

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Nahrazení vylisku plastovým 3D modelem  
pro vytvoření a ověření měřícího  
programu pro souřadnicový stroj**

**Replacing a Mold With a 3D Plastic Model  
to Create and Validate  
a Coordinate Machine Measuring  
Program**

Student:

Bc. Martin Jakubec

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Jakubec**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: Nahrazení výlisku plastovým 3D modelem pro vytvoření a ověření měřicího programu pro souřadnicový stroj  
Replacing a Mold With a 3D Plastic Model to Create and Validate a Coordinate Machine Measuring Program

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Návrh řešení problematiky.
4. Kvalitativní zhodnocení řešeného návrhu.
5. Technicko - ekonomické zhodnocení.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

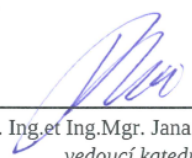
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.  
BATEMAN, Rob a Richard OLSSON. *The essential guide to 3D in Flash*. Berkeley, California: Friends of Ed, [2010]. ISBN 978-1-4302-2542-6.  
HAUSMAN, Kalani Kirk a Richard HORNE. *3D Printing for dummies*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, [2014]. -For dummies. ISBN 978-1-118-66075-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019




.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019

  
.....  
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Martin Jakubec

Adresa trvalého pobytu autora práce: Luh 1806, Vsetín

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JAKUBEC, M. *Nahrazení vylisku plastovým 3D modelem pro vytvoření a ověření měřicího programu pro souřadnicový stroj: Diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 59 s., Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Diplomová práce se zabývá možnostmi spojení a 3D tiskem modelu vylisku rozděleného na více částí. Úvodní část diplomové práce představuje nejpoužívanější technologie aditivní výroby a nejpoužívanější materiály pro technologii FDM. Experimentální část se již zabývá návrhem možných spojení, která jsou následně aplikována přímo do modelu vylisku. Po vytisknutí jednotlivých částí modelu a jejich úspěšném spojení probíhají měření na souřadnicovém měřicím stroji. Na základě tohoto měření je vyhodnocena vhodnost jednotlivých výrobků pro vytvoření měřicího programu. Závěr práce popisuje použitelné druhy spojení a obsahuje seznam doporučených 3D tiskáren.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

JAKUBEC, M. *Replacing a Mold With a 3D Plastic Model to Create and Validate a Coordinate Machine Measuring Program: Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 59 p., Thesis head: Kratochvíl, J.

The master thesis deals with the possibilities of connection and 3D printing model mold divided into several parts. The introductory part of the thesis presents the most used technologies of additive production and the most used materials for FDM technology. The experimental part deals with the design of possible connections, which are then applied directly to the molding model. After the individual parts of the model have been printed and connected successfully, measurements are taken on the coordinate measuring machine. On the basis of this measurement, the suitability of individual products for the creation of a measuring program is evaluated. The conclusion of the thesis describes usable types of connections and contains a list of recommended 3D printers.

## OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 VÝVOJ A ZÁKLADY 3D TISKU .....</b>	<b>10</b>
1.1 Aditivní technologie.....	10
1.2 Počátky 3D tisku .....	10
1.3 Technologie 3D tisku .....	11
1.3.1 Stereolitography Apparatus – SLA.....	11
1.3.2 Fused Deposition Modeling – FDM .....	12
1.3.3 Selective Laser Sintering – SLS .....	14
1.4 Materiály používané technologií FDM .....	15
1.4.1 PLA.....	15
1.4.2 ABS.....	16
1.4.3 SBS .....	16
1.4.4 PET – G .....	16
1.4.5 PVA .....	17
<b>2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>18</b>
2.1 Popis výrobku.....	19
2.1.1 Materiál vylisku .....	19
2.1.2 Tiskový materiál .....	19
2.2 Použité stroje a přípravky.....	20
2.2.1 Tiskárna EASY 3D MAKER.....	20
2.2.2 Tiskárna Anet A2.....	21
2.2.3 Tiskárna Creality ENDER 3 .....	22
2.2.4 Souřadnicový měřicí stroj HEXAGON GLOBAL Advantage.....	23
2.2.5 Ustavovací přípravek pro měření.....	24
2.3 Návrh spojení vytištěných výrobků .....	25
2.3.1 Spojení č. 1 – čep .....	25
2.3.2 Spojení č. 2 – pero .....	25
2.3.3 Spojení č. 3 – pero s úkosem .....	26
2.3.4 Spojení č. 4 – Snap Fit.....	26
2.3.5 Spojení č. 5 – puzzle .....	27
2.3.1 Spojení č. 6 – lepený spoj .....	28
2.3.2 Spojení č. 7 – magnet.....	28

2.4	Testovací tisk jednotlivých spojů.....	29
2.4.1	Spojení č. 1 – čep.....	29
2.4.2	Spojení č. 2 – pero.....	30
2.4.3	Spojení č. 3 – pero s úkosem.....	31
2.4.4	Spojení č. 4 – Snap Fit.....	31
2.4.5	Spojení č. 5 – puzzle.....	32
2.4.6	Spojení č. 6 – lepený spoj.....	33
2.4.7	Spojení č. 7 – magnet.....	33
2.4.8	Shrnutí.....	34
2.5	Tisk modelu výlisku s vybranými druhy spojů.....	35
2.5.1	Výrobek se spojem č. 1 – čep.....	35
2.5.2	Výrobek se spojem č. 5 – puzzle.....	37
2.5.3	Výrobek se spojem č. 6 – lepený spoj.....	40
2.5.4	Výrobek se spojem č. 7 – magnet.....	42
2.6	Měření jednotlivých výrobků.....	42
2.6.1	Měření výrobku se spojem č. 5 – puzzle.....	43
2.6.2	Měření výrobku se spojem č. 6 – lepený spoj.....	45
2.7	Zhodnocení řešených návrhů.....	47
2.7.1	Kvalitativní zhodnocení.....	48
2.7.2	Kvantitativní zhodnocení.....	49
2.8	Návrh na zlepšení.....	49
2.9	Ekonomické zhodnocení.....	51
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>54</b>
	<b>PODĚKOVÁNÍ.....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAMPŘÍLOH.....</b>	<b>59</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ABS	Akrylonitril Butadien Styren Tiskový materiál	[-]
Extruder	Součást 3D tiskárny dávkující materiál	[-]
FDM	Fused Deposition Modeling Technologie 3D tisku	[-]
FFF	Fused Filament Fabrication Technologie 3D tisku	[-]
Filament	Materiál pro FDM tiskárny v podobě struny	[-]
G – kód	Programovací jazyk pro číslicové řízení	[-]
Open Source	Software s otevřeným zdrojovým kódem	[-]
PET	Poly Etylén Tereftalát[-] Tiskový materiál	[-]
PET – G	Poly Etylén Tereftalát - Glykol Tiskový materiál	[-]
PET – G/CF	Tiskový materiál s karbonovými vlákny	[-]
PLA	Poly Lactic Acid Tiskový materiál	[-]
PVA	Poly Vinyl Alkohol Podpůrný tiskový materiál	[-]
SBS	Styren Butadien Styren Tiskový materiál	[-]
SLA	Stereolitografie Technologie 3D tisku	[-]
Slicer	Software generující G – kód	[-]
SLS	Selective Laser Sintering Technologie 3D tisku	[-]
Snap Fit	Zaklapnutí (zacvakávací spoj)	[-]



# ÚVOD

Aditivní technologie výroby dosáhla v posledních letech velkého rozmachu. Díky velkému snížení cen malých tiskáren se výrobky vyrobené technologií 3D tisku dostávají do mnoha odvětví strojírenství i mimo něj. Použití malých tiskáren vede k tisku velkých modelů po částech, které se následně spojí. Spojení těchto částí probíhá rozebíratelnými i nerozebíratelnými spoji.

Tato práce vznikla na základě požadavku firmy, za účelem zjištění, zdali lze využívat malé hobby tiskárny k tisku velkých modelů výlisků. Požadavkem je rozdělení modelů na více částí, které budou doplněny o funkční spojky. Kompletní modely mají nahradit dosavadní plechový výlisek při vytváření měřicího programu pro souřadnicový měřicí stroj.

Hlavním úkolem této diplomové práce je navrhnout možnosti spojení částí modelu výlisku vytisknutého technologií 3D tisku. Spojení jednotlivých částí nesmí narušovat tvar výlisku, avšak pevnost a přesnost spoje musí být dostačující pro vytvoření a ověření měřicího programu pro souřadnicový měřicí stroj dle vytisknutého modelu výlisku.

Začátek práce představuje princip aditivní technologie výroby a nejpoužívanější technologie 3D tisku. Následuje experimentální část, zaměřená na návrh a odzkoušení různých druhů spojení. Po vyhodnocení použitelnosti jednotlivých spojení jsou vytisknuty modely výlisku s namodelovanými použitelnými spojkami.

Kontrola rozměrů a kvality povrchu vytisknutých výrobků proběhla po úspěšném spojení jednotlivých částí výrobku. Na základě vyhodnocení rozměrů a kvality povrchu jsou v práci vybrány použitelné spojky, které vyhovují kvalitou a přesností spojení pro vytváření měřicího programu. Poslední část práce navrhuje možná zlepšení pro 3D tisk modelu výlisku doplněná o seznam doporučených použitelných tiskáren.

# 1 VÝVOJ A ZÁKLADY 3D TISKU

## 1.1 Aditivní technologie

Základním principem výroby většiny součástí a nástrojů je odebrání materiálu z již přichystaného polotovaru. Aditivní technologie je přesným opakem tohoto dodnes nejpoužívanějšího principu. Při aditivní technologii je materiál přidáván, místo ubírán. Součást tak vzniká postupně nanášením jednotlivých vrstev. Tento způsob výroby otevřel brány do světa nových tvarů součástí, kdy není konstruktér omezován tvarem, který by nešel vyrobit<sup>1,2</sup>.

S tímto myšlením je také spojena tzv. topologická optimalizace tvaru. To znamená, že součást má tvar potřebný k účelům, ke kterým je konstruována (pevnost, návaznost na další součásti, ...), bez ohledu na stránku vyrobitelnosti. Touto optimalizací lze dosáhnout mnohem větší pevnosti a menší hmotnosti součástí, než kdyby byla konstruována pro klasickou výrobu obráběním. Někdy jsou tyto konstrukce nazývány jako organické konstrukce<sup>1,2</sup>.

Aditivní technologie jsou často také nazývány jako 3D tisk. Toto pojmenování bude použito i v této diplomové práci.

## 1.2 Počátky 3D tisku

Počátky 3D tisku sahají do roku 1984, kdy Charles W. Hull dostal patent na technologii stereolitografie. Označení této technologie bylo SLA a využívá se dodnes. Při porovnání s technologií třískového obrábění, je 3D tisk relativně novou technologií<sup>3,4</sup>.

Na počátku se však tato technologie nenazývala 3D tisk, ale Rapid Prototyping. Tento název více vystihoval účel použití, kterým je výroba prototypů, před samotnou hromadnou výrobou<sup>3,4</sup>.

I když byl patent na tisk technologií stereolitografie vydán již v roce 1984, první 3D tiskárna byla na trhu dostupná až v roce 1992. Vyráběla ji firma 3D Systems, jejímž zakladatelem byl právě Charles W. Hull. Tyto tiskárny byly velice drahé, a proto dostupné pouze větším firmám. Během dalších let vznikaly nové technologie pracující na jiném principu než stereolitografií. Vznikly například technologie FDM (tavení materiálu) nebo SLS (spékání prášku pomocí laseru)<sup>3,4</sup>.

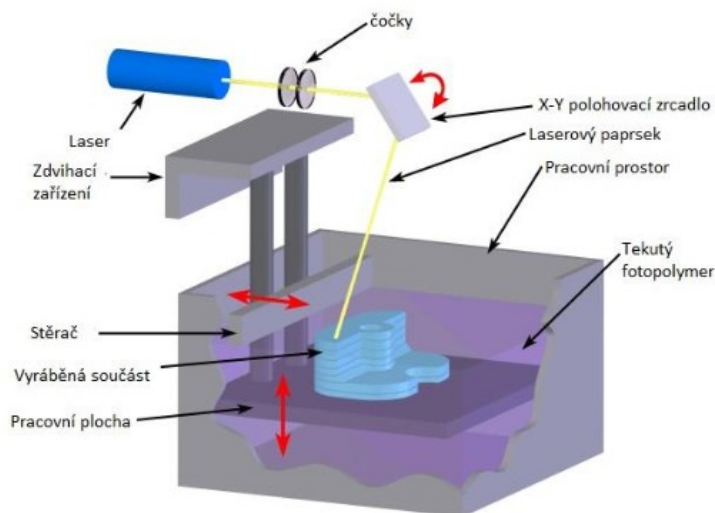
Revolucí v oblasti 3D tisku bylo založení projektu RepRap, který byl založen v roce 2005. Principem projektu bylo, že vyrobená tiskárna bude schopna vytisknout co nejvíce vlastních součástí pro následné postavení další tiskárny. Celý projekt byl uveden jako Open Source. Toto rozhodnutí zakladatele Adriana Bowyera zapojilo do projektu nadšence z celého světa. I proto jsou tiskárny založené na principu projektu RepRap nejrozšířenějším druhem tiskáren na celém světě. Většina tiskáren z kategorie hobby (cena do 30 000 Kč) jsou právě založeny na principu projektu RepRap<sup>4</sup>.

### **1.3 Technologie 3D tisku**

V průmyslu i širokou veřejností je využíváno hned několik různých technologií 3D tisku. Záleží na účelu, ke kterému je tiskárna využívána a materiálu, ze kterého bude výrobek vytisknut. Každá technologie 3D tisku totiž používá jiné druhy materiálů. Nejvíce používané technologie jsou SLA, FDM (FFF) a SLS<sup>4</sup>.

#### **1.3.1 Stereolitography Apparatus – SLA**

Technologie pracuje na principu vytvrzování tekutého fotopolymeru pomocí UV záření. Fotopolymer je materiál, který natrvalo změní své skupenství z kapalného na pevné, působením laserového ultrafialového záření. Výrobek při této technologii vzniká postupným vytvrzováním velmi tenkých vrstev fotopolymeru. Kontura vrstvy vždy odpovídá kontuře modelu v dané vrstvě. Po vytvrzení dané vrstvy se podložka posune o výšku vrstvy a proces se opakuje. Výška vrstvy při této technologii se pohybuje okolo (0,05 – 0,15) mm. Při tisku složitějších modelů je potřeba tisknout také tiskové podpory, které napomáhají při tisku ploch, které jsou tzv. „ve vzduchu“. Na obrázku 1 lze vidět princip tisku<sup>5,6</sup>.



Obr. 1 Princip tisku technologie SLA<sup>7</sup>

Výhodou technologie SLA je její přesnost a výsledná kvalita povrchu výrobku. Preciznost tiskárny určuje přesnost laserového záření a přesnost chodu pohybové soustavy ve vertikálním směru. Díky malým výškám jednotlivých vrstev, nejsou tyto vrstvy na výrobku po dokončení tisku vidět<sup>5,6</sup>.

