Bylo provedeno zkosení většiny rohů, tloušťka stěn byla snížena a ve stěnách byly vytvořeny vylehčovací otvory. Z Obrázku 28 je pouhým okem viditelná změna v objemu materiálu.



Obrázek 28: Optimalizace modelu pro 3D tisk kovu

Díky modelování v CAD systému bylo potom možné porovnat hmotnostní úbytek nového dílu oproti původnímu. Výsledek je vidět v Tabulce 3.

Tabulka 3: Porovnání původního a upraveného domku

	Objem [cm ³]	Hmotnost[kg]	Hmotnost vzhledem k původnímu [%]
původní	61,913113	0,4860	-
upravený	42,245123	0,3316	68

Zde je naprosto evidentní fakt, že se pouhou změnou konstrukce a přidáním vylehčovacích otvorů snížila hmotnost výrobku téměř o třetinu. Díky zkosení také nebyl problém s natočením dílu při nastavování tisku. Žádná část nezasahovala do bezpečnostní zóny válce a tisk mohl úspěšně proběhnout.

Z protokolu, jenž po výrobě součásti byl vygenerován, byl patrný rozdíl oproti prvnímu tisku. Většina parametrů byla totožná, výkon laseru 90W, rychlost laseru 500 mm/sec, procentuální zastoupení kyslíku v komoře při tisku 0,3%. Tyto předdefinované parametry se neměnily, ty změna konstrukce neovlivňuje. Čeho se ale změna dotkla, byl celkový čas, počet vrstev, Over supply factor. Over supply factor je procentuální zastoupení objemu materiálu v komoře k objemu materiálu v součásti. Minimální hodnota je 110%, ale zkušenostmi bylo zjištěno, že pro kvalitní tisk je nutné dávat vyšší hodnoty. Důvodem, proč Over supply factor nemůže být 100 % je fakt, že rozdílnou zrnitostí by na dně komory s práškem zůstávaly větší zrna. Mezi ně by padala ta nejjemnější a materiál by se upěchoval. V horních vrstvách by nebyl dostatek materiálu pro kvalitní tisk, nehledě na fakt, že spékáním prášku je dosáhováno nižší výšky, než který měl samotný prášek před spečením. Rozdílné parametry jsou uvedeny v Tabulce 4.

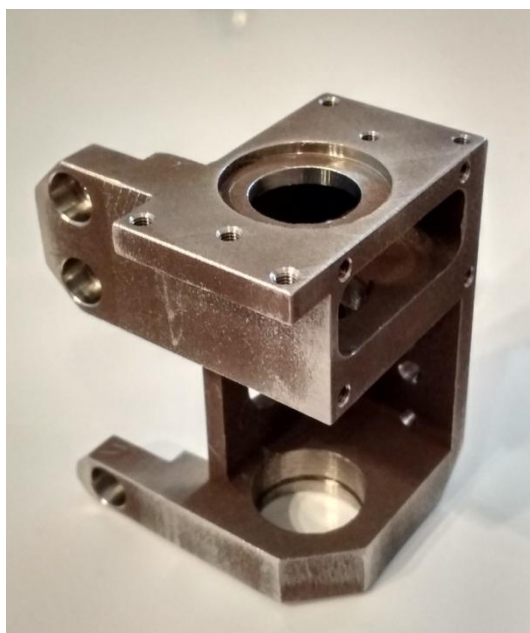
Tabulka 4: Rozdílné parametry tisků

	Doba výroby	Počet vstev	Over supply factor [%]
původní	27 hod 3 min	3294	170
upravený	26 hod 34 min	3100	184

Z tabulky je také patrný minimální rozdíl v době výroby. Díl byl sice upraven a jeho hmotnost je o zhruba třetinu lehčí, rozdíl v době výroby byl pouhých 30 minut. Lze si také povšimnout i poklesu počtu vrstev o 200. To jsou všechny předpoklady pro to, aby upravený tisk byl rychleji vyroben. Ve skutečnosti rozdíl byl minimální a byl způsoben podporami. Samotný domek je sice v upraveném modelu objemově menší, podpory byly ale při tomto tisku hustější a mnohem vyšší, než v původní verzi. To mělo za následek, i přes změnu konstrukce, zkrácení výroby o pouhých 30 minut.

Obecně lze tvrdit, že optimalizace slouží ke snižování nákladů. Ne vždy se musí jednat o náklady spojené s výrobou, ale například snížení nákladů při používání součásti nebo náklady spojené s dopravou.

Výsledkem optimalizace a druhého tisku byl znatelně vylehčený domek, který zůstal zcela funkční, i přes úbytek hmotnosti o třetinu oproti prvnímu. Vylehčený domek je vidět na Obrázku 29.



Obrázek 29: Finální díl vyrobený metodou 3D tisku kovu

5. Porovnání a měření

5.1. Porovnání a kalibrace

Po výrobě všech 3 kusů, byly sestaveny celé podskupiny (tzv. klepeta). Pro snadnější manipulaci a případnou výměnu byly opatřeny spojovacím konektorem, který se zároveň využívá pro odpojení klepet při přepravě. Všechny tři sestavy byly postupně připojeny k měřicímu vozíku Krab S-Light, se kterým byly dány na kalibrační rám. Na tomto rámu lze dosáhnout maximálních přesností spolu s variabilním nastavením všech měřených parametrů. Během kalibrace bylo dosaženo dvou konstant, které jsou originální pro každé klepeta. Konstanta Q uvádí hodnotu snímače, která je zvolena jako nulová hodnota celého klepeta, neboli konstanta posunu snímače. Konstanta K je hodnota minimálního kroku, který je schopen snímač změřit. Tyto hodnoty přímo ovlivňují přesnost měření a samotné výsledky, proto je velmi důležité správně zkalibrovat jak samotný měřicí vozík, tak i přídavná zařízení. Po kalibraci byla klepeta zvážena, aby mohla být porovnána hmotnost, neboť i hmotnost celého vozíku s přídavnými zařízeními je mnohdy jedním z hlavních požadavků uživatelů. Tabulka 5, která uvádí kalibrační konstanty a hmotnost je přiložena níže.

