



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

# NÁVRH A REALIZACE UPÍNACÍHO SYSTÉMU PRO PRŮMYSLOVÝ TOMOGRAF

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2021**

**LUKÁŠ MALÝ**

# ZADÁNÍ



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malý** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **473410**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací 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 a realizace upínacího systému pro CT**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design and verification of CT clamping system**

Pokyny pro vypracování:

Problematika skenování a upínání dílů v CT.  
Návrh modulárního systému pro univerzální použití.  
Volba vhodného materiálu upínacího systému.  
Ověření funkčnosti návrhu u vybraných dílů.

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  
podle vedoucí(ho) práce

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podle děkana/ky

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

**Vedoucí práce:**

Ing. Jan Šimota

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta strojní

České vysoké učení technické v Praze

Technická 4

160 00 Praha 6

Česká republika

©červenec 2021 Lukáš Malý

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma NÁVRH A REALIZACE UPÍNACÍHO SYTÉMU PRO PRŮMYSLOVÝ TOMOGRAF vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Ve Vysokém Mýtě .....

.....

Lukáš Malý

# ABSTRAKT

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je seznámení čtenáře s problematikou upínání dílů při měření pomocí průmyslových tomografů, návrhem vlastního univerzálního upínacího systému, volbou vhodného materiálu pro výrobu upínacího systému, jeho výrobou a ověření jeho funkčnosti v praxi. To vše za použití metod 3D tisku. V práci jsou zahrnuty informace o aktuálně dostupných řešení na trhu, 3D tisku, materiálech a optimalizaci. Závěrem práce je zhodnocení využitelnosti navrženého řešení a jeho uplatnění v budoucí praxi.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** CT, Tomografie, Upínací systém, Metrologie, 3D tisk, Materiály, Topologická optimalizace, FDM, CAD

## ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with acquainting the reader with the issue of clamping parts when measuring with industrial tomographs, designing its own universal clamping system, choosing a suitable material for the production of the clamping system, its production and verification of its functionality in practice. All this using 3D printing methods. The work includes information on currently available solutions on the market, 3D printing, materials and optimization. The conclusion of the work is the evaluation of the usability of the proposed solution and its application in future practice.

**KEYWORDS:** CT, Tomography, Clamping systém, Metrology, 3D printing, Materials. Topology optimization, FDM, CAD

## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou děkuji rodině za podporu při studiu. Dále děkuji Ing. Janu Šimotovi za jeho rady a doporučení při psaní této bakalářské práce.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 - SCHEMA PRŮMYSLOVÉHO TOMOGRAFU [1] .....	13
OBRÁZEK 2 - KONTROLA LEHKÉ KOVOVÉ SOUČÁSTI [5] .....	15
OBRÁZEK 3 - OMNIFIX FIRMY ZEISS [6] .....	17
OBRÁZEK 4 - TOMOSTAGE, ZEISS [8] .....	18
OBRÁZEK 5 - SWA39, DK FIXIERSYSTEME [6] .....	19
OBRÁZEK 6 -UPNUTÍ POMOCÍ UPÍNEK [9] .....	20
OBRÁZEK 7 - PŘÍPRAVEK PRO SNÍMÁNÍ VÍCE SOUČÁSTÍ NAJEDNOU VYROBENÝ METODOU 3D TISKU [10] .....	20
OBRÁZEK 8 - UPNUTÍ MĚŘENÝCH PŘEDMĚTŮ DO BLOKU POLYSTYRENU .....	21
OBRÁZEK 9 - 3D TISKÁRNA STRATASYS F370 (VLEVO) A TISKÁRNA TYPU PRUSA I3 .....	23
OBRÁZEK 10 -PRACOVNÍ PROSTOR TOMOGRAFU ZEISS METROTOM 1500 .....	27
OBRÁZEK 11 - 3D MODEL SVĚŘÁKU S TOPOLOGICKY OPTIMALIZOVANÝMI ČELISTMI .....	30
OBRÁZEK 12 - UPÍNÁNÍ SOUČÁSTEK ZA VNITŘNÍ PRŮMĚR NEBO DUTINY .....	31
OBRÁZEK 13 - 3D MODEL MONOLITNÍ SVORKY .....	32
OBRÁZEK 14 - PŘÍKLAD POUŽITÍ ÚHLOVÝCH MEZIKUSŮ A SPOJKY PRO MĚŘENÍ VÍCE KUSŮ NAJEDNOU .....	33
OBRÁZEK 15- UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ SOFTWARE PRUSA SLICER .....	35
OBRÁZEK 16 - UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ SOFTWARE GRABCAD PRINT .....	36
OBRÁZEK 17 - HOTOVÝ PROTOTYP MODULÁRNÍHO UPÍNACÍHO SYSTÉMU + NĚKTERÉHO PŘÍSLUŠENSTVÍ .....	37
OBRÁZEK 18 - TESTOVANÉ MATERIÁLY PRO ZHOVOVENÍ KONTAKTNÍ PLOCHY .....	38
OBRÁZEK 19 - UPÍNACÍ SYSTÉM .....	39
OBRÁZEK 20 - SNÍMEK PRO POROVNÁNÍ VHODNOSTI MATERIÁLŮ KONTAKTNÍ PLOCHY .....	39
OBRÁZEK 21 - PRINTSCREEN VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT POMOCÍ SOFTWARE VG STUDIO MAX .....	40
OBRÁZEK 22 - TESTOVACÍ SVORKY Z RŮZNÝCH MATERIÁLŮ PŘIPRAVENÉ PRO MĚŘENÍ V CT .....	40
OBRÁZEK 23 - PRINTSCREENY VYHODNOCENÍ NEJVHODNĚJŠÍHO MATERIÁLU .....	41

## SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 - SROVNÁNÍ HUSTOT A PEVNOSTÍ POTENCIÁLNĚ POUŽITELNÝCH MATERIÁLŮ .....	25
TABULKA 2 - ORIENTAČNÍ POROVNÁNÍ HUSTOT MATERIÁLŮ.....	26
TABULKA 3 - POROVNÁNÍ VELIKOSTI DEFORMACE JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ .....	42



## SEZNAM ZKRATEK

CT	Computed Tomography
CAD	Computer Aided Design
CMM	Coordinate-measuring machine
AM	Additive manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
HiPS	High impact polystyrene
PLA	Polyactid acid
PC	Polycarbonate
CAA	Computer aided accuracy
UV	Ultraviolet
ASA	Akrylonitril styren akrylát

# OBSAH

ZADÁNÍ .....	1
PROHLÁŠENÍ .....	3
ABSTRAKT .....	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	6
SEZNAM TABULEK .....	7
SEZNAM ZKRATEK .....	8
1. ÚVOD .....	11
2. CÍL A POSTUP PRÁCE.....	11
3. MOTIVACE.....	12
4. VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE .....	12
4.1. PRINCIP .....	12
4.2. SOUČASNÉ VYUŽITÍ.....	13
5. UPÍNACÍ SYSTÉMY .....	16
6. 3D TISK .....	22
6.1. HISTORIE 3D TISKU .....	22
6.2. POUŽITÁ METODA .....	23
6.3. MATERIÁLY .....	23
6.3.1. KONSTRUKČNÍ PRVKY.....	23
6.3.2. KONTAKTNÍ PLOCHA .....	26
7. NÁVRH A VÝROBA VLASTNÍHO UPÍNACÍHO SYSTÉMU .....	27
7.1. DESIGN A KONSTRUKCE.....	27
7.1.1. POŽADAVKY .....	28
7.1.2. ZÁKLADNA .....	28

7.1.3.	UPÍNACÍ NÁSTAVCE.....	29
7.1.3.1.	SVĚRÁK .....	29
7.1.3.2.	SVORKA.....	31
7.1.4.	PŘÍSLUŠENSTVÍ.....	32
7.2.	VÝROBA.....	33
7.2.1.	PŘÍPRAVA PODKLADŮ PRO TISK.....	34
7.2.2.	PRUSA SLICER / REPRAP I3 .....	34
7.2.3.	GRABCAD PRINT / STRATASYS F370.....	35
7.2.4.	POSTPROCESSING .....	36
8.	TESTOVÁNÍ V PRAXI .....	37
8.1.	MATERIÁL PRO VÝROBU KONTAKTNÍ PLOCHY .....	37
8.2.	MATERIÁLY PRO VÝROBU KONSTRUKCE UPÍNAČŮ.....	40
8.2.1.	CT TEST .....	41
8.2.2.	TEST ODOLNOSTI.....	42
9.	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A VÝBĚR NEJLEPŠÍHO ŘEŠENÍ.....	42
10.	UŽIVATELSKÝ MANUÁL .....	43
11.	ZÁVĚR .....	45
	BIBLIOGRAFIE .....	46

## 1. ÚVOD

Výpočetní tomografie (Computed Tomography, CT) se řadí mezi neinvazivní zobrazovací metody. Umožňuje vytvořit trojrozměrný obraz předmětu včetně jeho vnitřní struktury. Díky tomu je možné prohlížení a kontrola vnějších i vnitřních struktur předmětu. 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 bakalářské práce je proto návrh, výroba a následné otestování prototypu modulárního upínacího systému pro průmyslový tomograf. Upínací systém musí být schopen upnout měřené objekty rozličného tvaru, velikosti a hmotnosti. Dalším požadavkem je možnost napolohování objektu do libovolné pozice. 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 bakalářské práce je tedy návrh a realizace modulárního upínacího systému pro průmyslové tomografy s využitím metod 3D tisku. Práce je rozdělena do dvou částí, rešeršní (kapitoly 4-6) a praktické (kapitoly 7- 9). V rešeršní části jsou sumarizovány informace o průmyslové výpočetní tomografii, poté jsou prozkoumána momentálně dostupná řešení na trhu, která jsou zhodnocena a detailněji rozebrána. Následuje stručné shrnutí informací ohledně aditivních technologií a potenciálně použitelných materiálů.