Nevýhodou technologie je potřebná dodatečná úprava po dokončení tisku. Modely jsou totiž lepkavé od nevytvrzeného fotopolymeru. Proto je potřeba jejich očištění v izopropylalkoholu. Výrobky technologií SLA mají výhodu ve své tvrdosti. Této tvrdosti však dosáhnou až po dodatečném vytvrzení UV světlem. Některé firmy se proto zabývají výrobou přístrojů, které vytisknutý výrobek očistí a ihned poté vytvrdí. Vytvrzení výrobku lze i pomocí obyčejného slunečního záření, avšak rychlost je menší, než při použití umělého zdroje UV světla<sup>5,6</sup>.

Výrobky vytisknuté technologií SLA jsou často používány ve šperkařství, pro výrobu vstřikovacích a odlévacích forem<sup>4</sup>.

### 1.3.2 Fused Deposition Modeling – FDM

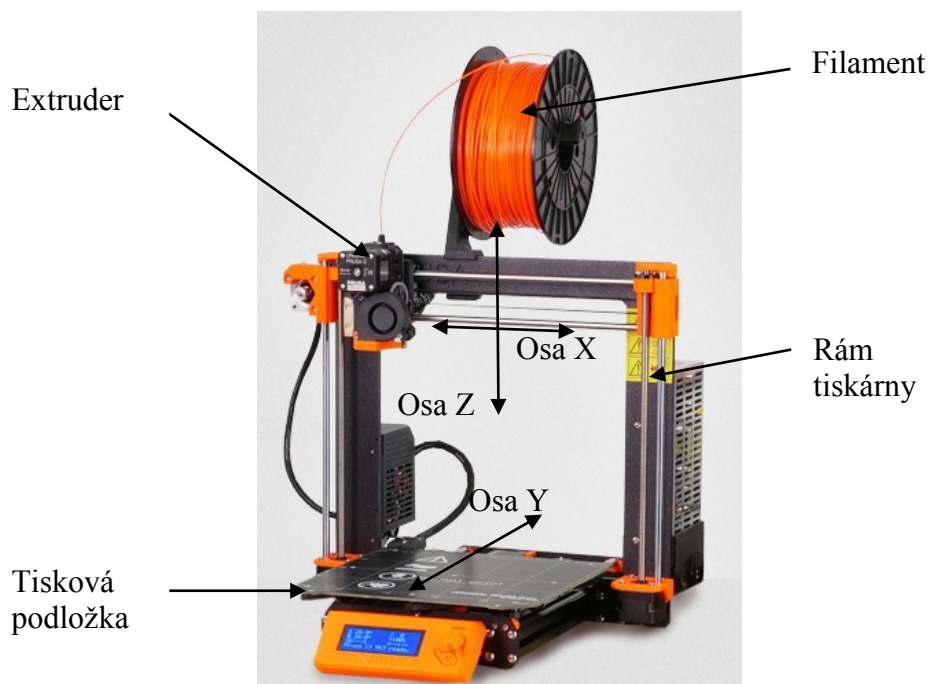
Principem této technologie je nanášení roztaveného materiálu v tenkých vrstvách na podložku. Na trhu se lze setkat také s označením FFF (Fused Filament Fabrication). Toto označení popisuje úplně stejný princip tisku jako zkratka FDM. Rozdíl je pouze v tom, že zkratka FDM je registrovanou ochranou značkou společnosti Stratasys<sup>4,8</sup>.

Tiskárny založené na technologii FDM patří mezi nejrozšířenější tiskárny na trhu. Hlavním důvodem je projekt RepRap, který umožnil vznik levných tiskáren, dostupných

všem. Projekt RepRap je samozřejmě využíván i u ostatních technologií, jenže technologie FDM je tou nejjednodušší pro domácí konstrukci tiskárny<sup>4, 8</sup>.

Jak již bylo řečeno, principem je nanášení roztaveného materiálu v tenkých vrstvách na podložku. Z tohoto principu již lze určit, že tiskový materiál musí spadat do kategorie termoplastů (termoplasty lze opětovně roztavit a nechat ztuhnout). Materiál je pro co nejlepší manipulaci dodáván v podobě struny o průměru 1,75 mm nebo 3 mm namotaného na špulce. Na trhu se objevuje velké množství různých druhů materiálů. Mezi nejpoužívanější materiály patří PLA, ABS, SBS, PET-G. Tiskovému materiálu se také říká filament<sup>4, 8</sup>.

Tento materiál v podobě struny je pomocí extruderu vtačován do tiskové hlavy, kde je roztaven a v tekuté podobě vytéká na podložku. V závislosti na konstrukci tiskárny může jednotlivé pohyby v osách XYZ konat buď tisková hlava, tisková podložka nebo jejich kombinace. Přesnost tiskárny ovlivňuje průměr použité trysky, tuhost rámu a přesnost krokových motorů. Na obrázku 2 lze vidět možnou konstrukci tiskárny<sup>4, 8</sup>.



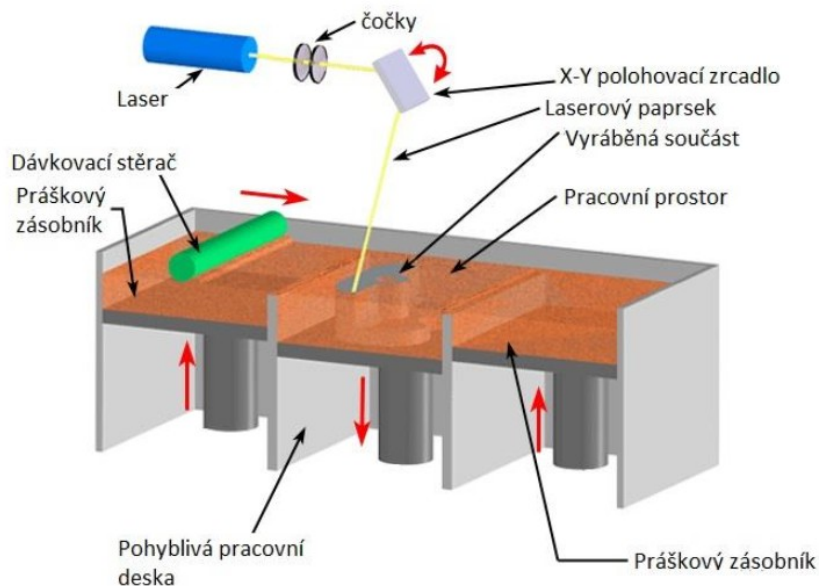
*Obr. 2 Konstrukce tiskárny Original Prusa i3 MK3S<sup>9</sup>*

Mezi výhody této technologie patří levná pořizovací cena tiskového materiálu, jednoduchá konstrukce tiskárny a výroba jednoduchých funkčních výrobků ihned po dokončení tisku<sup>4, 8</sup>.

Nevýhodou této technologie je nutnost použití tiskových podpor u složitějších výrobků a jejich následné odstranění. Bez následného opracování výrobku po tisku, lze rozeznat na výrobku jednotlivé vrstvy tisku<sup>4, 8</sup>.

### 1.3.3 Selective Laser Sintering – SLS

Aditivní technologie označovaná jako SLS pracuje na principu spékání práškových materiálů pomocí laserového záření. Materiál je spékán po jednotlivých vrstvách dle programu. Po každé vrstvě se výrobek posune ve vertikálním směru o tloušťku vrstvy a je nanášena nová vrstva prášku. Tato nová vrstva je stěračem urovňována na konstantní výšku a laserovým zářením se slinuje pouze tvar požadované kontury. Tvarovou přesnost kontury každé vrstvy určuje přesnost polohovacího zrcadla, které odráží laserový paprsek na požadovaná místa. Princip technologie je znázorněn na obrázku 3<sup>10, 11, 12</sup>.



Obr. 3 Princip technologie SLS<sup>7</sup>

Nejčastějším zdrojem záření jsou CO<sub>2</sub> lasery. Volba laseru však závisí na druhu spékávaného materiálu. Jako materiál totiž lze použít téměř cokoli, co se působením tepla roztaví a následně ztuhne<sup>10, 11, 12</sup>.

Technologii SLS lze rozdělit dle druhu práškového materiálu na<sup>11</sup>:

- Laser – Sintering Plastic – Použití prášku některého z dostupných druhů plastů
- Laser – Sintering Metal – Použití speciálně vyvinutých kovových prášků
- Laser – Sintering Formsand – Použití upraveného slévárenského písku

- Laser – Sintering Ceramic – Použití keramického prášku s tekutým pojivem
- Laser Micro Sintering – Použití wolframového prášku

Použití tolika druhů rozdílných materiálů představuje velkou výhodu technologie SLS oproti ostatním aditivním technologiím. Další nespornou výhodou je, že při technologii SLS není potřeba tisknout tiskové podpory. Podpory jsou tvořeny neroztaveným práškem z předchozích vrstev. Ve většině případů také není potřeba již žádná dodatečná úprava výrobků, a proto jsou ihned použitelné k danému účelu<sup>10, 11, 12</sup>.

Nevýhodou této technologie je potřeba uzavřené tiskové komory vyplněné inertním plynem, což zvyšuje tiskové náklady. Další nevýhodou je vysoká energetická náročnost způsobená použitím laserového záření<sup>10, 11, 12</sup>.

## 1.4 Materiály používané technologií FDM

Technologie FDM využívá pro tisk materiál v podobě struny ze skupiny termoplastů. Na trhu se objevuje velké množství druhů těchto materiálů určených pro tisk technologií FDM. FDM materiály bývají občas míchány i s neplastovými materiály, kterými jsou dřevo, kovy, sádra atd. V následujících kapitolách budou popsány nejčastěji používané termoplasty PLA, ABS, SBS, PET – G a PVA<sup>13</sup>.

### 1.4.1 PLA

Materiál PLA je nejuniverzálnějším materiálem pro FDM tisk. Výroba materiálu probíhá z kukuřičného nebo bramborového škrobu. Proto je materiál PLA biologicky odbouratelný a lze jej kompostovat<sup>4, 13</sup>.

Tisk velkých i malých výrobků je velmi jednoduchý. Teplotní roztažnost materiálu je totiž velmi malá a nezpůsobuje odlepování od tiskové podložky<sup>4, 13</sup>.

Materiál PLA je nejčastěji využívaným materiálem pro přimíchávání neplastových materiálů. Přimícháním ostatních materiálů lze změnit fyzikální a vzhledové vlastnosti materiálu<sup>13</sup>.

Nevýhodou materiálu PLA je jeho malá tepelná odolnost. Již při teplotě 60 °C měkne, a proto broušení povrchu je potřeba provádět s neustálým chlazením. Kvůli této nízké teplotě je potřeba výrobky nenechávat například během léta v autě<sup>4, 13</sup>.

Běžně se materiál PLA používá pro výrobu ekologických potravinových obalů<sup>13</sup>.

### 1.4.2 **ABS**

Materiál ABS je průmyslový termoplastický polymer. Mezi jeho největší přednosti patří jeho tvrdost, odolnost proti vyšším teplotám (100 °C), kyselinám, hydroxidům a zdravotní nezávadnost<sup>13</sup>.

Materiál je sice zdravotně nezávadný, ale pouze v pevném skupenství. Při jeho tavení se totiž odpařují škodlivé výpary pocházející z ropného původu materiálu. Proto je při tisku potřeba využít dobře větrané prostory. Další nevýhodou je jeho velká tepelná roztažnost, která způsobuje problémy při tisku. Tento problém částečně lze vyřešit použitím vyhřívané tiskové podložky a vyhřívanou tiskovou komorou<sup>4, 13</sup>.

Běžně se materiál ABS používá například pro výrobu LEGO kostek<sup>4, 13</sup>.

### 1.4.3 **SBS**

Materiál SBS je tvořen dvěma základními materiály. Prvním z nich je polystyren, což je tvrdý a pevný plast. Druhým materiálem je polybutadien, který má vlastnosti kaučuku. Spojením těchto dvou materiálů vznikl tvrdý materiál s dobrou odolností proti oděru a zároveň odolný proti mechanickému namáhání a působení rázových sil<sup>13</sup>.

Vlastnosti daného materiálu lze měnit změnou výrobního procesu, čímž lze dosáhnout extrémně tvrdého nebo houževnatého materiálu<sup>13</sup>.

Tisk tohoto materiálu je bezproblémový. Povrch výrobku lze vyhladit dokonce až do sklovitého povrchu pomocí D-Limonenu. Soudržnost jednotlivých vrstev je také dobrá<sup>13</sup>.

Běžně je materiál SBS používán pro podrážky obuvi, pneumatiky nebo zahradní hadice<sup>13</sup>.

### 1.4.4 **PET – G**

Materiál PET – G patří do skupiny materiálů založených na materiálu PET. Tyto materiály patří do skupiny polyesterů. Běžně se materiál PET používá pro výrobu plastových lahví. Pro aditivní technologie se však čistý PET nepoužívá. Vždy jsou do něj přidány určité přísady navíc. U materiálu PET – G je to glykol<sup>4, 13</sup>.



Materiál PET – G je odolný proti vůči kyselinám a rozpouštědlům. Jeho tepelná odolnost je oproti ostatním tiskovým materiálům také vysoká. Vytisknutý výrobek lze při zahřátí tvarovat nebo dokonce leštit ohněm. Tvrdost materiálu je také dobrá<sup>13</sup>.

V některých případech se do materiálu přidávají také uhlíkové vlákna, která zvyšují jeho pevnost. Materiál poté nese označení PET – G/CF. Vyznačuje se „kovovým“ zbarvením<sup>13</sup>.

#### 1.4.5 PVA

Tiskový materiál PVA je netoxický a biologicky odbouratelný materiál. Díky jeho vlastnosti rozpustit se ve vodě je využíván pro tisk tiskových podpor. Podpory jsou následně rozpuštěny ve vodě a zůstane pouze výrobek bez zbytků tiskových podpor<sup>13</sup>.

Aby mohl být materiál použit pro tisk podpor, je potřeba použít tiskárnu umožňující tisk ze dvou materiálů současně<sup>13</sup>.

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce se bude zabývat návrhem a zkušebním tiskem různých variant spojení dílů vyrobených pomocí 3D tisku. Z jednotlivých dílů bude sestaven výrobek, který bude sloužit k vytvoření a ověření měřicího programu pro souřadnicový měřicí stroj. Použitím výrobku z 3D tiskárny se zkrátí doba kontroly originální součásti (výlisku). Měřicí program totiž může být odzkoušen ještě před tím, než originální součást (výlisek) vyjede vůbec z lisu.

V první části kapitoly bude popsán samotný výlisek. Následovat bude popis jednotlivých tiskáren, které budou použity při tisku. V další části experimentu budou navrženy různé varianty spojení jednotlivých dílů výrobků.

Po návrhu variant spojení jednotlivých dílů, budou spojky odzkoušeny na jedné z tiskáren. Vyhovující spojky budou v další kapitole aplikovány přímo do modelu výlisku, který bude kvůli své velikosti rozdělen na více částí. Jednotlivé části modelu budou následně vytisknuty.

Po úspěšném vytisknutí a spojení budou výrobky s funkčními spojkami změřeny na souřadnicovém měřicím stroji, za účelem zjištění přesnosti. Kromě přesnosti budou výrobky porovnávány také ze stránky kvality povrchu. Na základě těchto vyhodnocení bude určena vhodnost jednotlivých spojení pro vytváření měřicího programu.

Na konci experimentální části budou představeny možné návrhy pro zlepšení nedostatků vzniklých během experimentu a ekonomické porovnání pro pořízení jednotlivých tiskáren.

