

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



Bakalářská práce

Návrh modulárního podtlakového upínacího systému

Design of a modular vacuum clamping system

Autor: Jakub Kortus

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Praha 2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kortus** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **483233**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh modulárního podtlakového upínacího systému

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a modular vacuum clamping system

Pokyny pro vypracování:

Problematika podtlakového upínání.
Využitelnost aditivních technologií u vakuových dílů s ohledem na těsnost.
Návrh zkušebního demonstrátoru pro ověření funkčnosti.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

Podpis.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Janu Šimotovi za odborné vedení mé bakalářské práce, jeho neocenitelné rady a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mi byli při psaní práce oporou.

Anotace

Bakalářská práce popisuje návrh modulárního podtlakového upínacího systému navrženého pro CMM a pro manipulaci. Teoretická část práce obsahuje základní druhy upínacích systémů podle způsobu upínání. V praktické části jsou navrženy zkušební demonstrátory v CAD softwaru na přetlakovou a podtlakovou zkoušku. Po ověření funkčnosti demonstrátorů byl navržen modulární upínací systém. Upínací systém byl vyroben pomocí aditivních technologií.

Klíčová slova

Modulární podtlakový upínací systém, upínání, podtlak, aditivní technologie

Annotation

This bachelor thesis is focused on the design of a modular vacuum clamping system designated for the CMM and for a manipulation. The theoretical part of this thesis includes basic types of clamping systems according to their clamping method. The practical part consists of demonstrators for overpressure and vacuum tests designed in CAD system. After the verification of demonstrator's functionality, the modular vacuum clamping system has been designed in accordance with previous tests. The clamping system was created using additive technologies.

Key words

Modular vacuum clamping system, clamping, vacuum, additive technology

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Druhy upínacích zařízení	9
2.1	Vlastní vahou	9
2.2	Mechanicky	9
2.2.1	Univerzální sklíčidlo.....	10
2.2.2	Prizma	10
2.2.3	Svěrák	11
2.2.4	Upnutí pomocí upínek	11
2.3	Jiné způsoby upínání	12
2.3.1	Matrix.....	12
2.3.2	Magnetické upnutí	13
2.3.3	Podtlakové upnutí	15
2.4	Stavebnice	17
3	Návrh upínacího zařízení	17
3.1	Problematické aspekty	17
3.2	Použitá technologie	18
3.2.1	Princip.....	19
3.2.2	Použité materiály	19
3.2.3	Nastavení a omezení tisku	21
3.3	Zkouška těsnosti.....	23
3.3.1	Používané komponenty	23
3.3.2	Přetlak	24
3.3.3	Podtlak	26
3.3.4	L a U profil	28
3.3.5	Vyhodnocení těsnosti.....	29

3.4	Návrh modulárního upínání	33
3.4.1	Cup.....	33
3.4.2	Cup s těsněním.....	34
3.4.3	Cup pro ALUFIX.....	35
3.4.4	Pad	36
3.4.5	Doplňky	37
3.5	Zkoušky upínání.....	38
3.5.1	Cup.....	38
3.5.2	Cup s těsněním.....	38
3.5.3	Pad	39
3.6	Zhodnocení zkoušek.....	39
4	Finanční analýza	40
4.1	Cena vývoje demonstrátorů.....	40
4.2	Cena návrhu a zhotovení vakuového upínání + doplňků.....	41
5	Ukázka využití podtlakového modulárního upínání v kombinaci s ALUFIXem.....	42
6	Závěr	46
7	Bibliografie	48
8	Seznam zkratk:	53
9	Seznam obrázků:	54
10	Seznam tabulek:	57

1 Úvod

Upínání dílů a manipulace s nimi je důležitá oblast výroby, která je často zkoumána a pořád je zde co objevovat. Zprvu sloužily upínací zařízení pouze k upínání součástí při obrábění. V dnešní době mají širší využití, a to v obrábění, v měřicí technice a v manipulaci. Sebelepší stroj nedokáže dosáhnout požadovaných tolerancí na tvar, povrch nebo přesného měření, pokud by obrobek neseděl pevně v upínacím zařízení.

Dříve byla většina obrobků do stroje upínána ručně a stejně tak vytahována. S nástupem automatizace ve výrobě se začaly používat hydraulická sklíčidla a svěráky, které dovolovaly rychlejší upnutí. S přesnější výrobou se následně začaly používat i přesnější měřicí přístroje, na které bylo potřeba hotový výrobek upnout ke kontrole. K tomu vznikly modulární stavebnicové upínací systémy a další moderní systémy. [1]

S modernizací stejně tak dorazily robotické manipulátory, které potřebují rychlý a efektivní způsob upínání polotovarů či hotových dílů. Nejčastěji upnutím mezi čelisti, stejně jako u svěráku.

Existují součásti, které se nedají upnout pomocí již zmíněných metod. Většinou se jedná o součásti náchylné k mechanickému poškození. Tento problém lze vyřešit upnutím kovových součástí pomocí magnetických upínačů. Nekovové součásti lze poté upnout pomocí vakuových desek či podložek.

Cílem práce je ověřit schopnosti 3D tisku s ohledem na možnosti jeho využití u podtlakového upínání. Aditivní technologie jsou voleny s ohledem na možnost výroby upínacího systému přímo na míru upínané součásti. Tímto způsobem se dají optimalizovat dosedací plochy systému a minimalizovat tak použitý materiál. Optimalizované upínání lze následně použít samostatně nebo v kombinaci s jiným upínacím zařízením.

2 Druhy upínacích zařízení

V následující kapitole jsou popsány základní možné způsoby upnutí dílů do upínacích systémů. Výběr daného systému závisí na velikosti dílu, jeho mechanických a fyzikálních vlastnostech a na operaci, která bude s dílem prováděna.

2.1 Vlastní vahou

Nejjednodušším způsobem upnutí dílu je upnutí jeho vlastní vahou. Tento způsob upnutí je vhodný pouze u měřicích center, kdy není na díl působeno skoro žádnou silou. Obrobek se položí obrobenu plochou na granitovou desku měřicího přístroje, popřípadě na přípravek, a bez dalšího upínání je možné začít měřit. Naneštěstí lze tento způsob zvolit pouze u velice těžkých měřených dílů, u nichž je jistota, že nedojde k sebemenšímu posunutí po měřicí ploše.



Obrázek 1 Upnutí vlastní vahou [2]

2.2 Mechanicky

Další osvědčenou metodou je upnutí pomocí mechanických zařízení. Při tomto typu upnutí je na obrobek vyvíjena síla, která drží obrobek pevně na místě. Nejčastěji se dělí na upnutí pro rotační a nerotační součásti. [3]

Rotační součásti je nutné upínat do zařízení, která zamezí možnosti pootočení nebo popojetí. Tato zařízení mohou být přímo součástí obráběcího zařízení nebo jako samostatné jednotky, které je možné poté upnout např. k měřicímu centru nebo manipulátoru. [4]

U nerotačních součástí nehrozí valivý pohyb po desce a stačí zamezit jeho posunu.

2.2.1 Univerzální sklíčidlo

Sklíčidlo se používá nejčastěji k upínání rotačních dílů, ale dá se využít i k upínání hranolů a dílců jiných tvarů. Lze upínat za vnitřní i vnější průměr dílce k obrábění na soustruhu nebo frézce. Pokud se sklíčidlo používá k pouhému upnutí do CMM (Coordinate-measuring machine) bez působení velkých sil, je možné ho upnout do stavebnice, aby bylo možné měřit součást kolmo či nakloněně. [4] [5]

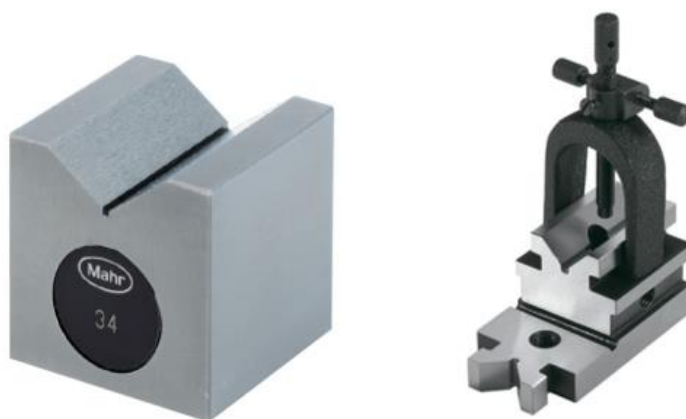
Sklíčidlo se skládá z tělesa s drážkami a radiálně přestavitelnými čelistmi, které jsou uvedeny do pohybu pomocí kličky. Tyto čelisti se pohybují současně a dochází k sousému upnutí. Počet čelistí poté udává, o kolika-čelist'ová sklíčidla se jedná – nejčastěji to jsou tříčelist'ová a čtyřčelist'ová. [6]



Obrázek 2 Tříčelist'ové a čtyřčelist'ové sklíčidlo [7]

2.2.2 Prizma

Pokud je potřeba upnout rotační díl vodorovně, je možné použít prizma. Jedná se o blok s vyrobeným V profilem, na který lze následně součást položit a zamezit tím pohybu. Podle velikosti upínaného dílu lze zvolit pouhé položení do prizma nebo následné zafixování pomocí upínacího třmenu. [8]



Obrázek 3 Prizma MarTool 107 V [9], Kontrolní prizma se třmenem [10]

2.2.3 Svěrák

Pro menší díly se k upnutí používají svěráky s ruční klikou. Upnutý díl ve svěráku se následně upne k desce stolu nebo do modulární upínací desky. [8]

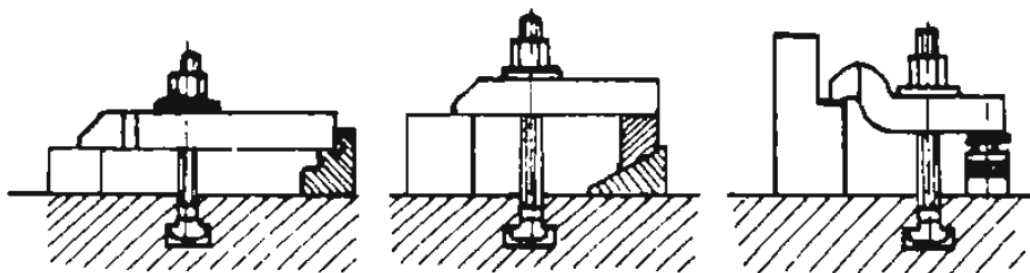
Pro větší všestrannost se vyrábí svěráky s otočnými a sklopnými mechanismy s přesným nastavením úhlu naklonění, které dovolují následně lepší manipulaci s dílem. Standardně se na trhu vyskytují svěráky s rozevřením čelistí až do 400 mm. [11]



Obrázek 4 Dvouosý otočný svěrák [12]

2.2.4 Upnutí pomocí upínek

Pro větší díly je výhodnější upnutí pomocí upínek. Upínací mechanismus se skládá z odstupňované podpěry pro upínku. Na podporu dosedá upínka, která se vyrábí ve více variantách, aby bylo možné uchytnout dílec co nejpříhodněji na desku. [8]



Obrázek 5 Upínky [8]

2.3 Jiné způsoby upínání

V některých případech není možné použít ani mechanické upnutí, ani upnutí pomocí vlastní váhy. Jedná se o tenkostěnné díly, díly náchylné k mechanickému poškození a díly s velkou tvarovou složitostí pro normální upnutí. Pro rovinné díly lze primárně použít dvě metody. První je upnutí magneticky a druhá pomocí podtlakových systémů. Pro geometricky složité díly je nejlepší použít moderní systém Matrix. [13]

2.3.1 Matrix

Jedná se o univerzální upínací systém pro upínání v oblasti obrábění, manipulace, automatizace a kontroly. Funguje na principu zatlačení tvarově složitého dílce do pole odpružených kolíků, které se následně mechanicky zajistí a dojde k vytvoření přesně vytvarovaného přípravku. Toto pole se po odjištění opět vrátí do původní polohy.

Hlavní výhodou je rychlé upnutí jakéhokoliv dílu nevhledě na tvarové složitosti. Díky tomu se výrazně snižují náklady na upínací přípravky. [1]



Obrázek 6 Upínací systém Matrix [1]

2.3.2 Magnetické upnutí

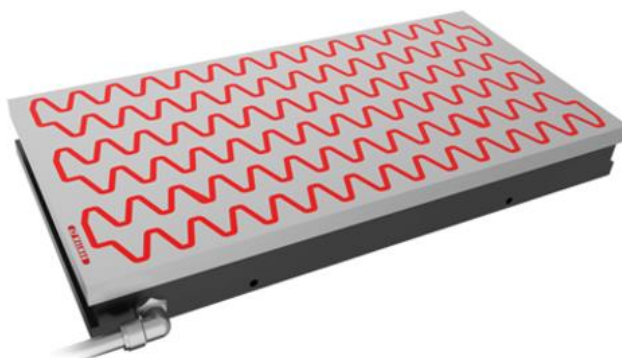
Upnutí pomocí magnetické plochy je moderní řešení, které nevyžaduje dlouhodobou přípravu. Magnetická plocha se přidělá k desce stolu frézky nebo měřicího přístroje, na kterou se následně položí díl, ale je možné upnout i více dílů najednou. Magnetickou plochu můžeme rozdělit na permanentní magnetické, elektromagnetické a elektropermanentní magnetické upínače. [4] [14]

Permanentní magnetické upínače obsahují neodymové magnety, které se zapnou a vypnou pomocí páky, jež je pootočí směrem k měřenému dílu. Tento druh upínače se vyrábí s maximální velikostí 600 x 300 mm. Větší rozměry je poté lepší upínat do elektromagnetických upínačů. Výhodou je nezávislost na přívodu elektrické energie a nezahřívání magnetů. Nevýhodou desky s permanentními magnety je zmagnetizování dílů, kdy je následně potřeba provést odmagnetizování. [14] [15]



Obrázek 7 Magnetický upínač NEOMAX 100 [14]

U elektromagnetického upínače vzniká magnetické pole průchodem stejnosměrného proudu skrz cívky. Výhodou tohoto upínání je vznik a zánik magnetického pole bez následného zmagnetizování měřeného dílu. Nevýhodou je zahřívání cívek při průchodu elektrickým proudem. Toto zahřátí může vést k nepřesnosti měření, kdy dojde k zahřátí dílce. [15]



Obrázek 8 Elektromagnetická deska Elmag Wave [16]

Nejnovějším druhem magnetického upínání je elektropermanentní upínání. Tento druh upínačů je kombinace dvou předchozích typů. U této desky dochází k zapnutí a vypnutí pomocí elektrické energie. Samotný dílec následně drží neodymové magnety, dokud není deska opět vypnuta. Ačkoliv dojde při držení k magnetizaci, je možné následně pomocí opačně orientovaného impulsu dílec odmagnetizovat. [14]



Obrázek 9 Elektropermanentní upínač Mastermill [16]

Speciálními druhy magnetického upínání jsou magnetické prizma a malé magnety do upínacích stavebnic. Magnetické prizma obsahuje neodymové magnety, a lze jím upnout dílec v případě obavy z možného mechanického poškození z upnutí pomocí upínacího třmenu. Magnety ve stavebnicích dovolují uchycení, pokud je potřeba díl naklonit a nelze ho jinak uchytit.