Druhá, praktická část, je věnována návrhu 3D modelu upínacího systému s ohledem na vytisknutelnost a funkčnost jednotlivých částí. Pro návrh modelu jsem

zvolil program Autodesk Inventor. Další fází práce je optimalizace jednotlivých částí modelu a výběr vhodného materiálu pro 3D tisk. Následuje otestování a korekce upínacího systému a jeho komponent. Závěr práce patří výslednému zhodnocení, zdali je samotná idea upínacího systému, vyrobeného pomocí aditivních technologií, správná a v budoucí praxi použitelná.

### 3. MOTIVACE

Motivací práce je navržení modulárního multifunkčního upínacího systému pro průmyslový tomograf, následně jeho ozkoušení a pokud možno, jeho využití v praxi nejen na tomografu ZEISS Metrotom 1500 v laboratořích Fakulty strojní ČVUT. Systém by měl v budoucnu pomoci zjednodušit a zpříjemnit práci nejen s výše zmíněným strojem, a to při významně nižších nákladech na upínání než s doposud na trhu dostupnými produkty.

### 4. VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE

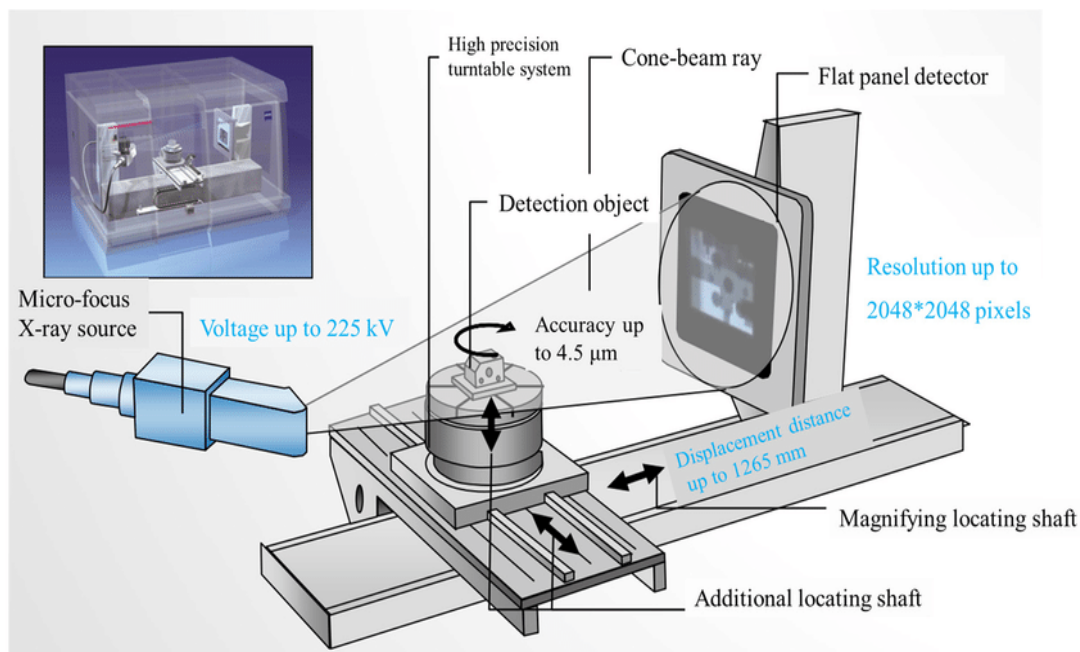
Tato kapitola shrnuje principy a současné využití výpočetní tomografie v praxi. Nejdůležitější částí této kapitoly je její závěr, kde jsou uvedeny limity této metody a orientační prozařitelné tloušťky materiálů v závislosti na jejich hustotě a napětí na rentgence.

#### 4.1. PRINCIP

Samotný název „výpočetní tomografie“ v sobě ukrývá podstatu principu této metody. „Výpočetní“ z toho důvodu, že výsledek, tedy trojrozměrný model, měření je pomocí matematických algoritmů vypočten z jednotlivých řezů. Slovo „tomografie“ vychází z řeckého *tomos* neboli (řez) a *graphy* (psát).

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 se vytvoří 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 - schéma průmyslového tomografu [1]

## 4.2. 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. [2]

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. [2] 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. [3] Dnes se můžeme na trhu setkat nejčastěji s průmyslovými tomografy od firem Carl ZEISS, Werth nebo North Star Imaging USA.