Tabulka 5: Kalibrační konstanty a hmotnost

	Hmotnost [g]	Konstanta K	Konstanta Q
Konvenční způsob	707	0,0008849557	37898
3D tisk plast	576	0,001519	27367
3D tisk kov	1011	0,000643	35021

Z tabulky je vidět, že hmotnost klepeta s nerezovým domkem je téměř dvakrát větší než u domku tištěného z plastu. U klasického měřicího vozíku, který má klepeta dvě, se jedná už o rozdíl jednoho kilogramu, což je znatelná hodnota. Ve většině zemí, kam firma KŽV dodává měřicí vozíky, je totiž požadavek i na celkovou hmotnost. Snahou je hmotnost snížit pod 30 kilogramů z důvodu předpisu, že měřicí vozík do této hmotnosti může být obsluhován pouze jedním pracovníkem. Odlehčení klepet je tedy velmi vítanou pomocí se snížením celkové hmotnosti.

5.2. Měření

Měření probíhalo dne 15.6.2020 na nádraží ve stanici Noutonice, okres Praha-západ. Jedná se o trať, která zásobuje Letiště Václava Havla leteckým palivem. Vytíženost této tratě není nijak velká, ale pro testovací účely naprosto dostačující. Zde byl měřen přímý úsek na čtvrté koleji o délce přes 300 metrů. Měření proběhlo v obou směrech, jak se stoupající, tak s klesající kilometrů. Následně byla proměřena výhybka na čtvrté koleji a to v přímém směru po hrotu srdcovky (Obrázek 30), poté ta stejná výhybka proti hrotu srdcovky. Jako počáteční bod bylo vždy zvoleno místo, které odpovídá začátku výhybky, tzn. svar mezi přímou kolejnicí a výhybkou. Stejně tak měření bylo ukončeno vždy na svaru, ukončujícím výhybku.



Obrázek 30: Měřená výhybka

Celé měření bylo opakováno ve třech variantách, vždy po měření došlo k demontáži klepeta a nainstalování nového. Zapotřebí bylo změnit kalibrační konstanty v nastavení měřícího vozíku, aby odpovídaly klepetu, které je namontováno a měření bylo správně provedené.



Obrázek 31: Měřící vozík ve výhybce

Jednou z nejdůležitějších částí ve výhybce je místo, kde klepeto je svíráno mezi srdcovkou a křídlovou kolejnicí. Zde totiž dochází ve výhybce k prvnímu kontaktu klepeta s křídlovou kolejnicí a je nutností, aby vjezd vozíku do výhybky proběhl bez potíží. Kolo je při průjezdu

srdcovkou v místě přerušení pojižděné hrany bez vedení, proto je u protilehlé koleje instalována přídržnice.

Přídržnice je viditelná na Obrázku 30 v pravé části, měřící vozík ve výhybce je patrný na Obrázku 31. Právě na toto místo byl dáván důraz při měření, aby bylo měření plynulé, bez trhaných pohybů a měřená data byla relevantní a použitelná pro vyhodnocení.

Na závěr celého měření byla vyzkoušena možnost špatné obsluhy vozíku, kdy je při měření najeto do výhybky špatně. Tato situace se stává velmi často a je důsledkem neodbornosti nebo nepozornosti obsluhy. Jedná se o případ, kdy je vozík tlačěn zpět do výhybky, ale klepeto zůstává otevřené. Je tak zamezeno jeho postupnému zavírání, ale vozík je zaražen díky otevřenému klepetu o hlavu křídlové kolejnice. Tímto pokusem je vyzkoušena tuhost domku, celého klepeta i spojení klepeta s měřícím vozíkem.

5.3. Zhodnocení měření

Měření proběhlo velmi rychle a bezproblémově. Všechny naplánované úkoly a pokusy byly úspěšně provedeny. Pro měření bylo velmi přínosné, že kalibrace klepet proběhla dopoledne stejného den, jako bylo uskutečněno měření. Klepeta tak nemohla být pozměněna či jinak upravena a vyhodnocené konstanty přesně souhlasily s daným nastavením.

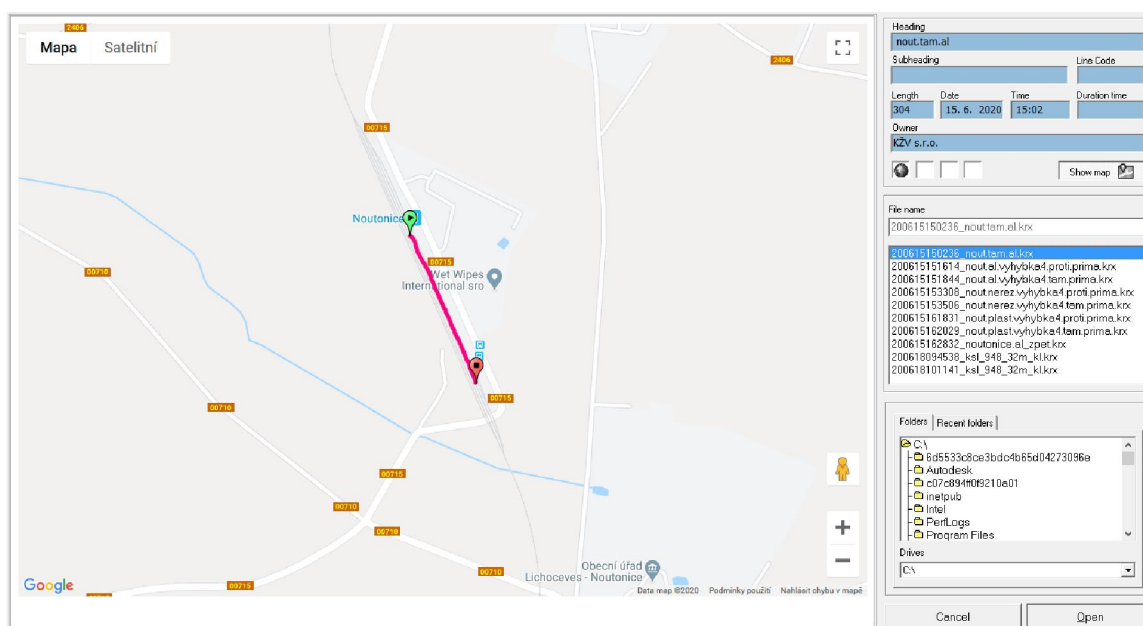
Při demontáži a následné montáži byl vždy dán důraz na to, aby přesnost mohla být co nejlepší. Dosedací plochy byly očištěny, měřící vozík a jeho aparát byly vždy zkontrolovány. Je ale důležité připustit, že tyto aktivity nebyly pro měření nikterak důležité, neboť při instalaci plastového domku bylo patrné, že tuhost není dobrá. Rukou bylo možné lehce natáčet osu vzhledem k uložení v domku.