Obrázek 10 Magnetické prizma MarTool 107 MH [17]

2.3.3 Podtlakové upnutí

Vakuové upínání na rozdíl od magnetického upínání není omezené magnetickými vlastnostmi upínaných dílců, a zároveň stále nedochází k potenciálnímu mechanickému poškození. Stejně jako magnetické, tak i vakuové upínání může zrychlit dané operace rychlým a jednoduchým upnutím. Lze ho využít jak při obrábění, tak i při následném měření a manipulaci. [4] [18]

U podtlakového upínání dochází ke vzniku tlakového rozdílu mezi dílem a upínací deskou, čímž je dílec přitlačován k desce. Podtlak vzniká za pomoci vývěvy nebo Venturiho trysky. [19]

Aby došlo k co nejlepšímu upnutí, je nutné zajistit co nejlepší povrch na dílu, tzn. eliminovat vlnitost povrchu a špatné drsnosti. Ty lze částečně kompenzovat těsněním. Dalším aspektem je velikost upínací plochy, která by měla být rovná a dostatečně velká, aby nemohlo dojít k posunutí dílce. [20]

S upínáním je možné se setkat v různých formách. Nejrozšířenější jsou upínací desky, vakuové přísavky a modulární upínací bloky. [20] [21]

Upínací deska se skládá z mřížky o různé hustotě. Čím hustší, tím složitější tvar lze upnout. Dále jsou v desce díry se závitem, jimiž je odváděn vzduch skrze externí čerpadlo. Pokud by velikost desky nestačila, je možné použít více desek zároveň, kdy jedna deska může dosahovat velikosti např. 4000 x 600 mm. Tvar pro dílec se poté pomocí těsnění vytvoří na desce a zbylé díry, jež jsou mimo utěsněnou plochu, se zašroubují. Těsnění následně funguje i jako médium pro zlepšení přísávání, pokud by měřený díl měl špatnou drsnost, a tím špatně držel na ploše. Existují i prohnuté desky, pokud je potřeba upnout prohnuté díly. Upínací desky se nejčastěji vyrábějí z hliníku. [20] [22]



Obrázek 11 Vakuové deska [19]

Vakuové přísavky jsou malé upínací systémy miskovitého tvaru. Skládají se většinou z pevného spodku a gumového lemu, který slouží jako těsnění. Lze je rozdělit na přísavky, které jsou součástí modulárních bloků, a přísavky vakuové. První jmenované nacházíme většinou po jednotlivých kusech, zatímco vakuové přísavky se upínají na upínací konstrukci ve více kusech. Samotná konstrukce se pak následně upne až na upínací plochu. Tyto vakuové přísavky ve větších počtech se nacházejí spíše uplatnění v automatizované manipulaci a výrobě. [21] [23]



Obrázek 12 Modulární přísavkový blok [21], přísavky pro upínací systémy [23]

Modulární upínací bloky jsou odlišnou variantou upínacích desek. Jedná se většinou o malé upínací desky, např. 100 x 100 mm, kterým je permanentně vytvarován tvar těsnění pro upínání. Lze na trhu nalézt obdélníkové modely, modely ve tvaru písmena L. Tyto bloky lze velice snadno a rychle rozmístit po desce stolu frézky nebo CMM a poté na ně upnout dílec. Výhodou je eliminace tvarování upínané plochy pomocí těsnění a nutnost menší upínací desky. Modulární bloky se vyrábí i s naklopidelnými upínacími plochami. Dané upínání lze najít na trhu jak hliníkové, tak plastové. [23] [24]



Obrázek 13 Modulární upínání [25]

2.4 Stavebnice

Upínací stavebnice slouží primárně k finální kontrole po obrábění nebo při operacích bez působení sil, např. sváření. Pro daný díl se sestaví na míru konstrukce z normalizovaných dílů, která se poté upne na základní desku. Na tuto konstrukci je následně možné přidělat ještě dodatečné upínací systémy jako magnety, sklíčidla, svěráky nebo upínky pro lepší upevnění. [5] [26]

Výhodou tohoto řešení je snadné sestavení, opakovatelnost a široké uplatnění v kontrolních centrech. Často se používá v leteckém a automobilovém průmyslu, kde je potřeba sériová kontrola. [27]



Obrázek 14 Upínací stavebnice [26]

3 Návrh upínacího zařízení

Úkolem této bakalářské práce je návrh a ověření vhodnosti FDM tisku pro podtlakové díly. Tato kapitola se nejprve zabývá obecnými problémy spojenými s vakuovým upínáním. Další část kapitoly se zabývá zvolenou technologií FDM 3D tisku a návrhem samotného upínání.

3.1 Problematické aspekty

Nejdůležitějším požadavkem na vakuové upínání je, aby upínací systém dokázal správně držet podtlak uvnitř samotného zařízení. Tím pádem je důležité klást důraz na samotnou výrobu. Na rozdíl od vakuového upínání, které se vyrábí pomocí frézování a vyvrtávání z hliníkového polotovaru, se upínání vyrobené na FDM tiskárně neobejde bez problémů spojených s těsností. Ta může být ohrožena, pokud se vybere špatný pórovitý materiál. Dalším zdrojem netěsnění může být únik tlaku mezi špatně vytištěnými vrstvami.

Tento problém lze eliminovat větším množstvím perimetrů (jednotlivých vrstev stěn) nebo tiskem se 100% výplní. [28] [29]

Dalším důležitým aspektem je drsnost povrchu. Pokud je nedostatečná jakost povrchu na upínací ploše, může dojít ke špatnému přitlaku a nežádanému odtrhnutí upínaného objektu od upínacího systému. Aby nedocházelo k nutnosti vysoké jakosti povrchu, je možné použít gumové těsnění, které zajistí stejnou drsnost po celé dosedací ploše. [30]

Poslední důležitý aspekt je samotná velikost upínací plochy. Ačkoliv se nejedná o parametr přímo udávaný 3D tiskárnou, je to parametr obecný, který nám určí finální přitlačnou sílu. [31]

3.2 Použitá technologie

Pro výrobu zkušebního demonstrátoru byla použita již zmíněná technologie FDM 3D tisku. Tato technologie byla zvolena z důvodu své všestrannosti a dostupnosti. Plastový 3D tisk dovoluje relativně rychlou výrobu prototypů se složitými tvarovými plochami, které by se v tak krátkém čase těžce obráběly.

Jako výrobní zařízení byla zvolena tiskárna Creality ENDER 3 pro svou dostupnost a cenovou nenáročnost.

Program použitý pro návrh jednotlivých dílů byl CAD Autodesk Inventor a postprocesor pro vygenerování drah pro 3D tiskárnu byl PrusaSlicer.

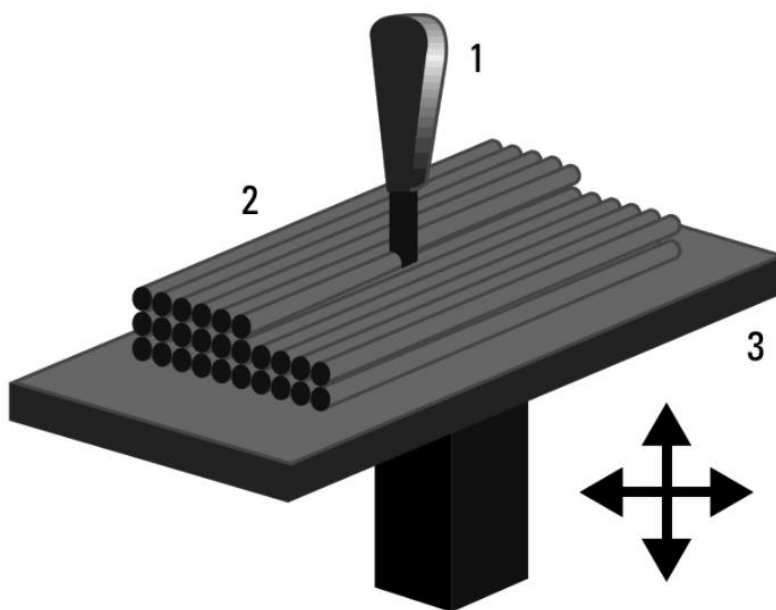


Obrázek 15 Tiskárna Creality ENDER 3 [32]

3.2.1 Princip

FDM 3D tisk funguje na principu natavování materiálu a následně jeho postupného ukládání ve vrstvách, dokud nedojde k vytvoření požadovaného modelu. Nejprve je potřeba získat model ve formátu STL, který je následně za použití pomocného programu, sliceru, převeden na G-CODE. Tento formát je tiskárna již schopna zpracovat a zahájit tisk. Nahřátý materiál je následně vytlačován tryskou v jednotlivých vrstvách.

Pohyb v jednotlivých osách je zajištěn elektromotory. Osa Y je osazena pohyblivou podložkou, ta se pohybuje dopředu a dozadu. Na ose X je pohyblivý hotend (tavné zařízení). Na ten přímo může navazovat extruder, který pohybuje materiálem do hotendu. Někdy se nachází mimo tiskárnu jako samostatné zařízení. V ose Z se lze pohybovat pouze nahoru a dolů, kdy pohyb je zajištěn pomocí vodící osy. Po dokončení tisku natavený plast rychle chladne, takže je skoro okamžitě možné vytištěný model odlomit a zahájit nový tisk. Pokud byl tisk nastaven s generováním podpor pro segmenty, které by se už nedaly jinak vytisknout, je pak následně nutné takto vygenerované podpory odlomit. [33]



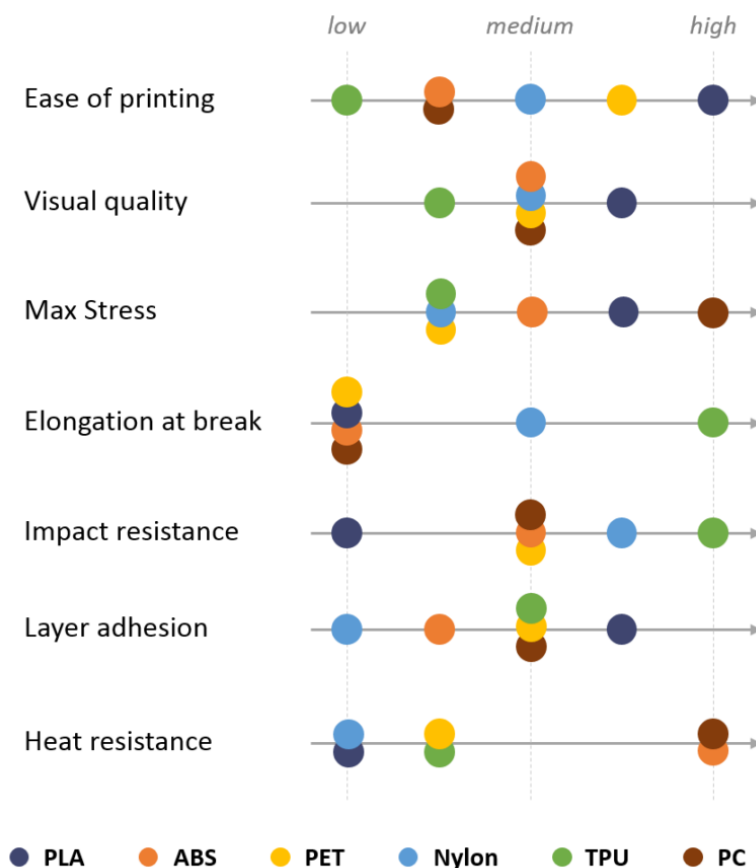
Obrázek 16 1. Tryska s nataveným materiálem, 2. Jednotlivé vrstvy nataveného materiálu, 3. Pohyblivá podložka [33]

3.2.2 Použité materiály

Pro 3D tisk se využívá nepřeberného množství materiálů, od obyčejných a hojně využívaných jako jsou plasty, které jsou používané v FDM tiskárnách, až po dražší,

mechanicky zajímavější materiály, jako jsou kovové prášky železa či titanu. Ty jsou následně spékány pomocí laseru. [33]

Pro FDM tisk je materiál obvykle dodáván v podobě struny o průměru 1,75 mm. Struna může následně obsahovat různé příměsi, jako kusy dřeva, či kousky kovů. V následující tabulce lze vidět srovnání základních materiálů používaných na tisk. [34]



Obrázek 17 Srovnání základních FDM materiálů [35]

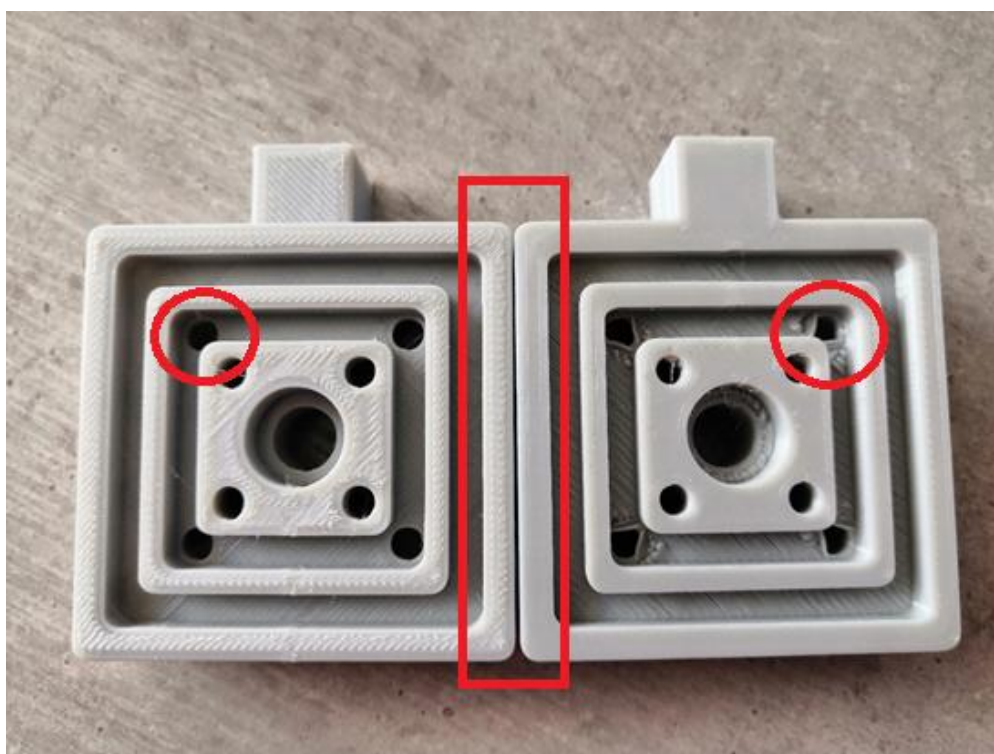
Pro tisk zkušebních demonstrátorů byl použit materiál PLA. Ten je ze všech materiálů nejlevnější a nejdostupnější. Jako další alternativy byly zkoušeny materiály PETG a ABS. Tyto materiály disponují vyšší pevností a teplotní odolností, avšak na rozdíl od PLA jsou náchylnější k poškrábání a mají horší vlastnosti tisku (viz Obrázek 17). Další jejich nevýhodou je, že se z nich špatně tisknou malé díly. U ABS může též dojít k silnému kroucení při chladnutí výtisku. Z těchto důvodů jsou tyto materiály nevhodné pro tisk závitů, které jsou pro podtlakové díly důležité. [35] [36]

Díly pro podtlakové upínání nebudou vystavovány takovým podmínkám, pro které jsou PETG a ABS uzpůsobeny, takže je PLA nejvhodnější.

