

NÁVRH, OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI A
EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY
UPÍNACÍHO SYSTÉMU PRO CT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

LUKÁŠ MALÝ

ZADÁNÍ



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malý** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **473410**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**
Studijní program: **Řízení průmyslových systémů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh, ověření funkčnosti a ekonomické zhodnocení výroby upínacího systému pro CT

Název diplomové práce anglicky:

Design, verification and economic evaluation of the clamping system for CT

Pokyny pro vypracování:

Rešerše současného stavu upínacích systémů pro CT a bezkontaktních metod měření.
Návrh a ověření vlastního řešení upínacího systému.
Ekonomická analýza využitelnosti řešení pro opakovanou výrobu.
Ekonomická náročnost vývoje prototypu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

prof. Ing. František Freiberg, CSc. ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Datum zadání diplomové práce: **19.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **21.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **29.02.2024**

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Vedoucí práce:

Ing. Jan Šimota

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

prof. Ing. František Freiberg, CSc.

Ústav řízení a ekonomiky podniku

Fakulta strojní České vysoké učení technické v Praze

Technická 4

160 00 Praha 6

Česká republika

©červenec 2023 Lukáš Malý

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem: „NÁVRH, OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI A EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY UPÍNACÍHO SYSTÉMU PRO CT“ vypracoval samostatně, za použití uvedené literatury a pramenů.

Ve Vysokém Mýtě dne

.....

Lukáš Malý

ABSTRAKT

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh a výrobu prototypu nového upínacího systému pro průmyslovou tomografii. Cílem studie je vyřešit problémy a omezení současných technik upínání v průmyslové tomografii, jako je neefektivita a neopakovatelnost měření. Práce zahrnuje analýzu stávajících upínacích systémů, určení klíčových požadavků na konstrukci, vytvoření prototypu a testování nově vyvinutého upínacího systému a vyhodnocení jeho funkčnosti. Výsledky studie ukazují potenciál vyvinutého upínacího systému pro zlepšení přesnosti a efektivity průmyslové tomografie a poskytují některé poznatky pro budoucí vývoj v této oblasti. Celkově tato práce přispívá k rozvoji průmyslové tomografie tím, že poskytuje nové řešení pro zlepšení procesu zobrazování prostřednictvím návrhu a implementace inovativního upínacího systému. Dalším výstupem práce je ekonomické zhodnocení vývoje prototypu a kalkulace nákladů případné sériové výroby.

KLÍČOVÁ SLOVA: CT, Tomografie, Upínací systém, Metrologie, 3D tisk, Materiály, Náklady, FDM, CAD

ABSTRACT

This thesis focuses on the design and manufacture of a prototype of a new clamping system for industrial tomography. The aim of the study is to address the problems and limitations of current clamping techniques in industrial tomography, such as inefficiency and non-repeatability of measurements. The work includes a comprehensive analysis of existing clamping systems, identification of key design requirements, prototyping and testing of the newly developed clamping system and evaluation of its performance. The results of the study show the potential of the developed clamping system to improve the accuracy and efficiency of industrial tomography and provide some insights for future developments in this area. Overall, this work contributes to the advancement of industrial tomography by providing a new solution to improve the imaging process through the design and implementation of an innovative clamping system. Another output of the thesis is an economic evaluation of the prototype development and costing of the eventual mass production.

KEYWORDS: CT, Tomography, Clamping system, Metrology, 3D printing, Materials, costs, FDM, CAD

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji rodině za podporu nejen při studiu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - schematické znázornění funkce průmyslového tomografu [1]	15
Obrázek 2 - Kontrola plastové součásti na defekty, konkrétně dutiny v materiálu. [7]	18
Obrázek 3 - upínací systém SWA39 CT firmy dk FIXIERSYSTEME GmbH & Co. KG [8]	19
Obrázek 4 - ALUMESS.xray od německého výrobce Spreitzer GmbH & Co. KG	20
Obrázek 5 - ALUMESS.xray od německého výrobce Spreitzer GmbH & Co. KG [9]	20
Obrázek 6 - ZEISS TomoStage [10].....	21
Obrázek 7 - ZEISS OmniFix CT [11].....	21
Obrázek 8 - ZEISS OmniFix Vise [12]	22
Obrázek 9 - upnutí pomocí upínek [13].....	23
Obrázek 10 - zafixování měřených předmětů "zapíchnutím" do bloku polystyrenu	23
Obrázek 11 -Řez platformou upínacího systému.....	31
Obrázek 12 - Nástavec "JEŽEK"	32
Obrázek 13 - Nástavec "Věž" pro měření více součástí najednou.	33
Obrázek 14 -Nástavec pinzeta pro upínání drobných součástí.....	34
Obrázek 15 - Nástavec Svěrák pro rozměrnější a tvarově složité součásti	35
Obrázek 16 - Stromečkovitý adaptér umožňující použití více monolitních upínačů	36
Obrázek 17 - Uživatelské rozhraní programu Prusa Slicer	38
Obrázek 18 -Tisk platformy upínacího systému na tiskárně Prusa i3 MK3S+	39
Obrázek 19 - Upínací systém včetně vybraných upínačů a nástavců.....	41
Obrázek 20 - použití upínače s uhlíkovými trny pro napolohování a zafixování dílců	42
Obrázek 21 - Upnutí součásti pomocí upínače "ježek" s trny z materiálu ABS	42
Obrázek 22 - příklad využití nástavce "věž" pro zvýšení efektivity měření.....	43
Obrázek 23 - příklad využití svorek a adaptéru pro zvýšení efektivity.....	43
Obrázek 24 - upnutý testovací vzorek v pracovním prostoru tomografu	44
Obrázek 25 - Printscreen vyhodnocení naměřených dat	44
Obrázek 26 - Díky nízké hustotě materiálů použitých k výrobě.....	45
Obrázek 27 - Upínač typu "věž" s upnutými testovacími artefakty v prostoru CT.	46
Obrázek 28 - Pohled na upnuté zkušební artefakty a naskenovaná data	47
Obrázek 29 -detailní pohled na zkušební artefakty upnuté v nástavci věž.....	47
Obrázek 30 - Záznam odvedených prací a chodu tiskárny, snímek obrazovky z MS Excel	49
Obrázek 31 - Výpočet nákladů na vývoj prototypu v programu MS Excel	50
Obrázek 32 -Platforma upínacího systému modifikovaná pro třískové obrábění	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Maximální prozařitelná akumulovaná tloušťky materiálů [6]	17
Tabulka 2 - Porovnání cen aktuálně na trhu dostupných řešení	23
Tabulka 3 - Srovnání vlastností tiskových materiálů [23]	29
Tabulka 4 -Doba tisku jednotlivých komponent upínacího systému	53
Tabulka 5 - Srovnání cen výroby upínacího systému při výrobě padesátikusové série.	55
Tabulka 6 - Porovnání prodejních cen navrženého upínacího systému a dostupných řešení....	56

SEZNAM ZKRATEK

ABS	
Akrylonitrilbutadienstyren	26
CAD	
Computer Aided Design	17
CMM	
coordinate measuring machine.....	18
CT	
Computed Tomography	14
EMI	
Electric and Musical Industries.....	17
FDM	
Fused deposition modelling	25
HIPS	
High impact polystyrene	28
LOM	
Laminated Object Manufacturing	25
PA	
Polyamide	28
PAHT	
Polyamide High Temperature	29
PC	
Polycarbonate	29
PETG	
Polyethylene terephthalate glycol	27
PLA	
Polylactid acid	27
PP	
Polypropylene	28
SLS	
Selective Laser Sintering.....	25
STL	
Stereolitografie	25

SEZNAM PŘÍLOH

Seznam příloh v elektronické podobě (CD)

1. Diplomová práce – elektronická verze
2. Dokument Excel – naklady_projekt.xlsx
3. Dokument Excel – naklady_serie50ks.xlsx
4. Dokument Excel – naklady_bezplatformy_serie50ks.xlsx
5. Výkres – jezdec_cnc.pdf
6. Výkres – kamen_cnc.pdf
7. Výkres – kamen_cnc_aretace.pdf
8. Výkres – kulovy_cep.pdf
9. Výkres – viko_kloubu_cnc.pdf

OBSAH

ZADÁNÍ.....	2
PROHLÁŠENÍ.....	4
ABSTRAKT.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK.....	8
SEZNAM ZKRATEK	9
SEZNAM PŘÍLOH.....	10
OBSAH	11
1. ÚVOD	13
2. CÍL A POSTUP PRÁCE	14
3. MOTIVACE.....	14
4. VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE	15
4.1. PRINCIP.....	15
4.2. HISTORIE.....	16
4.3. SOUČASNÉ VYUŽITÍ.....	16
5. UPÍNACÍ SYSTÉMY NA TRHU.....	18
5.1. UPÍNACÍ SYSTÉMY PRIMÁRNĚ URČENÉ PRO CT.....	19
SPREITZER.....	19
5.2. UPÍNACÍ SYSTÉMY ODVOZENÉ	21
5.3. ALTERNATIVNÍ ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ.....	22
6. 3D TISK	24
6.1. HISTORIE 3D TISKU	24
6.2. METODA POUŽITÁ PRO VÝROBU PROTOTYPU	24
6.3. MATERIÁLY	25

7.	NÁVRH A VÝROBA PROTOTYPU UPÍNACÍHO SYSTÉMU	30
7.1.	POŽADAVKY	30
7.2.	KONSTRUKCE	30
7.2.1.	PLATFORMA	31
7.2.2.	NÁSTAVCE	32
7.2.3.	PŘÍSLUŠENSTVÍ	36
7.3.	VÝROBA	37
7.3.1.	PŘÍPRAVA DAT	37
7.3.2.	TISK	38
7.3.3.	POSTPROCESSING	39
7.3.4.	MONTÁŽ	40
8.	PRAKTICKÉ ZKOUŠKY SYSTÉMU A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	41
9.	FINANČNÍ NÁROČNOST VÝROBY PROTOTYPU	48
10.	TECHNOLOGIE VHODNÉ PRO FINÁLNÍ VÝROBU	52
10.1.	UPÍNACÍ SYSTÉM VYRÁBĚNÝ METODOU 3D TISKU	53
10.2.	UPÍNACÍ SYSTÉM VYRÁBĚNÝ METODOU VSTŘIKOVÁNÍ	53
10.3.	UPÍNACÍ SYSTÉM VYRÁBĚNÝ METODOU TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ	54
10.4.	POROVNÁNÍ FINANČNÍ NÁROČNOSTI RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY	55
10.5.	CENOVÉ SROVNÁNÍ SE SYSTÉMY NA TRHU	56
11.	UŽIVATELSKÝ MANUÁL	57
12.	ZÁVĚR	59
	BIBLIOGRAFIE	60

1. ÚVOD

V posledních letech se průmyslová neboli výpočetní tomografie (Computed Tomography, CT) stává čím dál více populární, ať už kvůli dostupnosti nebo tomu, že se řadí mezi neinvazivní zobrazovací metody. Díky tomu umožňuje vytvořit trojrozměrný obraz předmětu včetně jeho vnitřní struktury. Proto je možné prohlížení a kontrola vnějších i vnitřních struktur předmětu bez nutnosti jeho destrukce. I přes rostoucí popularitu se na trhu zatím neobjevilo ideální řešení pro upnutí měřených objektů v měřicím prostoru tomografu, což mimo jiné dokazují naprosto rozdílné přístupy výrobců poskytujících současná řešení.

Princip průmyslové počítačové tomografie spočívá v provedení stovek, respektive tisíců průřezových radiografických projekcí během rotace objektu o 360 stupňů. Následně, je pomocí softwaru vypočten z průřezových projekcí prostorový obraz (3D), který je možné sledovat z jakéhokoli úhlu i s rozdělením na libovolně zvolené vrstvy. Každý měřený objekt je třeba v pracovním prostoru tomografu zafixovat tak, aby se zamezilo jeho pohybu a případným vibracím, které by znehodnocovaly měření. Náplní diplomové práce je proto návrh, výroba, otestování a ekonomické zhodnocení prototypu univerzálního upínacího systému pro průmyslové tomografy. Upínací systém musí být schopen upnout měřené objekty rozličného tvaru, velikosti a hmotnosti. Dalším požadavkem je možnost napolohování objektu do libovolné pozice, a především zvýšení produktivity měření na průmyslových tomografech. Výroba prototypu upínacího zařízení je realizována metodou 3D tisku z důvodu snadnějšího odladění jednotlivých komponent a ekonomické nenáročnosti při srovnání s alternativními možnostmi výroby.

2. CÍL A POSTUP PRÁCE

Cílem této diplomové práce je návrh univerzálního upínacího systému pro zjednodušení práce obsluhy průmyslového tomografu a zvýšení produktivity měření. Práce se skládá ze čtyř hlavních částí, kdy první - rešeršní část, shrnuje informace o problematice výpočetní tomografie, v současnosti dostupná řešení a metody 3D tisku. Tedy podklady nezbytně nutné k vytvoření funkčního prototypu upínacího systému, jehož návrh a tvorba je shrnuta v druhé části práce. Třetí část má za úkol čtenáře seznámit s reálnými daty získanými při zkouškách měření za použití vyvinutého upínacího systému. Nákladům na výrobu prototypu a případnou sériovou produkci s využitím konvenčních technologií výroby je věnována čtvrtá část práce.

3. MOTIVACE

Motivací pro vznik této diplomové práce bylo navázání na bakalářskou práci s názvem „NÁVRH A REALIZACE UPÍNACÍHO SYSTÉMU PRO PRŮMYSLOVÝ TOMOGRAF“, ve které jsem se zabýval problematikou upínání měřených objektů pro měření pomocí průmyslových tomografů, respektive návrhem jednoduchého modulárního upínacího systému. Od té doby nedošlo k významnému posunu v řešení tohoto problému. Finální návrh konceptu upínacího systému bude reflektovat poznatky z praxe, především s ohledem na zvýšení produktivity měření nejen na tomografu ZEISS Metrotom 1500 v laboratořích školy.

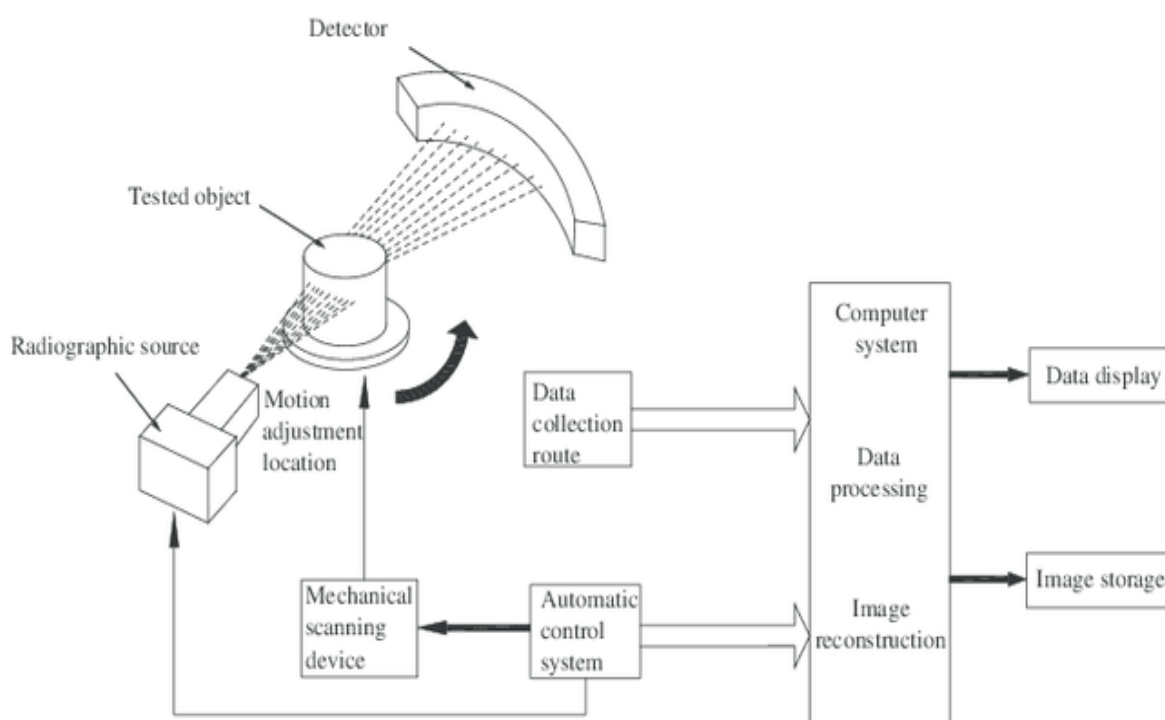
4. VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE

Úkolem této kapitoly je stručně shrnout principy a praktické využití průmyslové tomografie, což čtenáři objasní problematiku (a nezbytnost) správného upnutí měřených předmětů. Závěr obsahuje přehledné shrnutí a zhodnocení výhod a nevýhod materiálů vhodných pro výrobu samotného systému.

4.1. PRINCIP

Podstata principu metody výpočetní tomografie je ukryta v samotném názvu. „Výpočetní“ z toho důvodu, že výsledek měření, tedy trojrozměrný model, je pomocí matematických algoritmů vypočten z jednotlivých dvojrozměrných řezů měřeným objektem. Slovo „tomografie“ vychází z řeckého tomos neboli (řez) a graphy (písmo).

Základní princip tomografie je založen na prozáření vzorku svazkem rentgenových paprsků. Část záření je pohlcena materiálem měřeného objektu, zbytek paprsků dopadne na detektor, kde je změřena jejich intenzita. Tím je utvořen jeden rentgenový snímek neboli projekce. Těchto jednotlivých projekcí je pod různými úhly nasnímáno několik tisíc, tak, aby z nich bylo možno vytvořit prostorovou virtuální kopii součásti.