Při pokusu najetí do výhybky obráceně by bylo zajímavé měřit, při jaké rychlosti by bylo klepeto zničeno. Jelikož se ale jednalo ale o měření výhybek, které jsou měřeny převážně ručně, byl by tento pokus pouze informativní.

6. Vyhodnocení

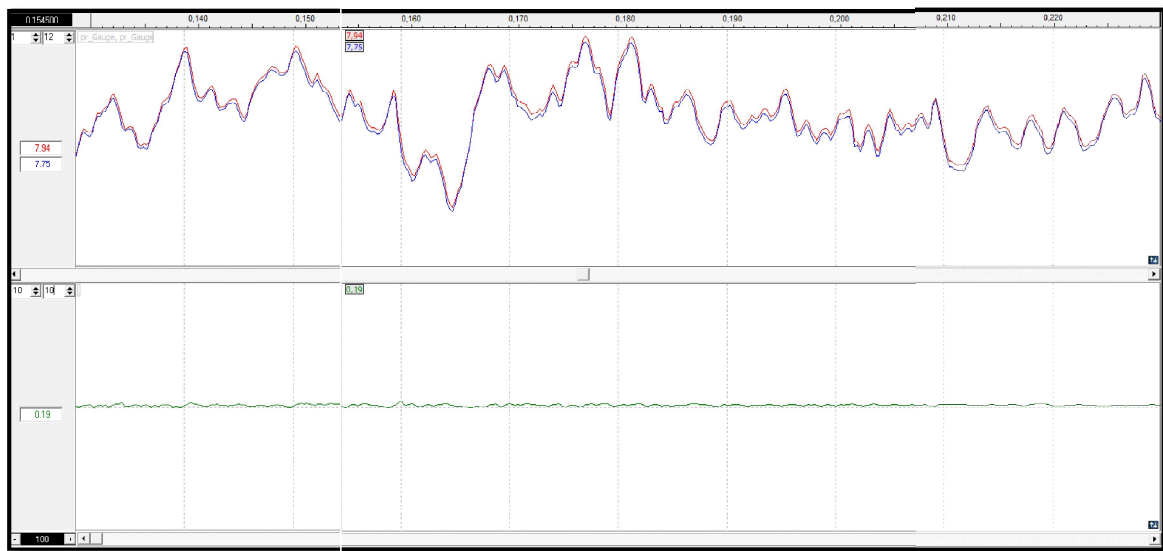
6.1. Vyhodnocení měření

Vyhodnocení bylo zrealizováno v programu Krab 10, který je používán na vyhodnocování tratí všech zákazníků KŽV po celém světě. Vyhodnocovací program se liší pouze normami jednotlivých zemí, podle kterých se vyhodnocuje, a parametry, které jsou potřeba vyhodnotit. V tomto případě bylo využito standardní evropské normy EN 13848, která vyhodnocuje skutečnou geometrii. Na počátku byly vybrány soubory pro porovnání. Pro usnadnění lze při výběru ze souborů vyčistit datum, čas a délku měření, ale také je měření zaneseno do map, tím pádem lze velmi rychle najít potřebné soubory (viz. Obrázek 32).



Obrázek 32: Výběr souborů pro vyhodnocení

Nejprve byly porovnány přímé úseky, konkrétně na koleji číslo 4 úsek od staniční budovy k výhybce a zpět. Měření slouží i jako kontrola správnosti měření a správné kalibrace. Z důvodu, že primárním úkolem bylo proměření výhybky, byl vyhodnocen v přímém úseku pouze jeden parametr a to rozchod koleje. Data z druhého měření musela být následně přepočtena, aby se do vyhodnocení nepromítl fakt, že měření bylo prováděno se stoupající a poté s klesající kilometrází. Pokud by data nebyla přepočtena, při vyhodnocení by se porovnávala data z prvního měření s daty z druhého měření, kde počáteční bod druhého měření je konečným bodem prvního. Zkráceně lze tvrdit porovnání start – start. Data z druhého měření se po přepočtu obrátily, tím pádem začínaly koncem z druhého měření, což byl zároveň začátek prvního měření. Po vykreslení dat do grafu bylo potřeba přiložit na sebe místa, která byla totožná. Znamenalo to posun jednoho grafu vůči druhému z důvodu chyby, která vznikne tím, že obrácením měřícího vozíku do správné polohy byl ztracen přesný bod ukončení předchozího měření.