3.2.3 Nastavení a omezení tisku

Na kvalitě tisku závisí spousta aspektů. Většinu z nich lze ovlivnit správnou kalibrací tiskárny, sliceru a správným přizpůsobením tištěného dílce možnostem tiskárny. U tisknutí jednotlivých dílů bylo nutné dávat pozor, aby byly všechny části se závity tištěny kolmo. Pokud závit nebyl tisknut kolmo, docházelo k jeho mírnému stlačení a následně do něj nezapadlo šroubení.

Další problematickou částí je již zmíněné dosedání upínací plochy na upínanou plochu. Pokud to dimenzování upínání dovoluje, je lepší tisknout upínací plochu směrem na podložku. Při tisku na skleněnou podložku dojde k vytvoření jemného, až skelného povrchu, u kterého není nutné používat jakékoliv těsnění. Na Obrázku 18 je vidět srovnání tisku na zrcadlo. Na levé straně byl tištěn výtisk směrem nahoru a lze vidět, že nedocházelo k defektům na tisku. Na pravé straně byl výtisk tisknut směrem na zrcadlo. Byl vytvořen téměř skelný povrch, nicméně došlo k nechtěným chybám tisku. Ty však neměly efekt na funkčnost celého výtisku.



Obrázek 18 Srovnání tisku na zrcadlo

Pokud není požadována nízká drsnost, která vznikne na skleněné podložce, tak je možné tisknout upínací plochu kolmo k podložce, kdy je možné vytisknout přesně závit a zároveň drážky pro těsnění. U takových dílů může však nastat problém s podporami, které jsou často požadovány, pokud vzniká někde převis, který už je mimo možnosti tiskárny.

Všechny díly z PLA byly tisknuty s těmito parametry. Měnil se pouze počet perimetrů. Díly se závitem bylo nutné tisknout se zvětšením 1 %, aby šroubení bylo možné bez problémů zašroubovat.

Výška vrstvy

● Výška vrstvy: mm

● Výška první vrstvy: mm nebo %

Svislé stěny

● Perimetry: (minimálně)

● Spirálová váza:

Doporučená tloušťka stěny objektu pro výšku vrstvy 0.20 a 2 perimetry: 0.86 mm , 3 perimetry: 1.26 mm , 4 perimetry: 1.67 mm , 5 perimetry: 2.08 mm , 6 perimetry: 2.49 mm

Vodorovné stěny

● Plných vrstev: Vrchních: Spodních:

● Minimální tloušťka skořepiny: Vrchních: mm Spodních: mm

Tloušťka vrchní skořepiny je 0.8 mm při výšce vrstvy 0.2 mm.
Tloušťka spodní skořepiny je 0.6 mm při výšce vrstvy 0.2 mm.

Obrázek 19 Nastavení tisku vrstev a perimetrů

Rychlosti pohybů tiskárny

● Perimetry: mm/s

● Malé perimetry: mm/s nebo %

● Vnější perimetry: mm/s nebo %

● Výplň: mm/s

● Plná výplň: mm/s nebo %

● Vrchní plné výplně: mm/s nebo %

● Podpěry: mm/s

● Kontaktní vrstvy podpěr: mm/s nebo %

● Mosty: mm/s

● Výplň tenkých stěn: mm/s

● Ironing: mm/s

Obrázek 20 Nastavení rychlosti tisku

Filament

● Barva:

● Průměr: mm

● Násobič extruze:

● Hustota: g/cm³

● Náklady: korun/kg

● Hmotnost cívky: g

Teplota

● Tryska: První vrstva: °C Ostatní vrstvy: °C

● Tisková podložka: První vrstva: °C Ostatní vrstvy: °C

Obrázek 21 Nastavení filamentu

3.3 Zkouška těsnosti

Prvními navrhnutými demonstrátory byly díly pro zkoušku těsnosti. Ty byly provedeny na jednoduchých válcových dílech, které měly otestovat počet potřebných stěn, aby byl upínací systém schopen udržet podtlak.

V následující kapitole je popsán průběh zkoušek na přetlak, podtlak a zkouška pro koleno, kdy dochází k vybočení z přímého tvaru. U takového zlomu může dojít k narušení vrstev a může se stát, že do dílu bude vnikat okolní vzduch.

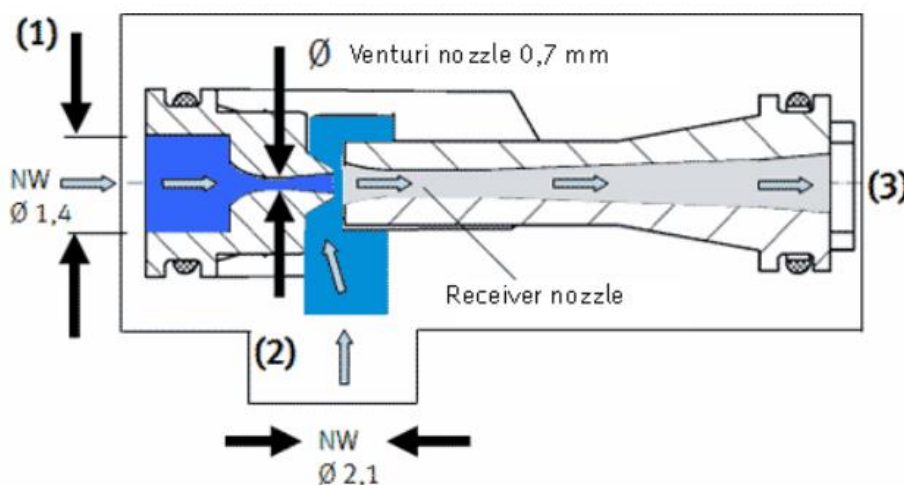
3.3.1 Používané komponenty

Pro zkoušky bylo potřeba využít sériově vyráběné díly. Těmi hlavními byly vakuový ejektor, vakuometr, šroubení, hadičky a těsnění.

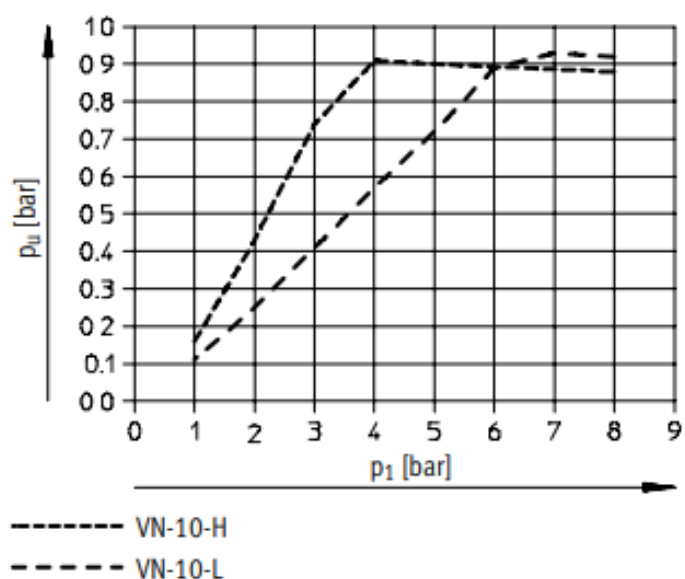
Vakuový ejektor je zařízení sloužící k vytvoření vakua ve výstupním šroubení v závislosti na velikosti vstupního tlaku. Stlačený vzduch ze vstupu prochází zúžením, nabere vysokou rychlost a v následující komoře vzduch proudí do tlumiče hluku, kde zároveň vytváří podtlak. Po připojení hadičky v ní vzniká podtlak. [37]



Obrázek 22 Vakuový ejektor VN-10-H-T4-PQ2-VQ2-O2-P [38]



Obrázek 23 (1) vstup natlakovaného vzduchu, (2) připojení pro hadičku, (3) výstup z ejektoru do tlumiče [37]



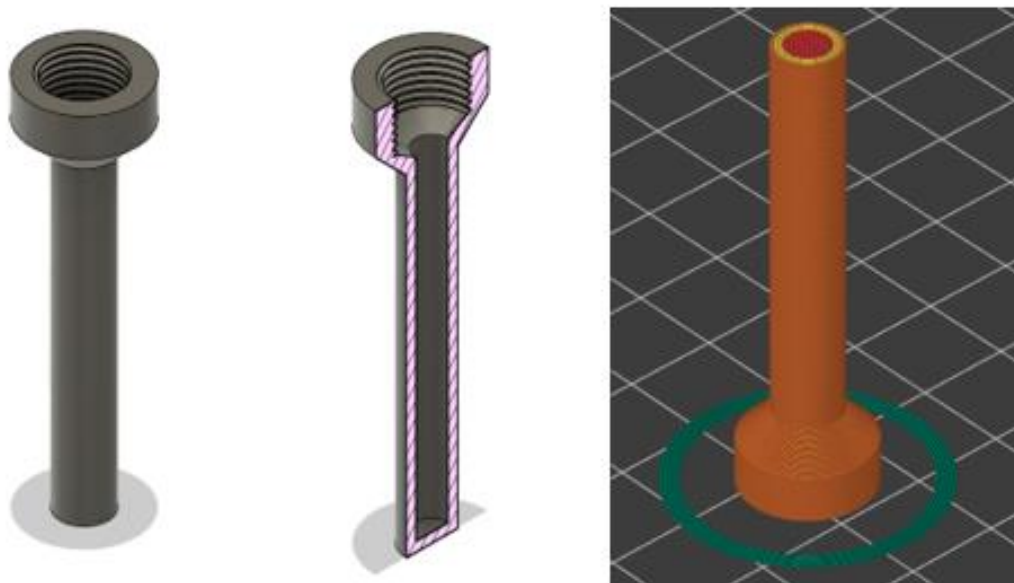
Obrázek 24 Vakuum p_u v závislosti na provozním tlaku p_1 [39]



Obrázek 25 Vakuometr VAM-40-V1/0-R1/8-EN [40], hadice PUN-H-6X1-TBL [41], šroubení QS-G1/8-6 [42], těsnění [19]

3.3.2 Přetlak

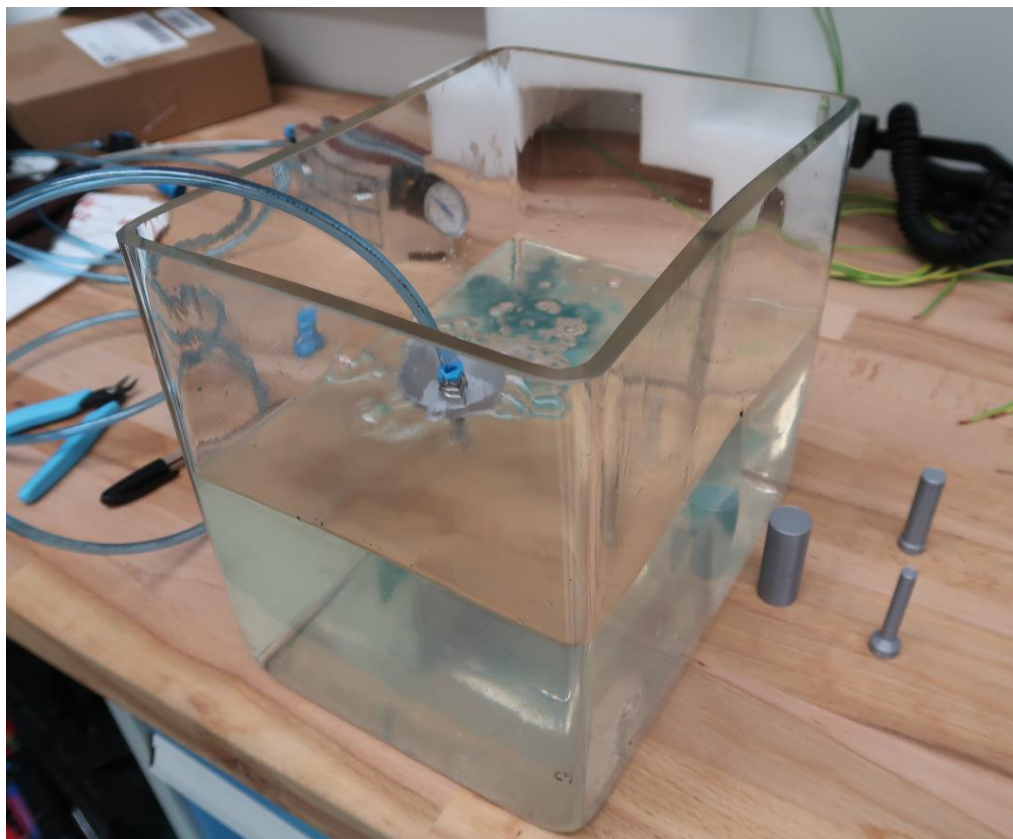
Jako první pokus byla provedena přetlaková zkouška. Na tu byly vytvořeny jednoduché válce v CADu. Ty měly různý počet perimetrů, tj. tři, čtyři, deset a dvacet, kdy jeden perimetr je 0,4 mm. Válce byly ponořeny do nádoby s vodou, aby byl vidět únik vzduchu.