Obrázek 1 - schematické znázornění funkce průmyslového tomografu [1]

4.2. HISTORIE

Wilhelm Conrad Röntgen, jenž roku 1895 objevil paprsky X, neboli rentgenové záření, což je jeden z principů, na kterém výpočetní tomografie funguje, tím vlastně položil základy této moderní metody. S rozvojem počítačů se ke konci šedesátých let minulého století podařilo sestavit první prototypy výpočetních tomografů. Za vynálezce je považován britský inženýr Godfrey Newbold Hounsfield, který stojí i za prvním komerčně dostupným tomografem vyvinutým v laboratořích EMI a uvedeným na trh v roce 1972. První výpočetní tomografy byly určeny primárně pro medicínské použití, až posléze se jejich využití začalo uplatňovat i v jiných oborech, od strojírenství až po paleontologii. [2]

4.3. SOUČASNÉ VYUŽITÍ

Výpočetní tomografie je pojem dříve známý především z oblasti medicíny. V poslední době se s ním můžeme stále častěji setkat i v průmyslu. Z důvodu nedostatečné přesnosti byla ještě donedávna počítačová tomografie v průmyslu omezena většinou na kontrolu materiálu. Předností moderních strojů je sloučení metrologie a tomografie, díky čemuž lze nedestruktivním způsobem snímání získat z jediného skenování data o vnější geometrii i objemu součástky s vysokou přesností. Kombinací polohovacích mechanismů, odměřovacích systémů, rentgenového detektoru s vysokým rozlišením a výkonné výpočetní techniky je možno nedestruktivním způsobem získat vysoce přesná data o měřené součástce. [3] [4]

Tato vcelku nová metoda měření se nazývá metrotomografie a její uplatnění lze nalézt především v oblasti kontroly a testování prototypů a součástek nových výrobků, které nelze jednoduše kontrolovat jiným způsobem. Hlavní oblasti použití jsou reverzní inženýrství, nedestruktivní měření a zkoušení, nedestruktivní porovnávání celkové jmenovité geometrie (CAD model) s geometrií reálného fyzického objektu. [3] [4]

Dále se nabízí možnosti měření sestav, což doposud vyžadovalo rozebrání nebo zničení celkové sestavy. Nyní může obsluha vyhodnotit sestavu vizuálně nebo měřit rozměry a posun mezi jednotlivými komponenty, což významně zjednodušuje a urychluje práci. Měření, v závislosti na požadovaném rozlišení a velikosti objektu, může trvat od několika málo minut až po několik hodin. Práci lze zefektivnit snímáním několika objektů najednou. Měření na CT se dá také snadno zautomatizovat využitím zakladače vzorků, což umožní například provoz na nočních směnách nebo o víkendech. [5] [4]

Dnes se můžeme na trhu setkat nejčastěji s průmyslovými tomografy od firem Carl ZEISS, Werth nebo North Star Imaging USA. Hlavní rozdíl v konstrukci medicínského a průmyslového tomografu je v tom, že v průmyslovém nerotuje snímací systém, ale otáčí se měřený objekt,

který je napolohován ve třech osách, tak, aby jeho obraz zabral co největší pole v oblasti detektoru. Během snímání je měřeným předmětem otáčeno o 360° kolem vertikální osy. V předem nastavených krocích na otáčku jsou poté snímány 2D obrazy - rentgenogramy. Všechny rentgenogramy jsou následně zpracovány počítačem. Výstupem je tzv. mračno bodů, resp. voxelů¹, prostorové umístění a intenzita v 16 bitech šedé barvy koresponduje s reálnými body v objemu součástky a okolí a jejich propustnosti. [3] [4]

Díky vysoce přesným a kvalitním součástkám je možno při měření na metrotomech docílit vysoké přesnosti s chybami v rozmezí $\pm (9 + L/50)$ μm (kde L je libovolná měřená vzdálenost), což je ve strojírenství automotive nebo leteckém průmyslu dostačující. Takto malých chyb je možno dosáhnout také pomocí CAA² opravy chyb a korekcí všech chyb systematických. Rozlišení otočného stolu, který je uložen na vzduchových ložiscích, je až 0,036 uhlové vteřiny. [3] [4]

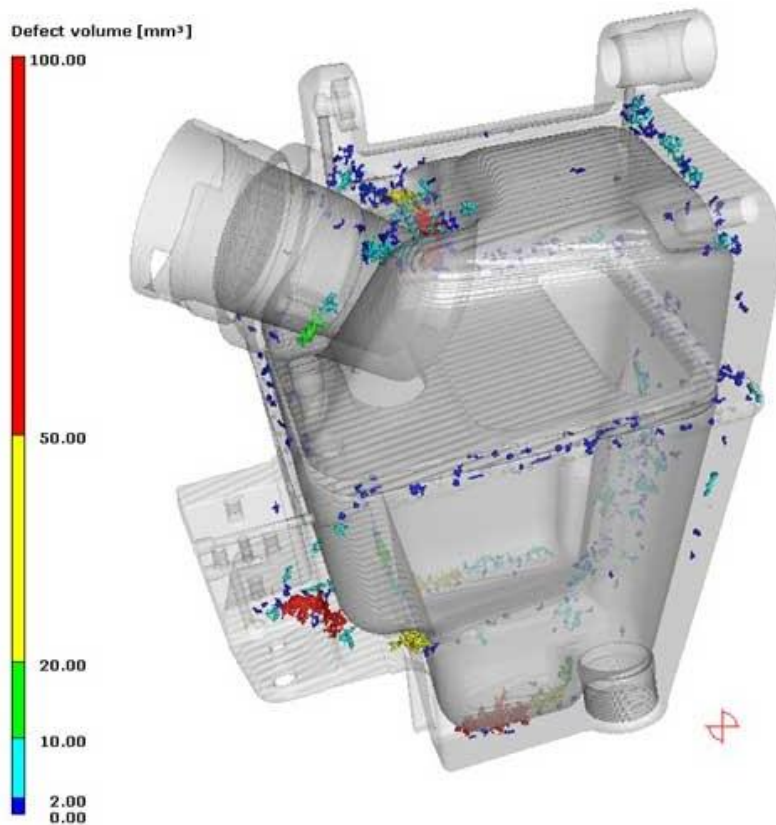
Nesporná výhoda bezkontaktního měření pomocí CT se projevuje při měření pružných a poddajných materiálů, kde by i sebestřednější CMM (souřadnicový měřicí stroj) nepřinesl relevantní výsledky. Základními limitujícími faktory tomografie je tloušťka a hustota materiálu zkoumaného předmětu. Dalším omezením je také vlnová délka použitého záření. Čím větší hustotu má materiál, kterým musí záření procházet, tím více ztrácí paprsek na intenzitě a k detektoru se dostane záření s výrazně nižší energií a snímáný bod je tmavý. Kumulovaná tloušťka materiálu, kterou musí paprsek proniknout, má vliv na snižování intenzity záření vystupujícího za objektem. Dle materiálu měřeného předmětu je nutno nastavit optimální napětí a proud na rentgence. Každý materiál má při daném napětí na rentgence maximální možnou prozařitelnou vzdálenost. Často dochází k používání filtrů z různých materiálů, pomocí nichž se dá regulovat intenzita záření a zbavit se tak nechtěných spekter rentgenového záření, která mohou způsobovat šумы a tím komplikovat měření a jeho vyhodnocení. Tabulka níže shrnuje orientační prozařitelné akumulované tloušťky materiálu v závislosti na materiálu a napětí na rentgence. [4]

Materiál/Napětí	130 kV	150 kV	190 kV	225 kV	450 kV
Plast	90 mm	130 mm	200 mm	250 mm	450 mm
Hliník	30 mm	50 mm	90 mm	150 mm	250 mm
Ocel	5 mm	8 mm	25 mm	40 mm	70 mm

Tabulka 1 - Maximální prozařitelná akumulovaná tloušťky materiálů v závislosti na velikosti napětí na rentgence. [6]

¹ Voxel (volumetric element / volume pixel) představuje částici mřížky ve třídimenzionálním prostoru v počítačové grafice. Je tedy prostorovou analogií k plošnému pixelu.

² CAA neboli Computer-Aided Accuracy je technologie ke zlepšení přesnosti a spolehlivosti měření, výpočtů a dalších kvantitativních procesů. To může zahrnovat použití počítačového softwaru pro analýzu dat, modelování a simulaci a automatizované měřicí systémy.



Obrázek 2 - Kontrola plastové součásti na defekty, konkrétně dutiny v materiálu. [7]

5. UPÍNACÍ SYSTÉMY NA TRHU

Správné upnutí měřeného objektu na otočný stůl tomografu je zárukou kvalitních výstupních dat. Musí splňovat následující parametry:

- Upnutí musí být takové, aby se eliminovaly nechtěné vibrace, vznikající při rotaci pracovního stolu, ty by snižovaly kvalitu jednotlivých snímků.
- Materiál, ze kterého je systém zhotoven by měl mít co možná nejnižší hustotu, proto aby upínací systém vyrobený z materiálu se zbytečně vysokou hustotou nepohlcoval záření a „nestínil“ tak snímaný objekt, čímž by snižoval výslednou kvalitu výstupních dat.

Tyto dva protichůdné požadavky je nutno vybalancovat a pro výrobu zvolit materiál, který bude kompromisem mezi nízkou hustotou a dostatečnou tuhostí. Nespornou výhodou je i versatilita upínacího systému umožňující upínání předmětů organických tvarů a různých velikostí.

V současné době je na trhu k dispozici poměrně omezené množství upínacích systémů použitelných pro potřeby výpočetní tomografie. Většina nabízených produktů je primárně určena pro použití na souřadnicových měřících centrech (CMM). V podkapitolách níže popsany

výčet momentálně na trhu dostupných řešení nám utvoří ucelenou představu o tom, jak které systémy fungují a jaké mají limity.

5.1. UPÍNACÍ SYSTÉMY PRIMÁRNĚ URČENÉ PRO CT

dk FIXIERSYSTEME

Německá firma dk FIXIERSYSTEME GmbH & Co. KG je patrně prvním výrobcem upínacích systémů primárně určených pro použití na CT. Jejich výrobky řady SWA39 CT se řadí k nejsofistikovanějším řešením na trhu a nabízí širokou škálu upínačů a příslušenství, které je neustále inovováno. Celokovová nosná konstrukce sestávající se z kombinace posuvných a kloubových spojek umožňujících napolohování měřeného předmětu je základnou pro samotný upínač, který uživatel volí dle tvaru a velikosti měřeného předmětu. Většina upínačů je tvořena jako soustava čelistí z uhlíkových vláken, v některých případech doplněných pěnovou kontaktní plochou. Princip funkce asi nejlépe popisují obrázky níže.

Mezi výhody se řadí především velmi kvalitní zpracování, robustní konstrukce zaručující trvanlivost a pevné upnutí a široké spektrum různých upínačů a příslušenství. Vysoká cena za základní set upínacího systému bez příslušenství a horší použitelnost pro měření větších objektů patří mezi hlavní nevýhody.



Obrázek 3 - upínací systém SWA39 CT firmy dk FIXIERSYSTEME GmbH & Co. KG [8]

SPREITZER

Dalším výrobcem upínacích systémů primárně koncipovaných pro použití na průmyslových CT je opět německá firma. Spreitzer GmbH & Co. KG nabízí systém ALUMESS.xray, který byl představen teprve na počátku roku 2022. Základem systému ALUMESS.xray je základna s centrální podpěrou měřeného dílce, ten je dále fixován pomocí systému vertikálních podpěr s horizontálními fixačními kolíky. Jedná se o celkem složité řešení, nicméně je vhodné pro

upínání tvarově složitých a těžších dílců. Pro lepší představu o logice upínání na pomoci tohoto systému poslouží Obrázek 4 a Obrázek 5.

Hlavní přednosti toho systému spočívají v možnosti upnutí rozměrnějších objektů a objektů o nepravidelném tvaru. Mezi nevýhody se řadí absence kontaktní plochy, která by umožňovala separaci měřeného objektu od čelistí upínače, nepříliš uživatelsky přívětivé upínání a vysoká cena.



Obrázek 4 - ALUMESS.xray od německého výrobce Spreitzer GmbH & Co. KG

Obrázek 5 - ALUMESS.xray od německého výrobce Spreitzer GmbH & Co. KG [9]

ZEISS

Společnost ZEISS ke svým tomografům nabízí příslušenství s označením TomoStage. TomoStage je vícepatrový stůl z uhlíkového kompozitu, který ovšem neslouží přímo jako upínač, ale jedná se o přípravek pro zvýšení efektivity měření pomocí CT, samotné upnutí je nutné provést např. zafrézováním kontury měřené součástky do bloku nízkohustotního materiálu jako je polystyren nebo jiné lehké pěnové materiály. Dalším z řady příslušenství od společnosti ZEISS je upínací systém OmniFix CT, jehož základem je podstava, do které se přišroubují prodlužovací a kloubové nástavce. Samotné upnutí je pak realizováno např. pomocí plastového tříčelistového sklíčidla.



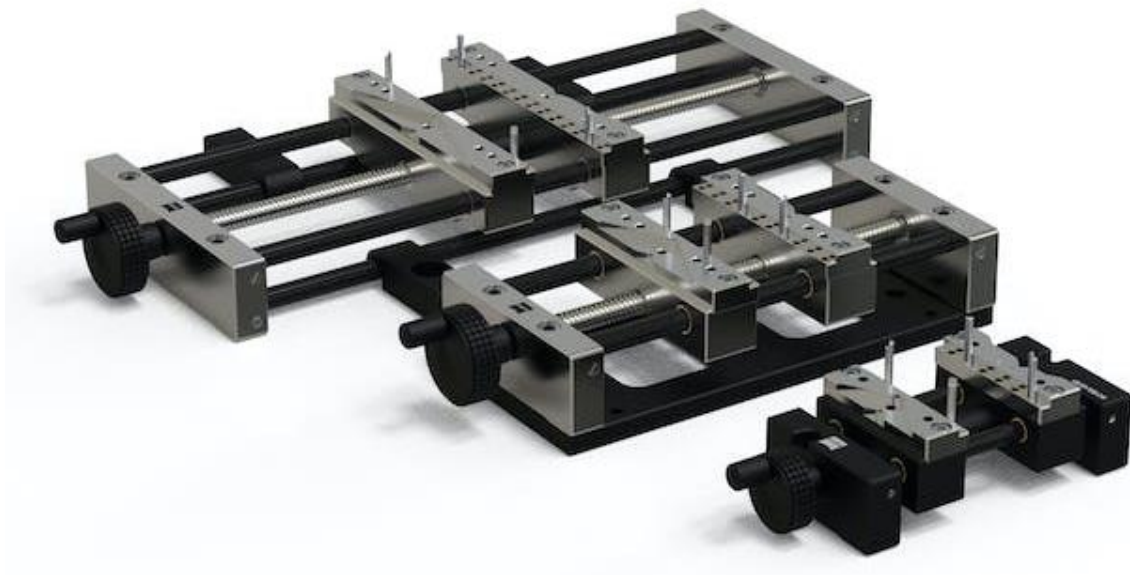
Obrázek 6 - ZEISS TomoStage [10]



Obrázek 7 - ZEISS OmniFix CT [11]

5.2. UPÍNACÍ SYSTÉMY ODVOZENÉ

Další upínací systémy, se kterými se lze setkat jsou ty, jejichž primární účel použití nebyl pro měření na CT. Ve většině případů, jak bylo v úvodu kapitoly zmíněno, se jedná o upínací zařízení vyvinutá pro CMM. Tyto systémy fungují na podobném principu, proto zde bude uveden pouze systém ZEISS OmniFix, který dostatečně reprezentuje zástupce této kategorie upínacích systémů a ilustruje princip jejich funkce. ZEISS OmniFix je jednoduchý systém ve formě celokovového svěráku a výměnnými nastavci čelistí. Tato konstrukce není optimální pro fixování drobnějších dílů a komponent složitějších a organických tvarů.



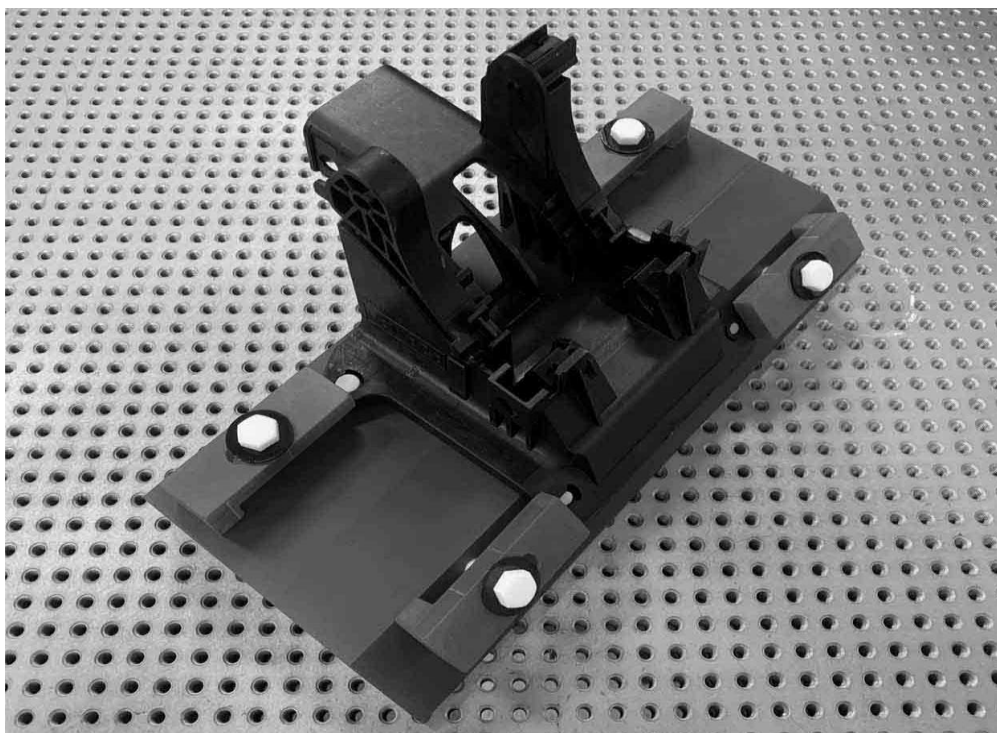
Obrázek 8 - ZEISS OmniFix Vise [12]

5.3. ALTERNATIVNÍ ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ

Upínky z materiálu o nízké hustotě lze použít pro fixaci dílů jednodušších tvarů, jejich použití je vhodné pro opakovaná měření například větších sérií stejných nebo tvarově podobných součástek. Logika upínání je totožná jako u třískového obrábění. Jedná se však o metodu, která v praxi není příliš rozšířena.