## 2.1 Popis výrobku

Pro experiment byl vybrán výlisek, který je následně montován do autosedačky a slouží k posunu sedačky po kolejnicích dopředu k volantů a zpět. Výlisek se skládá z převážné většiny z tvarových ploch, prolisů, stříhaných děr a lemovaných okrajů (viz obr. 4). Pro 3D tisk bude proto tento výlisek komplikovaným tvarem, kdy bude potřeba vyzkoušet několik poloh výlisku při tisku a nastavení tvorby podpor.

Maximální rozměry výlisku jsou (397,4 x 89,4 x 46,7) mm. Kompletní výkres výlisku je umístěn v příloze A.



Obr. 4 Originální plechový výlisek

### 2.1.1 Materiál výlisku

Originální plechový výlisek je vyroben z plechu oceli S420MC o tloušťce ( $2 \pm 0,08$ ) mm. Tato konstrukční mikrolegovaná ocel je vyráběna běžným válcováním za tepla a je určena pro tváření za studena<sup>14</sup>.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti při normální teplotě termomechanicky válcované oceli podle ČSN EN 10146-2<sup>15</sup>.

Minimální mez kluzu	[MPa]	420
Pevnost v tahu	[MPa]	480 – 620
Tažnost pro $t < 3$	[%]	16

### 2.1.2 Tiskový materiál

Materiál vytištěného výrobku byl zvolen plast s označením PLA. Tento plast je vhodný pro tisk běžnými FDM tiskárnami. Materiál PLA se vyznačuje malou tepelnou roztažností, což vyhovuje tisku velkého modelu výlisku. Nevýhodou tohoto materiálu je

ale jeho malá tepelná odolnost. Materiál totiž začíná měknout již při teplotě okolo 60 °C<sup>4, 13</sup>.

Malá tepelná odolnost materiálu však není při vytváření měřicího programu překážkou. Teplota v laboratoři se totiž kvůli měřicím strojům udržuje na stabilní teplotě 20 °C.

## 2.2 Použité stroje a přípravky

Při experimentu byly použity tři 3D tiskárny. Jedna od firmy 3D FACTORIES, druhá od firmy Anet a třetí od firmy Creality. Na tiskárnách byly tištěny výrobky s jednotlivými druhy spojek a také byla porovnávána kvalita výrobku z jednotlivých tiskáren. Pro následné měření rozměrů vytištěných výrobků byl použit souřadnicový měřicí stroj HEXAGON GLOBAL Advantage.

Při experimentu byl použit pouze jeden ustavovací přípravek. Tento přípravek sloužil pro ustavení vytisknutých výrobků na stole souřadnicového měřicího stroje.

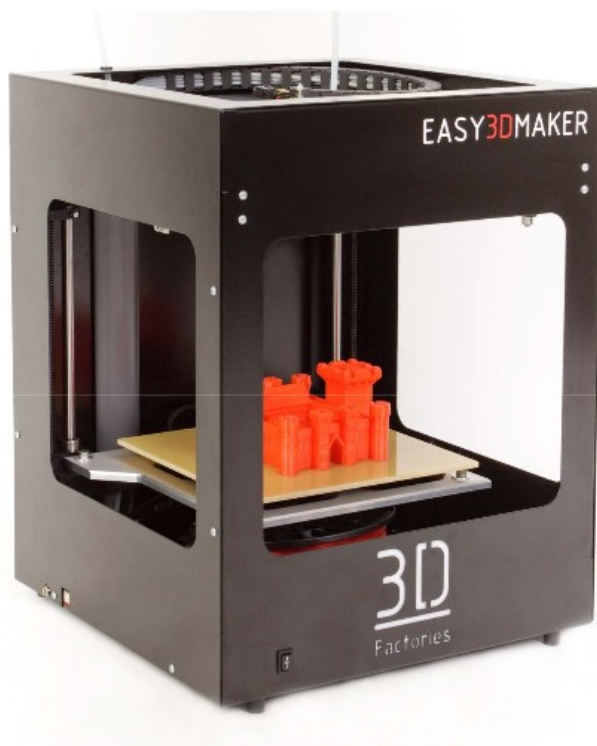
### 2.2.1 Tiskárna EASY 3D MAKER

Tiskárna EASY 3D MAKER je 3D tiskárna od firmy 3D FACTORIES. Tato tiskárna pracuje na principu FDM, kdy je materiál přiváděn v podobě struny. Tělo tiskárny není zakryto, jak se může na obr. 5 zdát. Tiskárna proto nevyužívá vyhřívanou tiskovou komoru<sup>16</sup>.

Pro vytvoření G-kódu byl použit software 3dfactories Repetier host, který zajišťoval komunikaci počítače s tiskárnou.

Tab. 2 Parametry tiskárny EASY 3D MAKER<sup>16, 17</sup>

Tisková oblast	[mm]	200 x 200 x 230
Výška vrstvy v ose Z	[mm]	0,08/ 0,125/ 0,25
Rozměrová přesnost	[mm]	±0,1
Rychlost tisku	[mm·s <sup>-1</sup> ]	80
Posuvová rychlost	[mm·s <sup>-1</sup> ]	230
Maximální teplota extruderu	[°C]	280
Maximální příkon	[W]	180
Rozměry tiskárny	[mm]	400 x 400 x 500
Cena	[Kč]	39 988



*Obr. 5 Tiskárna EASY 3D MAKER<sup>18</sup>*

### 2.2.2 Tiskárna Anet A2

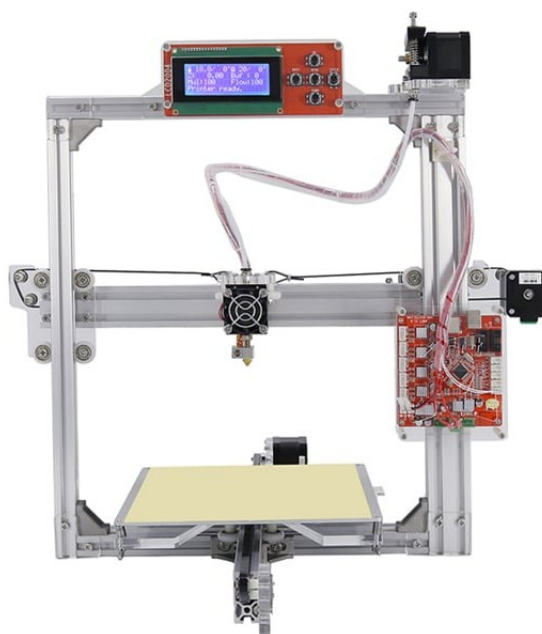
Tiskárna Anet A2 od firmy Anet pochází z čínského eshopu a do prostředí katedry se dostala při diplomové práci, která se zabývala porovnáním levné tiskárny z čínského trhu a konkurenčních dražších tiskáren. Tiskárna byla dodána jako stavebnice a následně musela být složena a seřízena. Pracuje také na principu tisku FDM. Na této tiskárně lze tisknout materiály ABS, PLA a podobné. Vzhled tiskárny lze vidět na obr. 6<sup>19</sup>.

Tělo tiskárny se skládá z hliníkových profilů, ke kterým jsou připevněny všechny ostatní díly. O pohon tiskárny se starají tři krokové motory, každý pro jednu z os X, Y, Z. Extruder tiskárny se pohybuje ve dvou osách X a Z. V ose Y se pohybuje tisková vyhřívaná podložka<sup>19</sup>.

Pro vytvoření G-kódu je používán výrobcem doporučený software Cura. Tento software vytvoří řídicí G-kód, který je následně pomocí microSD karty přenesen do tiskárny<sup>18</sup>.

Tab. 3 Parametry tiskárny Anet A2 <sup>17, 19</sup>

Tisková oblast	[mm]	220 x 220 x 220
Výška vrstvy v ose Z	[mm]	0,1 – 0,3
Rozměrová přesnost	[mm]	±0,1
Rychlost tisku	[mm·s <sup>-1</sup> ]	100
Maximální teplota extruderu	[°C]	260
Rozměry tiskárny	[mm]	500 x 500 x 490
Cena	[Kč]	5 700



Obr. 6 Tiskárna Anet A2 <sup>19</sup>

### 2.2.3 Tiskárna Creality ENDER 3

Tiskárna Ender 3 od firmy Creality je pracuje na principu FDM tisku. Její původ pochází také z Číny, jako tomu bylo u tiskárny Anet A2, avšak lze ji koupit i na českém trhu. Svoji cenou se řadí mezi levné tiskárny (cena tiskárny do 6 000 Kč)<sup>20</sup>.

Tělo tiskárny je složeno z pevných kovových profilů, které zajišťují dostatečnou tuhost tiskárny. I proto lze tisknout rychlostí až 180 mm/min. Pro vytvoření G-kódu byl použit software Simplify 3D, který je doporučen výrobcem tiskárny<sup>20</sup>.

Na obrázku 7 lze vidět velkou podobu s tiskárnou Anet A2.

Tab. 4 Parametry tiskárny Ender 3<sup>20</sup>

Tisková oblast	[mm]	220 x 220 x 250
Výška vrstvy v ose Z	[mm]	0,1 – 0,4
Rozměrová přesnost	[mm]	±0,1
Rychlost tisku	[mm·s <sup>-1</sup> ]	180
Maximální teplota extruderu	[°C]	255
Rozměry tiskárny	[mm]	440 x 410 x 465
Cena	[Kč]	5 929



Obr. 7 Tiskárna Ender 3 od firmy Creality<sup>20</sup>

#### 2.2.4 Souřadnicový měřicí stroj HEXAGON GLOBAL Advantage

Použitý souřadnicový měřicí stroj od firmy HEXAGON se řadí do skupiny velkých souřadnicových strojů. Jeho hlavní rám je vyroben z vysoce pevných hliníkových slitin, které zajišťují snížení hmotnosti při zachování potřebné pevnosti. Konstrukci rámu lze vidět na obr. 8. Stroj je připraven pro integraci systému automatického vkládání a vykládání dílů, kterou lze použít při sériové výrobě<sup>21</sup>.

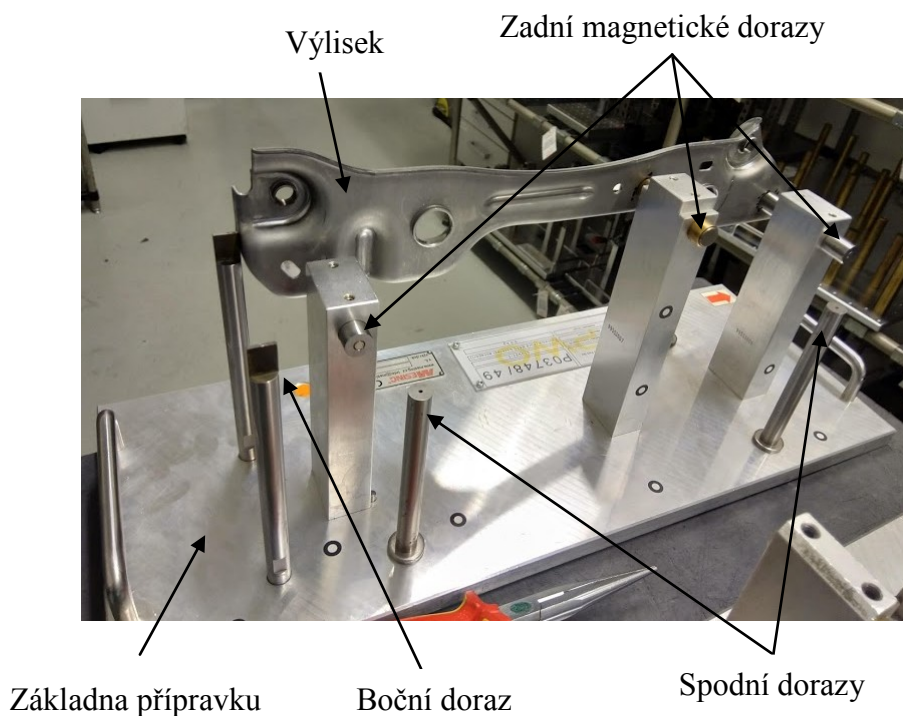
Na stroji byla při měření upnuta dotyková měřicí hlavice PH10 PLUS od firmy Renishaw.



Obr. 8 Souřadnicový měřicí stroj HEXAGON GLOBAL Advantage<sup>21</sup>

### 2.2.5 Ustavovací přípravek pro měření

Ustavovací měřicí přípravek slouží k ustavení výlisku (vytisknutého výrobku) pro měření na souřadnicovém měřicím stroji. Přípravek je složen z ocelového podstavce pro dobrou stabilitu a několika dorazů kruhového profilu taktéž z oceli. Na koncích dorazů jsou umístěny magnety, pro upnutí výlisku (vytisknutého výrobku) bez jakéhokoli použití upínek, které by mohly součást zdeformovat a zkreslit tím naměřené hodnoty. Na každý přípravek lze upnout dva k sobě zrcadlové kusy. Na obrázku 9 je popsán přípravek s jedním upnutým kusem výlisku.



Obr. 9 Ustavovací přípravek

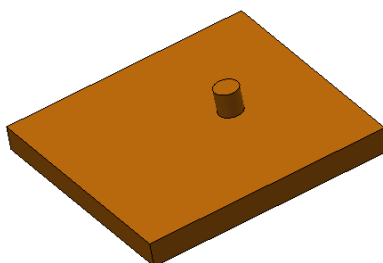


## 2.3 Návrh spojení vytištěných výrobků

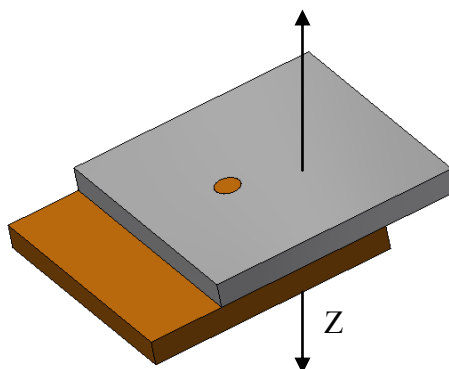
V této kapitole budou popsány jednotlivé návrhy možností spojení jednotlivých dílů vyrobených pomocí metody 3D tisku.

### 2.3.1 Spojení č. 1 – čep

Jako první varianta spojení bylo navrženo spojení s využitím uložení s přesahem v podobě čepu uloženého v díře (znázorněno na obr. 11). Spojení tohoto typu odebírá spojovaným součástem všechny stupně volnosti. Avšak v ose Z lze překonat sílu vzniklou přesahem a díly od sebe oddělit. Spojení bude vyžadovat malou úpravu 3D dat dílu v podobě namodelování čepu (obr. 10) a díry na jednotlivých částech.