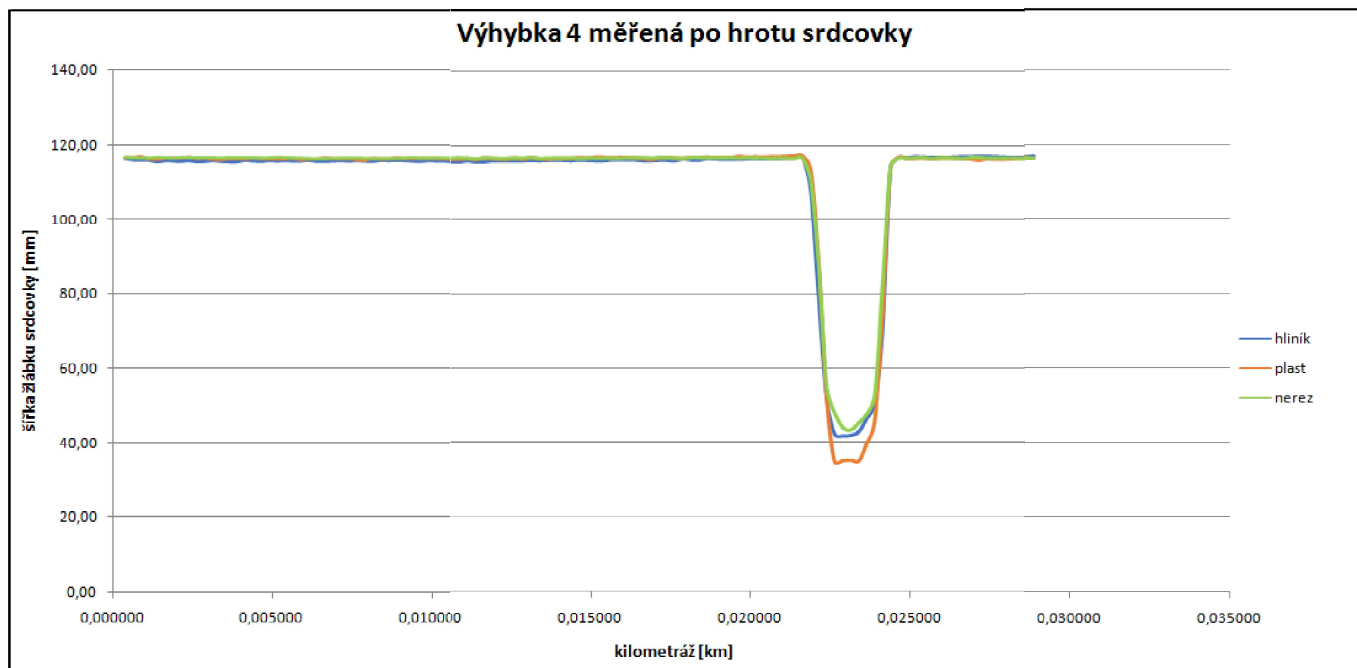
Graf 1: Porovnání rozchodu

Porovnání dvou signálů rozchodu bylo provedeno v Grafu 1. V horní části grafu jsou patrná primární data, která nejsou sice totožná, ale velmi dobře kopírují svůj tvar a odchylka je velmi malá. Ve spodní části grafu je vyhodnocení odchylky primárních dat vůči sobě. Spodní křivka je považována za výsledek, neboť měřením úseku, otočením měřicího vozíku a změřením úseku zpět, je chyba měření eliminována na minimum. Pokud je trať v pořádku, není možné, aby křivka měla ve spodní části grafu výrazná maxima či minima, znamenalo by to chybná data z jednoho měření. Bylo by potřeba proměřit úsek znovu.

V tomto případě se ale jedná o úspěšná měření, odchylka v bodě zobrazenému Grafu 1 je 0,19 mm. Co stojí za povšimnutí je rozhodně fakt, který je viditelný v primárních datech. Jedná se o hodnoty v rámečkách, které ukazují nominální hodnotu vzhledem k nastaveným normám. Jako norma byla použita EN 13848, standardní rozchod 1435 mm. V grafu jsou patrné hodnoty 7,94 a 7,75 mm, jejich odchylka je výše zmíněných 0,19 mm. Reálný rozchod ve zvoleném bodě byl $1435 \text{ mm} + 7,94 \text{ mm} = 1442,94 \text{ mm}$. V extrémech funkce byly hodnoty přes 10 mm. Svědčí to o realitě, že kolej 4 není moc často využívána a udržována. Pražce byly dřevěné, u betonových pražců s novým upevněním nebývají odchylky tak veliké. Tolerance odchylek podle normy závisí na rychlostním pásmu, do kterého kolej patří. Zde je to pravděpodobně RPO, maximální rychlost je tedy 60 km/h. V rychlostním pásmu RPO může být rozchod koleje až +35 mm. Naměřené hodnoty splňují požadavky a tolerance pro RPO dle normy ČSN 73 6360-2.

Při vyhodnocení výhybky nemohl být použit program Krab 10, primární data byla proto převedena do Microsoft Excel a bylo s nimi dále pracováno. Data byla rozdělena na dvě varianty, na průjezd výhybkou po hrotu srdcovky a na průjezd proti hrotu srdcovky. U každé varianty byly vytvořeny tři sloupce s daty z měření s plastovým, hliníkovým a nerezovým domkem. Z dat byl následně vytvořen graf pro porovnání všech tří měření.

Jako první byl naměřen průjezd výhybkou po hrotu srdcovky, proto byl i jako první vyhodnocen. Grafické porovnání je na Grafu 2. Na vodorovné ose x je umístěna kilometráž od začátku výhybky, osa y určuje šířku žlábků srdcovky. Celá výhybka měřila zhruba 30 metrů.