Díky rychlému rozvoji 3D tisku se lze také setkat s jednoúčelovými upínacími systémy vytisknutými na míru pro danou součástku nebo sloužící pro fixaci více kusů drobných součástek a zvýšení efektivity měření.

Dnes je nejrozšířenější metodou upínání zafixování měřeného dílu do kusu polystyrenu nebo aranžovací hmoty. Měřený díl se do hmoty buď jednoduše „zapíchne“ nebo se vloží do předem vyfrézovaného negativu tvaru měřeného dílu. Tento způsob je poněkud archaický, neuniverzální, pracný a s nízkou opakovatelností použití, je ovšem velmi rozšířený i díky tomu, že výroba upínacích přípravků pro průmyslové tomografy je tak úzké odvětví, že se jím zabývá málo výrobců, proto je na trhu jen minimum řešení. Na druhou stranu má tento způsob fixace velkou výhodu, a to, že samotná fixační hmota má tak nízkou hustotu, že nevnáší do výstupních dat nepřesnosti a po měření není ve valné většině případů nutno přípravek z výstupu měření odstranit, jelikož se na snímku jeví jako neviditelný.



Obrázek 9 - upnutí pomocí upínek [13]



Obrázek 10 - zafixování měřených předmětů "zapíchnutím" do bloku polystyrenu

Výrobek	Cena (EUR)	Poznámka
dk FIXIERSYSTEME SWA 39 CT	2854	Prostřední konfigurace dle Obrázek 3, bez příslušenství. Katalogová cena.
ALUMESS.xray	2819	Tak, jak je vyobrazeno na Obrázek 5, katalogová cena.
ZEISS TomoStage, 4 levels	680	-
ZEISS OmniFix CT + ring chuck	1630	-
ZEISS OmniFix Vise 120x270	2040	-
Upínky	>15	-

Tabulka 2 - Porovnání cen aktuálně na trhu dostupných řešení

6. 3D TISK

Metoda 3D tisku nabízí velice snadnou a rychlou cestu ke zhmotnění nápadů z náčrtů na listech papíru, respektive CAD modelů v počítači, což ji přímo předurčuje i pro tvorbu prototypu upínacího systému. Tato kapitola tedy pojednává o technologii 3D tisku, její stručné historii, volbě materiálu pro samotnou výrobu a metodě použité pro výrobu.

6.1. HISTORIE 3D TISKU

Koncem 70. let 20. století se začaly objevovat první návrhy metod počítačem asistované aditivní výroby s využitím různých technologií, které byly předmětem prvních patentů. Komplexnější patenty však začaly vznikat až v 80. letech. Jako první přišel s metodou stereolitografie (STL), respektive s jejím patentem z roku 1986, Charles Hull. Tato metoda spočívá ve vytvrzování polymerů ultrafialovým světlem vrstvu po vrstvě. Ke konci 80. let byla vyvinuta technologie LOM, při ní jsou z papíru pomocí laseru vyřezány příčné řezy objektu, které jsou následně slepeny k sobě. Stejnou dobou došlo na Texaské univerzitě k vynalezení metody SLS, jejímž principem je tavení částic prášku, nanášeným ve vrstvách, laserovým paprskem. Steven Scott Crump, respektive jeho firma Stratasys Inc. stojí za vývojem metody FDM patentované roku 1992. Tato metoda spočívá v nanášení roztaveného termoplastu ve vrstvách prostřednictvím tříosého robota. Po roce 2009, kdy došlo k vypršení patentů chránících technologii FDM, začíná boom 3D tiskáren využívající tuto technologii i mezi hobby uživateli, a to i díky projektu RepRap³. Dnes je FDM nejrozšířenější technologií 3D tisku, co do počtu tiskáren. [14]

Stručný přehled výše nebere v potaz zdaleka všechny technologie 3D tisku, kterých existuje více než 30, ale poskytuje rychlý vhled do historie umožňující utvořit si obrázek o metodách, které stály u zrodu této moderní technologie výroby a těch, jenž jsou potenciálně použitelné pro tvorbu prototypu upínacího systému.

6.2. METODA POUŽITÁ PRO VÝROBU PROTOTYPU

Pro výrobu prototypu upínacího systému byla zvolena metoda FDM, ta byla vybrána z důvodu dostupnosti, relativně rychlému a cenově dostupnému tisku. Pestrá škála materiálů tisknutelných touto metodou je také velikou výhodou. Tisk probíhal na tiskárnách Prusa i3 MK3S+ v laboratořích školy a tiskárně typu RepRap i3 v dílně autora diplomové práce. Díky snadné dostupnosti tiskáren bylo možné provádět modifikace jednotlivých komponent upínacího systému bez velkých prodlev, v podstatě do druhého dne po úpravě CAD modelu.

³ RepRap (Replicating Rapid Prototyper) je mezinárodní komunitní projekt, jehož principem je tisk většiny komponent 3D tiskárny na tiskárně jiné, tj. tiskárna je schopna sebepublikace.

6.3. MATERIÁLY

Pro aditivní metody výroby lze použít v podstatě všechny materiály. Od kovů přes papír, až po plasty, těm se dále věnuje tato podkapitola. Budou zde rozebrány materiály potenciálně použitelné pro výrobu upínacího systému. Jelikož je pro výrobu a následné použití v praxi stěžejní použití materiálu s co nejmenší hustotou (viz [SOUČASNÉ VYUŽITÍ](#)), avšak při zachování dostatečné tuhosti a odolnosti systému, jsou plasty ideální volbou.

Na základnu upínacího systému a ty části, které nejsou přímo upínačem, tj. nestíní RTG paprskům a jsou spíše nosného charakteru lze použít materiály o vyšší hustotě, ovšem s lepšími mechanickými vlastnostmi. To proto aby tyto komponenty měly co nejvyšší možnou životnost. Pro samotné upínače jsou vhodnější materiály o menší hustotě, avšak s vyhovujícími mechanickými vlastnostmi, aby bylo minimalizováno pohlcování paprsků. Upínací systém bude používán a skladován v prostředí s předpokládanými teplotami od 15 do 40 °C a vlhkosti vzduchu do 70 %. Těmto podmínkám vyhovují všechny materiály dostupné pro tisk technologií FDM. Pro výrobu potenciálně použitelné materiály jsou uvedeny v textu níže a komparační tabulce.

ABS – Akrylonitrilbutadienstyren

ABS je v současné době pravděpodobně nejrozšířenějším materiálem používaným v oblasti 3D tisku technologií FDM/FFF. Jeho přednosti jsou odolnost vůči teplotním výkyvům, pružnost, pevnost a tvarovatelnost. ABS, prvně patentovaný ve 40. letech 20. století, je termoplastický polymer složený ze tří monomerů: akrylonitrilu (dodává tuhost, chemickou stálost a pevnost), butadienu (houževnatost) a styrenu (hladká struktura). ABS se díky svým vlastnostem uplatňuje v mnoha průmyslových odvětvích, od hraček LEGO, domácích spotřebičů, elektroniky až po automotive. Teplota zpracování se pohybuje mezi 210-250 °C a následná tepelná odolnost výrobku je do 100 °C. Nevýhodami jsou především: nízká odolnost proti UV záření a chemikáliím, nezbytnost uzavřeného tiskového prostoru⁴ při tisku větších objektů, nízká odolnost vůči únavovému namáhání, uvolňování toxických výparů při zahřívání. Cena tiskové struny ABS je velice příznivá, pohybuje se od 310 CZK/kg. [15]

⁴ Uzavřený tiskový prostor je nezbytný při tisku materiálů s velkým procentuálním objemovým smrštěním při chladnutí. Díky použití uzavřeného (temperovaného) tiskového prostoru se dá předcházet deformacím v průběhu tisku.

PLA - Polyactid acid

Kyselina polylactidová je jedním z nejstarších plastů. Ačkoliv byl tento materiál zpopularizován až v posledních letech, byl vyroben již v roce 1938. Základní PLA vlákno je jednoduše polymer kyseliny mléčné s dlouhým řetězcem smíchaným s nukleárními látkami a změkčovadly. PLA nabízí oproti ostatním tiskovým materiálům významné výhody stran jednoduchosti tisku. Díky výborné vnitrovrstvé vazbě a široké teplotní toleranci lze snadno dosahovat vysokých tiskových rychlostí, vzhlednému povrchu a tisku i na jednodušších strojích bez temperování podložky a tiskového prostoru a s nekvalifikovanou obsluhou. Teplota zpracování PLA se nejčastěji pohybuje od 170 °C do 210 °C. Mezi další benefity PLA patří přírodní původ, PLA vzniká při fermentaci rostlinných zdrojů (kukuřičný škrob, cukrová třtina či taro) a je také biodegradabilní. Jeho největší uplatnění je pro výrobu statických jednorázových modelů. Odolnost výrobků z PLA je oproti ostatním plastům nízká, pohybuje se okolo 55 °C. K nevýhodám se mimo nízké teplotní odolnosti řadí nízká mechanická i chemická odolnost. PLA je při vývoji upínacího systému tedy vhodné především pro otestování tvarové správnosti a sestavení. Cena PLA je stejně jako u ABS také velice příznivá, jeden kilogram tiskové struny lze pořídit od 350 CZK. [16]

PETG - Polyethylene terephthalate glycol

Složení PETG je odvozeno od známého polyethylentereftalátu (PET), kdy PETG je obohacen o glykol a ethylenglykol v PET je nahrazen cyklohexanedimetanolem, oproti PET je PETG čirější, méně křehký a lépe se tiskne. Tento mechanicky i chemicky odolný a pevný materiál, jehož původ datující se do roku 1941, v sobě kombinuje výhody ABS i PLA - odolnost ABS a snadná tisknutelnost a nízká smrštitelnost PLA. Díky zdravotní nezávadnosti se používá především jako obalový materiál v potravinářském a nápojovém průmyslu. Tiskové teploty se pohybují mezi 210-250 °C a vyhřívaná tisková plocha alespoň na 80 °C je nutností. PETG má relativně vysokou tepelnou odolnost, je použitelný při teplotách nepřevyšujících 85 °C. Nevýhodou je stejně jako u výše zmiňovaných materiálů hygroskopie, složitější postprocessing – špatně se lakuje a barví. Cena filamentu⁵ začíná na 400 CZK za kilogram. [17]

⁵ Filament (někdy také označovaný jako tisková struna) je plastový, případně jiný materiál, nejčastěji navinut na cívce. Je to vstupní podoba materiálu pro tiskárny fungující na principu FDM. Nejčastěji je k dostání v průměrech 1,75 mm a 2,85 mm.

PA - Nylon

Nylon je vysoce odolný konstrukční termoplast používající se napříč všemi průmyslovými odvětví. Je oblíben zejména díky vynikající ořezodolnosti, vysoké únavové odolnosti, nosnosti a vysoké adhezi mezi vrstvami. Jeho nízký součinitel tření a tepelná odolnost jej předurčují pro výrobu funkčních zatěžovaných dílů jako jsou například ozubená soukolí, kluzná ložiska, třecí elementy či šroubové spoje. V tenkých vrstvách je výtisk z nylonu flexibilní. Díky svým vlastnostem je využíván v automotive i letectví. Teploty zpracování jsou relativně vysoké, pohybují se mezi 240 až 260 °C a teploty tiskové podložky okolo 130 °C. Pracovní teplota tištěného výrobku je do 150 °C. Nylon je hygroskopický (nutnost sušení před tiskem) náchylný ke kroucení, tiskne se obtížněji než materiály výše zmíněné a vyžaduje temperovaný tiskový prostor. Cena tiskové struny je vyšší, začíná na 1700 CZK/kg. [18]

HIPS - High impact polystyrene

HIPS je polystyren s kaučukovými aditivami, je prostorově stálý. HIPS má velice podobné mechanické a tiskové vlastnosti jako ABS s tím rozdílem, že není rozpustný v acetonu. Lze ho rozpustit v D-Limonenu. Proto se uplatňuje jako podpůrný materiál pro složitější a členitější výtisky na tiskárnách uzpůsobených pro multimateriálový tisk. Lze ho brousit. HIPS lze tisknout při teplotách od 230 °C na vyhřívané tiskové podložce. Své mechanické vlastnosti si zachovává do 80 °C. Lze ho pořídit od 550 CZK/kg. [19]

PP – Polypropylene

Polypropylen je polotuhá a houževnatá termoplastická lineární uhlovodíková polymerní pryskyřice o nízké hustotě, která má vynikající chemickou, elektrickou a únavovou odolnost při vysokých teplotách. Byl objeven v 50. letech 20. století Italskými vědci a dnes je po polyethylenu druhým nejvíce vyráběným plastem. Považuje se za zdravotně nezávadný plast a jako takový se používá k výrobě výrobků od plastového nábytku a strojů až po nádoby na pilulky a injekční stříkačky. Navzdory své univerzálnosti má tento materiál i některé nevýhody. Mezi ně se řadí náchylnost k oxidaci, vysoká hořlavost, citlivost na chlorovaná rozpouštědla a UV záření a aromatické látky. Tiskne se okolo 240 °C a tisk je poměrně složitý. Maximální teplota použití polypropyleny je 65 °C. Cena začíná na 1200 CZK za kilogram. [20]

PC – Polycarbonate

Polykarbonát je vysoce pevný materiál určený pro náročné prostředí a technické aplikace. Má extrémně vysokou tepelnou a rázovou odolnost a flexibilitu. Polykarbonát má také vysokou teplotu skelného přechodu 150 °C, tzn. zachovává si strukturální integritu až do této teploty, takže je vhodný pro použití v aplikacích s vysokými teplotami. Pro tisk je nutný temperovaný tiskový prostor, podložka vyhřívána až na 120 °C a tisková teplota se pohybuje okolo 260 °C až 310 °C. Tisk polykarbonátu je tedy velice náročný, polykarbonát je velmi hygroskopický, tudíž jeho uživatelská přívětivost je velice nízká. Cena začíná na 1200 CZK za kilogramovou cívku. [21]

PAHT CF15 - High-Temperature Polyamide carbon fiber reinforced

PAHT CF15 je vysoce efektivní vlákno pro FDM/FFF 3D tiskové technologie. Jedná se o polyamid s příměsí uhlíkových vláken (15% obsahu). Kromě rozměrové stability, chemické odolnosti, nízké hygroskopicitě, výrazně lepších mechanických vlastností a snadnějšímu tisku oproti klasickému nylonu je také tisknutelný na jakékoliv FDM 3D tiskárně vybavené tvrzenou tryskou⁶. Tepelná odolnost je do 150 °C, teplota zpracování se pohybuje v rozmezí 260-280 °C, vyhřívání tiskový prostor i podložka jsou nutností. Cena reflektuje vlastnosti materiálu, dá se pořídit od 2900 CZK za kilogram. [22]

PAHT CF15 je příkladem materiálu vylepšeného plnivem, takovýchto materiálů však existuje celá řada, ať už se jedná o filaments plněné dřevem, kovy, aramidem, skelnými vlákny či magnetické. Pro naše použití se však nehodí, proto nebyly zmíněny.

⁶ Tvrzená tryska se používá při tisku abrazivních materiálů, které standardní trysku, nejčastěji mosaznou, rychle opotřebují a zničí. Nejčastěji jsou vyráběny z kalené oceli či rubínu.

Materiál	Pevnost v ohybu [MPa]	Hustota [kg/m³]	Cena / 1 kg [CZK]	Mezní teplota použití [°C]	Obecná vhodnost použití + příklady	Pozn.
ABS	75	1020	310	100	Silově, mechanicky namáhané upínače -kleštiny, svorky	-
PLA	55	1230	350	55	Výroba ověřovacího prototypu	Test tvarové přesnosti
PETG	55	1270	400	85	Výroba ověřovacího prototypu	-
PA	85	1140	1700	150	Silově, mechanicky namáhané upínače -kleštiny, svorky	Vysoká odolnost, trvanlivost
HIPS	42	1030	550	80	Výroba ověřovacího prototypu	Test tvarové přesnosti
PP	40	900	1200	65	Nenamáhané upínače-věž, ježek	Nízká hustota, malá mechanická odolnost
PC	100	1150	1200	150	Platforma-posuvné díly, kulový čep	Vysoká odolnost, trvanlivost
PAHT CF15	160	1232	2900	150	Platforma-posuvné díly, kulový čep	Vysoká odolnost, trvanlivost

Tabulka 3 - Srovnání vlastností tiskových materiálů [23]⁷

⁷ Data v tabulce jsou orientační, ve skutečnosti se mohou mírně lišit v závislosti na výrobci daného filamentu, údaje jsou čerpány ze stránky omnexus.specialchem.com

7. NÁVRH A VÝROBA PROTOTYPU UPÍNACÍHO SYSTÉMU

Návrh upínacího systému a filozofie upínání vychází z praktických poznatků a volně navazuje na systém navržený v průběhu bakalářské práce zmíněné na úvodních stránkách. Proto se následující oddíl bude věnovat především novým a inovovaným částem upínacího systému.