Obrázek 26 Demonstrátor na přetlakovou zkoušku v CADu a v PrusaSliceru



Obrázek 27 Vytištěné zkušební válce o různém počtu perimetrů

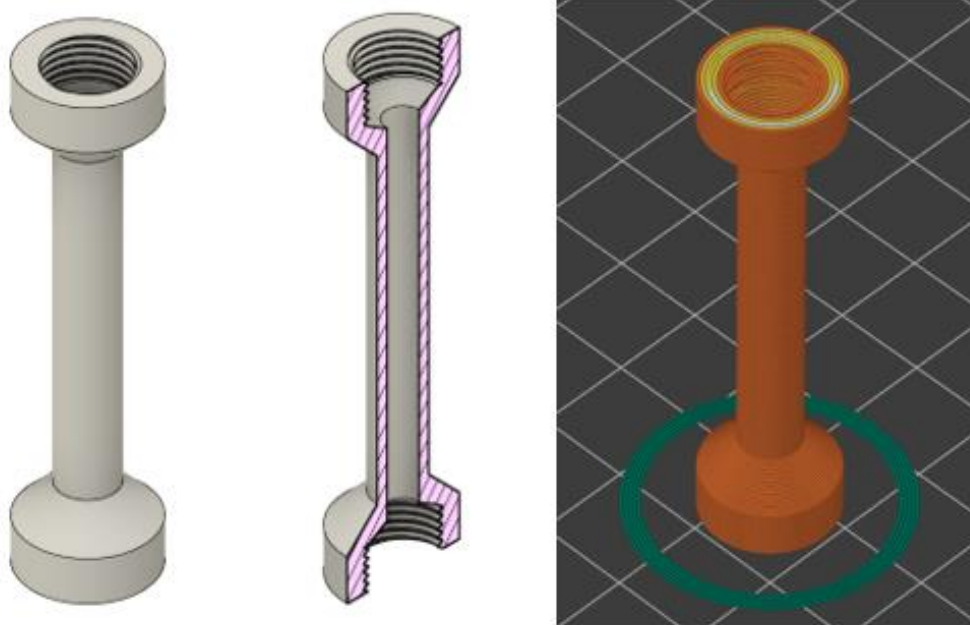


Obrázek 28 Průběh zkoušky

3.3.3 Podtlak

Pro podtlakovou zkoušku byly vytvořeny v CADu tyčky o tloušťce stěn 0,8; 1,2 a 1,6 mm, tj. dva, tři a čtyři perimetry. Ty se následně nechávaly přisát k ocelové destičce stranou, která byla tisknuta směrem k tiskové podložce.

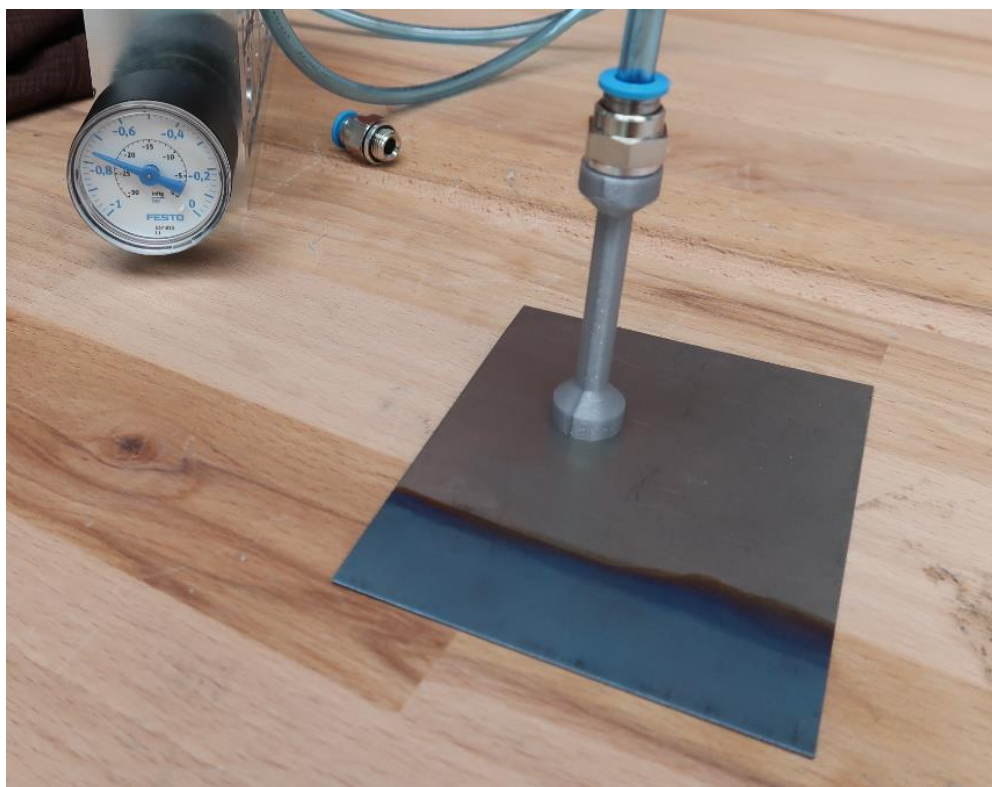
Při úvodním experimentu se ukázalo, že stěny se dvěma perimetry nedokážou dostatečně těsnit. Tři perimetry dosahovaly stejných hodnot jako čtyři perimetry. Z tohoto důvodu se pokračovalo pouze se třemi perimetry, aby nedocházelo k plýtvání materiálem a časem. Rozdíl mezi nimi byl v jednotkách procent.



Obrázek 29 Demonstrátor na podtlakovou zkoušku v CADu a v PrusaSliceru



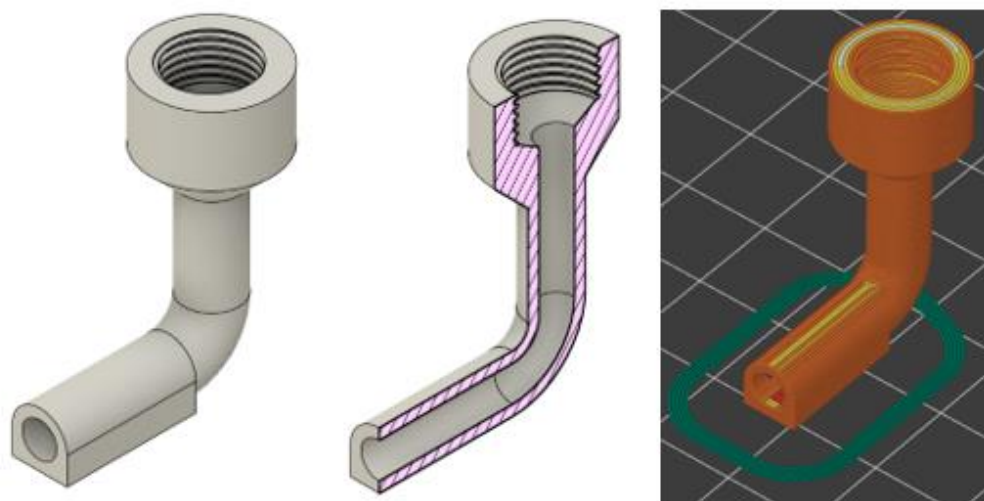
Obrázek 30 Zleva zkušební demonstrátor se dvěma, třemi a čtyřmi perimetry



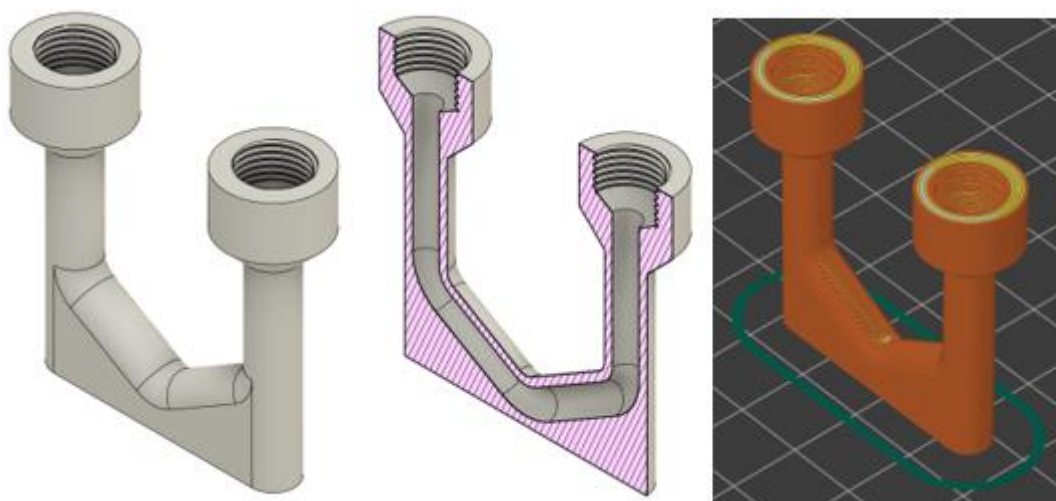
Obrázek 31 Průběh zkoušky

3.3.4 L a U profil

Jako poslední ze základních zkoušek byla zkouška ověření možnosti tisknout profily o jiném jak rovném tvaru. Pro tuto zkoušku byla navrhnutá čtyři zkušební tělesa. Dvě do tvaru L, kdy jedna verze má kolmé koleno a druhé v ohybu rádius. Třetí a čtvrté verze jsou do tvaru U. Opět jedna verze má rádius v ohybu.



Obrázek 32 Demonstrátor na podtlakovou zkoušku L profilu s rádiem v ohybu v CADu a v PrusaSliceru



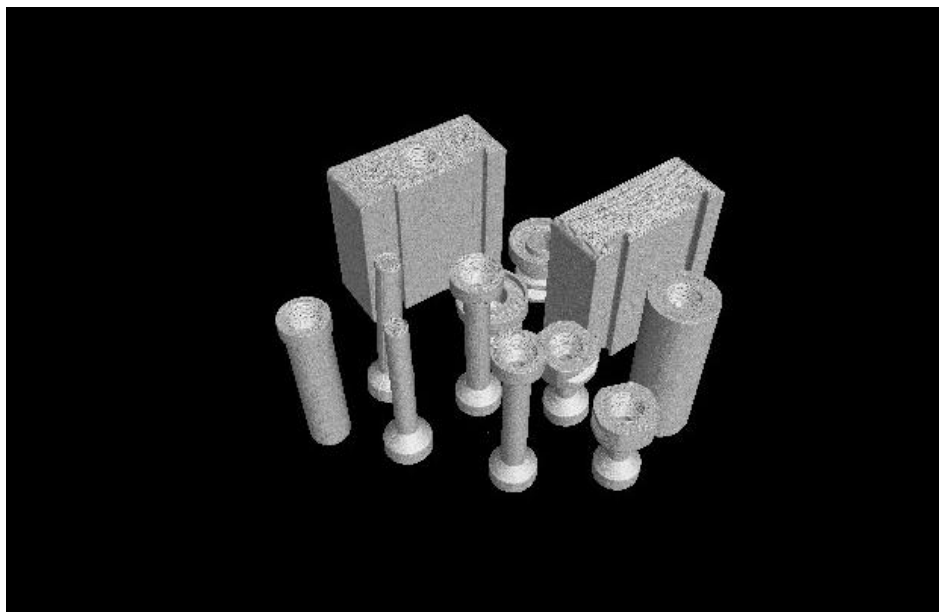
Obrázek 33 Demonstrátor na podtlakovou zkoušku U profilu s rádiem v ohybu v CADu a v PrusaSliceru



Obrázek 34 Vytisknuté L demonstrátory

3.3.5 Vyhodnocení těsnosti

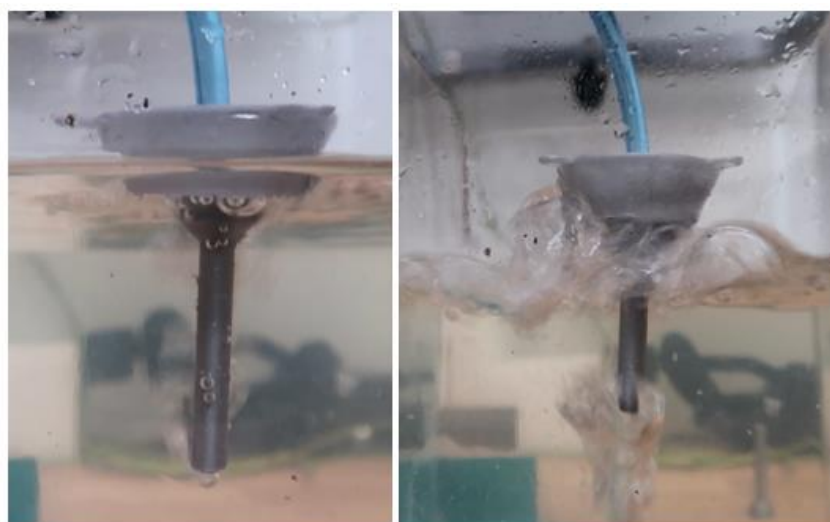
Po úvodních zkouškách došlo k vyhodnocení, zda je možné využít aditivní technologie k výrobě podtlakových dílů. Vyhodnocení proběhlo pomocí CT (computed tomography) typu METROTOM 1500 od firmy Zeiss a na schopnosti udržet stálý podtlak v dílcích. U všech zkoušek byl použit stejný tlak na vstupu do ejektoru 4 bary, tj. 400 000 Pa. Za tohoto tlaku docházelo k nejlepším výsledkům měření (viz Obrázek 24).



Obrázek 35 Vyhodnocení v CT

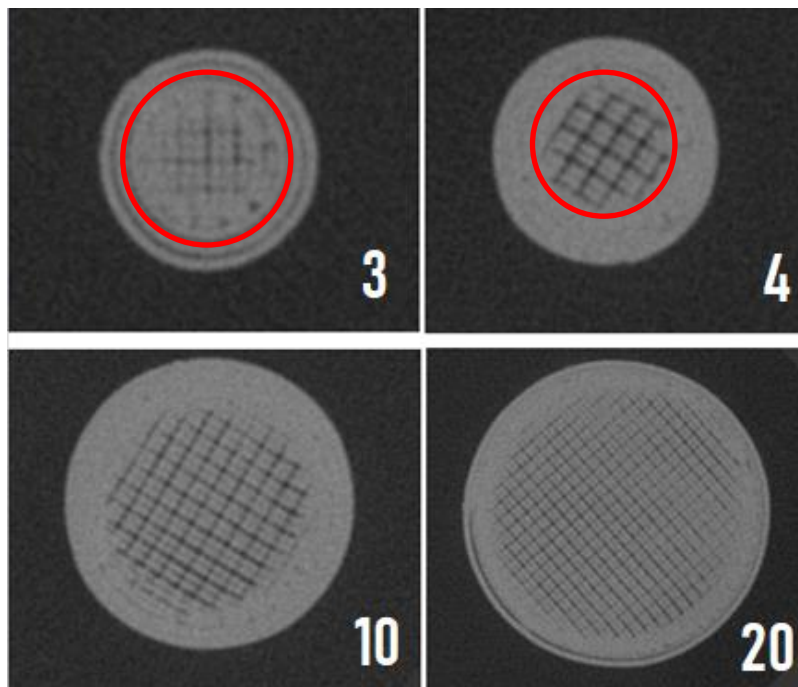
První byla přetlaková zkouška, která proběhla ponořením demonstrátoru do nádoby s vodou. U všech zkušebních prvků se objevila stejná chyba, a to únik vzduchu skrze dno součásti. Chyba je vidět na snímcích z CT (Obrázek 35), kde dno je tvořeno jemnou síťovou výplní.