Obr. 10 První část dílu s namodelovaným čepem

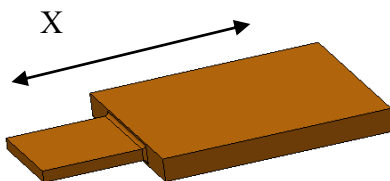


Obr. 11 Spojení obou částí dílu dohromady pomocí spojení č. 1 – čep

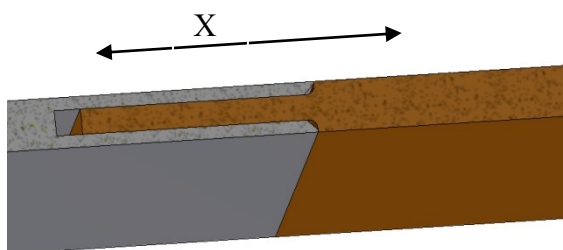
### 2.3.2 Spojení č. 2 – pero

Další varianta spojení byla navržena také na principu uložení s přesahem, kdy oproti prvnímu spojení je přesah uvnitř neprůchozí drážky, která je umístěna do tloušťky materiálu (obr. 13). Spojení opět odebírá jednotlivým částem dílu všechny stupně volnosti. Montáž a demontáž probíhá v ose X, která je zajištěna proti pohybu pouze

silou vyvinutou přesahem. Potřebná úprava 3D dat bude v tomto případě ještě jednodušší, než u spojení č. 1.



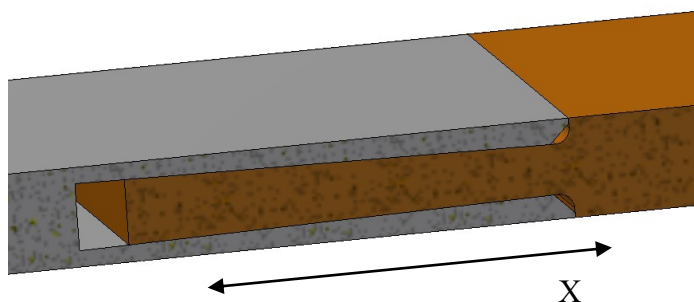
*Obr. 12 První část dílu s namodelovaným perem*



*Obr. 13 Spojení jednotlivých částí dílu pomocí spojení č. 2 – pero*

### 2.3.3 Spojení č. 3 – pero s úkosem

Návrh spojení č. 3 vycházel z návrhu č. 2 – pero, kdy pro dosažení větší pevnosti v ose X budou pero i drážka vyrobeny s úkosem  $1^\circ$ , který by měl zajistit větší odpor při pohybu v ose X. Úkos lze vidět na obr. 14. Spojení odebírá jednotlivým částem všechny stupně volnosti.

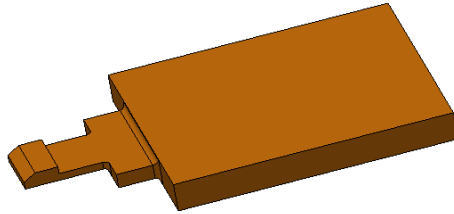


*Obr. 14 Spojení jednotlivých částí dílu pomocí spojení č. 3 – pero s úkosem*

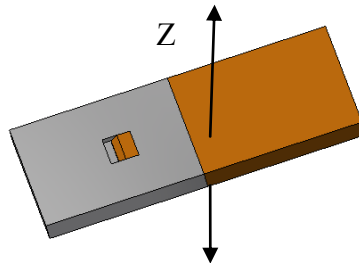
### 2.3.4 Spojení č. 4 – Snap Fit

Další varianta spojení byla navržena na principu zaklapnutí jednotlivých součástí dílu do sebe. Spojení touto variantou bude odebírat jednotlivým součástem všechny stupně

volnosti. K rozebrání spojení bude totiž potřeba vyvinutí síly v ose Z, k odsunutí západky (obr. 16). Tato varianta spojení již bude potřebovat složitější úpravu 3D dat dílů, kdy bude potřeba namodelovat západku sloužící pro zaklapnutí do druhé části dílu. Podoba západky je zobrazena na obr. 15.



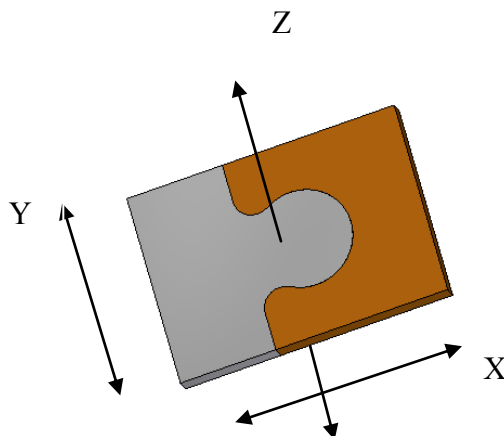
*Obr. 15 První část dílu s vymodelovanou západkou*



*Obr. 16 Spojení jednotlivých částí pomocí spojení č. 4 – Snap Fit*

### 2.3.5 Spojení č. 5 – puzzle

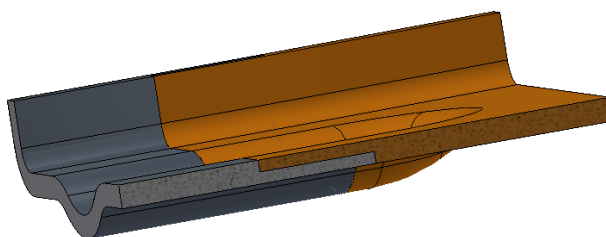
Jako varianta č. 5 bylo navrženo spojení pomocí tvaru. Inspirace pochází ze světoznámého puzzle, kdy jsou jednotlivé díly spojovány pomocí tvarových zámků (obr. 17). Při použití tohoto spojení však bude potřeba ještě zajistit pohyb v ose Z. Spojení totiž omezuje pohyb pouze ve dvou osách (X, Y). Osa Z slouží ke složení a rozebrání spoje.



*Obr. 17 Spojení č. 5 – puzzle*

### 2.3.1 Spojení č. 6 – lepený spoj

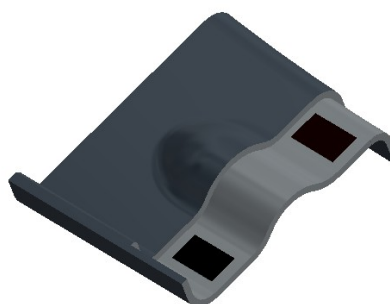
Jako předposlední varianta bylo navrženo nerozebíratelné spojení docílené přeplátovaným lepeným spojem (obr. 18). Při použití tohoto spojení budou částem dílu odebrány všechny stupně volnosti. Výhodou tohoto spojení bude pevnost i při hrubším zacházení, avšak na úkor skladovatelnosti.



*Obr. 18 Lepený spoj*

### 2.3.2 Spojení č. 7 – magnet

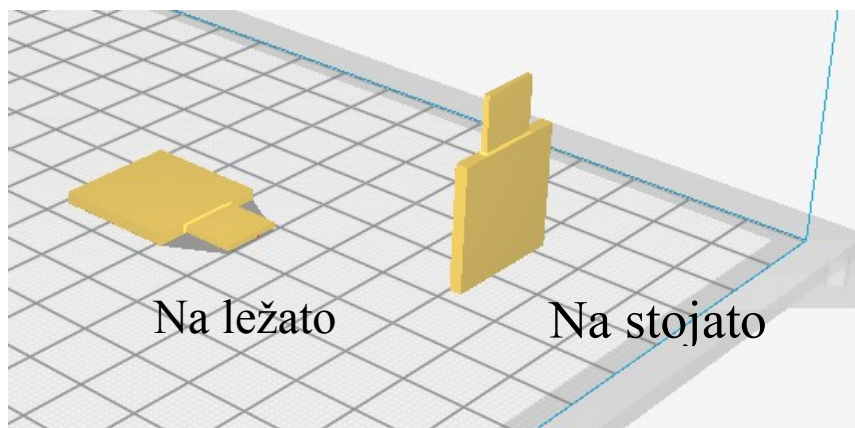
Poslední varianta návrhu spojení jednotlivých částí dílu byla založena na použití magnetické síly. Použití magnetické síly odebere částem dílu všechny stupně volnosti. Podmínkou této varianty bylo použití dostatečně silných, ale tenkých magnetů, aby je bylo možné umístit do tloušťky materiálu (obr. 19).



*Obr. 19 První část dílu s magnety*

## 2.4 Testovací tisk jednotlivých spojů

Jelikož má vytisknutý díl tloušťku pouze 2 mm, dostaly se rozměry některých variant spojek do velmi malých rozměrů (0,4 mm). Proto bylo potřeba nejdříve provést testovací tisk jednotlivých variant spojení. Testovací tisk probíhal ve dvou polohách a to na ležato a na stojato (obr. 20).

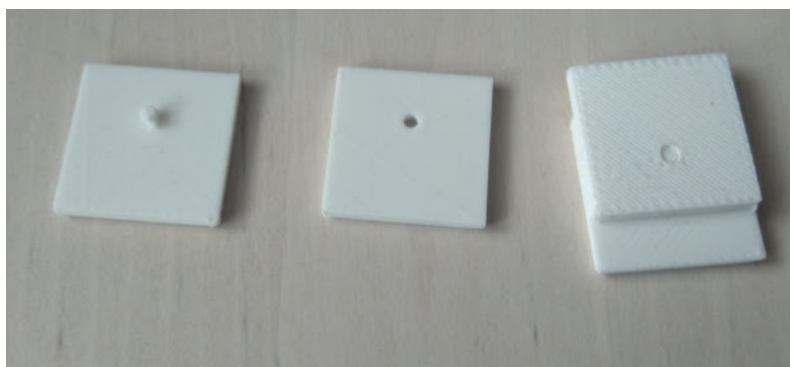


*Obr. 20 Poloha tisku na stojato a ležato*

Díky tomuto testu bylo zjištěno, jak velké přesahy je nutno namodelovat pro použití spojení s přesahem, a které spojky lze vůbec na dané 3D tiskárně vytisknout. Výsledky testovacího tisku jednotlivých variant spojení jsou uvedeny v této kapitole.

### 2.4.1 Spojení č. 1 – čep

Tisk prvního testovacího vzorku probíhal na tiskárně EASY 3D MAKER a modely jednotlivých částí byly namodelovány bez přesahu pro zjištění přesnosti tiskárny a smrštivosti materiálu. Po dokončení tisku nebylo potřeba odstraňovat žádné podpory, ani nijak upravovat velikost přesahu a oba díly bylo možné jednoduše spojit (obr. 21). Tisk byl tedy úspěšný a již nebylo potřeba ustavovat modely do jiné polohy při tisku. Zajímavostí bylo, že i když byl model vytvořen bez přesahu, tak tiskárna svou nepřesností chodu, přesahu docílila. Spojení č. 1 – čep bylo proto použito pro spojování vytištěných částí dílu.



*Obr. 21 Vytisknutý testovací vzorek varianty spojení č. 1 – čep*

#### 2.4.2 **Spojení č. 2 – pero**

Při dalším testovacím tisku byly vytištěny modely vzorku pro variantu spojení č. 2. Modely byly opět namodelovány bez přesahu ze stejného důvodu, jako tomu bylo při testovacím tisku spojení č. 1 – čep. Tisk probíhal v poloze tzv. na ležato.

Po dokončení tisku již bylo vidět, že díl obsahující drážku není dokonale vytištěn. Po odstranění dílů z tiskové podložky bylo zjištěno, že i druhý díl není dokonale vytištěn. Problémy byly způsobeny tisknutými podporami, které v prvním případě „zalepily“ drážku, a také nedokázaly udržet horní vrstvu materiálu při stavbě. V případě pera, podpory také nedokázaly udržet materiál při stavbě spodní plochy pera v dostačujících rozměrech. Vadné plochy lze vidět na obrázku 22 a „zalepenou“ drážku podporami na obr. 23.



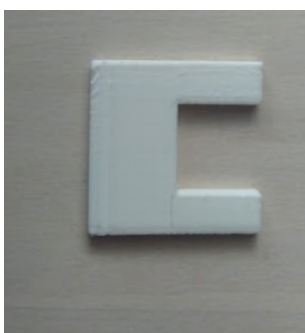
*Obr. 22 Zborcené plochy testovacích dílů*



*Obr. 23 Díra vyplněná podporami*

Proto byl zahájen druhý testovací tisk, při kterém byla změněna poloha ustavení modelu při tisku (tzv. na stojato). Již při zpracovávání modelů ve sliceru se projevovaly problémy s tloušťkou stěny drážky, kterou slicer vůbec nezobrazoval. I přes to byl zahájen tisk. Po dokončení tisku bylo zjištěno, že díl obsahující pero byl již vytištěn správně. Avšak díl s drážkou ne. Tak jak se model zobrazoval ve sliceru bez stěn drážky, tak byl i vytištěn (obr. 24).

Tisk varianty spojení č. 2 – pero tedy nebyl úspěšný. Důvodem byly nejspíše malé tloušťky stěn (0,5 mm), které při použití trysky s vnitřním průměrem 0,5 mm nelze vytisknout. Varianta proto nemohla být použita pro spojování jednotlivých vytisknutých částí dílu.



*Obr. 24 Chybně vytištěný díl s dírou*

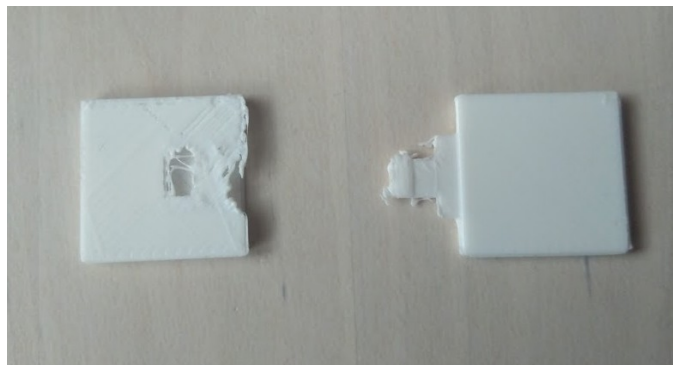
### 2.4.3 **Spojení č. 3 – pero s úkosem**

Varianta spojení dílů č. 3 byla založena na principu spojení č. 2 – pero. Proto se předpokládal podobný výsledek jako u varianty spojení č. 2, a proto byly modely hned ustaveny do polohy tzv. na stojato. Problémy se vyskytly již při zpracování modelu slicerem, kdy opět nebyly zobrazeny stěny drážky. Následný tisk dopadl také tak. Díl s perem byl vytištěn správně i s namodelovaným úhlem, avšak díl s drážkou byl opět bez bočních stěn jako na obrázku 24.

### 2.4.4 **Spojení č. 4 – Snap Fit**

Jako další byl na řadě testovací tisk zacvakávacího spoje. Jelikož tato varianta využívá opět otvor umístěný v tloušťce stěny, byl předpokládán podobný výsledek jako u variant č. 2 – pero a č. 3 – pero s úkosem. Modely dílů byly ustaveny nejdříve tzv. na ležato. Při zpracování modelů slicerem proběhlo vše v pořádku. Zato tisk už tak v pořádku nebyl. Díra byla znova „zalepena“ podporami a vrchní stěna byla částečně zborcená. Tisk

západky nedopadl o moc lépe. Podpory ze spodní strany nedokázaly udržet materiál při stavbě spodní plochy a ani západka na horní straně nebyla moc povedená. Na obrázku č. 25 lze vidět zborcenou horní stěnu díry a špatně vytištěnou západku z důvodu zborcení spodní plochy na podporách.



*Obr. 25 Zborcené plochy při testovacím tisku*

Protože se tisk v poloze na ležato nepovedl, byly oba modely při přípravě tisku ve sliceru umístěny tzv. na stojato. Slicer opět odmítl generovat kód pro stěny díry, které byly nejspíše příliš tenké, ale také vynechal část západky u druhého dílu. Po předchozích zkušenostech proto nebyl tento tisk již zahájen.