7.1. POŽADAVKY

Upínací systém musí splňovat celou řadu požadavků a omezujících podmínek, které jsou klíčové pro jeho správnou funkci a uspokojení uživatele, ty jsou přehledně shrnuty v seznamu níže:

- Velikost – upínací systém musí být možno umístit do pracovního prostoru stroje, konkrétně na kruhový stůl o průměru 300 mm. Systém by měl být co možná nejnižší, tak aby zbytečně nezmenšoval využitelný vertikální pracovní prostor tomografu.
- Polohovatelnost – dle tvaru a povahy měřené součásti by měl upínací systém dovolit její napolohování, tak aby byla například vycentrovaná uprostřed pracovního prostoru, byla možnost součástku naklopit atp.
- Konstrukce – tuhá, odolná, tak aby zaručila pevné a stabilní upínání a eliminovala případné vibrace, ale ne zbytečně mohutná.
- Uživatelská přívětivost – upnutí součástek musí být snadné a rychlé, stejně tak výměna upínacích nástavců, tak aby práce se systémem byla co nejjednodušší.
- Materiál – pro výrobu upínacího systému by měl být použit materiál o co nejnižší možné hustotě, tak aby bylo minimalizováno pohlcení CT paprsků.
- Univerzálnost – upínací systém musí být schopen upnout součástky rozličných velikostí, tvarů a hmotností při dodržení předcházejících bodů v seznamu požadavků.

7.2. KONSTRUKCE

Z výše uvedeného seznamu je patrné, že výsledný produkt musí nutně být kompromisním řešením mezi jednotlivými požadavky, z nichž je většina protichůdných. Výsledné řešení by tedy mělo být takovou kombinací materiálů a konstrukčních prvků, aby co nejlépe vyhovělo všem požadavkům, aniž by bylo od některého upuštěno. Návrh upínacího systému probíhal v CAD softwaru Autodesk Inventor Professional 2018.

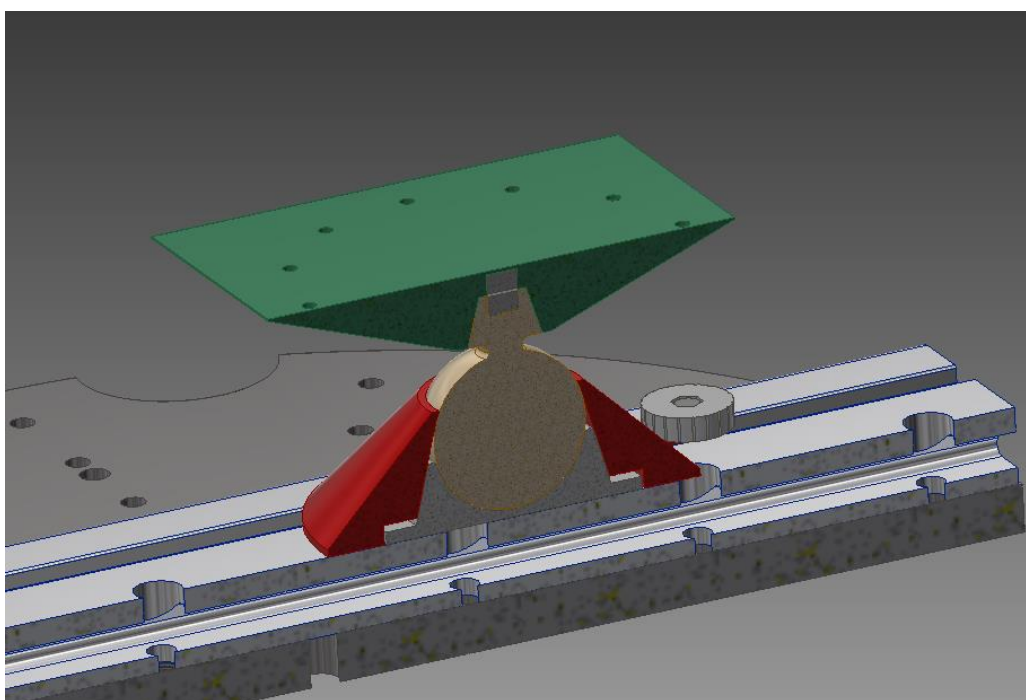
Základním prvkem upínacího systému je platforma, která je nosičem různých upínacích nástavců volených dle tvaru, velikosti a hmotnosti měřené součásti. Nástavce jsou snadno a rychle vyměnitelné díky systému aretace pomocí permanentních magnetů a čtyřbokého jehlanu. Upínací nástavec stačí pouze jednoduše nasadit na kulový čep v platformě, napolohovat dle libosti a dotáhnout aretační matici - nástavec je automaticky vystředěn

pyramidovým trnem a spojen magnetickou spojkou. Platforma upínacího systému bude vyrobena z odolnějšího materiálu, pro co nejvyšší tuhost a trvanlivost na úkor co nejnižší možné hustoty, protože je předpokládáno, že platforma bude vždy níže než měřený objekt, tj. nebude stát v cestě CT paprskům. Jednotlivé upínače musí být vyrobeny tak, že jejich tvar zabezpečí dostatečnou robustnost, ale zároveň budou z materiálu, který bude co nejméně záření pohlcovat.

Jednotlivé upínací nástavce dále rozebírané v podkapitolách níže nejsou konečným počtem řešení, ale základem, který může být kdykoliv do budoucna rozšířen.

7.2.1. PLATFORMA

Základem platformy je extrudovaný hliníkový profil 16x80x300 mm, na něm je nasunutý posuvný prvek s kulovým čepem opatřeným spojovacím elementem. Posuvný prvek je na těsno nasunut v drážkách hliníkového profilu, proti posunutí je zajištěn aretačním šroubem, kterým je vzepřen proti profilu. V posuvném prvku je uložen kulový čep, kterým je zajištěno libovolné natočení a zároveň naklonění upínacího nástavce, respektive měřené součásti. Aretace kulového čepu v požadované poloze je realizována přitažením dna pouzdra čepu proti kulovému čepu viz řez na Obrázek 11. Kulový čep je opatřen pyramidovým trnem zakončeným magnetem, který zajišťuje vystředění a dostatečné ukotvení nástavce. Tato konstrukce platformy tak umožňuje optimální vycentrování měřeného předmětu či předmětů (to je prováděno pomocí centrovacího zařízení před každým měřením).



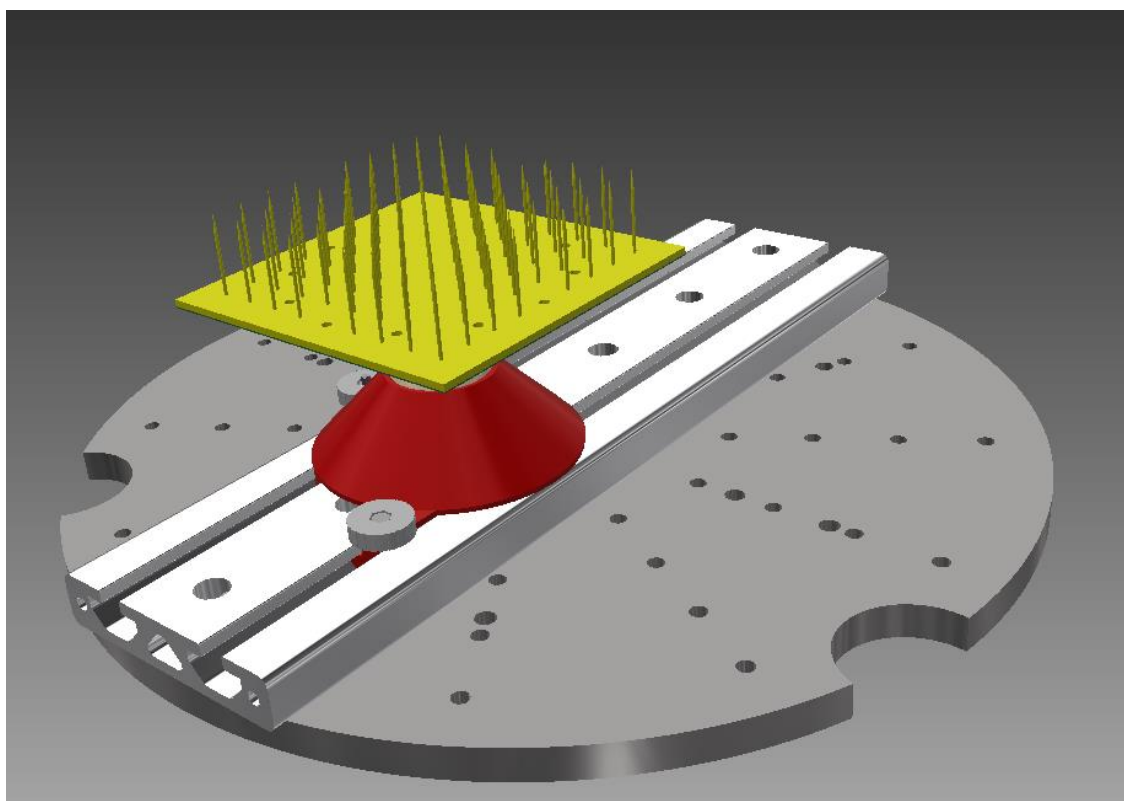
Obrázek 11 -Řez platformou upínacího systému

7.2.2. NÁSTAVCE

Nástavce se upínají na pyramidový trn na kulovém čepu, proto jsou na spodní části opatřeny zahlobením, které je přesným negativem zmíněného pyramidového trnu a opačně polarizovaným magnetem než na platformě. Momentálně existují 4 typy nástavců. Deska s vyměnitelným povrchem, věž, svěrák a pinzeta.

DESKA

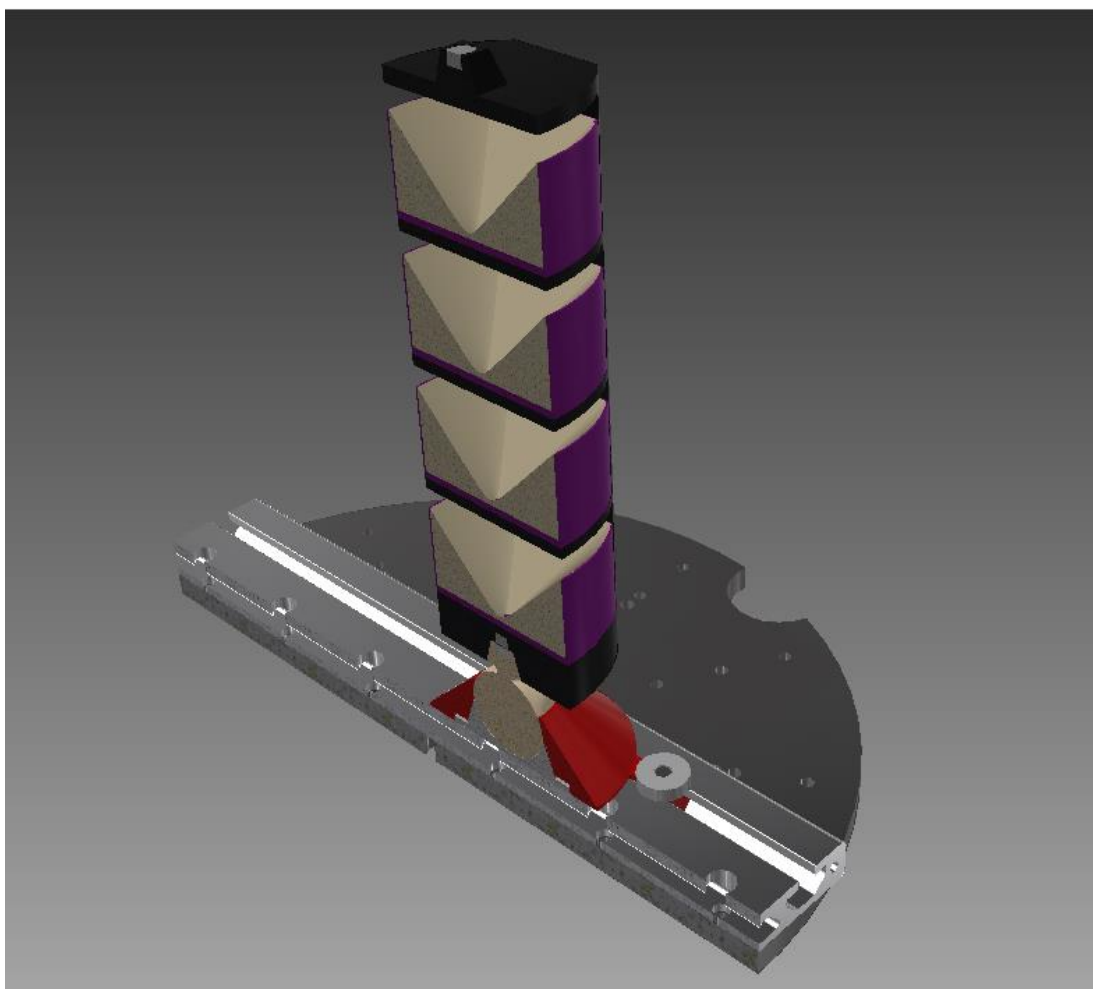
Deska 100x100 mm, resp. 200x200 mm umožňuje díky dvěma možným variantám nástavců („JEŽEK“ a „BLOK“). Upínání objektů tvarově složitých, elastických či organického tvaru (JEŽEK) a předmětů těžších o pravoúhlém tvaru (varianta BLOK). Nástavce jsou snadno a rychle vyměnitelné pomocí sady vestavěných magnetů. Funkci nástavců nejlépe vystihnou přiložené obrázky.



Obrázek 12 - Nástavec "JEŽEK"

VĚŽ

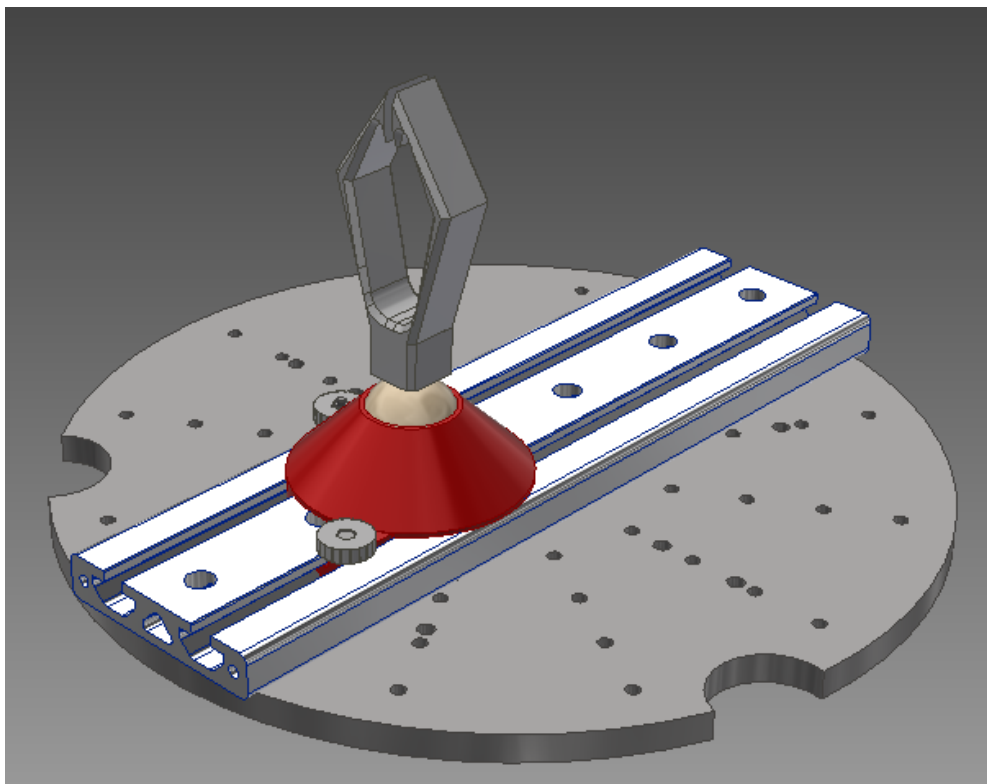
Věž je nástavec, jehož primární funkcí je zvýšení produktivity měření pomocí CT. Umožňuje totiž měření více kusů zároveň. To je umožněno díky vícepatrovému uspořádání „úložných kapes“ pro měřené objekty. Jednotlivé kapsy jsou opatřeny pěnovým lůžkem s kuželovým zahloubením, které zajišťuje zafixování měřeného objektu a jeho snazší separaci, díky nižší hustotě (viz kapitoly výše), od upínacího systému při zpracování naměřených dat. Úložné kapsy jsou ve věži zafixovány pomocí vertikální drážky a magnetu. Věž je určena pro měření drobnějších předmětů. V případě dostatku prostoru a nízké hmotnosti měřených objektů je možno tento upínací nástavec rozšířit o další. To se provede jednoduchým upnutím nástavců na sebe, analogicky, stejným způsobem, jako upnutí nástavce na platformu, tj. pomocí magnetu na pyramidovém trnu.