Samotné stěny součásti po ucpání dna nevykazovaly vizuální proudění vzduchu z dílce. Pouze u součásti se třemi perimetry na pár místech došlo k tvorbě bublin na povrchu. Tato chyba mohla vzniknout chybou v tvorbě stěn.



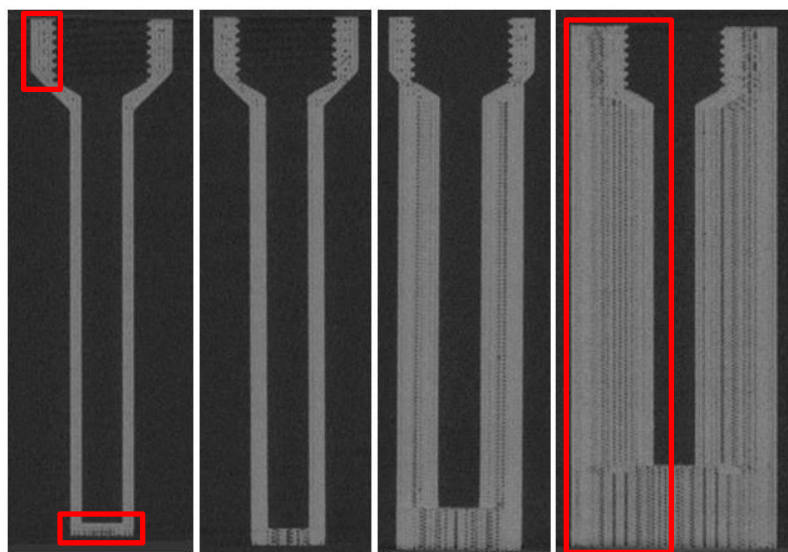
Obrázek 36 Chyby stěn (vlevo), Chyba dna (vpravo)

Na Obrázku 37 je vidět chybné síťkovité dno, pokud by se tisknul díl s uzavřeným dnem. To je na obrázku vyznačeno červeně. Tuto chybu by bylo možné eliminovat přelakováním nebo jinak navrženým uzavřením dna.



Obrázek 37 Síťkovité dno s počtem perimetrů

Následující Obrázek 38 obsahuje průřez stěn. Je zde patrné, že jednotlivé stěny tvořené perimetry na sebe dosedají bez mezer, dále jsou zde vidět opět chyby dna. U dílů s větším počtem perimetrů, kdy docházelo k využívání výplně, jsou vidět chyby ve výplni. Opět vyznačeno červeně. Ta neměla na finální fungování vliv.



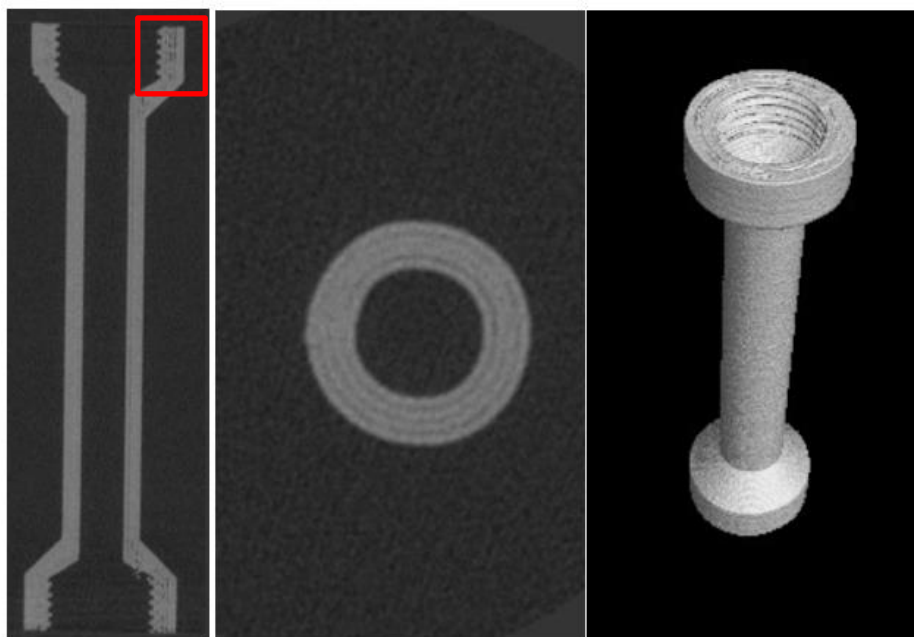
Obrázek 38 Průřez přetlakovými demonstrátory

Druhou zkouškou byla podtlaková zkouška. Ta probíhala ve dvou fázích. V první byl vyhodnocen již zmíněný počet perimetrů. Ve druhé byl opakovaně zkoušen podtlak na více zkušebních dílech. U těchto dílů již probíhal test na jakost povrchu, kdy u povrchu tištěného směrem od zrcadla nedocházelo k dostatečné přilnavosti a měřený díl se odtrhával od ocelové desky. Při opakovaném zkoušení se z tabulky dá vyhodnotit, že se nejedná o náhodnou těsnost dílů se třemi perimetry. Průměrná hodnota podtlaku je rovna $-0,77$ baru. Dle Obrázku 24 by maximální hodnota za vstupního tlaku 4 barů měla být rovna $-0,9$ baru. Z toho lze vyvodit, že dochází k poklesu o 15 %. Ten mohou způsobovat chyby vrstev mezi jednotlivými perimetry.

Tabulka 1 Vyhodnocení zkoušky podtlaku

Demonstrátor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Udržený podtlak (bar)	-0,84	-0,79	-0,76	-0,83	-0,77	-0,77	-0,75	-0,75	-0,75	-0,78	-0,76

Na snímcích z CT (Obrázek 39) lze vidět, že stěny neobsahují žádné viditelné chyby. Pouze na koncích u závitu se objevuje pórovitá vnitřní struktura. Na obrázku vyznačeno červeně.



Obrázek 39 Snímky zkušebního dílce z CT

Poslední ze zkoušek těsnosti bylo měření podtlaku v L a U profilu. Ta probíhala stejně jako podtlaková zkouška s přímými demonstrátory. Na jednu stranu bylo našroubováno šroubení, zatímco druhá strana byla zacpána.

V následující tabulce je vidět, že mezi L profilem s a bez rádia byl minimální rozdíl. Mezi U profilem s a bez rádia byl rozdíl též minimální, ale samotný podtlak dosahoval

nižších hodnot. To je pravděpodobně způsobeno více ohyby, kde u záhybů mohlo dojít k vytištění horší kvality stěn.

Tabulka 2 Podtlaková zkouška u L a U profilu

Profil L		Profil U	
Rádus	Udržený podtlak (bar)	Rádus	Udržený podtlak (bar)
NE	-0,76	NE	-0,68
ANO	-0,8	ANO	-0,65

Po provedení tří zkoušek těsnosti lze z naměřených hodnot usuzovat, že vakuové upínání lze vyrobit na 3D tiskárně. Aby se docílilo nejlepšího podtlaku, musí se správně sladit tiskárna a nastavení sliceru.

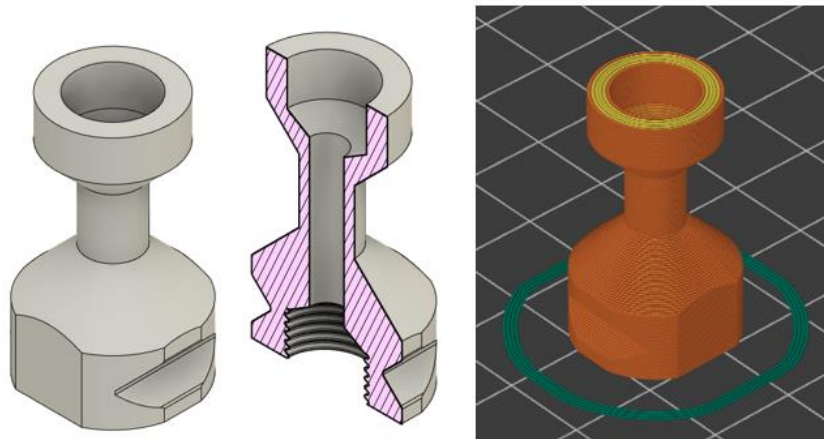
3.4 Návrh modulárního upínání

Následující modulární upínání vychází z předchozích měření, kdy u každého jednotlivého druhu upínání jsou použity tři perimetry a stejný materiál. Dále byly k jednotlivým kusům navrženy doplňkové díly. S jejich pomocí lze následně modulární upínání upnout k měřicí desce CMM, do upínací stavebnice značky ALUFIX či jiného druhu upnutí, kde nejsou následně vyvíjeny velké síly na upnutý díl, aby nedošlo k jeho odtržení.

U většiny navrhovaných upínacích dílů došlo k navržení více verzí, než vznikla verze finální.

3.4.1 Cup

Jako první modulární upínání byl navržen upínací cup, který vychází z jednoduchého designu demonstrátoru z podtlakové zkoušky. Strana tištěná od zrcadla obsahuje závit G 1/8". Strana tištěná na zrcadlo slouží jako upínací plocha k upínanému dílu.



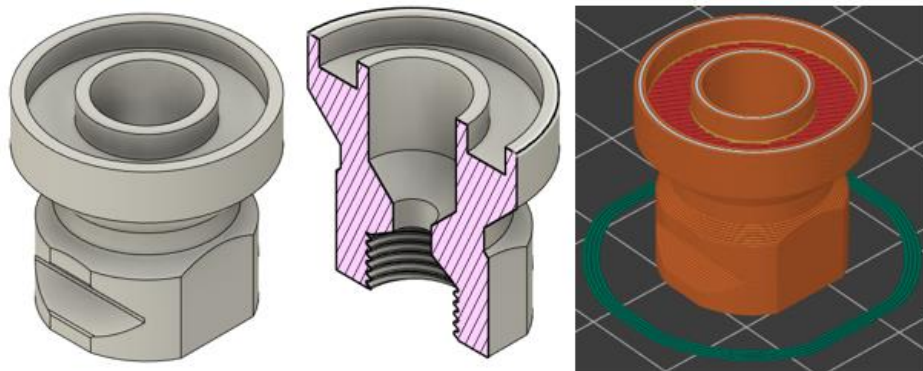
Obrázek 40 Cup v CADu a v PrusaSliceru



Obrázek 41 Vytištěné cupy se šroubením

3.4.2 Cup s těsněním

Tento model vychází z cupu bez těsnění. U tohoto modelu došlo k zvětšení dosedací části, aby na ni bylo možné připevnit těsnění.



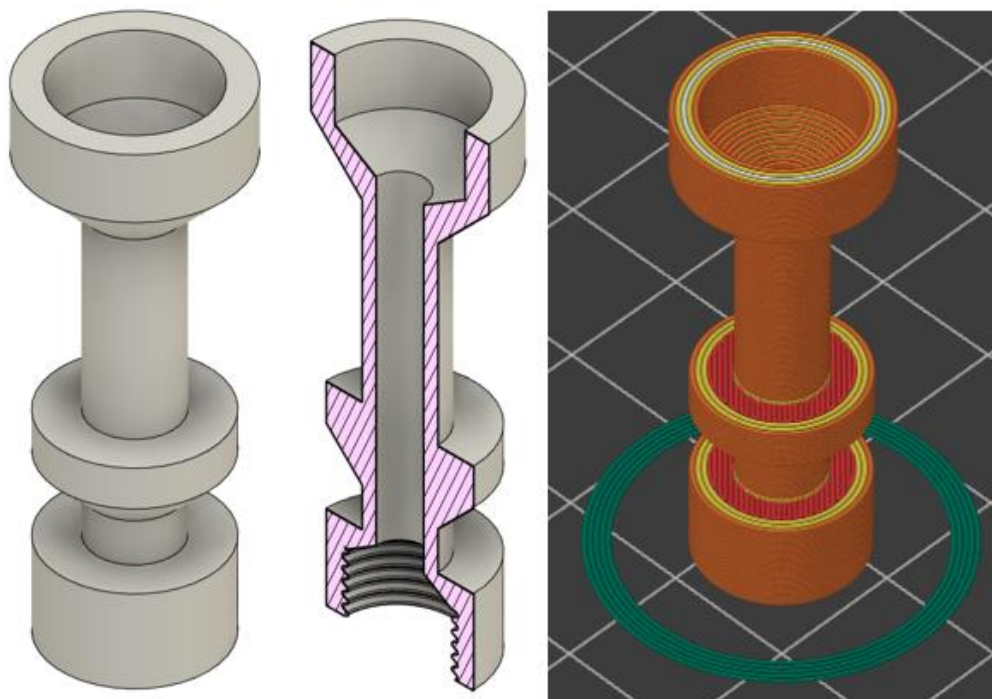
Obrázek 42 Cup s drážkou pro těsnění v CADu a v PrusaSliceru



Obrázek 43 Vytištěné cupy s těsněním

3.4.3 Cup pro ALUFIX

Pro upínací stavebnici ALUFIX jsou navrženy užší delší cupy, které vycházejí z úzkého designu podtlakového demonstrátoru. Na straně u šroubení byl protažen kostkou ALUFIXu, kde byl následně zajištěn pomocí vytištěného přípravku.



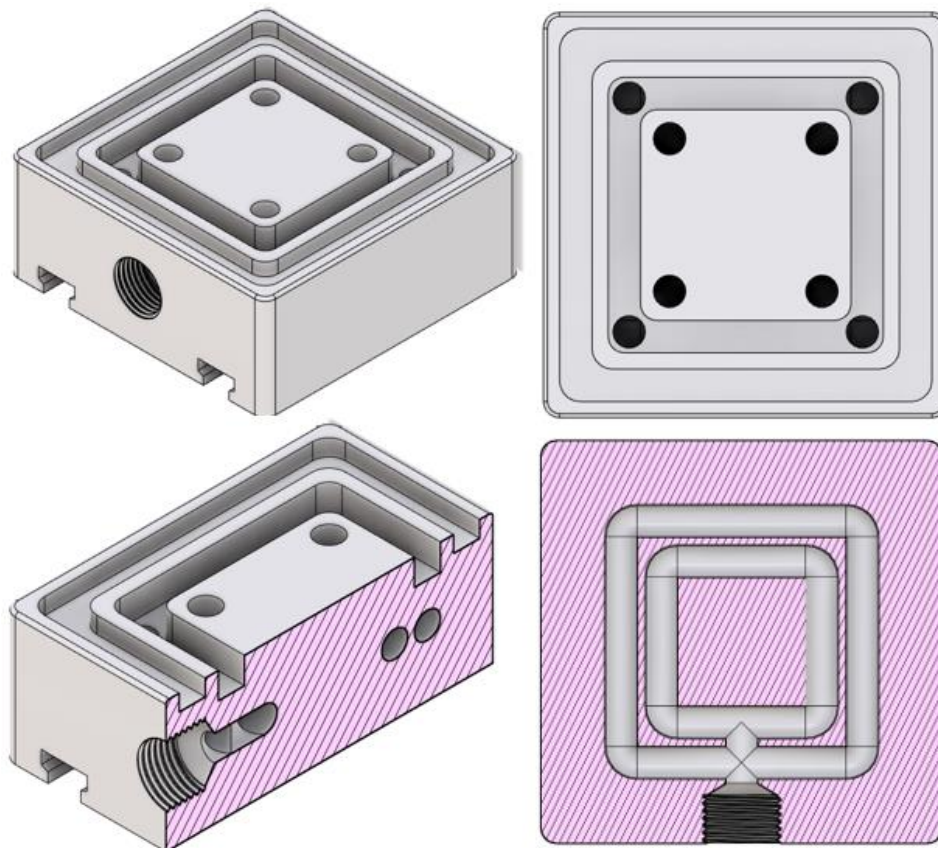
Obrázek 44 Cup pro ALUFIX v CADu a v PrusaSliceru



Obrázek 45 Cup v upevnění v kostce ALUFIXu

3.4.4 Pad

Pad je druh modulárního upínání, který je větší a má větší upínací plochu. Je tvořen kanálky, které ústí do oblasti vymezené těsněním. Stejně jako cup obsahuje závit G 1/8". U padu bylo nutné ho tisknout se 100% výplně. Při nižší hodnotě výplně nedocházelo k udržení podtlaku uvnitř kanálků.