Na obrázku č. 26 lze vidět zborcenou plochu spojenou s podporami, které nelze odstranit klasickým odlomením.



*Obr. 26 Zborcená plocha pevně spojená s podporami*

#### 2.4.5 **Spojení č. 5 – puzzle**

Ještě před zahájením příprav na tisk byly po předchozích zjištěních do varianty spojení č. 5 vkládány velké naděje. Tato varianta totiž při tisku v poloze na ležato nepotřebuje žádné podpory a ani se na ní nenacházejí žádné tenké stěny. Modely byly opět



namodelovány bez přesahu, aby bylo možno zjistit velikost smrštění materiálu. Poloha modelu při přípravě ve sliceru byla určena samozřejmě na ležato.

Při dokončení tisku a sejmutí dílů z tiskové podložky bylo zjištěno, že díly lze bez jakékoli další úpravy spojit (obr. 27). Spojení drželo dostatečnou silou, a proto bylo vyhodnoceno jako vyhovující pro spojování jednotlivých částí vytištěného dílu. Překvapením byla třecí síla, která držela obě části pohromadě i při působení síly v ose Z. V ose Z totiž tato spojka neodebírá jednotlivým částem stupeň volnosti pohybu.



*Obr. 27 Varianta spojení č. 5 – puzzle*

#### **2.4.6 Spojení č. 6 – lepený spoj**

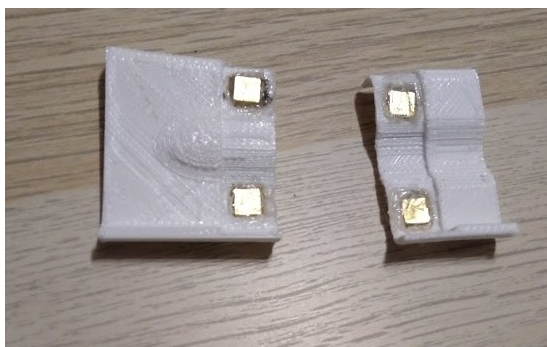
Varianta spojení č. 6 nebyla samostatně vytištěna. Na jejím základě přeplátovaného spoje byla totiž založena následující varianta č. 7 s magnety, a proto byl použit testovací díl z varianty č. 7, čímž došlo k úspoře materiálu při testovacím tisku. Ještě před nalepením magnetů do otvorů bylo odzkoušeno přiložení obou dílů k sobě bez lepidla, kvůli kontrole přesnosti tisku. Tento úkon dopadl dobře, a proto lze variantu s lepeným přeplátovaným spojem použít pro spojování jednotlivých částí dílu.

#### **2.4.7 Spojení č. 7 – magnet**

Pro testovací tisk varianty spojení č. 7 s využitím magnetů byla použita část originálního modelu, který byl upraven podle vzoru přeplátovaného spoje. V místě přeplátování byly namodelovány díry pro následné vlepení magnetů.

Po vytištění dílů byly pomocí tavné pistole vlepeny do otvorů magnety (obr. 28). Byly použity neodymové magnety s rozměry (5 x 5 x 1) mm s teoretickou nosností ve směru

kolmém na magnetickou plochu 0,49 kg. Neodymové magnety byly použity z důvodu jejich velké přitažlivé síly při malé ploše oproti klasickým feritovým magnetům<sup>22</sup>.



*Obr. 28 Obě části dílu s vlepenými magnety*

Při testování spojení bylo zjištěno, že magnety plní svoji funkci (drží obě části dílu pohromadě), ale pouze malou silou. Při manipulaci s testovacím dílem docházelo k rozdělení. Pro reálné použití by bylo potřeba použít silnější magnety. Dosavadní magnety však mohou sloužit jako fixace jednotlivých částí dílu při ustavení na měřicím přípravku. Pokud s dílem není totiž manipulováno, magnety dokážou udržet jednotlivé části v potřebné poloze (obr. 29).

Tuto variantu spojení proto lze s určitým omezením použít.



*Obr. 29 Obě části dílu spojené pomocí magnetů*

#### 2.4.8 Shrnutí

Po vytisknutí a otestování jednotlivých druhů spojení lze říct, že použitelné druhy spojení jsou spojení č. 1 – čep, 5 – puzzle, 6 – lepený spoj a 7 – magnet. Tyto vybrané varianty byly následně zakomponovány do modelu výlisku a jednotlivé části modelu posléze vytisknuty. Celý tento postup popisuje následující kapitola.

## 2.5 Tisk modelu výlisku s vybranými druhy spojů

Tato kapitola popisuje tisk jednotlivých částí modelu výlisku, kdy bude model pokaždé vytištěn pouze s jednou variantou pro spojení. Pro tisk celých výrobků byly použity pouze varianty spojení, které vyšly jako vyhovující při testovacím tisku (1 – čep, 5 – puzzle, 6 – lepený spoj a 7 – magnet).

Poloha ustavení modelu na tiskové ploše byla zvolena tak, aby vytvořené tiskové podpory co nejméně zasahovaly do tvarové plochy dílu.

Tisk částí modelu výlisku probíhal na třech tiskárnách, uvedených v kapitole 2.2. Díky tomu bylo možné následně porovnat rozdíly v kvalitě tisku obecných tvarových ploch jednotlivých tiskáren.

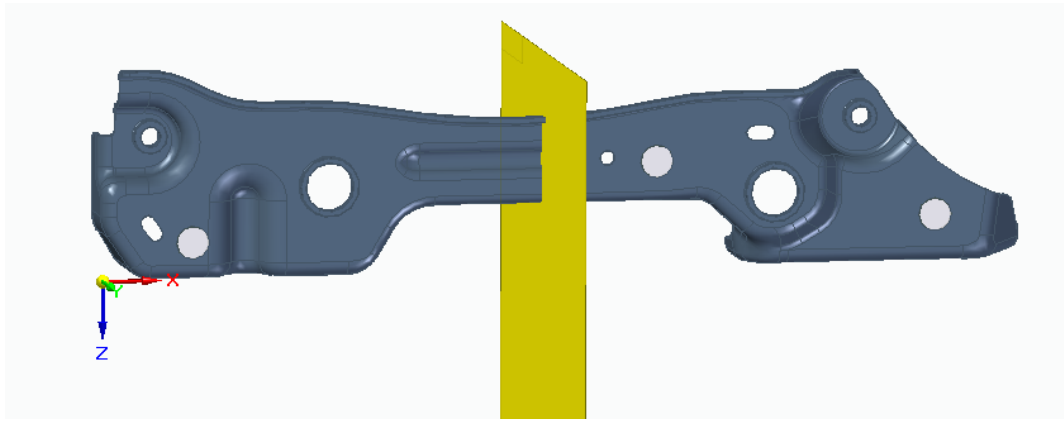
### 2.5.1 Výrobek se spojem č. 1 – čep

#### Příprava modelu

První z použitelných variant spojení byla varianta č. 1 – čep. Před samotným zahájením tisku bylo potřeba upravit model dílu. Model dílu byl získán ve formátu .par, programu Solid Edge, a proto veškerá úprava probíhala v tomto programu.

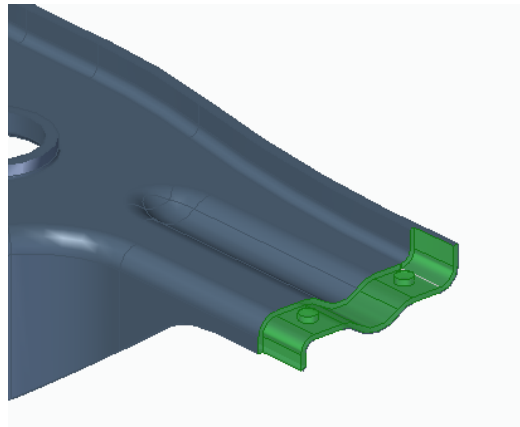
První úpravou modelu bylo vytvoření kruhových neprůchozích děr o  $\varnothing$  10 mm, do kterých budou po vytisknutí vlepeny kolečka z ocelového plechu sloužící pro upínání magnety na měřicí přípravek. Takto upravený model byl následně používán i při úpravách pro ostatní varianty spojení.

Nejdříve bylo potřeba určit polohu dělicí roviny (obr. 30). Při určování polohy muselo být splněno několik podmínek. První podmínkou bylo rozdělení dílu na části takové velikosti, aby bylo možno jednotlivé části umístit velikostně na tiskovou plochu. Další podmínkou umístění dělicí roviny byl prostor alespoň 10 mm z levé strany dělicí roviny pro namodelování spojky. Spojka totiž nesměla procházet přes jakoukoli z funkčních ploch, které byly dány výkresem.



*Obr. 30 Poloha dělicí roviny*

Po úspěšném rozdělení dílu na dvě části následovala úprava první části dílu s názvem „Levy\_kus\_1.par“. Nejdříve byla odebrána polovina tloušťky stěny (odebrán 1 mm) v délce 10 mm. Následovalo vytvoření dvou čepů, které budou zapadat do otvorů protikus. Poloha čepů byla určena tak, aby byly vytvořeny na rovné ploše (obr. 31). Rozměr čepů byl  $\varnothing$  3 mm. Tímto byla úprava první části dílu u konce.



*Obr. 31 Upravený model levé části dílu*

Dále bylo potřeba upravit druhou část dílu. Tato úprava probíhala za pomoci funkce „Odečtení“. Do modelu celkového dílu bylo potřeba nahrát model již upravené části (Levy\_kus\_1.par) a pomocí funkce „Odečtení“ odebrat část modelu. Tímto vznikla druhá polovina dílu, která tvořila přesný protikus. Vznikl tak díl s názvem „Pravy\_kus\_1.par“. Dle předchozího testovacího tisku nebylo potřeba již modely nijak upravovat ve vztahu k uložení s přesahem, a proto byly oba modely uloženy jako soubor .stl, se kterým dokáže pracovat slicer.

## **Příprava tisku a tisk**

Jelikož každá z částí vyplňovala tiskovou podložku skoro až do jejích maximálních rozměrů, musely být jednotlivé díly tisknuty postupně. Pokaždé byly jednotlivé části umístěny svojí délkou na úhlopříčku tiskové plochy. Pro tisk byla vybrána tiskárna EASY 3D MAKER (Pravy\_kus\_1.par) a CREALITY Ender 3 (Levy\_kus\_1.par).

Po vytištění obou částí dílu bylo potřeba odstranit tiskové podpory. Podpory byly odstraněny za pomoci plochého šroubováku. Po odstranění podpor bylo vidět, že spojovací čepy jsou správně vytištěny a díry na druhé části dílu také (obr. 32). Avšak při spojení obou částí dohromady bylo zjištěno, že síla vzniklá přesahem a výškou čepu není dostačující pro spojení obou dílů dohromady. Z důvodu malé výšky čepu proto nelze tento typ spojení pro daný výrobek použít. Tudíž neproběhla ani jeho rozměrová kontrola, ale pouze hodnocení kvality povrchu.



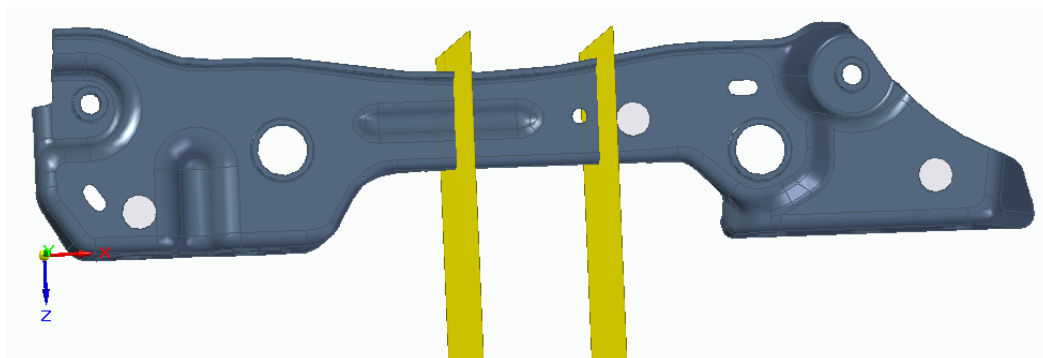
*Obr. 32 Obě vytisknuté části*

### **2.5.2 Výrobek se spojem č. 5 – puzzle**

#### **Příprava modelu**

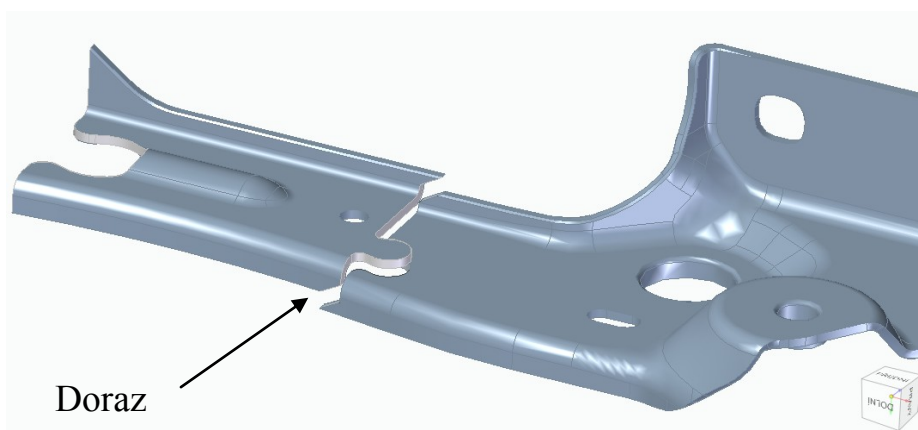
Jako další přišel na řadu tisk dílu s variantou spojení č. 5 - puzzle. Bylo potřeba znova upravit model dílu a rozdělit jej na více částí. Rozdělení modelu proběhlo tentokrát na tři části, aby bylo možno vyzkoušet dvě různé velikosti spojek.

Pro úpravu byl použit již model s otvory pro ocelová plechová kolečka. Nejdříve byly určeny dvě dělicí roviny (obr. 33), které musely opět splňovat podmínku velikosti jednotlivých částí, a také musely ležet mimo funkční plochy dané výkresem.



*Obr. 33 Poloha dělících rovin*

Úprava pokračovala nakreslením skici obsahující tvar spojky o poloměru R10 s umístěním kolmo na první dělící rovinu. Touto skicou byl následně model ořezán a vznikla tak jeho první část nazvaná „Levy\_kus\_5.par“. Vytvoření druhé části dílu s názvem „Pravy\_kus\_5“ probíhalo opět ze základního modelu s otvory pro plechy. Byla vytvořena druhá dělící rovina a kolmo na ni vytvořena skica. V této skice byl nakreslen tvar spojky, který nyní měl pouze poloměr R5. Protože však u spojení tvarem není kromě tření nijak omezen pohyb jednotlivých částí v ose Z, bylo potřeba namodelovat ještě tvarové dorazy (obr. 34). Tyto dorazy budou omezovat pohyb v jednom směru osy Z. Druhý směr nelze omezit z důvodu smontovatelnosti jednotlivých částí do sebe. Dorazy budou namodelovány pouze u spojky ležící u druhé dělící roviny. Důvodem bylo zjištění pevnosti spoje bez dorazů při manipulaci s celým dílem.