Obrázek 13 - Nástavec "Věž" pro měření více součástí najednou. Jednotlivé kapsy jsou fixovány pomocí drážky a magnetu.

PINZETA

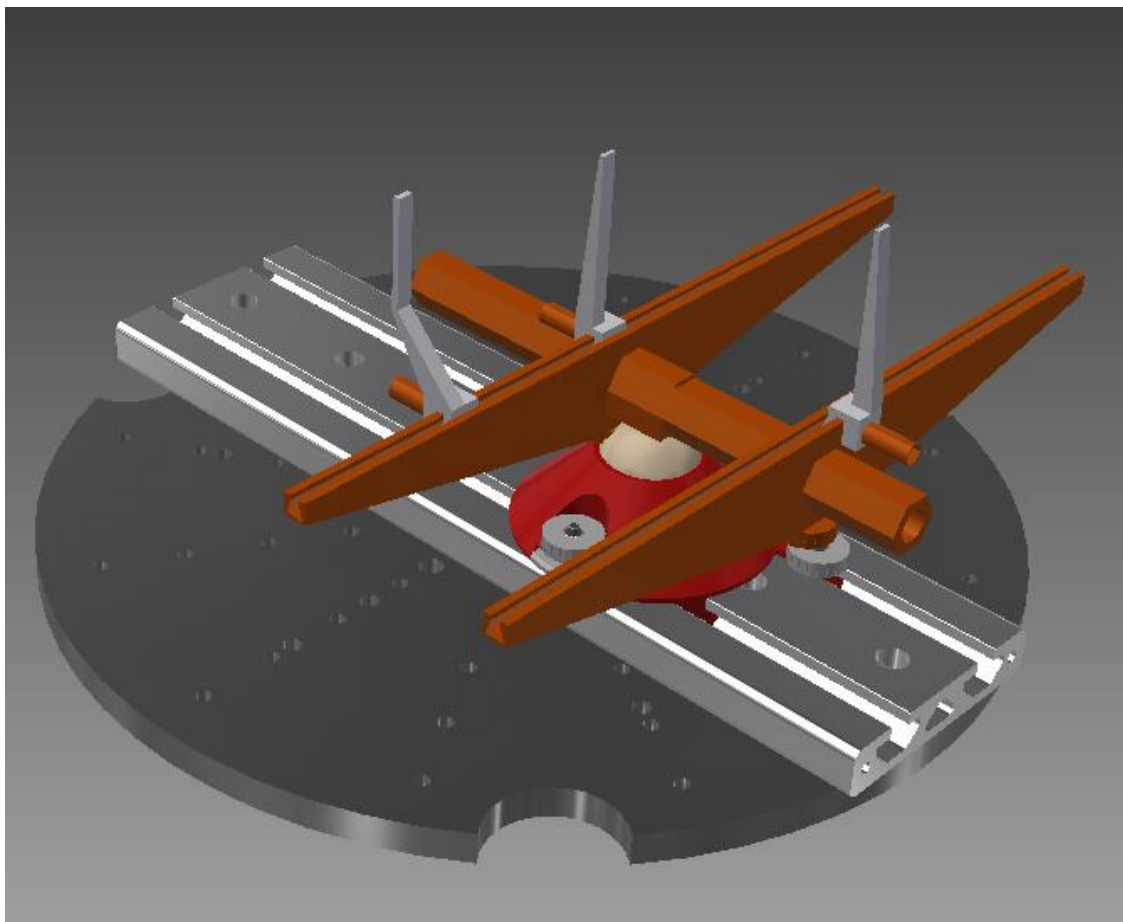
Jednoduchý monolitní upínač sloužící pro měření drobných dílů. Čelisti jsou opatřeny pěnovou kontaktní plochou pro lepší zafixování a snazší separaci měřeného dílu od upínače při práci s daty.



Obrázek 14 -Nástavec pinzeta pro upínání drobných součástí

SVĚRÁK

Svěrák slouží pro upínání větších dílů, umožňuje upnutí za vnější povrch či dutinu díky libovolně nastavitelným tvarovým čelistem opatřeným pěnovou kontaktní plochou. Svěrák se na platformu upíná taktéž pomocí magnetu. Čelisti svěráku se proti posuvu aretují stavěcími šrouby.



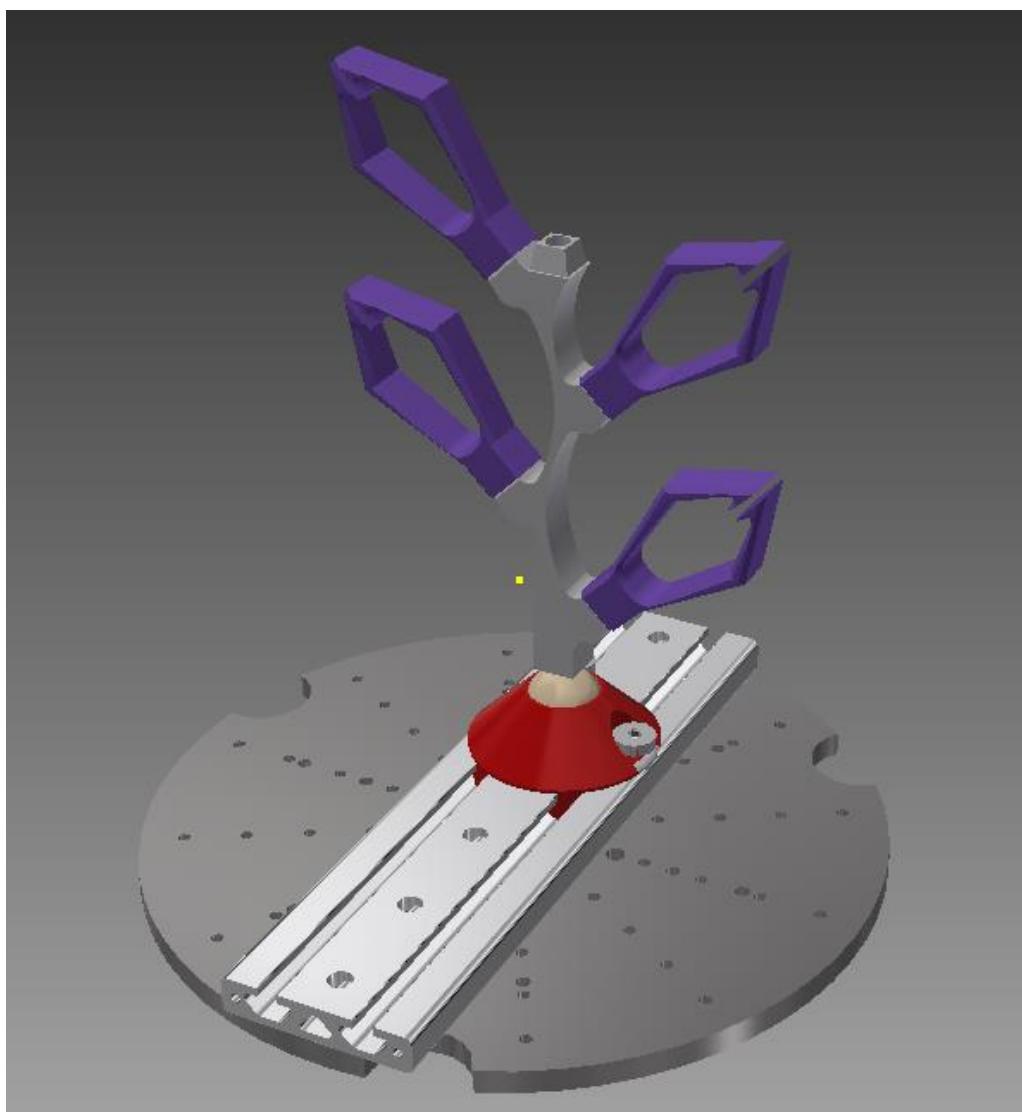
Obrázek 15 - Nástavec Svěrák pro rozměrnější a tvarově složitější součásti

7.2.3. PŘÍSLUŠENSTVÍ

Příslušenství upínacího systému se sestává zejména z nástavců a spojek, které umožňují zvýšit produktivitu skenování.

Spojky zajišťují vrstvení nástavců typu „DESKA“ do pater nad sebe. Jejich montáž spočívá v pouhém nasunutí na roh nástavce a zasunutí dalšího nástavce do vrchní části spojky, tímto způsobem se dá vytvořit několikapatrová věž pro produktivnější skenování větších předmětů.

Možnost skenovat více drobných dílů upnutých v monolitních nástavcích typu „pinzeta“ přináší stromečkovitý adaptér. Na něj lze upevnit až pět upínačů, díky vertikálnímu odsazení je eliminován potenciální překryv měřených součástí, což zajišťuje požadovanou kvalitu měření.



Obrázek 16 - Stromečkovitý adaptér umožňující použití více monolitních upínačů

7.3. VÝROBA

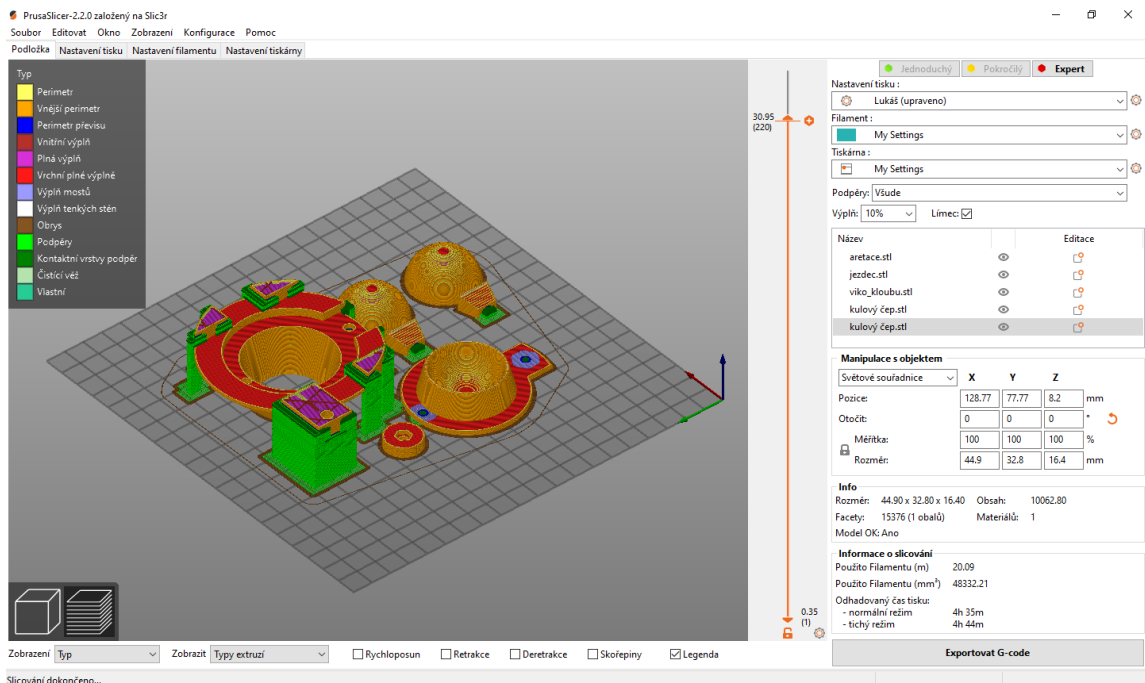
Tato podkapitola popisuje proces výroby prototypu upínacího systému včetně příslušenství, od přípravy dat, přes samotný tisk až po montáž systému.

7.3.1. PŘÍPRAVA DAT

Prvním krokem bylo přenést myšlenku z hlavy na papír, respektive monitor počítače. K tomu posloužil CAD software Inventor Professional 2018 od společnosti Autodesk. V tomto programu byl upínací systém kompletně navržen a průběžně modifikován. Dílčí komponenty upínacího systému byly následně exportovány do formátu .stl⁸, což je nutnost pro jejich další zpracování a přípravu dat pro tisk. Ta probíhá v tzv. sliceru, což je program, který, zjednodušeně řečeno, model nařeže na předem definované vrstvy a vygeneruje kód pro řídicí jednotku tiskárny. Jednotlivé komponenty v tomto formátu byly pro 3D tisk připravovány v programu Prusa Slicer 2.2.0. . Díky univerzálnosti a možnostem nastavení tohoto programu bylo možno připravovat data jak pro školní tiskárny Prusa i3 MK3S+, tak pro jiná zařízení, například domácí výroby. Prusa Slicer v režimu „Expert“ umožňuje nastavovat od tiskových rychlostí, zrychlení, retrakcí až po vlastní dodatky G-kódu⁹. Pro tisk prvotních zkušebních dílů, kterými bylo ověřeno, zda jsou použité konstrukční prvky správně navrženy či potřebují úpravy, byly nastaveny tiskové parametry upřednostňující rychlost tisku před vizuální stránkou (vyšší rychlosti tisku (120 mm/s +), vyšší vrstvy (0,2-0,35 mm), větší průměr trysky (0,4-0,6 mm)). Finální ověřené komponenty byly tištěny s důrazem na vzhled a kvalitu povrchu (nižší rychlosti tisku (<90 mm/s), nižší vrstvy (0,1-0,2 mm), menší průměr trysky (0,3-0,4 mm)).

⁸ .stl je formát souborů využívaný například pro potřeby 3D tisku či pro práci v programech CAD. Stl lze kromě „Stereolitografie“ vyložit také například jako Standard Triangle Language nebo Standard Tessellation Language, to proto, že se každý soubor skládá z řady trojúhelníků tvořících síť, čímž popisují povrch objektu. Čím je vyšší hustota sítě, tím je vyšší rozlišení modelu. [24]

⁹ G-kód (Geometric Code) je programovací jazyk pro CNC stroje. Tímto jazykem říkáme stroji, co má dělat, jakou rychlostí, trajektorii nástroje atp.

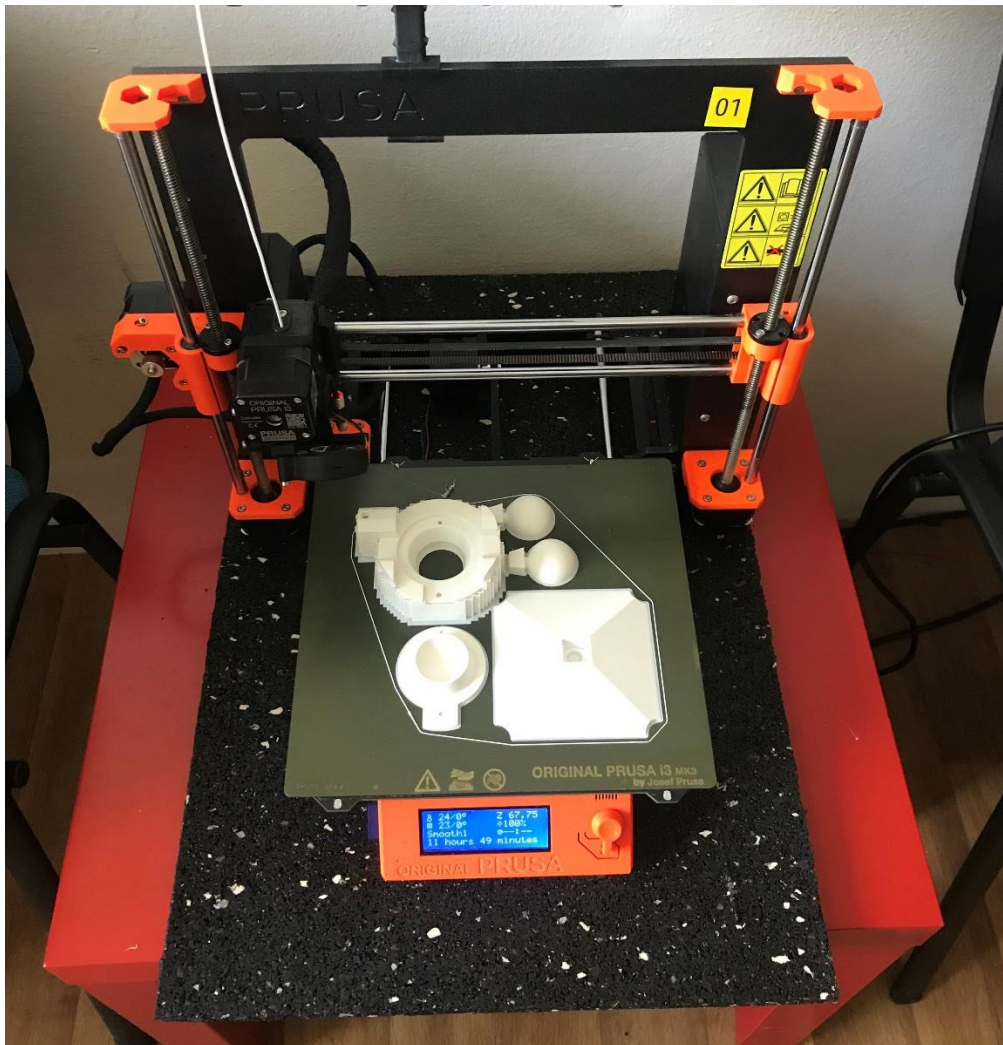


Obrázek 17 - Uživatelské rozhraní programu Prusa Slicer

7.3.2. TISK

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6, tisk probíhal na 2 různých tiskárnách, prvotní testovací prototypy byly tištěny na starší RepRap tiskárně v dílně autora práce. Finální prototyp byl z důvodu vyšší tiskové kvality vytisknut na tiskárnách Prusa i3 MK3S+. Pro tisk prvních testovacích dílů pro ověření korektnosti některých komponent a jejich sestav byl použit materiál PLA z důvodu jednoduchosti tisku. Pro finální model byla zvolena kombinace materiálů PETG a ABS, jejich vlastnosti jsou dostačující pro otestování funkčnosti a odolnosti předseriového modelu upínacího systému.