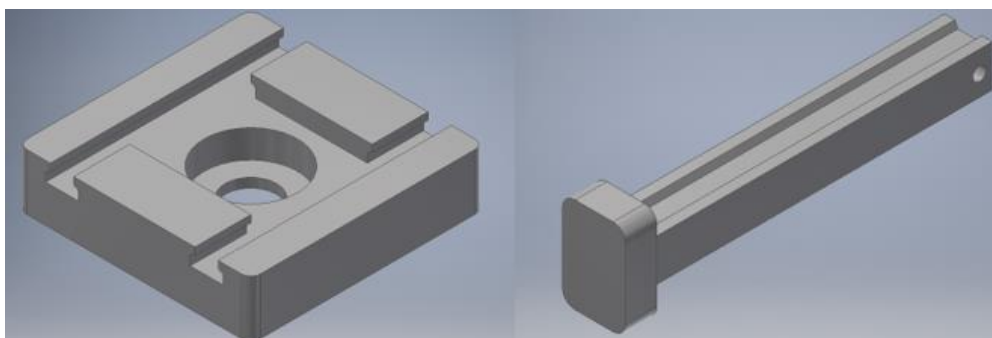
Obrázek 46 Upínací pad s řezy



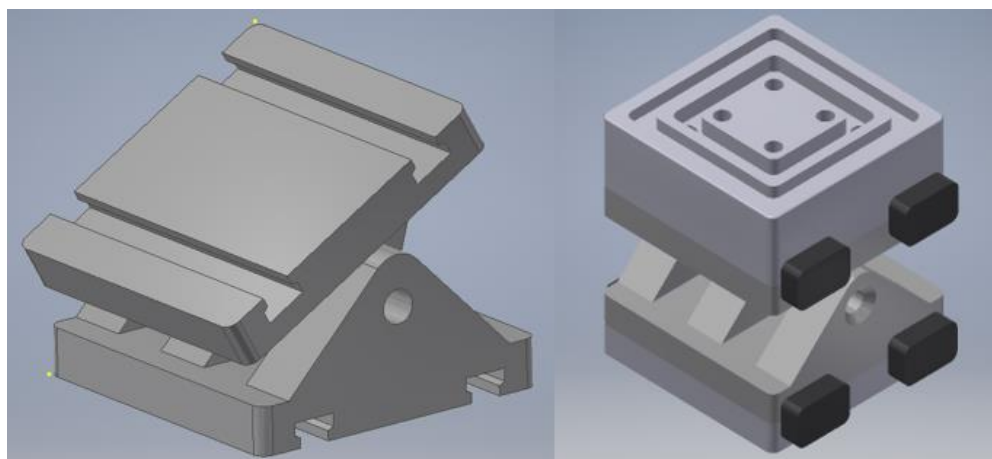
Obrázek 47 Vytištěný pad s těsněním a šroubením

3.4.5 Doplnky

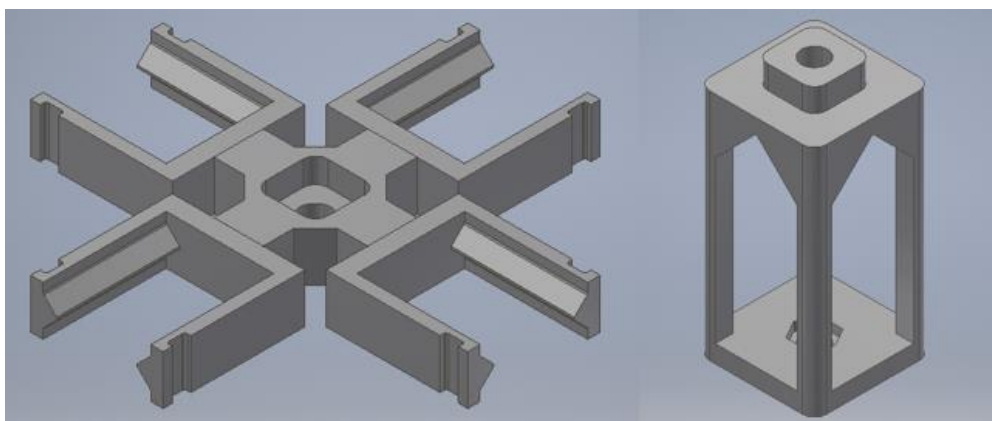
Pro jednoduché upnutí byly navrženy doplňky pro modulární upínání, které slouží k jednoduché fixaci a výměně za jiný kus. Následující obrázky obsahují ukázky vybraných doplňků.



Obrázek 48 Upínací destička ke stolu (vlevo), jistící kolík (vpravo)



Obrázek 49 Náklonný přípravek (vlevo), pad na přípravku spojený spojkami (vpravo)



Obrázek 50 Upínací hvězda pro cupy (vlevo), stojan pro hvězdu (vpravo)

3.5 Zkoušky upínání

Pomocí upínacích přípravků sloužících k upínání padů a cupů a jednorázových přípravků byly provedeny zátěžové zkoušky vytisknutých dílů. Zkoušky probíhaly jako zatěžovací zkouška, kdy docházelo k postupnému zatěžování nádoby kovovým materiálem.

3.5.1 Cup



Obrázek 51 Zátěžová zkouška cupu

3.5.2 Cup s těsněním



Obrázek 52 Zátěžová zkouška jednoho cupu s těsněním (vlevo), čtyři cupy s těsněním (vpravo)

3.5.3 Pad



Obrázek 53 Zátěžová zkouška padu

3.6 Zhodnocení zkoušek

Prvním vyhodnoceným dílem je cup bez těsnění. U tohoto měřeného dílu docházelo k nejnižší nosnosti ze všech měřených dílů. V následující tabulce jsou uvedeny nosnosti při upínání za jeden, dva a čtyři cupy. Uvedená váha je váha, u které došlo k odtržení hliníkové desky, za kterou byla zavěšena nádoba pro závaží.

Teoretická upínací síla pro jeden a více cupů

$S = 66,48 \text{ mm}^2$; $p = 85\,000 \text{ Pa}$

$$F_n = S \cdot p = 66,48 \cdot 10^{-6} \cdot 85\,000 = 5,7 \text{ N}$$

Pro 4 cupy

$$F = F_n \cdot n = 5,7 \cdot 4 = 22,8 \text{ N}$$

Tabulka 3 Zátěžová zkouška cupu

Počet cupů	Podtlak (bar)	Nosnost do odtržení (g)
1	-0,85	356
2	-0,68	510
4	-0,62	880

U více cupů docházelo k poklesu podtlaku uvnitř soustavy o více jak 27 %. Tento pokles mohl být zapříčiněn špatnými těsníci vlastnostmi rozvojek, do kterých vedly hadičky, v nichž docházelo k dělení podtlaku. Z toho důvodu je teoretická upínací síla chybná, jelikož podtlak s přibývajícím počtem cupů klesal.

Druhou vyhodnocenou zkouškou je zátěžová zkouška pro cup s těsněním. Ta probíhala totožně jako zkouška s cupem bez těsnění.

Tabulka 4 Zátěžová zkouška cupu

Počet cupů	Podtlak (bar)	Nosnost do odtržení (g)
1	-0,67	720
2	-0,62	1105
4	-0,61	2094

Z tabulky je patrné, že za nižšího podtlaku u dílů s těsněním došlo ke zvýšení nosnosti do odtržení o alespoň dvojnásobné hodnoty. Z tohoto měření vyplývá, že pokud to upínané díly dovolí, je lepší volit variantu s těsněním.

Posledním měřeným dílem je upínací pad. Ten jako jediný nebyl měřen ve více kusech. U tohoto měření nedošlo k měření do odtržení.

Podtlak (bar)	Nosnost do odtržení (g)
-0,6	7378

Tento upínací modul dokázal udržet minimálně 7378 g materiálu. Poté došlo k prasknutí nádoby pro závaží a měření muselo skončit.

4 Finanční analýza

V následující kapitole je uvedena finanční analýza pro vývoj zkušebních demonstrátorů a následně cena výsledného modulárního upínání.

4.1 Cena vývoje demonstrátorů

Tabulka 5 Jednorázové investice

Drobný majetek	Cena bez DPH (Kč)
3D tiskárna Creality ENDER 3	5000 (včetně updatů)
Ejektory VN-10-H-T4-PQ2-VQ2-O2-P	3230
Vakuometr VAM-40-V1/0-R1/8-EN	540
Hadice PUN-H-6X1-TBL	128

Šroubení QS-G1/8-6 (4ks)	184
--------------------------	-----

Tabulka 6 Náklady na materiál

Cena za 1 kg bez DPH (Kč)	Váha (kg)	Celková cena (Kč)
495	0,3	149

Tabulka 7 Náklady na elektřinu při ceně 4,7 Kč / kWh

Spotřeba elektřiny / h	Celkový počet kWh za 12 hodin	Celková cena (Kč)
0,125	1,5	7

Tabulka 8 Cena práce v CADu a obsluha tiskárny

Cena (Kč /hod)	Počet hodin (hod)	Celková cena (Kč)
500	5	2500

Celková cena za vývoj zkušebních demonstrátorů pro přetlakovou a podtlakovou zkoušku vychází přibližně na 11 738 Kč bez DPH. Cena obsahuje jak cenu tiskárny, tak spotřebu energie a lidskou práci. Největší cenovou položku zabírá jednorázová investice do drobného majetku, který lze dále využít k hotovému podtlakovému upínání.

4.2 Cena návrhu a zhotovení vakuového upínání + doplňků

Tabulka 9 Jednorázová investice

Drobný majetek	Cena bez DPH (Kč)
Těsnění 7800D	519

Tabulka 10 Náklady na materiál

Cena za 1 kg bez DPH (Kč)	Váha (kg)	Celková cena (Kč)
495	1,2	594

Tabulka 11 Náklady na elektřinu při ceně 4,7 Kč / kWh

Spotřeba elektřiny / h	Celkový počet kWh za 43 hodin	Celková cena (Kč)
0,125	5,375	25

Tabulka 12 Cena práce v CADu a obsluha tiskárny

Cena (Kč /hod)	Počet hodin (hod)	Celková cena (Kč)
500	23	11500

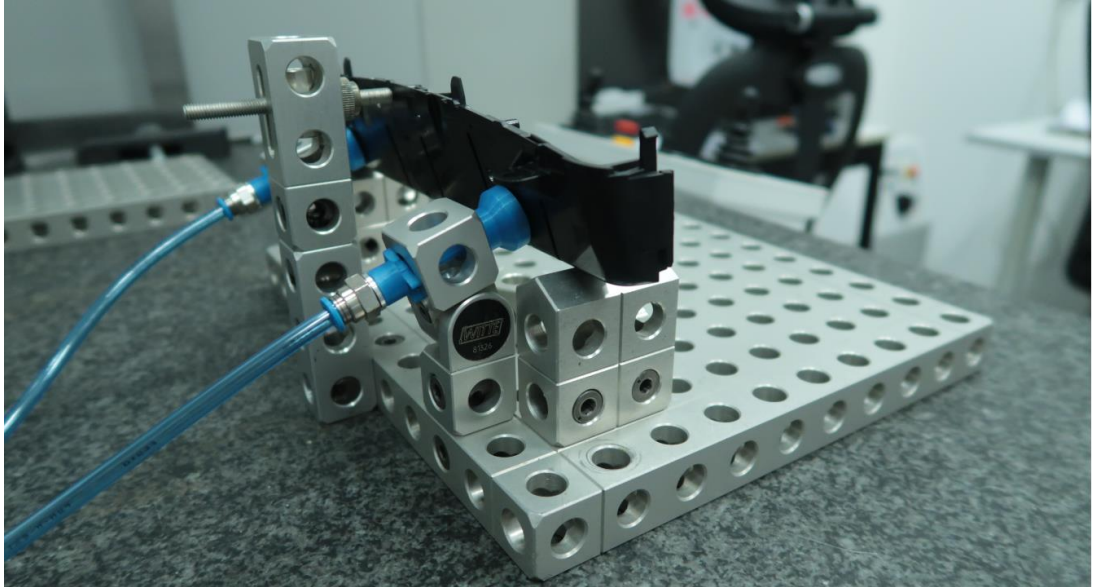
Cena pro vývoj a výrobu modulárního vakuového upínání je přibližně 12 638 Kč bez DPH. V ceně není zahrnuta cena jednorázového nákupu drobného majetku z vývoje demonstrátorů. Celkový součet cen za vývoj demonstrátorů a modulárního upínání je přibližně 24 376 Kč. Nicméně následná cena tisku samotných dílů by se pohybovala v řádech jednotek korun, pokud by všechny potřebné komponenty a 3D tiskárna byly nakoupeny. Výroba jednoho kusu cupu by tak stála s elektrinou a materiálem přibližně 3 Kč.

5 Ukázka využití podtlakového modulárního upínání v kombinaci s ALUFIXem

V této kapitole je vyobrazena ukázka podtlakového upínání nazvaného A-cup v kombinaci se systémem ALUFIX pro CMM. Kontrolovanou součástí byl plastový díl. Ten je zobrazen na Obrázku 54.