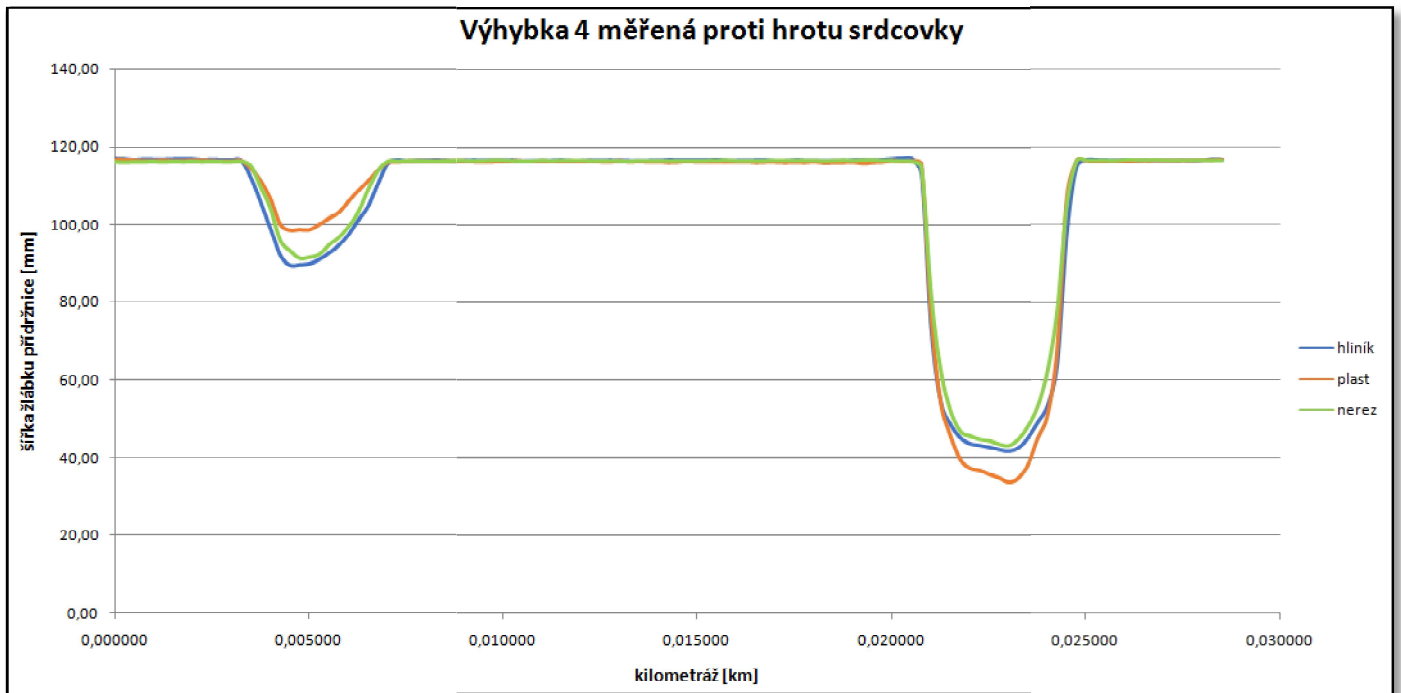


Graf 2: Měření po hrotu srdcovky

Zde je patrná poměrně značná odchylka, konkrétněji u plastového domku se hodnota liší o 7 až 8 milimetrů oproti hliníku. Nerez se liší vzhledem k hliníku maximálně o několik milimetrů, někde jsou rozdíly pouze desetiny milimetru. Ukazuje to na podobnost výsledků naměřených s hliníkovým a nerezovým domkem. Naproti tomu výsledky z měření s plastovým domkem sice tvarem odpovídají, ale jeho minimum je posazeno níže, než u zbývajících dvou měření. Lze si také všimnout absolutní shody mezi všemi třemi variantami, pokud není klepeto zatěžováno, pokud je však klepeto namáháno, hodnoty naměřených výsledků u plastového domku se odchylují v extrému od hliníkového a nerezového.

Je také potřeba dodat, že neexistuje žádný etalon nebo ideální trať, ve které by byly známé hodnoty a všechny parametry. Vždy se jedná o porovnání k nějakému měření. Jelikož do dnešní doby byly výhybky měřeny měřícím vozíkem Krab s hliníkovými klepety, porovnávají budou výsledky s hliníkovým domkem. Nelze ale jednoznačně tvrdit, že tyto hodnoty jsou naprosto přesné. Měření výhybek je ale natolik specifické, že rozdíly desetiny milimetru nejsou zcela průkazné. Je však možné, že se časem ukáže, že nerezové klepeto lépe vystihuje reálný tvar výhybky a bude použito pro porovnávání při dalších měření.

Druhé vyhodnocení ukazuje závislost kilometráže na šířce žlábků přídržnice, viz. Graf 3.

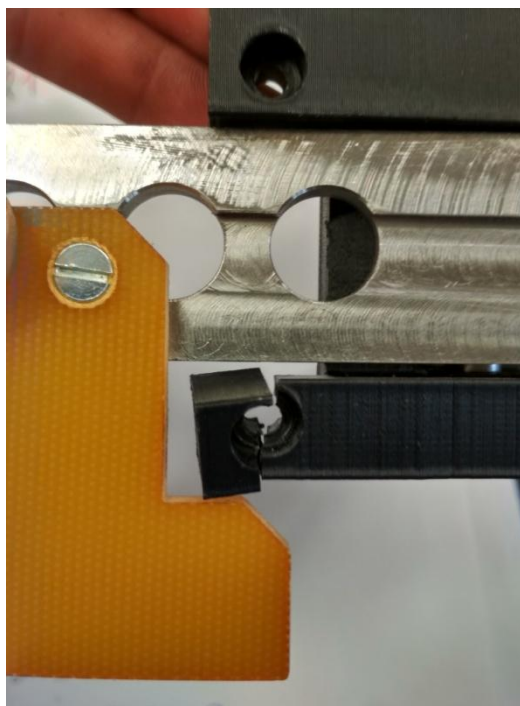


Graf 3: Měření proti hrotu srdcovky

Vyhodnocením je získán průběh šířky žlábků přídržnice. Opět nastává stejný úkaz jako v Grafu 2, kdy v případě namáhání klepeta v sevření kolejnice a v tomto případě přídržnice, se výsledky naměřené s klepetem s plastovým domkem odchylojí od ostatních dvou měření. Lze tvrdit, že důvodem odchylek je nedostatečná tuhost. Druhou možností vzniku odchylek by mohlo být špatné nastavení a kalibrace klepet, ovšem to vylučuje téměř dokonalá shoda v nenamáhaných místech. Rozdíly mezi hliníkovým a nerezovým domkem jsou opět minimální.

Závěrečným pokusem bylo úmyslné najetí ve špatném směru do výhybky. Klepeto bylo tažením vozíku na špatnou stranu zaraženo o hlavu křídlové kolejnice. Bylo zjišťováno, jestli vozík zastaví, případně jak moc je vozík, respektive klepeto, poškozeno. Ve všech třech případech vozík zastavil velmi rychle, bez vykolejení a jiných problémů. Také domek s aparátem nebyl poškozen.

V případě plastového domku se ale ukázal jako problematický bod spojení klepeta s měřícím vozíkem. Přenos nárazu totiž zapříčinil prasknutí plastového dílu v místě, kde je přichycen jedním šroubem k vozíku. Na díl v tomto místě bylo vyvinuto namáhání, které materiál nebyl schopen přenést. Snížení průřezu díky zapuštění ještě tuto část oslabilo. Velmi dobře je prasknutí, téměř odlomení částí od sebe, vidět na Obrázku 33. Je potřeba poznamenat, že pokud by proběhlo další měření s takto naprasklým aparátem, významně by to ovlivnilo kvalitu měření. Tuhost uchycení by byla snížena a celková přesnost měření by se nemohla rovnat přesnosti předešlé.