*Obr. 34 Namodelovaný tvar dorazu*

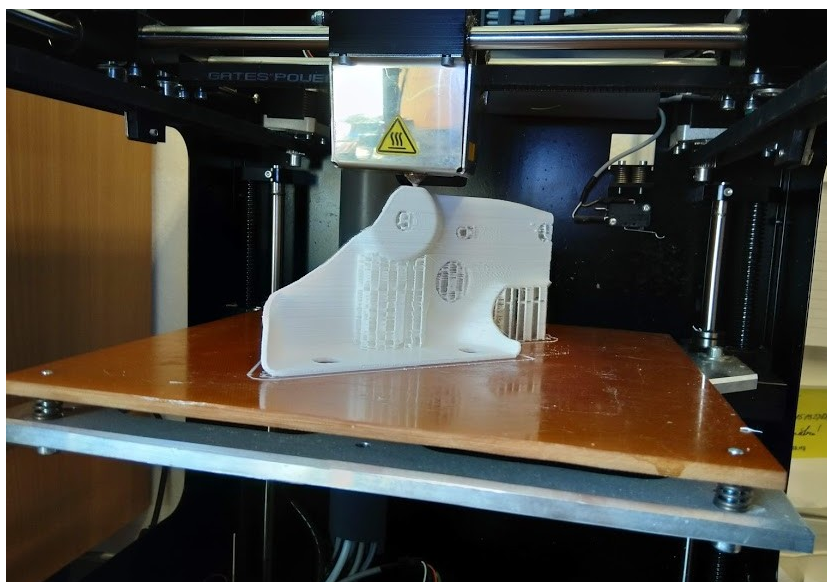
Po ořezání modelu pomocí skici kolmé na druhou dělící rovinu vznikl díl s názvem „Pravy\_kus\_5.par“. Následujícím krokem bylo vytvoření zbylého prostředního dílu, který musí obsahovat negativy obou tvarových spojek. Pro dosažení dokonalého negativu včetně negativu dorazů byla použita zase funkce „Odečtení“ v originálním modelu s otvory

pro plechová kolečka. Do modelu byly nahrány oba již upravené modely (levá i pravá část), čímž vznikla třetí část dílu nazvaná „Prostredni\_kus\_5.par“.

Všechny tři modely jednotlivých částí dílu byly uloženy ve formátu .stl.

### **Příprava tisku a tisk**

Tisk všech tří částí modelu probíhal na 3D tiskárně EASY 3D MAKER. Díly byly tisknuty postupně, protože jejich velikost nedovolila tisk více dílů najednou. Při nastavování tiskových parametrů byla snížena rychlost tisku. Při předchozím tisku byla na vytištěném díle místa, kde byly některé vrstvy posunuty v osách X a Y. Předpokládalo se, že snížením rychlosti tisku bude tato nepřesnost tiskárny vyřešena. Poloha modelů byla ve sliceru určena tak, aby vytvořené podpory zasahovaly co nejméně do tvaru dílu. Průběh tisku lze vidět na obr. 35.



*Obr. 35 Tisk pravé části dílu*

Tisk všech částí proběhl v pořádku. Na tvaru větší spojky byly vidět sice malé nepřesnosti, které by však na spojení neměli mít vliv. Nepřesnosti v podobě posunutých vrstev v osách X a Y na díle zůstaly i po snížení tiskové rychlosti. Způsobeny tedy budou jiným důvodem. Tiskové podpory byly odstraněny plochým šroubovákem. Protože část podpor zasahovala také přímo do tvaru spojovacího tvaru, bylo potřeba použít brusný papír k jemnému dokončení spojovacího tvaru. Po této malé úpravě bylo možné všechny tři díly spojit dohromady (obr. 36).



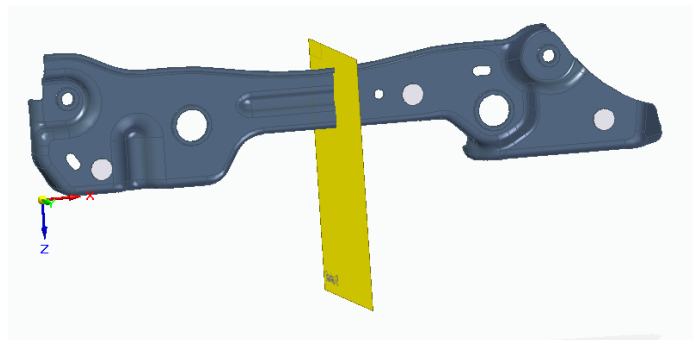


*Obr. 36 Všechny tři vytisknuté části*

### 2.5.3 Výrobek se spojem č. 6 – lepený spoj

#### **Příprava modelu**

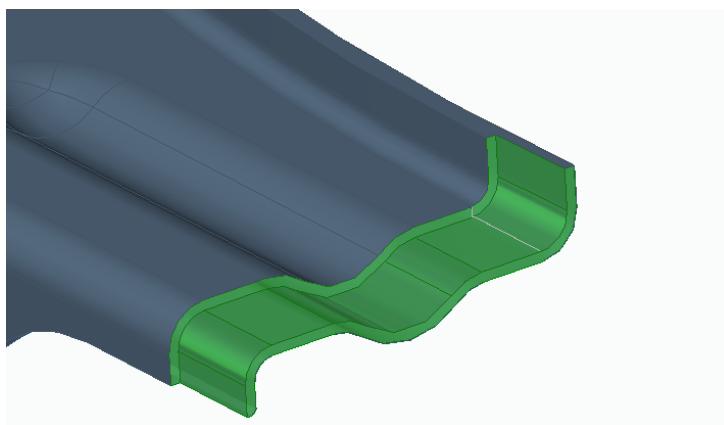
Při úpravě modelu byl použit opět model s již vymodelovanými otvory pro plechová kolečka. Byla vytvořena dělicí rovina (obr. 37), která splňovala podmínky rozdělení dílu na části vhodné velikosti pro tisk a umístění mimo jakékoli funkční plochy. Z jedné strany od dělicí roviny (v ose X) bylo potřeba mít k dispozici alespoň 10 mm bez funkčních ploch pro modelovou úpravu dílu přeplátovaného spoje.



*Obr. 37 Dělicí rovina*

Dále byla úprava modelu již velice jednoduchá. Podle dělicí roviny, byla vytvořena rozdělením první část dílu. Na této části byla odebrána polovina tloušťky modelu (odebrán 1 mm) do délky 10 mm. Tím byly úpravy první části modelu ukončeny. Tvar vzniklé plochy lze vidět na obrázku 38. Vznikl tím soubor s názvem „Levy\_kus\_6.par“. Tento model byl následně nahrán do modelového prostoru celého modelu a pomocí funkce „Odebrání“ vytvořena druhá část dílu s názvem „Prava\_cast\_6.par“.



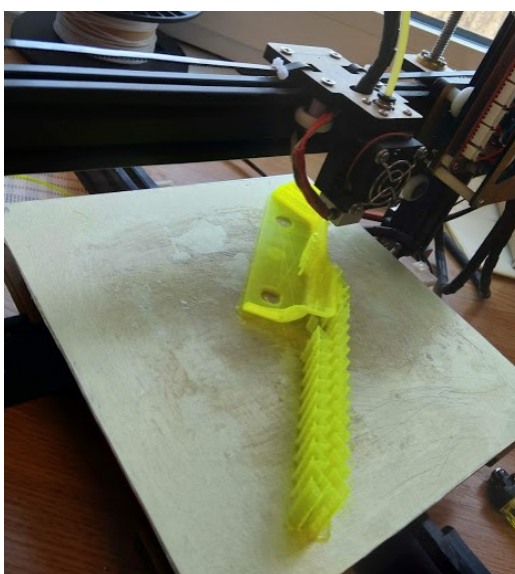


*Obr. 38 Upravená plocha pro překlátovaný spoj*

Použití funkce odebrání, bylo důležité hlavně kvůli správnému kopírování tvarových ploch, které se na díle nacházejí. Jejich tvar se mění skoro s každým milimetrem, a proto nelze plochy rozšiřovat pomocí funkce „Protáhnout plochu“. Je tedy důležité vždy při modelování odebrat, ne přidávat.

### **Příprava tisku a tisk**

Tisk dílu s variantou spojení č. 6, neboli překlátovaný lepený spoj, probíhal na tiskárně Anet A2. Díl byl rozdělen na dvě části. I když má tiskárna Anet A2 o 20 mm větší tiskovou plochu, nebylo možné tisknout obě části dílu najednou. Jako slicer byl použit software Cura, který se svým ovládáním velice podobal dříve použitému softwaru 3Dfactories Repetier Host. Při tisku bylo také použito lepidlo na tiskovou podložku, aby se zamezilo odlepení první vrstvy při následných teplotních rozdílech při více vrstvách. Poloha modelu byla zvolena tak, aby tiskové podpory zasahovaly co nejméně do plochy dílu (obr. 39).



*Obr. 39 Průběh tisku*

Průběh tisku proběhl bez problémů. Na vytištěných dílech bylo potřeba odstranit tiskové podpory. Odstraňování probíhalo pomocí plochého šroubováku, ale jelikož některé části podpor držely více, bylo je potřeba obrousit brusným papírem zrnitosti 400. Po odstranění podpor přišlo na řadu lepení obou dílů k sobě. Na jednu plochu spoje bylo nanášeno vteřinové lepidlo Loctite Super Bond 3 a přiloženo k druhé části dílu. Zajištění dílů proti pohybu do doby zaschnutí proběhlo běžnými prádelními kolíky. Po úplném zaschnutí lepidla bylo zjištěno, že obě části pevně drží u sebe i při hrubším zacházení. Proto tento spoj vyhovuje a lze jej využívat.

#### 2.5.4 Výrobek se spojem č. 7 – magnet

Jako poslední, měl na řadu přijít tisk dílu, do kterého budou následně vlepeny magnety. Tento díl však nebyl celý vytištěn. Testovací magnety již byly použity při testovacím tisku, kde byly vlepeny do vytištěných zkušebních částí (nebylo možno je opětovně použít). Při následné manipulaci bylo zjištěno, že síla magnetu pouze dokáže udržet díly u sebe při ustavení do přípravku a jelikož úprava modelu vycházela z přeplátovaného lepeného spoje, byl by opakovaný tisk neekonomický. Tvarová přesnost byla totiž ověřena již u předchozího přeplátovaného lepeného spoje.

## 2.6 Měření jednotlivých výrobků

Po vytisknutí a spojení jednotlivých částí dílů bylo potřeba zjistit rozměrové odchylky vytisknutých dílů od modelu výlisku. Proto byly vyhovující výrobky (se spoji č. 5 – puzzle a č. 6 – lepený spoj) upnuty na měřicí přípravek a pomocí souřadnicového měřicího stroje GLOBAL Advantage od firmy HEXAGON změřeny. Měřicí program byl použit stejný, jako se používá pro měření originálního plechového výlisku.

Proto, aby bylo možné výrobky změřit, musely být nejdříve nalepeny plechové kolečka do již dříve určených neprůchozích děr. Pro nalepení bylo použito již dříve použité vteřinové lepidlo Loctite Super Bond 3. Kolečka byly vystřiženy z plechu o tloušťce 0,2 mm.

## 2.6.1 Měření výrobku se spojem č. 5 – puzzle

Při skládání výrobku dohromady před upnutím do měřicího přípravku bylo zjištěno, že třecí síla vzniklá přesahem spojení již není dostatečně velká, aby udržela jednotlivé díly u sebe při manipulaci. Opakovaným spojováním a rozpojováním spoje došlo totiž k rychlému opotřebení, a tím ke vzniku vůle. Tato skutečnost ukázala, že materiál PLA není vhodný pro jakékoli spojení s přesahem, které je potřeba po rozebrání znova složit.

Proto byly jednotlivé díly spojeny přímo v měřicím přípravku, kde již byly přidržovány upínací magnetickou silou. Pro zlepšení upínací magnetické síly by bylo vhodnější místo plechových koleček na základnu výrobku nalepit malé magnety. Magnety přípravku působící na zadní stranu výrobku totiž neměly dostatečnou sílu k udržení dílu při dotyku sondy (výrobek se v přípravku pohyboval). Řešením bylo zatížení základny výrobku (obr. 40). Následné měření již proběhlo bez komplikací.



*Obr. 40 Průběh měření výrobku se spojem č. 5 – puzzle*

Při vyhodnocení výsledků měření bylo zjištěno, že přesnosti jednotlivých ploch, kontur a poloh otvorů se velice liší. Při měření odchylek tvaru čelních dosedacích ploch byly naměřeny hodnoty okolo 0,3 mm. Občas se však vyskytly i hodnoty blížíící se k 0,7 mm.

Následovalo vyhodnocení tvaru vnitřní plochy výrobku. Zde lze říci, že přesnost skoro odpovídá požadavkům výrobce na výlisek. Hodnoty odchylek se pohybují v rozmezí

od -2,65 mm do 0,67 mm. Vysoké odchylky v určitých místech mohou být způsobeny nedokonalostí povrchu po odstranění tiskových podpor.

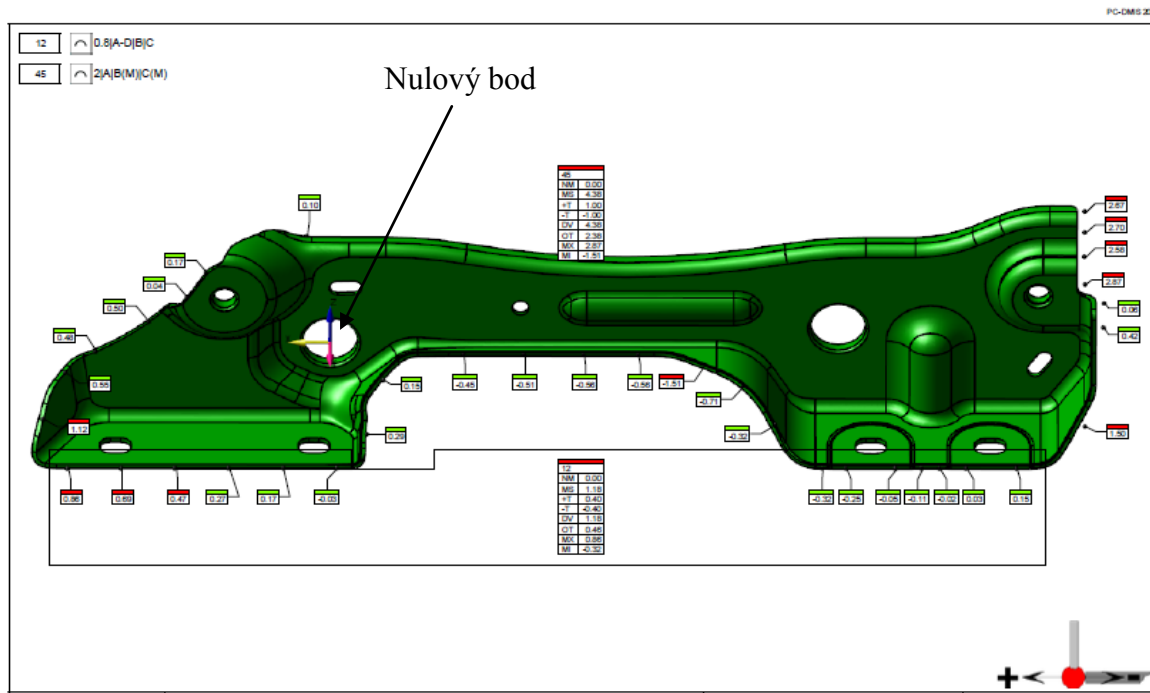
Další na řadě bylo vyhodnocení přesnosti základny a výšky průtaží (lemů) dvou hlavních otvorů. Naměřené odchylky na spodní straně výrobku se pohybovaly stabilně okolo 0,5 mm. Tato hodnota není nejlepší, ale při přihlédnutí na její stabilitu, ji lze akceptovat. Při měření výšky průtaží (lemů) byly naměřeny hodnoty od -0,06 mm do 0,45 mm. Velikost odchylek výšky jednotlivých průtaží (lemů) není v celé délce průtaže (lemu) stabilní, jako tomu bylo u spodní strany výlisku.