Pro případnou komerční výrobu se počítá s využitím kombinace materiálů PAHT CF15 či jeho ekvivalentu a ABS + PP. PAHT CF15 poslouží pro zhotovení platformy upínacího systému pro zaručení co nejvyšší odolnosti a životnosti. Z materiálů ABS a PP budou zhotoveny jednotlivé upínače, adaptéry a nástavce.



Obrázek 18 - Tisk platformy upínacího systému na tiskárně Prusa i3 MK3S+

7.3.3. POSTPROCESSING

Po vytištění většiny součástí a jejich sejmutí z tiskové plochy následuje jejich finální úprava. Jedná se zejména o odstranění podpěr, které jsou nezbytné pro tisk převisů. U některých dílů je nutno strhnout hrany, dobrousit a vyhladit dosedací plochy či protáhnout otvory. Dále následuje nalisování mosazných závitových vložek (u součástí složených z více kusů) a šestihranných matic například pro aretační šrouby. U součástí osazených magnety je nutno začistit kapsy určené pro jejich nalisování, následně nanést malé množství dvousložkového epoxidu pro zajištění a magnet nalisovat. Některé komponenty, jako např. kulový čep, je nutno tisknout rozdělené na dvě části. Jelikož je koule tiskově náročný tvar, je kulový čep, pro dodržení správné geometrie, tištěn podélně rozdělený, proto je nutno ho po vytištění slepit a zabrousit dělicí rovinu.

7.3.4. MONTÁŽ

Jednotlivé podsestavy jsou složeny z vícero komponent, je proto nutno je podrobit finální montáži a ověření tvarové přesnosti. Jako ideální příklad pro uvedení do problematiky montáže poslouží platforma.

Do tělesa posuvné části – jezdce je vložen kulový čep s řádně začištěnou dělicí rovinou. Je provedena zkouška volnosti otáčení kulového čepu v tělese jezdce, pokud je vše v pořádku, je do spodní části jezdce umístěno víko kulového čepu. Víko je pojištěno adjustačním šroubem se zapuštěnou hlavou a aretačním šroubem s tvarovou hlavou pro snazší dotahování. Dále je provedeno umístění aretačního šroubu posuvu. Adjustačním šroubem je upravena síla předpružení víka kulového čepu. Poslední fází je provedení zkoušky aretace kulového čepu.

8. PRAKTICKÉ ZKOUŠKY SYSTÉMU A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tento oddíl má za cíl shrnout poznatky z reálných testů prototypu upínacího systému. Testování probíhalo s díly, se kterými se při měření na průmyslových CT často setkáme. Důraz byl kladen především na plnění vytyčených cílů, kterými jsou zvýšení produktivity měření na CT a uživatelská přívětivost.

Jako první, resp. v průběhu celého návrhu, byla prováděna zkouška kompatibility jednotlivých upínačů s platformou a nástavci. Poté byla provedena zkouška schopnosti upínání předmětů různých tvarů, velikostí a materiálů. Nakonec byly provedeny samotné zkoušky na CT.



Obrázek 19 - Upínací systém včetně vybraných upínačů a nástavců



Obrázek 20 - použití upínače s uhlíkovými trny pro napolohování a zafixování dílců upnutých v bloku polystyrenu



Obrázek 21 - Upnutí součásti pomocí upínače "ježek" s trny z materiálu ABS



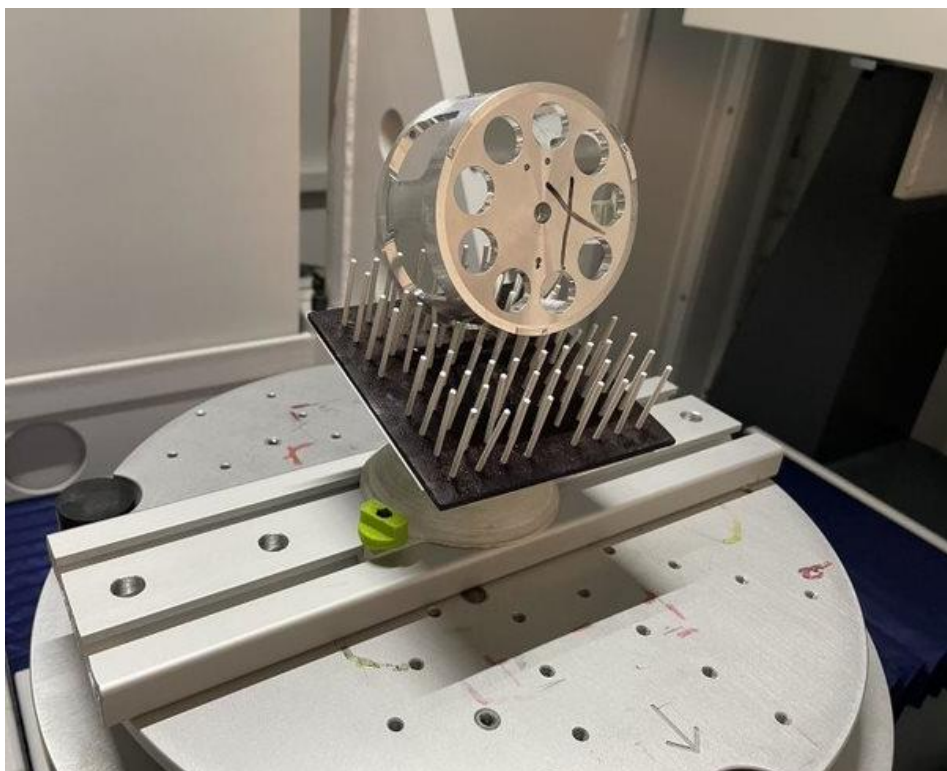
Obrázek 22 - příklad využití nástavce "věž" pro zvýšení efektivity měření



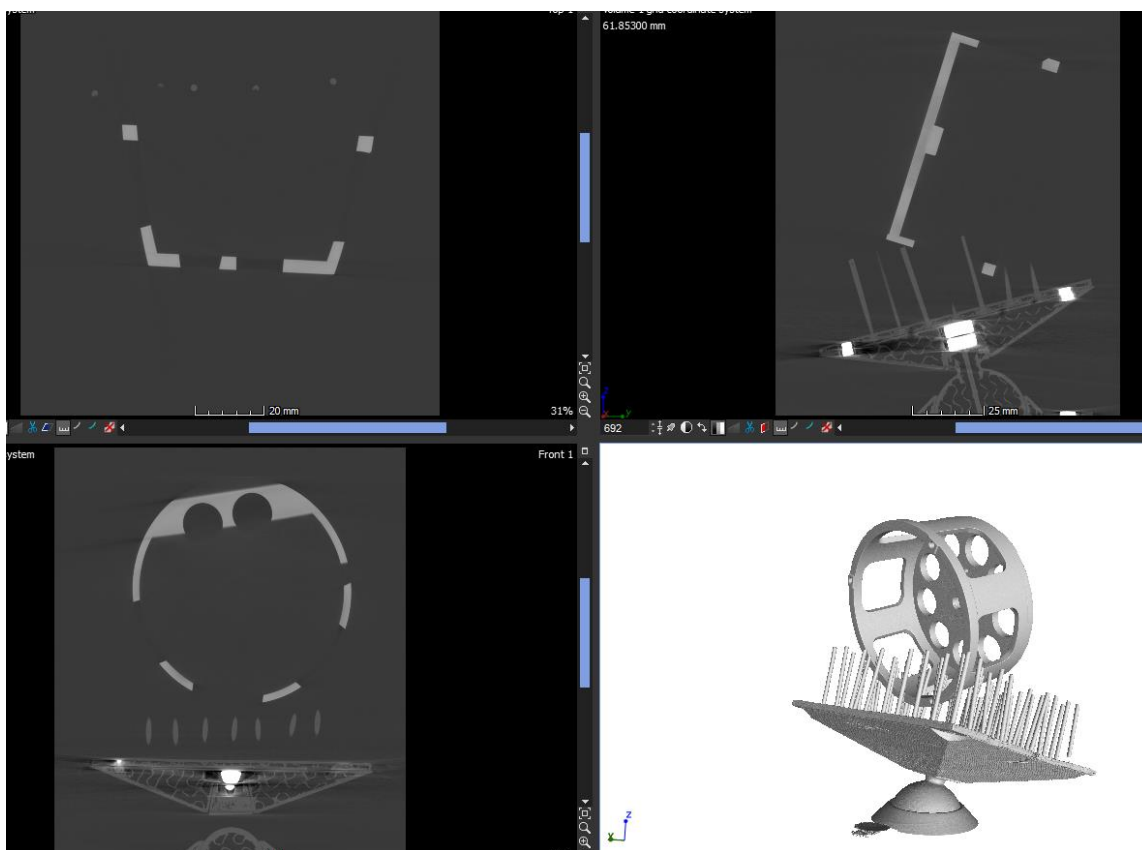
Obrázek 23 - příklad využití svorek a adaptéru pro zvýšení efektivity

Z výše přiložených snímků je patrné, že navržený upínací systém a jeho příslušenství umožňuje upnutí široké škály předmětů různých tvarů a velikostí. Upnutí je dostatečně pevné, zároveň však nedeformuje upínaný předmět. Při použití vybraných upínačů lze dosáhnout zvýšení produktivity skenováním vícero předmětů najednou.

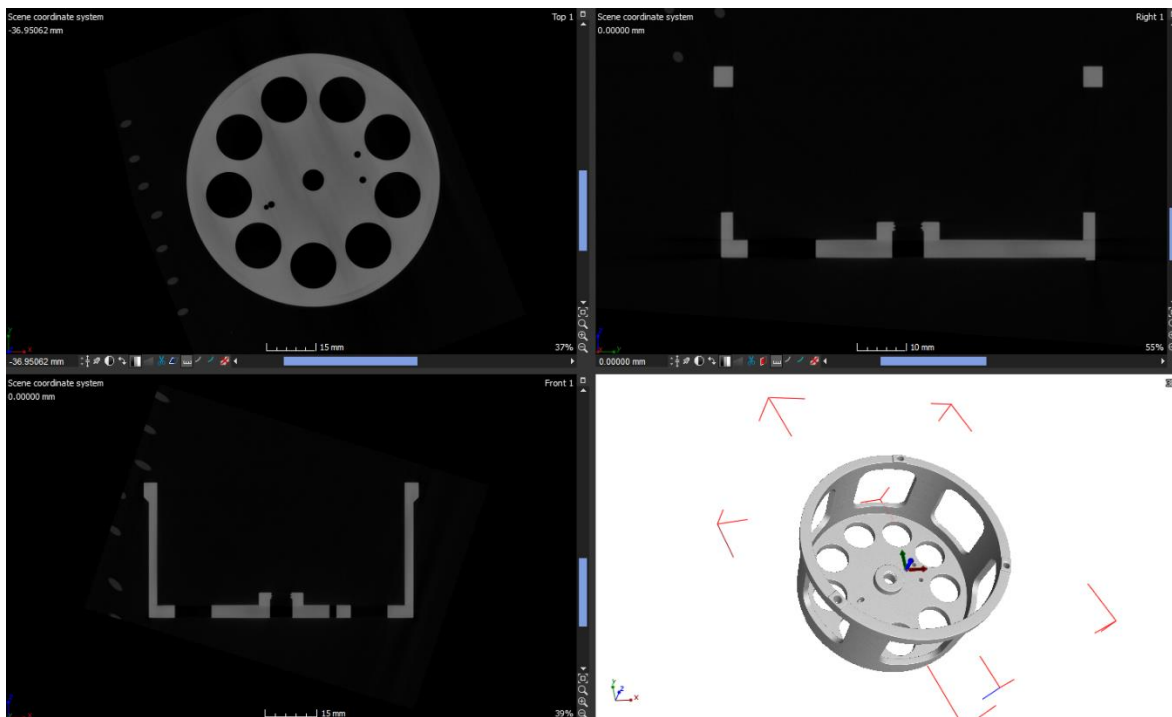
Na snímcích níže je ilustrativní příklad ověření funkce upínacího systému v praxi. Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno pomocí softwaru VG STUDIO MAX. Pro zkoušku byl použit upínač „ježek“ a upnuta byla hliníková klec. Díky nízké hustotě trnů z materiálu ABS a správně nastavenému filtru je výsledek uspokojivý a odpovídá teorii.



Obrázek 24 - upnutý testovací vzorek v pracovním prostoru tomografu

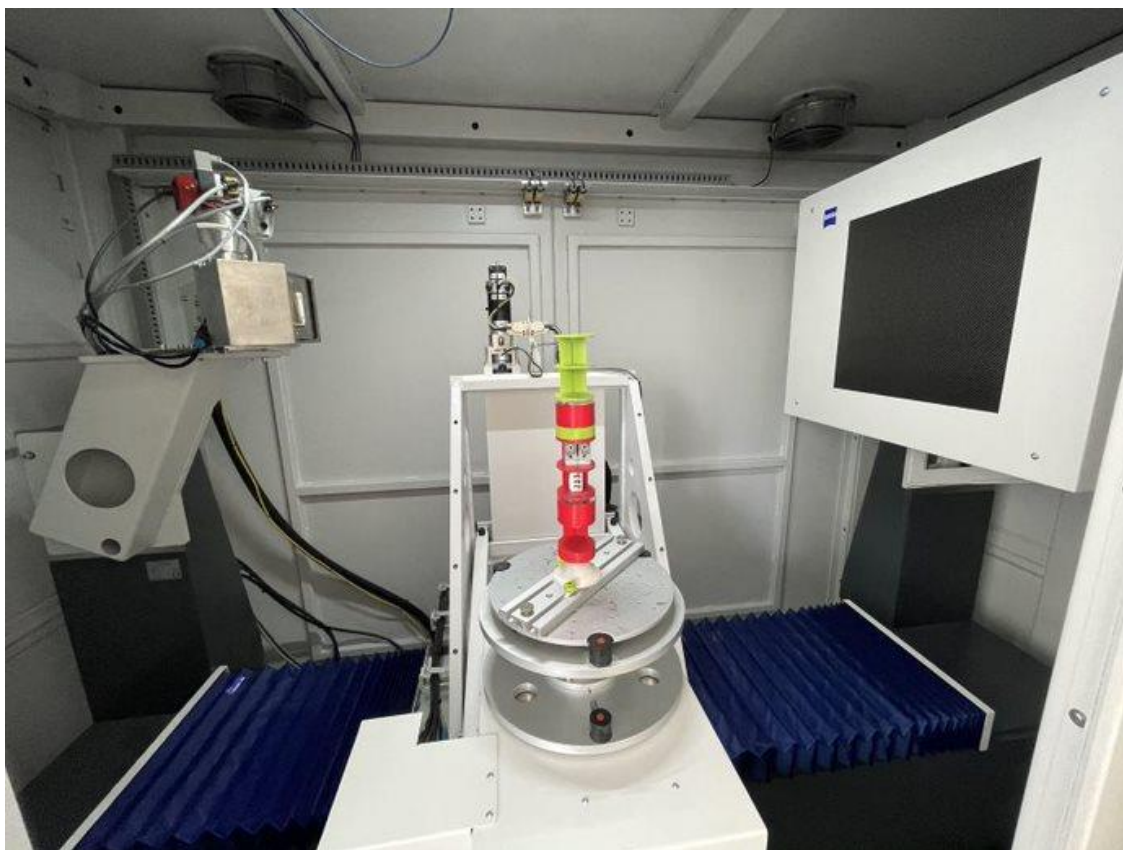


Obrázek 25 - Printscreens vyhodnocení naměřených dat v uživatelském prostředí softwaru VG STUDIO MAX, ze snímku je patrná rozdílná hustota jednotlivých komponent upínacího systému a měřeného předmětu.



Obrázek 26 - Díky nízké hustotě materiálů použitých k výrobě upínacího systému lze upínač z výsledného snímku "odfiltrovat" a oříznout

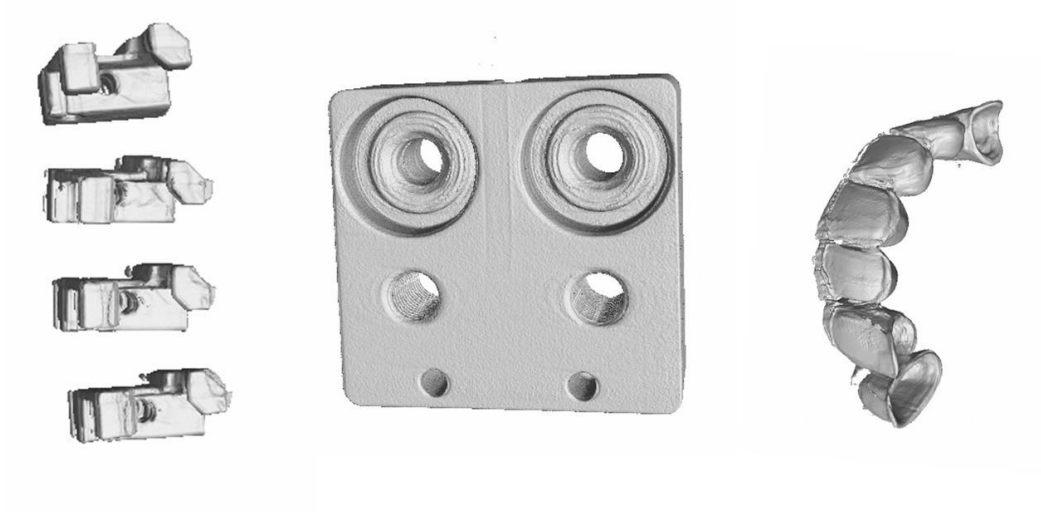
Otestování nástavce typu „věž“ pro měření více předmětů přineslo kýžené výsledky. Bylo ověřeno, že je možné simultánní skenování vícero stejných objektů, ale i objektů o různém tvaru, velikost i materiálu zhotovení. Pro simultánní skenování různých objektů je však třeba nastavit pro každý segment věže, tj. jiný objekt jiné parametry pro správnou extrakci a práci s daty. To ovšem díky dostatečné vertikální separaci jednotlivých segmentů nečiní větší problémy. Při testování tohoto nástavce se naskytl problém v podobě zhoršené stability více nástavců na sobě, resp. nutnosti umístit hmotnější objekty do nižších pater „věže“. V případě jejich umístění do vyšších pater dochází ke snížení stability v bodě upnutí nástavce na platformu, je proto nutné snížit rychlost nájezdu stolu do výchozí měřicí pozice, ten jinak najíždí rychloposuvem. Při použití rychloposuvu hrozí kolaps upínače v bodě upnutí k platformě. Tento problém bude u sériové verze upínacího systému vyřešen zvětšením pyramidového trnu v platformě a jeho protikusu v nástavcích a použitím silnějšího permanentního magnetu.