Obrázek 33: Prasknutí vzorku

6.2. Ekonomické vyhodnocení

Ekonomické hledisko je obvykle nejdůležitějším hlediskem z důvodu následné prodejnosti součásti nebo návratnosti financí spojených s výrobním procesem. Vždy musí platit, že náklady na výrobu by měly být nižší, než výnosy. Rozdíl těchto položek činí zisk, který je možné dále využívat pro potřeby firmy.

Výpočty probíhaly z dat, získaných při všech typech výroby, spolu s tím byly zjištěny náklady na provoz strojů a další potřebné údaje. Standardní doba odpisu výrobních strojů je 5 let.

Tabulka 6: Pořizovací ceny potřebných strojů

	3D plast	3D kov	Konvenční způsob
TruPrint 1000		7 000 000 Kč	
Ultimaker	150 000 Kč		
Píla			40 000 Kč
CNC			2 000 000 Kč
Frézka			800 000 Kč

Ekonomické vyhodnocení bylo prováděno metodou hodinových režijních sazeb (HRS). Pro správné zhodnocení bylo potřeba znát využití strojů, jejich roční provozní náklady a počet pracovních dnů v roce. Výpočty HRS proběhly dle vztahů:

Roční odpis stroje:

$$O_s = \frac{C_s}{t_o}$$

kde, O_S je roční odpis stroje v Kč
 C_S je celková cena stroje v Kč
 t_O je odpisová doba stroje v letech

Výpočet kapacity stroje:

$$K = V_S * P_{PD}$$

kde, K je vypočtená kapacita stroje v hod
 V_S je denní využití stroje v hod
 P_{PD} je počet pracovních dnů v roce

Hodinová režijní sazba:

$$HRS = \frac{O_S + N_{PR}}{K}$$

kde, HRS je vypočtená hodinová režijní sazba stroje v Kč/hod
 N_{PR} jsou provozní náklady na provoz, údržbu a chod stroje za rok

Tabulka 7: Výpočet HRS pro jednotlivé stroje

	3D plast	3D kov	Pila	CNC	Frézka
C_S [Kč]	150 000	7 000 000	40 000	2 000 000	800 000
t_O [rok]	5	5	5	5	5
O_S [Kč/rok]	30 000	1 400 000	8 000	400 000	160 000
N_{PR} [Kč/rok]	10 000	200 000	20 000	200 000	120 000
V_S [hod]	24	24	10	10	10
K [hod]	6 000	6 000	2 500	2 500	2 500
HRS [Kč/hod]	6,6	266,6	11,2	240	112

U tiskáren byla doba využití stroje zvolena jako 24 hod denně, jelikož obsluha při samotném tisku není potřeba. Při zvolení vhodného programu je tedy možnost výroby dílu i v době, kdy nikdo není přítomen a kontrola může probíhat pouze skrze kameru nebo vzdáleným přístupem tiskárny a obsluhy. Naproti tomu konvenční stroje mají denní využití stroje menší, z důvodu potřeby obsluhy.

Další složkou celkové ceny je materiál potřebný pro výrobu. Na kovový 3D tisk bylo spotřebováno 0,33 kilogramu prášku, pro 3D tisk plastu bylo potřeba 6,42 m filamentu (45 g) a na konvenční způsob byl potřeba polotovary 60 mm x 62 mm x 78 mm. Ceny materiálů byly vypočteny z materiálů dostupných od výrobců nebo nákupních cen daného materiálu. Výsledné ceny materiálu jsou v Tabulce 8.

Tabulka 8: Výpočet ceny materiálu

	3D plast	3D kov	Konvenční způsob
cena materiálu	78 Kč	3 072 Kč	235 Kč

U konvenčního způsobu musí být obsluha přítomna pořád, u obou tisků je potřeba nutnosti obsluhy pouze v přípravné části. Hodinová sazba pracovníka u tisku byla jednotně zvolena jako 250 Kč/hod. U konvenční výroby je zkušenost a potřeba kvalitní obsluhy největší, proto i hodinová sazba je 400 Kč/hod. Jelikož je známá cena hodinových režijních sazeb strojů, lze ze znalosti celkového výrobního času určit strojní náklady. Současně je možné vypočítat náklady na pracovníka obsluhujícího stroj.

Tabulka 9: Výpočet nákladů na pracovníka

	3D plast	3D kov	Konvenční způsob
čas výroby	5 hod 14 min	26 hod 34 min	5 hod 45 min
přípravný čas	10 min	30 min	-
celkový výrobní čas	5 hod 24 min	27 hod 4 min	5 hod 45 min
nutný čas pracovníka	10 min	30 min	5 hod 45 min
náklady na pracovníka	42 Kč	125 Kč	2300 Kč

U konvenčního způsobu bylo potřeba přesně určit čas, který na daném stroji výrobek byl. Ze znalosti vzorce pro výpočet strojních nákladů pro více strojů, byla vypočítána výsledná hodnota.

Strojní náklady:

$$N_S = \sum (t_{C_i} * H_{RS_i})$$

kde, N_S jsou strojní náklady v Kč
 t_C je celkový výrobní čas daného stroje v hod
 H_{RS} je hodinová režijní sazba daného stroje v hod

Tabulka 10: Výpočet strojních nákladů

	3D plast	3D kov	Konvenční způsob
strojní náklady	36 Kč	7 214 Kč	1 250 Kč

Poslední složkou, která pro vypočtení celkové ceny výroby byla potřeba, byla cena post-processingu. Ta byla vypočtena obdobně jako v předchozích případech ze znalosti času a hodinových sazeb strojů, spolu s náklady na pracovníka. U konvenčního způsobu nebylo zapotřebí žádných úprav a doobrobení funkčních ploch. Jedinou složkou bylo tedy eloxování součástky. Tabulka 11 ukazuje konečné ceny post-processingu.