Při vyhodnocování odchylek kontury byl zjištěn posun ve směru délky dílu až o 2,7 mm. Tato velká odchylka byla nejspíše způsobena nepřesností a opotřebením spojek jednotlivých částí výrobku (viz. obrázek 41). Odchylky kontury lze vidět na obr. 42.



*Obr. 41 Nepřesnosti spojek č. 5 – puzzle*

Jako poslední proběhlo vyhodnocení poloh jednotlivých otvorů. Při sledování jednotlivých odchylek otvorů lze najít spojitost s odchylkami kontury a nepřesností spojek ve směru délky výrobku. Odchylka polohy otvorů ve směru délky dílu postupně roste v závislosti na umístění od nulového bodu (obr. 42) až do hodnoty 2,75 mm.

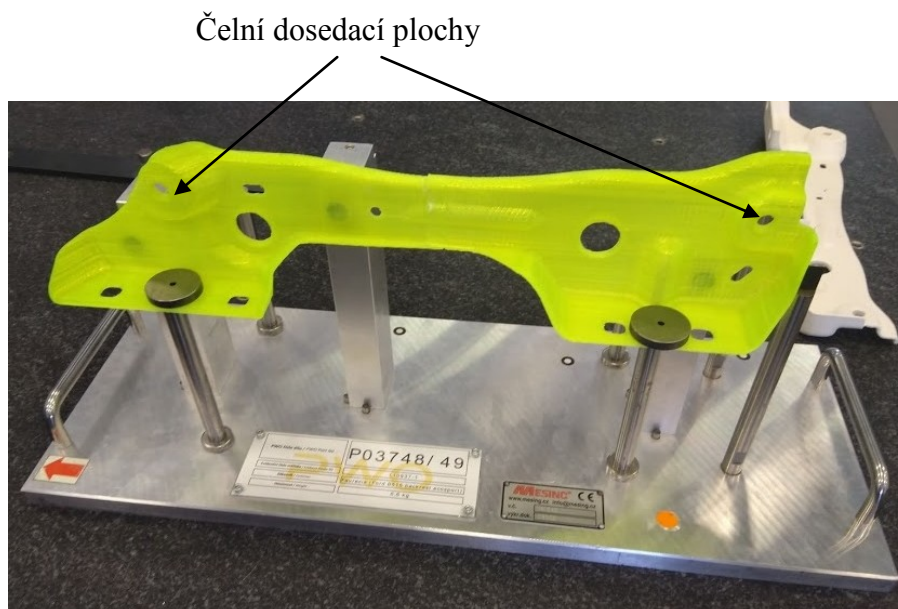


Obr. 42 Náhled protokolu měření z přílohy B (měření kontury)

Po vyhodnocení výsledků měření lze říct, že díl lze použít pro vytvoření programu pro souřadnicový měřicí stroj, avšak s velkou rezervou. Přesnost některých ploch je sice dostačující, ale posunutí ve směru délky dílu způsobené nepřesností a opotřebením spojek velice komplikuje programování. Kompletní měřicí protokol výrobku se spojením puzzle je přiložen v příloze B.

## 2.6.2 Měření výrobku se spojem č. 6 – lepený spoj

Po naměření výrobku se spojem číslo 5 – puzzle přišlo na řadu měření výrobku s lepeným spojem (spoj č. 6). Díky nerozebíratelnému spojení nevznikl problém s opotřebením spojovaných ploch a následným rozpojováním. Na výrobek byly již předem nalepeny plechové kolečka pro upnutí v měřicím přípravku, a proto nebylo možno vyzkoušet upnutí na měřicí přípravek s pomocí nalepených magnetů. Při spuštění měřicího programu se tak objevil opět stejný problém, jako u předchozího měření s posunem výrobku při dotyku sondy. Proto byl výrobek znova zatížen v místech dotyku spodní základny (obr. 43).



*Obr. 43 Ustavení výrobku se spojem č. 6 na měřícím přípravku*

Při měření odchylek tvaru čelních dosedacích ploch bylo zjištěno, že záleží, na kterém ze dvou částí dílu se dosedací plocha nachází (jestli na díle s nulovým bodem nebo bez). Na pravém díle s počátkem souřadného systému se hodnota odchylek tvaru pohybuje ve velice příznivých hodnotách od  $-0,09$  mm do  $0,1$  mm. Při měření odchylek u druhé dosedací plochy, která se nachází na levém díle výrobku, byly již naměřeny několikanásobně vyšší odchylky. Jejich hodnota se pohybovala od  $-0,39$  mm do  $-0,12$  mm. Tato skutečnost poukazuje na fakt, že díl je zkroucený. Zkroucení může být způsobeno nepřesným slepením obou částí k sobě nebo vnitřním pnutím, které vzniklo při chladnutí dílu při tisku.

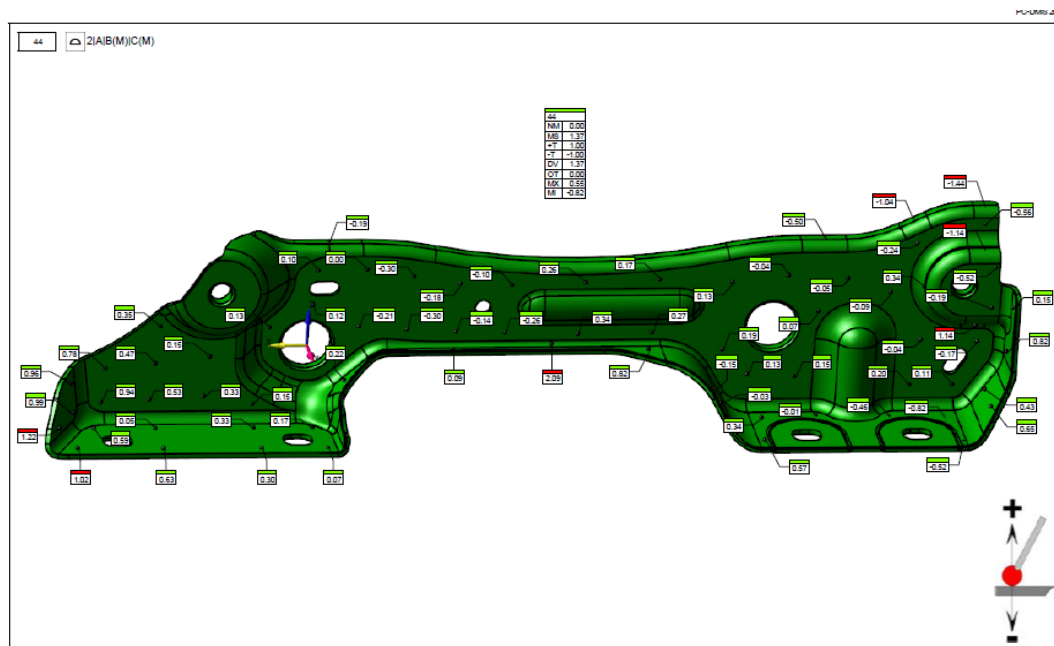
Při vyhodnocování odchylek tvaru celé vnitřní plochy byly naměřeny hodnoty odchylek od  $-1,44$  mm do  $1,22$  mm. Náhled rozložení odchylek je na obrázku 44. V místě spoje byla naměřena dokonce hodnota  $2,09$  mm. Nepřesnost v místě spoje byla způsobena zakřiveným rohem jednoho z dílů. Kromě rohových hodnot zkreslených zkroucením, lze považovat naměřené odchylky za velmi dobré.

Vyhodnocení odchylek výšky průtaží (lemů) obou otvorů dopadlo velice dobře. Výška průtaží (lemů) v celé délce obvodu byla konstantní a odchylky se pohybovaly v rozmezí od  $-0,21$  mm do  $0,1$  mm. Avšak odchylky spodní základny byly v rozmezí od  $-1,11$  mm do  $0,39$  mm. Zde již odchylky nemají konstantní hodnotu. Rozmanitost odchylek může být způsobena kromě nepřesnosti tiskárny také zkroucením dílu.



Při měření odchylek kontury se hodnoty pohybovaly v rozmezí od -1,14 mm do 1 mm. Rozložení hodnot odchylek kontury nenasvědčuje žádnému posunutí jednotlivých částí výrobku vůči sobě ve směru délky výrobku.

Poslední vyhodnocení se týká polohy otvorů na výrobku. Při porovnání naměřených odchylek s dovolenými odchylkami od zákazníka pro originální plechový výlisek většina otvorů svojí polohou nevyhovuje. Avšak nejvyšší odchylka polohy otvoru byla 0,93 mm, což pro vytvoření měřicího programu vyhovuje.



Obr. 44 Náhled protokolu měření z přílohy C (odchylky tvaru vnitřní plochy)

Po vyhodnocení jednotlivých měření lze konstatovat, že výrobek lze použít pro vytvoření programu pro souřadnicový měřicí stroj. Odchylky některých ploch a kontur sice překračují občas hodnotu 1 mm, ale poloha jednotlivých otvorů je pod touto hodnotou. Právě poloha otvorů je při vytváření programu nejvíce důležitá. Velikost zkroucení dílu lze zanedbat díky nastavení větší bezpečné vzdálenosti při měření v krajních bodech výrobku. Kompletní měřicí protokol výrobku s lepeným spojem je přiložen v příloze C.

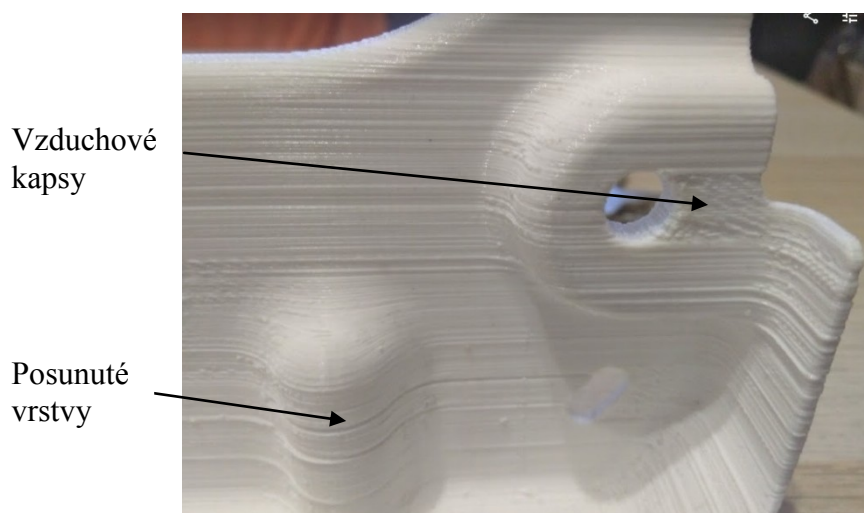
## 2.7 Zhodnocení řešených návrhů

Kapitola zhodnocení řešených návrhů porovnává oba měřené výrobky (výrobek se spojem č. 5 – puzzle a č. 6 – lepený spoj) z kvantitativní stránky, a také ze stránky kvality výrobků. U výrobku se spojem č. 1 – čep kapitola popisuje pouze kvalitativní zhodnocení povrchu dílu, který byl vytisknut na tiskárně od firmy Creality. Jeho měření totiž neproběhlo z důvodu nefunkčního spojení jednotlivých dílů.

### 2.7.1 Kvalitativní zhodnocení

Hodnocení kvality povrchu jednotlivých výrobků probíhalo pouze vizuální kontrolou.

U výrobku vytisknutého na tiskárně EASY 3D MAKER lze vidět mnoho pozůstatků po vytisknutých podporách, které nelze jednoduše odstranit broušením. Na výrobku lze také vidět nedokonalé první vrstvy kladené na vytvořených podporách. Dalším vizuálním problémem jsou místa s nedokonalým vyplněním materiálem. V těchto místech jsou viditelná místa, kde pozici materiálu vyplňují vzduchové kapsy. Tento problém bude nejspíše způsoben nekontinuální dodávkou filamentu během tisku nebo nedodržením naprogramované rychlosti tisku tiskárnou. Posledním vizuálním problémem je posunutí několika vrstev při tisku a následné vrácení na správnou polohu. Vznikly tím rýhy na jedné straně výrobku, které lze vidět na obr. 45. Na druhé straně výrobku se tento problém promítnul jako výstupky materiálu. Výstupky však bylo možno částečně zabrousit.



Obr. 45 Vady na výrobku z tiskárny EASY 3D MAKER

Na druhé straně výrobek tištěný na tiskárně Anet A2 dopadl o mnoho lépe. Odstranění podpor proběhlo jednoduše a povrch, se kterým přišly do kontaktu, bylo možno dokonale obrousit. Jediné zbytky podpor, které nebylo možné dokonale odstranit, se nacházejí na spodní straně horního lemu. Na tomto místě však nevádí, jelikož plocha není pro měření důležitá. Důležitá je horní plocha lemu, která obsahuje pouze malé schody, které při vytváření programu, nejsou překážkou. Tvarové plochy jsou vytištěny z vizuální stránky téměř dokonale, a dokonce i otvory vypadají svým tvarem a povrchem kvalitně.

Oproti výrobku vytisknutému na tiskárně EASY 3D MAKER nejsou vidět žádné posunuté vrstvy ani místa bez materiálu. Z pohledu kvalitativního zhodnocení je rozhodně výrobek vytisknutý na tiskárně Anet A2 tím lepším. Jeho kvalita povrchu dostačuje pro



vytváření měřicího programu. Oproti tomu kvalita výrobku z tiskárny EASY 3D MAKER je na hraně použitelnosti při vytváření programu. Výstupky materiálu, prohlubně, špatně kladené první vrstvy na podporách a další problémy v kvalitě povrchu zasahují do přesnosti při dotyku sondy. Řešením těchto problémů by možná byla změna materiálu. Při použití materiálu ABS, by totiž bylo možné některé nedokonalosti povrchu opravit leptáním v acetonu. Je však otázkou, nakolik by tento zásah ovlivnil rozměrovou přesnost.

Výrobek vytisknutý na tiskárně Creality ENDER 3 lze svou kvalitou povrchu srovnat s výrobkem vytisknutým tiskárnou Anet A2. Jeho povrch je rovný, bez jakýchkoliv vad, které by mohly komplikovat vytváření měřicího programu. Opět se objevily zbytky tiskových podpor na spodní straně horního lemu, jako tomu bylo u všech předešlých výrobků z ostatních tiskáren.

Z pohledu kvality povrchu jsou tedy použitelné výrobky vytisknuté na tiskárnách Anet A2 a Creality ENDER 3.