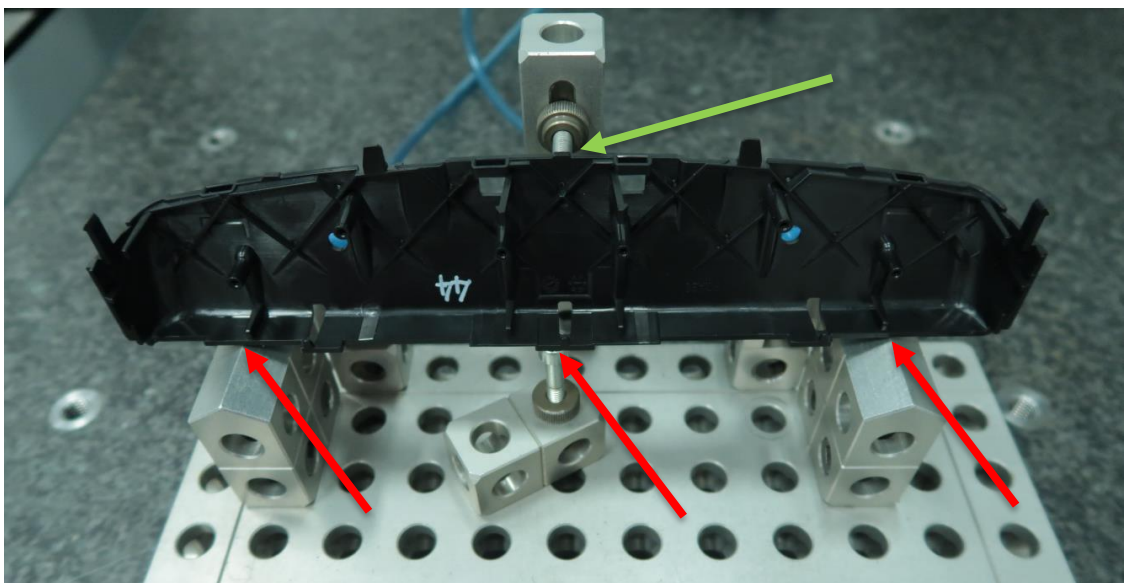


Obrázek 54 Měřená součást

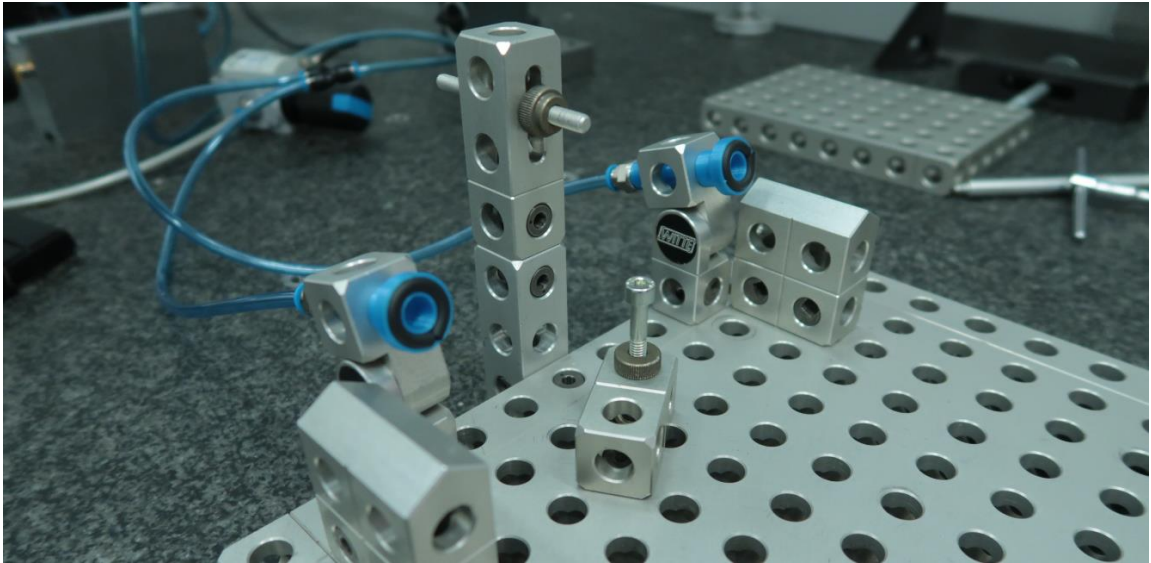


Obrázek 55 Součást v upínacím systému

Kontrolovanou součást bylo nutné zajistit tak, aby se nemohla prohýbat a pohybovat. Toho se docílilo pomocí A-cupů a jednotlivých dílů stavebnice. A-cupy byly schopny udržet celý díl samotný, bylo však nutné zamezit jeho prohýbání. Omezení pohybu a prohybu v ose Z bylo zajištěno využitím hranolů a šroubu (vyznačeno červenou šipkou). Omezení pohybu v ose X bylo zajištěno pomocí podtlakového upínání. Omezení pohybu v ose Y bylo zajištěno opět pomocí podtlakového upínání a šroubu, který podpíral vrchní část. Využitím tohoto šroubu docházelo zároveň k centrování dílu, aby bylo možné vložit součást vždy stejně (vyznačeno zelenou šipkou).

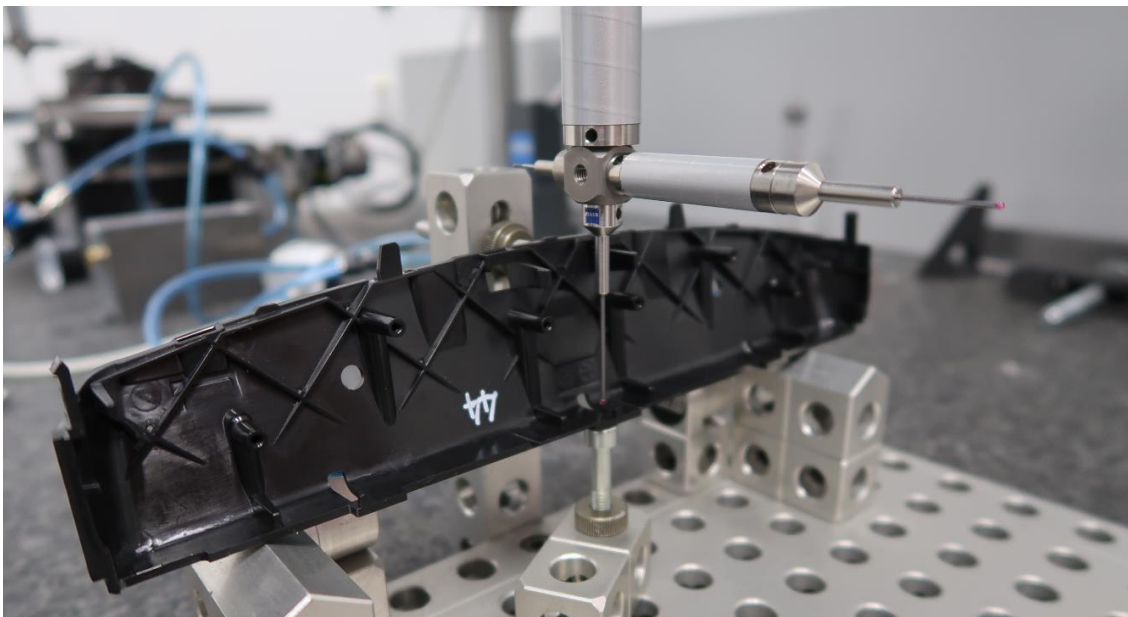


Obrázek 56 Upnutá součást pomocí ALUFIXu a A-cupů

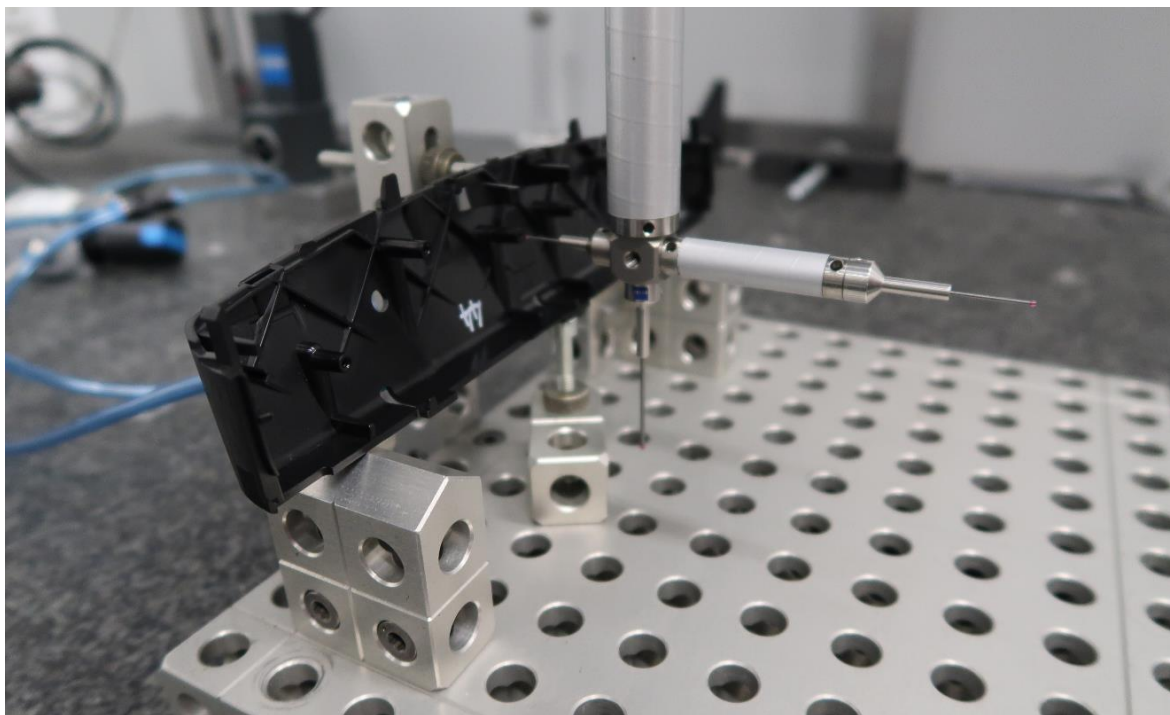


Obrázek 57 Upínací sestava bez upínaného dílu

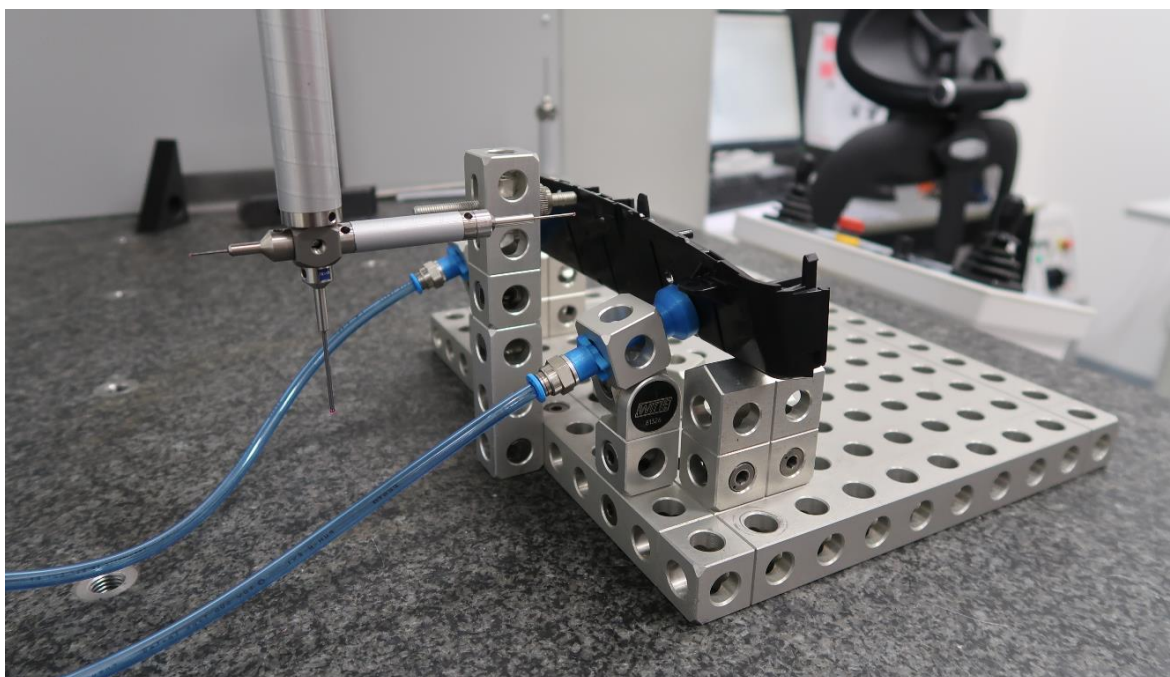
Hlavní výhodou tohoto druhu zajištění je rychlé upnutí daného dílu. Pokud by se upínalo pouze pomocí dané stavebnice a upínek, bylo by nutné sestavit spoustu dílů stavebnice pro upnutí do kolmé polohy. Díky podtlakovému upínání došlo k rychlé fixaci a stačilo tak pouze zamezit prohýbání dílu.



Obrázek 58 Ověření funkčnosti s konfigurací snímačů ve tvaru T na CMM Zeiss Prismo



Obrázek 59 Snímač při kontrole závitu



Obrázek 60 Snímač při kontrole zadní plochy

6 Závěr

Teoretická část bakalářské práce slouží k seznámení čtenáře se základními druhy upínacích systémů. Rozdělení obsahuje často, i méně často používané upínací systémy. Ty lze využít jak v upínání dílu při obrábění, tak v manipulační a měřicí technice. Systémy jsou rozděleny podle způsobu upínání. Prvním způsobem je upínání mechanické, kdy může dojít k poškození upínaného dílu, pokud není mechanicky odolný. Další způsoby upnutí jsou nemechanické, kde upnutí zajišťuje magnetismus a podtlak. Posledním způsobem je upnutí do upínací stavebnice, které může obsahovat jak mechanické, tak nemechanické upínání.