Tabulka 11: Výpočet ceny post-processingu

	3D plast	3D kov	Konvenční způsob
cena post-processingu	1 043 Kč	1 401 Kč	40 Kč

Celková cena součástky je součet ceny materiálu, strojních nákladů, ceny post-processingu a nákladů na pracovníka. Tabulka s výsledky a finální cenou je patrná v Tabulce 12.

Tabulka 12: Výpočet celkové ceny

	3D plast	3D kov	Konvenční způsob
cena materiálu	78 Kč	3 072 Kč	235 Kč
strojní náklady	36 Kč	7 214 Kč	1 250 Kč
cena post-processingu	1 043 Kč	1 401 Kč	40 Kč
náklady na pracovníka	42 Kč	125 Kč	2300 Kč
celková cena	1 199 Kč	11 812 Kč	3 825 Kč

V Tabulce 12 je velmi dobře vidět rozdílná cenová hladina jednotlivých výrob. Pokud se zaměříme na 3D tisk plastu, zde je jednoznačně největší položka (téměř 87 %) cena post-processingu, ostatní položky jsou v řádech desítek korun. 3D tisk kovu překvapil svou náročností v položce strojní náklady. Zde je to zapříčiněno dobou tisku, která trvala 27 hodin. Nejnákladnější položkou u konvenčního způsobu byly náklady na pracovníka, jinak náklady nebyly nijak zásadní. Výhodou je také velká variabilita výroby a oproti ostatním technologiím ne tak velikostně omezený výrobek. U obou tisků je totiž zapotřebí vměstnat výrobek na stavební paletu nebo podložku.

Pokud by bylo dosaženo lepší kvality tisku u plastového výrobku, byla by i následně minimalizována položka post-processingu a metoda 3D tisku plastu by měla největší potenciál pro to, být použita při výrobě dílů. Nutné je ale zmínit horší výsledky v měření a prasknutí při špatném najetí do výhybky.

7. Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření kovové vytištěné součásti, která měla být vyzkoušena v reálných podmínkách a vyhodnocení využitelnosti 3D tisku kovu v malosériové výrobě. Pro lepší porovnání a zhodnocení z několika hledisek, byly vyrobeny totožné součástky konvenčním způsobem a plastovým 3D tiskem. Všechny tři výrobky byly upraveny a celé sestavy byly zkalištrovány s měřícím vozíkem. Následně bylo provedeno měření výhybky na železniční stanici Noutonice na 4 koleji, a to po a proti směru hrotu srdcovky. Na závěr měření byly všechny sestavy otestovány najetím špatným směrem do výhybky.

Vyhodnocení měření proběhlo v programu Krab 10, který firma KŽV používá na vyhodnocení naměřených dat. Vyhodnocení dat ukázalo velmi přesné, v některých místech až totožné hodnoty hliníkového a nerezového dílu, tedy výrobu konvenční s metodou 3D tisku kovu. Naopak 3D tisk plastu se ukázal být jako nekvalitní, hlavně při namáhání dílu. Nedostatečná tuhost výrobku zapříčiňuje, že celkové měřené hodnoty jsou nejvíce odchýleny právě v bodech, kdy je namáhání na součást největší. Maximální odchylky se pohybovaly v rozmezí 7-8 milimetrů.

Pokus o špatné najetí do výhybky dopadl u plastového domku prasknutím vzorku, ostatní dva vzorky vydržely bez známek porušení. Tento pokus simuloval špatnou manipulaci s měřícím vozíkem. Prasknutím byla ještě více snížena tuhost a kvalita plastového dílu, následovala by proto výměna celé součásti.

Kovový díl, který byl vytvořený metodou 3D tisku, byl při post-processingu a měření shledán jako příliš těžký, nehledě na fakt, že při tisku došlo k problémům s podporami a výrobek tak byl s vizuálními, ne však funkčními vadami. Vytvořen tak byl optimalizovaný díl, který byl o třetinu lehčí a designově atraktivnější. Při tomto tisku bylo upraveno i nastavení podpor a jejich hustota. Finální výrobek neobsahoval žádné vady a tisk proběhl bezproblémově.

Ekonomickým zhodnocením bylo však zjištěno, že metoda 3D tisku kovu není pro tento výrobek vhodná. Je třikrát dražší než výroba konvenční a desetkrát než plastový tisk. Nejnákladnější položkou jsou strojní náklady, které jsou ale poměrně fixní a jedinou možností je snížení doby výroby. Znamenalo by to však změnit celkové nastavení tisku, zvýšit tloušťku tištěné vrstvy a zvýšit rychlost tisku. Nelze ale odpovědět, jak by se změnila kvalita výrobku. Pro podobně objemné součástky není 3D tisk kovu schopný konkurovat jiným způsobům výroby, jeho předností je výroba miniaturních dílů s velkou geometrickou náročností. Jedinou možností, kdy by mohl být 3D tisk kovu nasazen i na objemově větší součástky je v případě, kdy nelze dosáhnout tvaru jinak, než aditivní technologií (výroba dutých těles, tvarově složitá tělesa s malými detaily).

Pro malosériovou výrobu tohoto dílu by bylo velice zajímavé použít kvalitnější plast, který by zaručoval dostatečnou tuhost při měření, vyrobil nový vzorek a porovnat ho s dílem, vyrobeným konvenčním způsobem. Každopádně díl, který byl vyroben metodou 3D tisku kovu, je v tomto případě zcela nepoužitelný pro malosériovou výrobu z důvodu ekonomické nákladnosti výroby.