Obrázek 27 - Upínač typu "věž" s upnutými testovacími artefakty v prostoru CT.



Obrázek 28 - Pohled na upnuté zkušební artefakty a naskenovaná data



Obrázek 29 -detailní pohled na zkušební artefakty upnuté v nástavci věž, viz předchozí obrázek

9. FINANČNÍ NÁROČNOST VÝROBY PROTOTYPU

„Kolik by ten projekt vlastně stál ve firmě?“, říkal jsem si na některých předmětech nejen magisterského studia. Proto jsem se rozhodl finální produkt této diplomové práce – UNIVERZÁLNÍ UPÍNACÍ SYSTÉM PRO PRŮMYSLOVÝ TOMOGRAF, respektive celý jeho vývoj finančně vyčíslit.

Výsledná cena zohledňuje materiál, energie, opotřebení strojů i lidský faktor v podobě mzdy, tedy mzdových nákladů. Použité ceny odpovídají aktuálním tržním cenám a mzdové náklady, tedy mzda včetně odvodů (zdravotní a sociální pojištění) je stanovena na 550 CZK/h (činnosti vyžadující kvalifikovanějšího pracovníka, jako práce s CAD a nastavení sliceru a parametrů tisku), resp. 450 CZK (postprocessing a montáž, tj. činnosti nevyžadující vyšší kvalifikaci).

Pro výpočet ceny vývoje byl sestaven program v programu Microsoft Excel (viz příloha *naklady_projekt.xlsx*). Program pro výpočet ceny je univerzální a uživatelsky přívětivý, lze ho tedy i snadno aplikovat na jiné projekty či modifikovat při dalším vývoji prototypu. Program spočte čisté náklady na zaměstnance, materiály a stroje. Barevné podbarvení polí uživateli napoví, kde je nutno vyplnit či vybrat data z rozbalovací nabídky nebo zda jsou data automaticky dopočítána.

Program má čtyři listy: hlavní - výpočetní, jenž je rozdělen do třech bloků, list se záznamem tisku, list prací a list s daty. List se záznamem tisku zachycuje proběhlé doby jednotlivých tisků, typ materiálu a jeho spotřebu. V listu s pracemi jsou zaznamenány odpracované hodiny a povaha práce. Tři bloky na hlavním listu počítají náklady za samotný tisk (tiskárna, materiál, energie, ...), náklady na lidské zdroje a náklady za jiný než tiskový materiál či jednorázové operace. Po zaznamenání odpracované doby a doby chodu tiskárny jsou data automaticky propsána a přepočítána na hlavním listu.

TABULKA HODIN STRÁVENÝCH NA VÝVOJI				
datum	činnost	začátek	konec	doba
28.12.2022	modelování	18:00	21:00	3:00:00
29.12.2022	modelování	17:00	20:00	3:00:00
23.01.2023	modelování	18:00	19:00	1:00:00
27.01.2023	modelování	16:00	17:30	1:30:00
05.02.2023	modelování	18:30	20:00	1:30:00
07.02.2023	modelování	9:00	12:00:00	3:00:00
14.02.2023	modelování	15:00	23:00	8:00:00
14.02.2023	příprava dat pro tis	23:00	24:00:00	1:00:00
15.02.2023	příprava dat pro tis	12:00	13:30	1:30:00
17.02.2023	modelování	13:00	23:30	10:30:00
18.02.2023	modelování	14:30	23:00	8:30:00
26.02.2023	modelování	11:00	22:00	11:00:00
26.02.2023	modelování	22:30	23:00	0:30:00
27.02.2023	příprava dat pro tisk postprocessing	10:00	13:00	3:00:00
27.02.2023	montáž N/A	16:00	18:00	2:00:00
20.03.2023	modelování	11:30	23:30	12:00:00
22.03.2023	příprava dat pro tis	16:00	16:30	0:30:00
22.03.2023	příprava dat pro tis	13:30	14:30	1:00:00
28.03.2023	postprocessing	8:30	10:30	2:00:00
28.03.2023	montáž	12:30	14:00	1:30:00
01.04.2023	modelování	9:00	18:30	9:30:00
02.04.2023	modelování	11:30	22:30	11:00:00
03.04.2023	příprava dat pro tis	8:00	8:30	0:30:00
10.05.2023	příprava dat pro tis	8:15	8:30	0:15:00
11.05.2023	příprava dat pro tis	9:00	9:15	0:15:00
13.05.2023	příprava dat pro tis	9:00	9:15	0:15:00
22.05.2023	příprava dat pro tis	10:00	10:15	0:15:00
25.05.2023	modelování	13:30	20:30	7:00:00
31.05.2023	příprava dat pro tis	8:30	9:00	0:30:00
03.06.2023	modelování	12:30	22:00	9:30:00
10.06.2023	příprava dat pro tis	8:15	8:30	0:15:00
10.06.2023	modelování	13:00	19:00	6:00:00
11.06.2023	postprocessing	8:00	11:00	3:00:00

TISK			
datum	celkem	materiál	množství [gram.]
15.02.2023	14:12	PLA	186
16.02.2023	13:34	ABS	176
26.02.2023	18:23	PETG	223
23.03.2023	6:34	PC	43
23.03.2023	5:56	PAHT CF15 N/A	34
24.03.2023	10:32	PETG	98
25.03.2023	12:31	PETG	123
25.03.2023	10:00	PETG	105
03.04.2023	9:30	ABS	89
04.04.2023	18:32	PLA	243
12.04.2023	9:21	ABS	87
13.04.2023	5:13	ABS	49
14.04.2023	13:43	PETG	138
10.05.2023	4:10	ABS	41
11.05.2023	4:50	ABS	52
13.05.2023	3:12	ABS	34
22.05.2023	11:49	PETG	134
31.05.2023	14:44	PLA	215
10.06.2023	4:50	ABS	87
14.06.2023	4:02	ABS	32
15.06.2023	12:42	ABS	176

Obrázek 30 - Záznam odvedených prací a chodu tiskárny, snímek obrazovky z MS Excel

Výpočet ceny projektu - vývoj prototypu upínacího systému pro CT

		TISKÁRNA		
položka	jednotka	hodnota		
FIXNÍ NÁKLADY				
pořizovací cena	CZK	24 389,00		
životnost	roky	3		
opotřebení	CZK/rok	8 129,67		
údržba	CZK/rok	10 000,00		
Fix. náklady celkem	CZK/rok	18 129,67		
Kapacita	hod/rok	3 120,00		
cena el. Energie	CZK/kWh	6,00		
HMS	CZK/hod	5,81		
VARIABILNÍ NÁKLADY 1				
Typ materiálu		PLA		
Spotřeba energie	kWh/hod	0,08		
Náklady na energii	CZK/hod	0,48		
Doba tisku	hod	85:59		
Náklady na energii na tisk	CZK	1,719666667		
množství materiálu	kg	1,086		
Cena materiálu j.	CZK/kg	400		
Cena využitého materiálu	CZK	434,4		
Variabilní náklady	CZK	436,1196667		
VARIABILNÍ NÁKLADY 2				
Typ materiálu		PETG		
Spotřeba energie	kWh/hod	0,1		
Náklady na energii	CZK/hod	0,60		
Doba tisku	hod	64:31		
Náklady na energii na tisk	CZK	1,612916667		
množství materiálu	kg	0,632		
Cena materiálu j.	CZK/kg	420		
Cena využitého materiálu	CZK	265,44		
Variabilní náklady	CZK	267,0529167		
VARIABILNÍ NÁKLADY 3				
Typ materiálu		ABS		
Spotřeba energie	kWh/hod	0,12		
Náklady na energii	CZK/hod	0,72		
Doba tisku	hod	57:50		
Náklady na energii na tisk	CZK	1,735		
množství materiálu	kg	0,647		
Cena materiálu j.	CZK/kg	380		
Cena využitého materiálu	CZK	245,86		
Variabilní náklady	CZK	247,595		
Doba tisku celkem	hod/výrobek	208:20		
Fixní náklady	CZK/výrobek	50,44		
Variabilní náklady	CZK/výrobek	950,7675833		
Celkové náklady výrobku	CZK/výrobek	1 001,21 Kč		
NAKLADY OPERACE				

		LIDSKÉ ZDROJE	
činnost	sažba CZK/h	časová náročnost	cena [CZK]
modelování	550	119:00	65 450,00 Kč
příprava dat pro tisk	550	7:45	4 262,50 Kč
postprocessing	450	8:30	3 825,00 Kč
montáž	450	9:00	4 050,00 Kč
Celkem			77 587,50 Kč

TAKTO VYBARVENÁ POLE je nutno vyplnit
TAKTO VYBARVENÁ POLE obsahují rozbalovací předdefinovaný seznam
TAKTO VYBARVENÁ POLE jsou automaticky dopočtena
TAKTO VYBARVENÁ POLE jsou automatické měřisoučty
TAKTO VYBARVENÁ POLE jsou sumy jednotlivých celků

CELKOVÉ NÁKLADY NA PROJEKT
81 205,85 Kč

		MATERIÁL, dodatečné náklady		
položka	množství	cena j.	suma	
magnet neodymový 10x4mm	54	9,90 Kč	534,60 Kč	
magnet neodymový 4x2mm	62	7,90 Kč	489,80 Kč	
kulatina ABS 2x1000	5	49,90 Kč	249,50 Kč	
kulatina CF 2x1000	1	9,90 Kč	9,90 Kč	
šroub M3x25 DIN933	12	1,33 Kč	15,96 Kč	
matice M3 DIN938	23	0,16 Kč	3,68 Kč	
magnet neodymový 8x4mm	12	8,90 Kč	106,80 Kč	
Profil 8 16x80 E	1	479,00 Kč	479,00 Kč	
EPS deska 50x1000x500	1	45,90 Kč	45,90 Kč	
molitan 2x200x300	1	18,00 Kč	18,00 Kč	
dopravné	4	119,00 Kč	476,00 Kč	
Lepidlo CA	1	59,00 Kč	59,00 Kč	
Aktivátor CA	1	129,00 Kč	129,00 Kč	
XY			- Kč	
XY			- Kč	
XY			- Kč	
XY			- Kč	
CELKEM			2 617,14 Kč	

Obrázek 31 - Výpočet nákladů na vývoj prototypu v programu MS Excel

Při výpočtu je uvažována výroba na nově zakoupené tiskárně s životností počítanou na 3 roky, od té se dále odvíjí fixní hodinová sazba. Roční náklady na údržbu tiskárny činí 10 000 CZK, v těch je zahrnuto čištění, promazání ložisek, výměna spotřebního materiálu jako jsou řemeny či povrch tiskového plátu, trysky atp. a práce technika. Tisková kapacita tiskárny je stanovena na 3120 hodin za rok.

Program umožňuje výpočet výsledné ceny při použití až pěti materiálů pro výrobu upínacího systému zároveň. Reálná data, zaznamenávána v průběhu vývoje, jako jsou: množství a typ spotřebovaného materiálu, tiskové časy, čas strávený vývojem, množství a ceny spojovacího materiálu a energií apod. je nutné zanást manuálně do programu. To probíhá na listech „vývoj“ a „tisk“ tak, že po odpracování činnosti, dojde k manuálnímu záznamu jejího začátku a konce a vybrání činnosti z rozbalovací nabídky, respektive zaznamenání doby tisku, hmotnosti spotřebovaného materiálu a vybrání materiálu z nabídky. Následně jsou automaticky dopočteny všechny náklady v jednotlivých třech blocích (tisk, mzdové náklady, materiál).

Při využití aktuálních tržních cen tiskových materiálů, cen energií a spojovacího materiálu, výše stanovené mzdy vychází celková čistá cena projektu vývoje upínacího systému na 81.205,85 CZK.

10. TECHNOLOGIE VHODNÉ PRO FINÁLNÍ VÝROBU

V případě profesionální produkce upínacího systému v počtu desítek až stovek kusů je vhodné použít na některé, zejména ty méně komplikované a více namáhané díly, konvenční technologie výroby. Následující řádky porovnávají a hodnotí optimální volbu technologie pro potenciální budoucí sériovou výrobu.

Z hlediska trvanlivosti výrobku je vhodné, aby základní platforma, tj. jezdec s kulovým čepem a magnetem byl vyráběn konvenční výrobní technologií. Proto bude zhodnocena nákladnost výroby platformy metodou třískového obrábění a vstřikování plastů. Na výrobu ostatních dílů – jednotlivých upínačů je díky menší frekvenci využití, v porovnání s platformou, dostačující využít metody 3D tisku. Je počítáno s předpokladem výroby 50 kusů upínacího systému za rok.

Budou tedy porovnány 3 druhy výrobních technologií pro výrobu upínacího systému. Jedná se o následující:

- Upínací systém – komplet 3D tisk
 - Platforma PAHT CF15, upínače PP, ABS
- Upínací systém – platforma vstřikování, upínače 3D tisk
 - Platforma ABS, upínače PP, ABS
- Upínací systém – platforma obráběná, upínače 3D tisk
 - Platforma Hliník EN AW-6082 T6, upínače PP, ABS

Pro všechny 3 potenciální výrobní varianty jsou pro výpočet nákladů stanoveny mzdové náklady následovně:

- 300 CZK – příprava tisku, tj. sejmutí hotového výtisku, odmaštění tiskové plochy, nastavení a kontrola tiskárny, spuštění nového tisku.
- 450 CZK – postprocessing a montáž

Odhad spotřeby časů při výše zmíněných činnostech byl experimentálně ověřen při návrhu a výrobě prototypu.

Níže vypočtené údaje interpretují pouze výrobní, nikoliv celkové náklady, jelikož nejsou brány v potaz případné režijní náklady, jako náklady na marketing, odbytí či řízení podniku, ve kterém by probíhala výroba. Nicméně pro porovnání nákladnosti jednotlivých technologií bohatě postačí.

10.1. UPÍNACÍ SYSTÉM VYRÁBĚNÝ METODOU 3D TISKU

V případě výroby celého upínacího systému metodou 3D tisku se počítá se zhotovením platformy z odolnějšího materiálu. Tím je PAHT CF15, tedy polyamid zesílený 15 % výplní z uhlíkových vláken. Upínače budou zhotoveny z ABS, resp. polypropylenu. Celkový tiskový čas a spotřebovaná množství materiálu jsou obsaženy v přiložené tabulce. Je předpokládána výroba na tiskárně Prusa i3 MK3S+ s tiskovými parametry dbajícími na vizuální stránku a zaručující odolnost jednotlivých komponent.

Díl	Materiál	Doba tisku [hod.]	Hmotnost [g]
Platforma	PAHT CF15	14	80
Desky magnet	ABS	22	125
Svorky + stromek	ABS	22	104
Věž + vaničky	PP	34	136
Svěrák	ABS	18	100
CELKEM		110	545

Tabulka 4 -Doba tisku jednotlivých komponent upínacího systému

Výsledné celkové výrobní náklady na první padesátikusovou sérii vychází na 157.710,42 CZK. Při rozpuštění nákladů na dosavadní vývoj (81.205,85 CZK) činí náklady na kus 4.778,33 CZK (více viz příloha *naklady_serie50KS.xlsx*).

10.2. UPÍNACÍ SYSTÉM VYRÁBĚNÝ METODOU VSTŘIKOVÁNÍ

Platforma upínacího systému vyráběná metodou vstřikování plastů by byla zhotovena z materiálu ABS. Výroba formy, tedy forem¹⁰ pro vstřikování plastů a náklady na zhotovení jednoho kusu výrobku byly poptány u dvanácti společností. Odhad nákladů byl poskytnut třetinou oslovených firem. Cenové nabídky byly zprůměrovány, tím byla stanovena přibližná cena za zhotovení forem, ta činí 235.000 CZK. Náklady na výrobu jednoho kusu, resp. jedné sady komponent byly naceněny na 23,50 CZK¹¹.

Celková cena za zhotovení padesátikusové série platformy upínacího systému touto technologií činí ca 236.200 CZK. Cena za jeden kus platformy tak vychází na 15.640 CZK.

Náklady na komponenty zhotovené metodou 3D tisku byly vypočteny prostřednictvím upraveného sešitu v MS Excel. Ty vychází na 3.983,59 CZK včetně rozpuštěných nákladů na vývoj (viz příloha *naklady_bezplatformy_serie50ks.xlsx*).

¹⁰ Jedná se o nejlevnější řešení pro malé výrobní série, tj. formy s ruční obsluhou.