Cílem praktické části bylo vyhodnotit problematické aspekty podtlakového upínání. Mezi tyto problémy se řadí schopnost udržení podtlaku uvnitř upínacího systému, kvalita povrchu upínací plochy a síla, kterou dokáže zařízení daný díl upnout. První rozhodující zkouškou byly podtlakové a přetlakové zkoušky, které měly ukázat, zda je možné využít aditivní technologie k zhotovení upínacího systému. Výsledkem přetlakové zkoušky bylo, že vzduch proudící do zařízení uniká pouze dnem, které obsahuje síťkovitou strukturu. Stěny tvořené třemi perimetry však vzduch nepropouštěly. Další byla zkouška podtlaková, u té se zkoušelo, jestli jsou stěny tvořené dvěma, třemi a čtyřmi perimetry schopné odolat podtlaku. U této zkoušky bylo vyhodnoceno, že stěny tvořené třemi a čtyřmi perimetry dosahují totožného výsledku. Následně byl opakován test pouze s demonstrátorem se třemi perimetry. Maximální podtlak při vstupním tlaku 4 barů může dosahovat hodnoty $-0,9$ baru. Z opakovaného testu vzešel výsledek, že demonstrátory jsou schopny držet stálou průměrnou hladinu podtlaku, ale dochází k přijatelným ztrátám 15 %. Tato ztráta nebrání využití v praxi. Zkoušky proběhly úspěšně. Díky tomu mohl být navrhnout modulární upínací systém. Ten se skládá z cupů nebo padů. Většina navrhovaných dílů musela mít více verzí, protože u 3D tisku je těžké docílit správného dosednutí dílů do sebe kvůli horším tolerancím. Cupy jsou jednoduché přímé upínací systémy, které mohou (ale nemusí) obsahovat těsnění na upínací ploše. Ty slouží k upínání ploch, které jsou nedostatečně velké pro upínací pad. Pad je upínací systém složený z jedné velké upínací plochy. Ta je vymezena pomocí gumového těsnění. Jeden cup bez těsnění je schopen udržet maximálně 0,35 kg, než dojde k odtržení dílu. Cup s těsněním je schopen udržet více než 0,7 kg. Nejvíce je schopen udržet pad, tj. minimálně 7 kg. Z těchto výsledků je patrné, že navrhované podtlakové upínání najde nejlepší využití v upínání dílů náchylných na mechanické poškození v CMM

a u manipulátorů s nízkou nosností. Hlavní výhodou tištěného upínání je možnost jeho uzpůsobení pro upínaný díl a jeho nízká cena. V závěrečné fázi testování byla úspěšně ověřena funkčnost podtlakového systému v kombinaci s ALUFIXem při měření plastového dílu.

7 Bibliografie

- [1] *MATRIX® AUTOMATION* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.matrix-innovations.com/produkt-kategorie/automation/>
- [2] *Bridge coordinate measuring machine MMZ T* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/carl-zeiss-industrielle-messtechnik/product-210459-2150513.html>
- [3] M, Saif. *JIGS AND FIXTURES: TYPES, PARTS, ADVANTAGES, APPLICATIONS AND MORE*. [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/jigs-and-fixtures/>
- [4] SCALLAN, Peter. *Process Planning: The Design/Manufacture Interface* [online]. Elsevier Science & Technology [cit. 2021-07-13]. ISBN 9780080473994. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=288841>
- [5] *Upínací stavebnice pro CMM* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/cmm-fixtures--20851>
- [6] *Upínání obrobků: Upínání do univerzálního sklíčidla* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce11.htm>
- [7] Univerzální sklíčidla. *Boukal* [online]. [cit. 2021-07-14]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/univerzalni-sklicidla/723/kategorie>
- [8] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2610-8.
- [9] MĚŘICÍ PRIZMA MARTOOL 107 V. *TM TECHNIK* [online]. [cit. 2021-07-14]. Dostupné z: <https://www.tm-technik.cz/merici-prizma-martool-107-v/>

- [10] Kontrolní prizma Bernardo. *Boukal* [online]. [cit. 2021-07-14]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/kontrolni-prizma-bernardo-90-x-48-x-48-mm-se-trmenem/2939/produkt>
- [11] *Katalog - svěráky a upínací systémy* [online]. [cit. 2021-07-14]. Dostupné z: https://media.wnt.com/dwn/cs/katalog/9903110019_katalog%20-%20sveraky%20a%20upinaci%20systemy%202019.pdf
- [12] Dvouosý otočný svěrák Bernardo PTS 100. *Boukal* [online]. [cit. 2021-07-14]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/dvouosy-otocny-sverak-bernardo-pts-100/2771/produkt>
- [13] SURUPA, S. *Clamping Devices: Rules and Types* [online]. [cit. 2021-07-14]. Dostupné z: <https://www.engineeringenotes.com/industrial-engineering/machine-tools/clamping-devices-rules-and-types-fixtures-machine-tools-engineering/23622>
- [14] Magnetické upínače ve strojírenství – které typy existují?. *UNIMAGNET* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/clanek/245/magneticke-upinace-ve-strojirenstvi-ktere-typy-existuji/>
- [15] Magnetické upínání obroubků. *Techlan Chudoba s.r.o.* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.techlan.cz/magneticke-upinani-obroubku-uvod>
- [16] MAGNETICKÉ UPÍNAČE. *WALMAG* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://eshop.walmag.cz/NextCategory/cs-CZ/P123/magneticke-upinace>
- [17] Magnetické měřicí a upínací prizma MarTool 107 MH. *TM TECHNIK* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.tm-technik.cz/magneticke-merici-a-upinaci-prizma-martool-107-mh/>
- [18] ABUŠINOV, Ing. Alexandr. *Vakuové upínací desky pro obrábění* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vakuove-upinaci-desky-pro-obrabeni>

- [19] Vacuum clamping Systems 2021/2022. *AMF* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.amf.de/files/amf-assets/news/downloads/catalogues/Catalogue-AMF-Vacuum-Clamping-Systems.pdf>
- [20] Modular vacuum clamping system. *SPREITZER* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.spreitzer.de/en/clamping-technology/vacuum-clamping-technology/>
- [21] *The vacuum clamping system VAC SYS: Clamping without limits* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: https://tts-pim.com.au/4-downloads/festool/brochures/vac_sys_clamping_system_brochure.pdf
- [22] VAKUOVÉ UPÍNACÍ SYSTÉMY. *ESPERANTO s.r.o.* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.esperantomb.cz/vakuove-upinaci-systemy.html>
- [23] Vacuum Clamping Systems: Clamping Solutions for CNC Machining. *SCHMALZ* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: https://cdn.schmalz.com/media/schmalz.fi/05_services/catalogs/VA-CL/clamping-solutions-CNC-machining.pdf
- [24] Cups. *VACUUM CNC* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://vacuum-cnc.com/en/home/vacuum-cnc-cups/>
- [25] *VACUUM CNC* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://vacuum-cnc.com/en/>
- [26] *Clamping devices and fixture system solutions for metrology* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/prislusenstvi/fixture-systems.html>
- [27] ALUFIX. *WITTE* [online]. [cit. 2021-07-16]. Dostupné z: <https://www.witte-barskamp.com/modular-fixturing-systems/alufix-classic-alufix-eco/>
- [28] G. GORDEEV, Evgeniy, Alexey S. GALUSHKO a Valentine P. ANANIKOV. *Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling* [online]. [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: doi:<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0198370>

- [29] AL-HASNI, Shihab a Giulio SANTORI. *3D printing of vacuum and pressure tight polymer vessels for thermally driven chillers and heat pumps* [online]. [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: [doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X19322717?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X19322717?via%3Dihub)
- [30] *Vacuum clamping for flat metal workpieces* [online]. [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: <https://www.spreitzer.de/en/clamping-technology/vacuum-clamping-technology/>
- [31] *Suction Cup Selection* [online]. [cit. 2021-07-23]. Dostupné z: <https://www.schmalz.com/en/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/system-design-calculation-example/suction-cup-selection/>
- [32] *ENDER 3* [online]. [cit. 2021-07-19]. Dostupné z: <https://www.creality.com/goods-detail/ender-3-3d-printer>
- [33] HAUSMAN, Kalani a Richard HORNE. *3D Printing for Dummies*. 1. John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. ISBN 9781118660751.
- [34] *MATERIÁLOVÝ SLOVNÍK* [online]. [cit. 2021-07-19]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [35] *FDM 3D printing materials compared* [online]. [cit. 2021-07-19]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
- [36] *Filamenty* [online]. [cit. 2021-07-19]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/42-prusament>
- [37] *Vakuová technika* [online]. [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/9830.htm
- [38] *VN-10-H-T4-PQ2-VQ2-O2-P* [online]. [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: <https://www.landefeld.com/artikel/cs/vn-10-h-t4-pq2-vq2-o2-p-536805-vacuum-gener-OT-FESTO021294>
- [39] *Vakuové ejektory VN* [online]. [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/VN_CZ.PDF

- [40] *VAM-40-V1/0-R1/8-EN (537810) Vacuum gauge* [online]. [cit. 2021-07-22]. Dostupné z:
<https://www.landefeld.com/artikel/cs/vam-40-v10-r18-en-537810-vacuum-gauge/OT-FESTO008306>
- [41] *PUN-H-6X1-TBL (8048681) Plastic tubing* [online]. [cit. 2021-07-22]. Dostupné z:
[https://www.landefeld.com/artikel/cs/pun-h-6x1-tbl-8048681-plastic-tubing/OT-FESTO069735?param_1=\[{%22typ%22:%22fremd%22,%22artnr%22:%22PUN-H-6X1-TBL%22}\]](https://www.landefeld.com/artikel/cs/pun-h-6x1-tbl-8048681-plastic-tubing/OT-FESTO069735?param_1=[{%22typ%22:%22fremd%22,%22artnr%22:%22PUN-H-6X1-TBL%22}])
- [42] *Nástrčná šroubení QS-G1/8-6* [online]. [cit. 2021-07-22]. Dostupné z:
https://www.festo.com/cat/cs_cz/search?query=QS-G1/8-6

8 Seznam zkratek:

ABS Akrylonil Butadien Styren

FDM Fused Deposition Modeling

PLA Polylactic acid

PETG Polyethylen tereftalat glykol

CT Computed tomography

9 Seznam obrázků:

Obrázek 1 Upnutí vlastní vahou [2].....	9
Obrázek 2 Tříčelist'ové a čtyřčelist'ové sklíčidlo [7].....	10
Obrázek 3 Prizma MarTool 107 V [9], Kontrolní prizma se třmenem [10].....	11
Obrázek 4 Dvouosý otočný svěrák [12]	11
Obrázek 5 Upínky [8]	12
Obrázek 6 Upínací systém Matrix [1].....	12
Obrázek 7 Magnetický upínač NEOMAX 100 [14].....	13
Obrázek 8 Elektromagnetická deska Elmag Wave [16]	13
Obrázek 9 Elektropermanentní upínač Mastermill [16]	14
Obrázek 10 Magnetické prizma MarTool 107 MH [17].....	14
Obrázek 11 Vakuové deska [19].....	15
Obrázek 12 Modulární přísavkový blok [21], přísavky pro upínací systémy [23].....	16
Obrázek 13 Modulární upínání [25]	16
Obrázek 14 Upínací stavebnice [26].....	17
Obrázek 15 Tiskárna Creality ENDER 3 [32]	18
Obrázek 16 1. Tryska s nataveným materiálem, 2. Jednotlivé vrstvy nataveného materiálu, 3. Pohyblivá podložka [33]	19
Obrázek 17 Srovnání základních FDM materiálů [35].....	20
Obrázek 18 Srovnání tisku na zrcadlo	21
Obrázek 19 Nastavení tisku vrstev a perimetrů	22
Obrázek 20 Nastavení rychlostí tisku	22
Obrázek 21 Nastavení filamentu.....	22
Obrázek 22 Vakuový ejektor VN-10-H-T4-PQ2-VQ2-O2-P [38].....	23
Obrázek 23 (1) vstup natlakovaného vzduchu, (2) připojení pro hadičku, (3) výstup z ejektoru do tlumiče [37].....	23
Obrázek 24 Vakuum p_u v závislosti na provozním tlaku p_1 [39].....	24
Obrázek 25 Vakuometr VAM-40-V1/0-R1/8-EN [40], hadice PUN-H-6X1-TBL [41], šroubení QS-G1/8-6 [42], těsnění [19]	24
Obrázek 26 Demonstrátor na přetlakovou zkoušku v CADu a v PrusaSliceru	25
Obrázek 27 Vytištěné zkušební válce o různém počtu perimetrů	25
Obrázek 28 Průběh zkoušky	26

Obrázek 29 Demonstrátor na podtlakovou zkoušku v CADu a v PrusaSliceru	27
Obrázek 30 Zleva zkušební demonstrátor se dvěma, třemi a čtyřmi perimetry	27
Obrázek 31 Průběh zkoušky	28
Obrázek 32 Demonstrátor na podtlakovou zkoušku L profilu s rádiem v ohybu v CADu a v PrusaSliceru	28
Obrázek 33 Demonstrátor na podtlakovou zkoušku U profilu s rádiem v ohybu v CADu a v PrusaSliceru	29
Obrázek 34 Vytisknuté L demonstrátory	29
Obrázek 35 Vyhodnocení v CT	30
Obrázek 36 Chyby stěn (vlevo), Chyba dna (vpravo)	30
Obrázek 37 Síťkovité dno s počtem perimetrů	31
Obrázek 38 Průřez přetlakovými demonstrátory	31
Obrázek 39 Snímky zkušební dílce z CT	32
Obrázek 40 Cup v CADu a v PrusaSliceru	33
Obrázek 41 Vytištěné cupy se šroubením	34
Obrázek 42 Cup s drážkou pro těsnění v CADu a v PrusaSliceru	34
Obrázek 43 Vytištěné cupy s těsněním	34
Obrázek 44 Cup pro ALUFIX v CADu a v PrusaSliceru	35
Obrázek 45 Cup v upevnění v kostce ALUFIXu	35
Obrázek 46 Upínací pad s řezy	36
Obrázek 47 Vytištěný pad s těsněním a šroubením	36
Obrázek 48 Upínací destička ke stolu (vlevo), jisticí kolík (vpravo)	37
Obrázek 49 Náklonný přípravek (vlevo), pad na přípravku spojený spojkami (vpravo)	37
Obrázek 50 Upínací hvězda pro cupy (vlevo), stojan pro hvězdu (vpravo)	37
Obrázek 51 Zátěžová zkouška cupu	38
Obrázek 52 Zátěžová zkouška jednoho cupu s těsněním (vlevo), čtyři cupy s těsněním (vpravo)	38
Obrázek 53 Zátěžová zkouška padu	39
Obrázek 54 Měřená součást	42
Obrázek 55 Součást v upínacím systému	43
Obrázek 56 Upnutá součást pomocí ALUFIXu a A-cupů	43
Obrázek 57 Upínací sestava bez upínaného dílu	44
Obrázek 58 Ověření funkčnosti s konfigurací snímačů ve tvaru T na CMM Zeiss Prismo	44

Obrázek 59 Snímač při kontrole závitu	45
Obrázek 60 Snímač při kontrole zadní plochy.....	45

10 Seznam tabulek:

Tabulka 1 Vyhodnocení zkoušky podtlaku	32
Tabulka 2 Podtlaková zkouška u L a U profilu	33
Tabulka 3 Zátěžová zkouška cupu.....	39
Tabulka 3 Zátěžová zkouška cupu.....	40
Tabulka 4 Jednorázové investice	40
Tabulka 5 Náklady na materiál	41
Tabulka 6 Náklady na elektřinu při ceně 4,7 Kč / kWh	41
Tabulka 7 Cena práce v CADu a obsluha tiskárny	41
Tabulka 8 Jednorázová investice	41
Tabulka 9 Náklady na materiál	41
Tabulka 10 Náklady na elektřinu při ceně 4,7 Kč / kWh	41
Tabulka 11 Cena práce v CADu a obsluha tiskárny	42