8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Využití materiálů pro 3D tisk [3]	7
Obrázek 2: Rozdělení technologií podle formy [8].....	8
Obrázek 3: Porovnání SLA a DLP [5].....	8
Obrázek 4: Rozdělení technologií a materiálů [4].....	9
Obrázek 5: Atomizace taveniny - (a) plynem, (b) vodou [17]	12
Obrázek 6: Logo firmy KŽV	17
Obrázek 7: Model Kraba S-Light	18
Obrázek 8: Reálný vozík Krab S-Light.....	18
Obrázek 9: Detailní pohled na levé klepeto	19
Obrázek 10: Sestava levého klepetá	20
Obrázek 11: Optimalizace dílu [7]	21
Obrázek 12: Optimalizační proces [3].....	22
Obrázek 13: Výkres součásti.....	23
Obrázek 14: Chemické a mechanické vlastnosti EN AW-6060 [9].....	24
Obrázek 15: Řezání polotovaru.....	25
Obrázek 16: Kontrola rozměrů součásti	25
Obrázek 17: Program na CNC obrábění	26
Obrázek 18: Díl po první operaci.....	26
Obrázek 19: Finální díl vyrobený konvenční technologií.....	28
Obrázek 20: Struktura ABS [11]	29
Obrázek 21: Nastavení tisku	30
Obrázek 22: Porovnání simulace a reálného výrobku	30
Obrázek 23: Finální díl vyrobený 3D tiskem plastu.....	31
Obrázek 24: Chemické složení a mechanické vlastnosti nerezové oceli [13].....	32
Obrázek 25: TruPrint 1000.....	33
Obrázek 26: Simulace tisku na stavební paletě.....	34
Obrázek 27: Finální díl vyrobený metodou 3D tisku kovu s vadami.....	35
Obrázek 28: Optimalizace modelu pro 3D tisk kovu	36
Obrázek 29: Finální díl vyrobený metodou 3D tisku kovu	37
Obrázek 30: Měřená výhybka	39
Obrázek 31: Měřicí vozík ve výhybce.....	39
Obrázek 32: Výběr souborů pro vyhodnocení	41
Obrázek 33: Prasknutí vzorku	45

9. Seznam grafů

<i>Graf 1: Porovnání rozchodu</i>	42
<i>Graf 2: Měření po hrotu srdcovky</i>	43
<i>Graf 3: Měření proti hrotu srdcovky</i>	44

10. Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Technologie na tisk kovu [3]</i>	11
<i>Tabulka 2: Technologický postup eloxování</i>	27
<i>Tabulka 3: Porovnání původního a upraveného domku</i>	36
<i>Tabulka 4: Rozdílné parametry tisků</i>	37
<i>Tabulka 5: Kalibrační konstanty a hmotnost</i>	38
<i>Tabulka 6: Pořizovací ceny potřebných strojů</i>	45
<i>Tabulka 7: Výpočet HRS pro jednotlivé stroje</i>	46
<i>Tabulka 8: Výpočet ceny materiálu</i>	47
<i>Tabulka 9: Výpočet nákladů na pracovníka</i>	47
<i>Tabulka 10: Výpočet strojních nákladů</i>	47
<i>Tabulka 11: Výpočet ceny post-processingu</i>	48
<i>Tabulka 12: Výpočet celkové ceny</i>	48

11. Zdroje

[1] CHUA, Chee Kai, Chee How WONG a Wai Yee YEONG. [online]. Elsevier, 2017 [cit. 2020-05-18]. ISBN 978-0-12-813489-4. Dostupné z:

https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSQCMSDP3/viewerType:toc/root_slug:standards-quality-control?kpromoter=federation.

[2] GUPTA, Manoj. [online]. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017 [cit. 2020-05-18]. ISBN 9783038425915 9783038425922. Dostupné z:

<https://www.doabooks.org/doab?func=search&query=rid:24753>

[3] KRAUS, Jan. *3D tisk segmentu pro rám jízdního kola* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z:

<http://hdl.handle.net/10467/84858>.

Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Šimota.

[4] CALIGNANO, Flaviana. Overview on Additive Manufacturing Technologies. *Proceedings of the IKEE* [online]. 2017, 105(4), 593-612 [cit. 2020-04-10]. DOI:

10.1109/JPROC.2016.2625098. ISSN 0018-9219. Dostupné z:

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7803596/>

[5] *SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers: Accuracy and Precision* [online]. Formlabs [cit. 2020-04-06]. Dostupné z:

<https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>

[6] *3D tisk v kostce* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z:

<https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>

[7] *3D tisk kovů: Jak omezit 3D tisk podpůrného materiálu* [online]. 2017 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z:

<https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-jak-omezit-3d-tisk-podpurneho-materialu/>

[8] MAREK, Jiří. *Problematika 3D tisku* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z:

<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85137>

Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

- [9] *Alunet: Hliníkové profily na míru* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-6060>
- [10] *Proal: Hliníkové profily* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-6060/>
- [11] *Nekorektní blog Petra Kubáče: Chemie pro šílence 13. ABS a blokové kopolymery* [online]. 2014 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <http://petr-kubac.blog.cz/1403/chemie-pro-silence-13-abs-a-blokove-kopolymery>
- [12] *ABS: Materiálový slovník* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [13] *Nerezová ocel: Technické vlastnosti* [online]. [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <http://colstoneglobal.cz/technical-properties/>
- [14] *TruPrint 1000* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-aditivni-vyroby/truprint-1000/
- [15] 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 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321616000408>
- [16] GAYNOR, Andrew T., Nicholas A. MEISEL, Christopher B. WILLIAMS a James K. GUEST. *Topology Optimization for Additive Manufacturing: Considering Maximum Overhang Constraint* [online]. In: . 13.6.2014 [cit. 2020-07-02]. DOI: 10.2514/6.2014-2036. Dostupné z: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2014-2036>
- [17] DRAŠNAR, Martin. *Mechanické vlastnosti 3D tištěných vzorků z oceli 316L* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73276>.
Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Aleš Hermann, Ph.D
- [18] *Metal materials* [online]. Initial [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.initial.fr/en/materials/metal/?fbclid=IwAR3eootaEdG1NxtiV0DdyekUdVZ-xWFafme8pvwEDkrT7K2NL51sJ9f6TLk>

[19] *DMLS Materials for Additive Manufacturing of Metal Parts: EOS 3D Printing Materials* [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z:

https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials?fbclid=IwAR1BTzKzO_Or6g5-eGk1LIs_7L6o9XqYqof0GL-idzK-qTBv1VSDITcXPI

[20] *Metal 3D Printing: 3D Printing Technology* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z:

https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/metal-3d-printing?fbclid=IwAR343zWOyY-bNtyY2jrb_XqEF46P9_e69xaGzopKg_m0IMcwO2oh_YLEa4Y#materials

[21] *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z:

<https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-uprav/fused-deposition-modeling-fdm>