### 2.7.2 Kvantitativní zhodnocení

Měření hodnot odchylek od originálního modelu výlisku proběhlo pro každý kus z časových důvodů pouze jednou. Proto v této práci není provedeno žádné statistické vyhodnocení měření. Je počítáno s tím, že měření může obsahovat nahodilé chyby měření, které mohou měření zkreslit. Avšak pro zjištění použitelnosti výrobku při vytváření měřicího programu lze toto zkreslení akceptovat.

Naměřené odchylky obou měřených výrobků byly popsány v kapitole 2.6. Při jejich porovnání lze konstatovat, že výrobek se spojem č. 6 – lepený spoj je rozměrově přesnější. U výrobku se spojem č. 5 – puzzle sice nebylo naměřeno žádné zkroucení dílu, ale za to posunutí ve směru délky dílu zde bylo velmi vysoké. Toto posunutí se promítlo do přesnosti polohy otvorů, která je pro vytváření měřicího programu velmi důležitá. Celkově rozměrová a tvarová přesnost kopírovala kvalitu povrchu.

Z pohledu rozměrové přesnosti je pro vytváření měřicího programu vhodný výrobek se spojem č. 6 – lepený spoj.

## 2.8 Návrh na zlepšení

Při tisku a následném použití jednotlivých výrobků s různými druhy spojení vzniklo mnoho problémů, které omezovaly jejich použití. Nejčastějším problémem při tisku

jednotlivých výrobků a spojení byla přesnost a kvalita tisku. Tento problém lze vyřešit použitím jiné, kvalitnější tiskárny, která bude svými vlastnostmi převyšovat dosavadní použité tiskárny. Důležitým parametrem tiskárny je její přesnost a výška vrstvy. Proto doporučuji pořízení tiskárny Original Prusa i3 MK3S, která se stala vítězem několika celosvětových testů.

Při použití tiskárny, která dokáže tisknout z více materiálů najednou, by bylo možné i použití rozpustných tiskových podpor. Použití těchto podpor by vyřešilo problém s odstraňováním jejich zbytků z tvarových ploch, čímž by se určitě zlepšila kvalita dosaženého povrchu.

Problémy s opotřebením spojek byly způsobeny malou otěru vzdorností použitého materiálu. Tyto problémy vlastně znehodnotily všechny varianty rozebíratelného spojení na principu spoje s přesahem. Řešením problému by bylo použití jiného, více tvrdšího materiálu. Tyto požadavky splňují například materiály ABS nebo SBS. Více informací o těchto materiálech je uvedeno v kapitole 1.4.

Kvalitativní a materiálové problémy by se daly také vyřešit použitím tiskárny pracující na jiném principu. Pro dokonalou kvalitu povrchu, by bylo například vhodné, použít tiskárnu využívající technologii tisku SLA, o které je více napsáno v kapitole 1.3.1. Avšak u technologie SLA je potřeba počítat s řádově vyššími náklady na tisk.

Při měření obou výrobků byly zjištěny problémy způsobené spojkami jednotlivých dílů (zkroucení, posunutí). Tyto problémy by se daly vyřešit koupí velkoformátové tiskárny. Při použití velkoformátové tiskárny by zmizely všechny nepřesnosti vzniklé v místě spojení. Také by se tím vyřešil samozřejmě problém s opotřebením jednotlivých spojek.





*Obr. 46 Velkoformátová tiskárna BigRep ONE<sup>23</sup>*


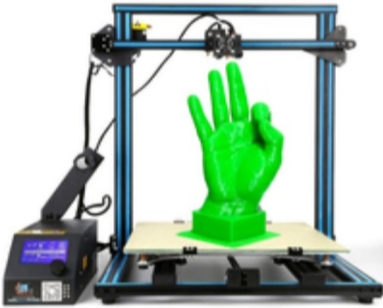


## 2.9 Ekonomické zhodnocení

Z ekonomického hlediska je použití 3D tiskáren z kategorie hobby, které mají relativně malou tiskovou plochu (okolo 200 mm v každé ose) a následné spojení jednotlivých dílů výhodné. Cena těchto tiskáren se pohybuje pod hranicí 30 000 Kč. Avšak při spojování tenkých výrobků nastává mnoho problémů, které následně neumožňují použití výrobku pro vytváření měřicího programu. Proto pořízení profesionální velkoformátové tiskárny bude rozhodně lepší volbou. Proto je již pouze na vedení firmy, zda li bude akceptovat testování různých spojení pro každý nový díl nebo raději vynaloží větší finanční prostředky pro pořízení velkoformátové tiskárny z kategorie středních nebo velkých tiskáren. V tabulce č. 5 je uveden přehled některých dostupných tiskáren z jednotlivých kategorií <sup>4</sup>.


Tab. 5 Návrh možných tiskáren dle velikosti stavební komory (část 1/3)

Název tiskárny	Velikost stavební komory [mm]	Cena [Kč]	Vzhled
<b>Kategorie: Malé hobby tiskárny</b>			
Original Prusa i3 MK3S <sup>24</sup>	250 x 210 x 210	19 990	
<b>Kategorie: Střední velikost tiskáren</b>			
Craftuniqué CraftBot 3 <sup>25</sup>	322 x 250 x 250	65 219	

Tab. 5 Návrh možných tiskáren dle velikosti stavební komory (část 2/3)

Název tiskárny	Velikost stavební komory [mm]	Cena [Kč]	Vzhled
BCN3D SIGMAX R19 <sup>26</sup>	420 x 297 x 210	119 669	
Creality ENDER CR10 S5 <sup>27</sup>	500 x 500 x 500	15 990	
3ntr A2 <sup>28</sup>	600 x 325 x 500	Na dotaz u obchodníka	
<b>Kategorie: Velké tiskárny</b>			
Builder Extreme 1500 PRO <sup>29</sup>	1100 x 500 x 820	Na dotaz u obchodníka	

Tab. 5 Návrh možných tiskáren dle velikosti stavební komory (část 3/3)

Název tiskárny	Velikost stavební komory [mm]	Cena [Kč]	Vzhled
BigRep ONE <sup>23</sup>	1005 x 1005 x 1005	Na dotaz u obchodníka	

Cena tiskáren je pouze orientační a může se měnit na základě časového vývoje trhu. Před koupí tiskárny je vhodné si nejdříve objednat zkušební tisk, pro zjištění kvality tisku. Může se totiž stát, že tiskárna nebude schopna vytisknout modely složitých tenkých výlisků v potřebné kvalitě.

V kategorii malých hobby tiskáren bez diskuzí vyhrává česká tiskárna Original Prusa i3 MK3S. Tato tiskárna se stala vítězem mnoha celosvětových testů v kvalitě tisku. Výhodou tiskárny je česká technická podpora a její cena ležící pod hranicí 20 000 Kč. Proto v této kategorii není uveden žádný jiný zástupce.

V kategorii středně velkých tiskáren je výhodné pořízení čínské tiskárny Creality ENDER CR10 S5. Její cena je dokonce nižší, než u tiskárny Original Prusa i3 MK3S. Nevýhodou je však absence jakékoli technické podpory ze strany výrobce tiskárny.

Pořízení profesionálních velkoformátových tiskáren může být cenově o několik desítek tisíc korun výše. Přesná cena dané tiskárny je pouze na dotaz u obchodníka a není v tabulce 5 proto uvedena. Řešením vysoké ceny velkoformátové tiskárny by bylo zajištění externí firmy, zabývající se velkoformátovým 3D tiskem. Tímto řešením by odpadla počáteční investice, jejíž návratnost nelze přesně časově určit. Záleží totiž na aktuální poptávce výroby lisovacích nástrojů.

## ZÁVĚR

Hlavním úkolem diplomové práce bylo navrhnout a odzkoušet různé možnosti spojení jednotlivých částí modelu výlisku. Spojky nesměly narušovat tvar výlisku, avšak musely být dostatečně pevné pro použití modelu při vytváření programu pro souřadnicový měřicí stroj.

V teoretické části byl popsán princip aditivní technologie výroby společně s vysvětlením potřebných pojmů týkajících se 3D tisku. Následoval teoretický rozbor jednotlivých technologií aditivní výroby, které se v současné době využívají.

V experimentální části bylo navrženo více druhů spojek. Bylo navrženo celkem sedm možností spojení. Po navržení bylo potřeba otestovat, zda bude vůbec možné spojky vytisknout dostupnými 3D tiskárnami. Při testovacím 3D tisku bylo zjištěno, že použitelné jsou pouze čtyři z navržených sedmi spojení (spojení čep, puzzle, lepený spoj a magnet). Ostatní druhy spojení nebylo možné dostupnými 3D tiskárnami správně vytisknout (pero, pero s úkosem a Snap Fit). Proto byly z dalšího postupu vyřazeny.

Po namodelování použitelných spojek do modelu výlisku byl zahájen tisk jednotlivých dílů (kromě dílu se spojem č. 7 – magnet, pro který nebyly dostupné magnety). Tisk probíhal na třech různých FDM tiskárnách, aby bylo možné následně porovnat rozdíly v kvalitě tisku.

Při spojování jednotlivých dílů k sobě bylo zjištěno, že varianta spojení č. 1 (spojení čepem), není pro danou tloušťku výrobku vyhovující. Byla proto vyřazena z měření. Následně se objevily problémy i se spojem č. 5 – puzzle, u kterého rychlé opotřebení spoje způsobilo rozpadání výrobku. I přes tento problém proběhlo měření. Proměřen byl i výrobek se spojem č. 6 – lepený spoj.

Po úspěšném měření odchylek od originálního modelu výlisku byly výrobky vzájemně zhodnoceny ze strany rozměrové, tak i ze strany kvality povrchu.

Na závěr práce byly uvedeny návrhy pro zlepšení a řešení jednotlivých problémů, které se při experimentu vyskytly, společně s návrhem použitelných 3D tiskáren.

V experimentální části bylo zjištěno, že pro vytvoření měřicího programu pro souřadnicový měřicí stroj je nejvhodnější výrobek se spojem č. 7 (lepený spoj) vyrobený na tiskárně Anet A2 nebo Creality ENDER 3. Ostatní druhy spojek nebylo možné na dostupných tiskárnách vytisknout v dostatečné kvalitě.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce. Také bych chtěl poděkovat Martinu Kolářovi z firmy PWO Czech Republic a.s. za umožnění spolupráce při experimentální části diplomové práce.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. *AXIOM TECH* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/>
2. HOMOLA, Jan. 3D-tisk.cz. *3D tisk* [online]. 15. 2. 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/3d-tisk/>
3. HAUSMAN, Kalani Kirk a Richard HORNE. *3D Printing for dummies*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, [2014]. --For dummies. ISBN 978-1-118-66075-1
4. PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *ZÁKLADY 3D TISKU* [online]. In: . 2014, 15. 12. 2014 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
5. Josef Průša. *Představujeme Original Prusa SL1 – novou open-source SLA 3D tiskárnu* [online]. 25. 9. 2018 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/original-prusa-sl1-nova-sla-3d-tiskarna/>
6. HOMOLA, Jan. 3D-tisk. *Stereolitografie* [online]. 26. 2. 2013 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
7. KUTIL, Jaroslav. *Vliv průměru trysky na kvalitu tisku 3D tiskárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 69s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
8. Svět Hardware. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl* [online]. 21. 2. 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
9. Prusa3d. In: *Original Prusa i3 MK3S* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/wp-content/uploads/2018/03/MK3.png>
10. CAD.cz. *Využití rapid prototyping technologií* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2715-vyuziti-rapid-prototyping-technologiei.html>
11. MM. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl* [online]. 19. 11. 2018 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html%20https://protolab.cz/3d-tisk-plastu/.html>
12. Protolab. *3D tisk plastů metodou Selective Laser Sintering (SLS)* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://protolab.cz/3d-tisk-plastu/>
13. *MATERIALPRO 3D* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/>
14. ALFUN. *Ocelové plechy a pásy válcované za tepla* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/ocel>



15. BOLZANO. *Ploché výrobky válcované za tepla zocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Ploche\\_vyroby/MOP\\_EN10149TDP.pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Ploche_vyroby/MOP_EN10149TDP.pdf)
16. 3D Printer Super Store. *EASY3DMAKER 3D Printer* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://3dprintersuperstore.com.au/products/3dfactories-easy3dmaker-3d-printer>
17. ERMIS, J. *Montáž a ověření funkčnosti 3D tiskárny: diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 77 s, Vedoucí práce: Kratochvíl. J.
18. Svět 3D tisku. *Uživatelský manuál Typ: EASY 3D MAKER* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://eshop.svet-3d-tisku.cz/user/related\\_files/u\\_\\_ivatelsk\\_\\_p\\_\\_\\_\\_ru\\_\\_ka\\_easy-\\_verze\\_7\\_2013.pdf](https://eshop.svet-3d-tisku.cz/user/related_files/u__ivatelsk__p____ru__ka_easy-_verze_7_2013.pdf)
19. Gearbest. *Anet A2 Aluminum Metal 3D DIY Printer* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://cz.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits/pp\\_447847.html](https://cz.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits/pp_447847.html)
20. Alza.cz. *Creality ENDER 3* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/ender-3-d5462906.htm>
21. HEXAGON. *GLOBAL Advantage* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/global-advantage>
22. MAGSY. *Neodymový magnet kvádr 5x5x1 Au 80 °C, VMM9-N48* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://e-shop.magsy.cz/neodymovy-magnet-hranol-5x5x1-au/>
23. 3D WISER. *BigRep ONE: Velkoformátový 3D tisk pro VELKÉ nápady* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/fdm/bigrep-one/>
24. PRUSA RESEARCH. *Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s.html#>
25. 3D WISER. *Craftunique CraftBot 3* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/fff-fdm/craftunique-craftbot-3/>
26. ABC 3D. *SigmaX R19* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.abc3d.cz/eshop/3d-tiskarny/3d-tiskarny-prislusenstvi-1/3d-tiskarna-bcn3d-sigmax-r19-detail?gclid=EAIaIQobChMI5dT3vbL94QIVmfdRCh0G0wxnEAYYBCABEGIJfPD\\_BwE](https://www.abc3d.cz/eshop/3d-tiskarny/3d-tiskarny-prislusenstvi-1/3d-tiskarna-bcn3d-sigmax-r19-detail?gclid=EAIaIQobChMI5dT3vbL94QIVmfdRCh0G0wxnEAYYBCABEGIJfPD_BwE)

27. Creality 3D. *The Largest Print Size CR10 S5* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://creality3d.shop/?gclid=EAIaIQobChMI-7HSrLr94QIVSEHTCh37CwKSEAAAYASAAEgJ7h\\_D\\_BwE](https://creality3d.shop/?gclid=EAIaIQobChMI-7HSrLr94QIVSEHTCh37CwKSEAAAYASAAEgJ7h_D_BwE)
28. 3D WISER. *3ntr A2 a A4* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/fdm/3ntr-a2-a4/>
29. 3D WISER. *BUILDER EXTREME 1500 PRO* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/fdm/builder-extreme-1500/>

## **SEZNAMPŘÍLOH**

Příloha A Výkres plechového výlisku – na CD

Příloha B Měřicí protokol výrobku se spojem č. 5 – puzzle – na CD

Příloha C Měřicí protokol výrobku se spojem č. 6 – lepený spoj – na CD