¹¹ Přibližné cenové nabídky a odhady výrobních nákladů byly poskytnuty společnostmi zabývajícími se vstřikováním plastů a výrobou forem. Společnosti z České republiky byly osloveny prostřednictvím elektronické komunikace.

Veškeré náklady na výrobu kompletního upínacího systému kombinovaného z platformy zhotovené vstřikováním plastů a zbylých komponent zhotovených metodou 3D tisku tedy činí přibližně 19.623,6 CZK.

10.3. UPÍNACÍ SYSTÉM VYRÁBĚNÝ METODOU TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

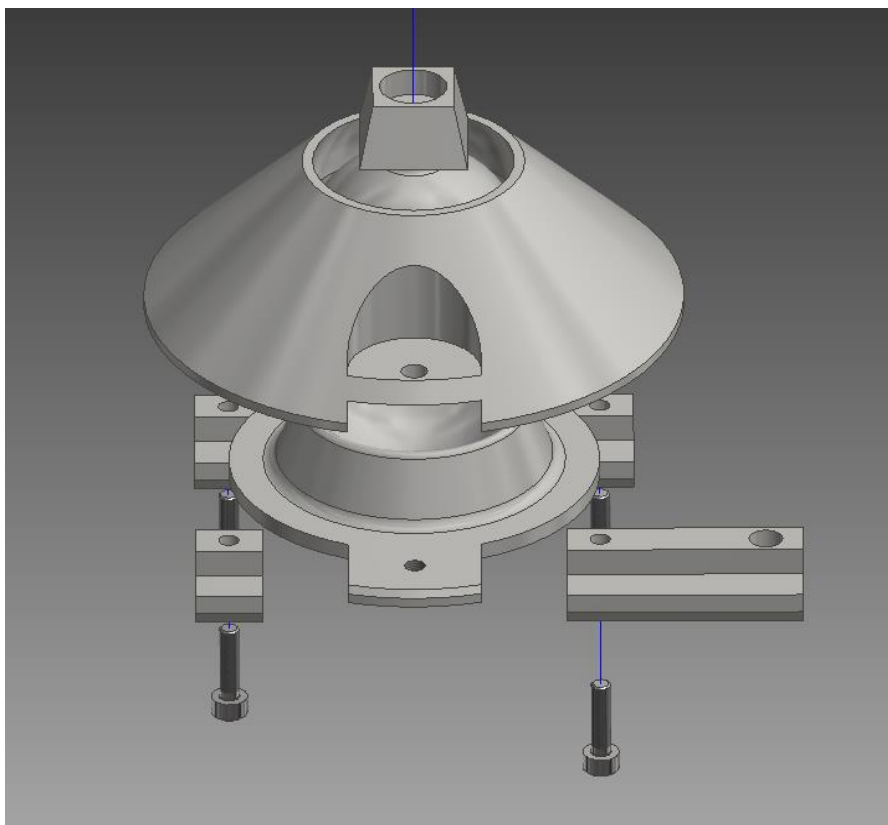
Případná výroba platformy upínacího systému metodou třískového obrábění by proběhla na soustruhu s poháněným nástrojem a 3+osé frézce. Pro snížení náročnosti a zlevnění výroby by byly vodící kameny vyfrézovány samostatně a následně přišroubovány k tělu posuvníku platformy, viz rozpad sestavy na ilustračním obrázku níže a výkresová dokumentace v příloze. Tím je umožněna výroba těla posuvníku platformy na soustruhu s poháněným nástrojem, jenž je nutností z důvodu vyfrézování drážky pro aretaci kulového čepu.

Výroba platformy byla poptána u společností zabývajících se CNC obráběním ve východočeském regionu. Průměrná cena služeb za obrábění činí 120.000 CZK bez materiálu¹². Polotovarem jsou hliníkové kruhové a čtyřhranné tyče EN 573-3 AW 6082 T6/T6511 s rozměrovými specifikacemi dle výkresové dokumentace. Jako spojovací materiál slouží inbusové šrouby DIN 912 M3x12-8.8. Cena materiálu potřebného pro zhotovení padesátikusové série činí 8.829 CZK¹³. Celková suma za zhotovení padesátikusové série platformy upínacího systému pro průmyslovou tomografii tedy vychází přibližně na 128.829 CZK. Cena za jeden kus platformy tedy činí 2.577 CZK.

Zbylé komponenty jsou tištěné beze změn viz tabulka výše, náklady na ně činí 3.983,59 CZK včetně rozpuštěných nákladů na vývoj, tj. naprosto stejně jako v podkapitole výše (viz příloha *naklady_bezplatformy_serie50ks.xlsx*).

¹² Ceny vychází z nabídek z emailové korespondence s firmami v regionu zabývajících se CNC třískovým obráběním kovů.

¹³ Ceny polotovarů jsou čerpány z webových stránek společnosti ehlinik.cz k datu 18.7.2023



Obrázek 32 -Platforma upínacího systému modifikovaná pro třískové obrábění

Veškeré náklady na výrobu kompletního upínacího systému kombinovaného z obráběné hliníkové platformy a zbylých komponent zhotovených metodou 3D tisku tedy činí přibližně 6.561 CZK.

10.4. POROVNÁNÍ FINANČNÍ NÁROČNOSTI RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY

Z průzkumu trhu a vlastních výpočtů známe přibližné náklady pro výrobu série čítající padesát kusů. To nám umožní mezi sebou porovnat nákladnost jednotlivých výrobních technologií a stanovit minimální množství, od kterého by se vyplatilo použít kterou technologii.

Technologie výroby	Náklady na výrobu [CZK]	Náklady na výrobu [EUR] ¹⁴
3D tisk	4.778	200,6
Hliníková obráběná platforma + 3D tisk	6.561	275,4
Platforma vyráběná metodou vstřikování plastů + 3D tisk	19.623	823.8

Tabulka 5 - Srovnání cen výroby upínacího systému při výrobě padesátikusové série.

¹⁴ Dle kurzu CZK/EUR (0.041982) ke dni 18.7.2023

10.5. CENOVÉ SROVNÁNÍ SE SYSTÉMY NA TRHU

Díky cenám aktuálně na trhu dostupných upínacích systémů můžeme porovnat, resp. stanovit případnou prodejní cenu vyvinutého upínacího systému. Ceny některých produktů jsou veřejně dostupné přímo na stránkách výrobce, např. ZEISS. Ceny jiných, zpravidla těch dokonalejších řešení, veřejně dostupné nejsou, proto byly poptány buď přímo u výrobců nebo jejich distributorů (viz Tabulka 2 - Porovnání cen aktuálně na trhu dostupných řešení).

Pro sériovou výrobu byla zvolena varianta s hliníkovou obráběnou platformou. Důvodem je násobně vyšší odolnost a subjektivně lepší vzhled. Případná prodejní cena je stanovena na 1.400 EUR, tj. 33.400 CZK. I přes 80 % marži na jednom kusu výrobku je cena oproti zavedené konkurenci poloviční. Za poloviční cenu je ovšem k dostání velká škála příslušenství, které ostatní výrobci nabízí za příplatky v řádech stovek eur.

Výrobek	Výrobní náklady	Cena (EUR)	Poznámka
dk FIXIERSYSTEME SWA 39 CT	-	2854	-
ALUMESS.xray	-	2819	-
ZEISS TomoStage, 4 levels	-	680	-
ZEISS OmniFix CT + ring chuck	-	1630	-
ZEISS OmniFix Vise 120x270	-	2040	-
Upínky	-	>15	-
Navržený upínací systém	275,4	1400	Marže 80 % na výrobku.

Tabulka 6 - Porovnání prodejních cen navrženého upínacího systému a dostupných řešení.

11. UŽIVATELSKÝ MANUÁL

Uživatelský manuál přináší stručné shrnutí kroků pro správné užívání systému.

- Na otočný stůl tomografu pomocí 2 inbusových šroubů M5 s vnitřním přípevním hliníkové lineární vedení.
- Do lineárního vedení nasuneme platformu či více kusů platformem
- Na magnetickou koncovku kulového čepu platformy upneme nástavec dle typu a tvaru měřeného předmětu / předmětů
- V závislosti na použitém upínači se řiďte následujícími pokyny:
 - Při použití upínače „VĚŽ“ – volně vložte do konické výstelky úložné kapsy měřený předmět. Příhradku nasuňte do prostoru tělesa upínače. Proveďte kontrolu, zda je správně mechanicky a magneticky zaaretována.
 - Při použití upínače „PINZETA“ – přiměřenou silou rozevřete čelisti a vložte mezi jejich pěnový povrch měřený předmět, nechte čelisti samovolně stisknout měřený předmět. Pinzetu upněte přímo na platformu nebo použijte stromečkovitý nástavec pro zefektivnění měření.
 - Při použití nástavce „JEŽEK“ s pružnými hroty – vložte měřený předmět mezi hroty, mírně přimáčkněte. Předmět drží zafixovaný. Upněte nástavec na přechodku pro upínání rozměrnějších předmětů.
 - Při použití nástavce ježek s pevnými hroty – přiměřenou silou napíchněte fixovací hmotu či protikus. Upněte nástavec na přechodku pro upínání rozměrnějších předmětů.
 - Při použití nástavce „SVĚŘÁK“ – nastavte vzdálenost čelistí, tak aby přibližně odpovídala délce měřeného předmětu, případně dutiny, za kterou se bude upínat. Vložte mezi čelisti měřený předmět a přisuňte čelisti, za použití přiměřené síly vytvořte mírné předpětí. Zaaretujte dotažením aretačních šroubů.
- Za pomoci centrovacího zařízení napolohujeme měřený předmět / předměty do středu stolu, upravíme náklon a provedeme aretaci posuvu i kulového čepu dotažením aretačních šroubů

- Sestavu stolu a upínacího zařízení umístíme do pracovního prostoru tomografu
- Provedeme měření na CT
- Sestavu vyjmeme z pracovního prostoru tomografu
- Vyjmeme z upínačů měřené předměty přesně opačným způsobem, než byly upnuty
- Připravíme upínací systém na další měření

V případě nutnosti měření předmětů atypických tvarů a velikostí lze použít více upínacích platforem a předmět upnout například mezi svorky, jak vertikálně, tak horizontálně.

Uživatelský manuál slouží pro základní seznámení s funkcemi upínacího systému, není však nutné se ho striktně držet. Kreativitě při používání se meze nekladou.

12. ZÁVĚR

Tématem diplomové práce bylo navržení, ověření funkčnosti a ekonomické zhodnocení výroby upínacího systému pro průmyslovou tomografii. V první části byla provedena rešerše a seznámení čtenáře s principy průmyslové tomografie. Na tu navazuje výčet a zhodnocení aktuálně na trhu dostupných řešení a jejich zhodnocení. Po uvedení čtenáře do problematiky upínání na průmyslových CT následují kapitoly návrh a výroba prototypu vlastního upínacího systému. Návrh vychází z praktických poznatků a jeho primárním cílem je zvýšení produktivity při měření za použití průmyslových tomografů. Prototyp upínacího systému byl vyroben za pomoci metody 3D tisku a otestován na tomografu v laboratořích školy. Z výsledků je zřejmé, že byly splněny vytyčené cíle a požadavky na upínací systém. Jeho největší předností je uživatelská přívětivost, možnost efektivního skenování více objektů najednou a polohovatelnost měřené součásti, které bylo dosaženo použitím magnetů pro upínání jednotlivých upínačů a adaptérů. Paralelně s návrhem a výrobou prototypu byla zaznamenávána data, díky kterým bylo možno stanovit ekonomickou náročnost vývoje, to jest obsahem navazujících kapitol. Bylo vypočteno, že pokud by vývoj upínacího systému probíhal komerčně, náklady k datu odevzdání této diplomové práce by činily zhruba 81.205,85 CZK. Případná malosériová výroba a porovnání různých technologií výroby je řešena v druhé půli této práce. Jako nejlevnější se jeví výroba metodou 3D tisku za použití vybraných materiálů. Ovšem pro sériovou verzi volím variantu s hliníkovou platformou a nástavci vyrobenými metodou 3D tisku. To z důvodu mnohonásobně vyšší trvanlivosti i lepšího vzhledu. Porovnání cen vyvinutého upínacího systému a systémů na trhu je shrnuto v předposlední kapitole. Závěr práce tvoří stručný uživatelský manuál.

Pokyny pro vypracování diplomové práce byly splněny, aktuálně probíhá doladění a optimalizace některých komponent upínacího systému pro tvorbu předsériového kusu.

BIBLIOGRAFIE

1. *Meso-structures evolution rules of coal fracture with the computerized tomography scanning method*. **Baisheng Nie, Xueqiu He, Xiangchun Li, Wenxue Chen, Hu Shoutao**. 2014.
2. History of the CT Scan. *catalinaimaging.com*. [Online] [Citace: 1. Únor 2023.] <https://catalinaimaging.com/history-ct-scan/>.
3. CAD. *Počítačová tomografie pro přesné měření, defektoskopii i reverzní inženýrství*. [Online] [Citace: 5. Leden 2022.] <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2114-pocitacova-tomografie-pro-presne-mereni-defektoskopii-i-reverzni-inzenyrstvi.html>.
4. *NÁVRH A REALIZACE UPÍNACÍHO*, *Bakalářská práce*. **Malý, Lukáš**. Vysoké Mýto, 2021.
5. **MM publishing, s.r.o.** 181119 Vyšlo v MM : 14.11.2018. *MM Průmyslové spektrum*. 2018, 11.
6. **CHRISTOPH, Ralf a Hans J. NEUMANN**. *Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice: přesná, hospodárná a univerzální*. Uherský Brod : PRIMA Bilavčík, 2011.
7. **Steiner, Dirk**. *Computed Tomography Scans: The Latest Tool for Industrial Quality Evaluation*. *qualitymag.com/*. [Online] BNP Media, 1. Únor 2019. [Citace: 3. Únor 2023.] <https://www.qualitymag.com/articles/95261-computed-tomography-scans-the-latest-tool-for-industrial-quality-evaluation>.
8. **KG, dk FIXIERSYSTEME GmbH & Co**. www.dk-fixiersysteme.de/fixiersysteme/swa39_ct. *www.dk-fixiersysteme.de*. [Online] [Citace: 14. Leden 2023.] https://www.dk-fixiersysteme.de/wp-content/uploads/2022/08/2022_08-CT-Prospekt_EN.pdf?lang=en.
9. *Spannsysteme für optische Messgeräte und industrielle Computertomographie*. <https://www.qz-online.de/>. [Online] [Citace: 14. Leden 2023.] <https://www.qz-online.de/a/produktmeldung/spannsysteme-fuer-optische-messgeraete-u-1141885>.
10. ZEISS FixAssist CT. *zeiss.cz*. [Online] [Citace: 14. Leden 2023.] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/prislusenstvi/machine-accessories/zeiss-fixassist-ct.html>.
11. OmniFix plastic ring chuck Ø70 mm. *shop.metrology.zeiss.de/*. [Online] [Citace: 14. Leden 2023.] https://shop.metrology.zeiss.de/INTERSHOP/web/WFS/IMT-DE-Site/en_DE/-/EUR/ViewProduct-Start?SKU=626170-0011-160&CategoryName=440400&CatalogID=400000.

12. Universal clamping fixtures. *zeiss.cz*. [Online] [Citace: 14. Leden 2023.] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/prislusenstvi/machine-accessories/clamping-devices.html>.
13. Low Density Fixtures for Industrial X-Ray & CT Scanning. *https://www.havenmetrology.com/*. [Online] 12. Červen 2020. [Citace: 2023. Leden 14.] <https://www.havenmetrology.com/industrial-ct-fixtures/>.
14. *A short history of 3D printing, a technological revolution just started*. **Savini, A. a Savini, G. G.** Tel-Aviv, Israel : IEEE, 2015. ISBN: 978-1-5090-0065-4.
15. **Xometry, Team.** All About ABS 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition. *Xometry*. [Online] 19. Zář 2022. [Citace: 16. Duben 2023.] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>.
16. All About PLA 3D Printing Filament: Composition, Properties, Differences. *Xometry*. [Online] 30. Srpen 2022. [Citace: 16. Duben 2023.] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/pla-3d-printing-filament/>.
17. All About PETG 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition. *Xometry*. [Online] 19. Zář 2022. [Citace: 16. Duben 2023.] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/petg-3d-printing-filament/>.
18. **Xometry.** Nylon 3D Printing Service. *Xometry*. [Online] [Citace: 16. Duben 2023.] <https://www.xometry.com/capabilities/3d-printing-service/3d-printing-nylon/>.
19. HIPS. *PRUSA RESEARCH by JOSEF PRUSA*. [Online] 2022. [Citace: 16. Duben 2023.] https://help.prusa3d.com/cs/article/hips_167118.
20. **Nikolovska, Gracija.** All About Polypropylene: How it's Made and Used. *Xometry*. [Online] 24. Květen 2022. [Citace: 19. Duben 2023.] <https://www.xometry.com/resources/materials/polypropylene/>.
21. Polycarbonate. *SYMPLIFY3D*. [Online] [Citace: 21. Duben 2023.] <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/polycarbonate/>.
22. Ultrafuse PAHT CF15 Technical Data Sheet. *ultrafusefff*. [Online] 14. Listopad 2019. [Citace: 16. Duben 2023.] https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2019/01/Ultrafuse_PAHT_CF15_TDS_EN_v3.3.pdf.

23. **SA, SpecialChem.** Density of Plastics: Technical Properties. *Omnexus*. [Online] [Citace: 19. Duben 2023.] <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/density>.
24. Soubory STL. *Adobe*. [Online] [Citace: 7. duben 2023.] <https://www.adobe.com/cz/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html>.