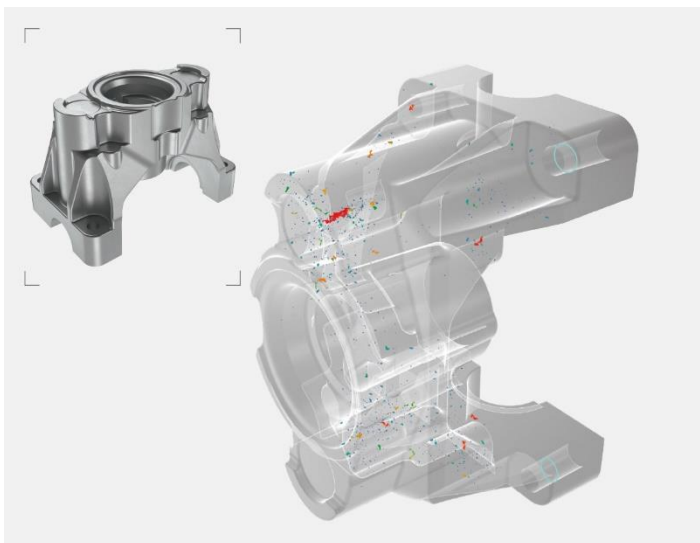
Hlavní rozdíl v konstrukci medicínského a průmyslového tomografu je v tom, že v průmyslovém nerotuje snímací systém, ale otáčí se měřený objekt, který je napolohován ve třech osách, tak, aby jeho obraz zabral co největší pole v oblasti detektoru. Během snímání je měřeným předmětem otáčeno o 360° kolem 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. voxelů (volume pixel), prostorové umístění a intenzita v 16 bitech šedé barvy koresponduje s reálnými body v objemu součástky a okolí a jejich propustnosti. [2]

Díky vysoce přesným a kvalitním součástkám je možno při měření na metrotomech docílit vysoké přesnosti s chybami v rozmezí  $\pm (9 + L/50) \mu\text{m}$  (kde L je libovolná měřená vzdálenost), což je ve strojírenství automotive nebo leteckém průmyslu dostačující. Takto malých chyb je možno dosáhnout také pomocí CAA (Computer Aided Accuracy) opravy chyb a korekcí všech chyb systematických. Rozlišení otočného stolu, který je uložen na vzduchových ložiscích, je až 0,036 uhlové vteřiny. [2] Nesporná výhoda bezkontaktního měření pomocí CT se projevuje při měření pružných a poddajných materiálů, kde by i sebestřednější CMM (souřadnicový měřicí stroj) nepřineslo 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. [2] [3] [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. [4]



Obrázek 2 - kontrola lehké kovové součásti [5]



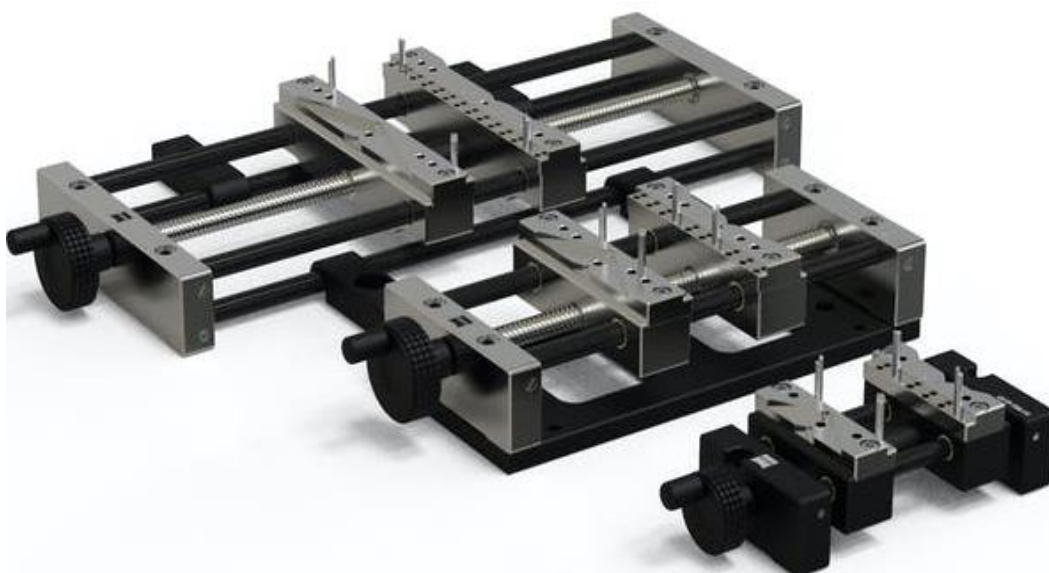
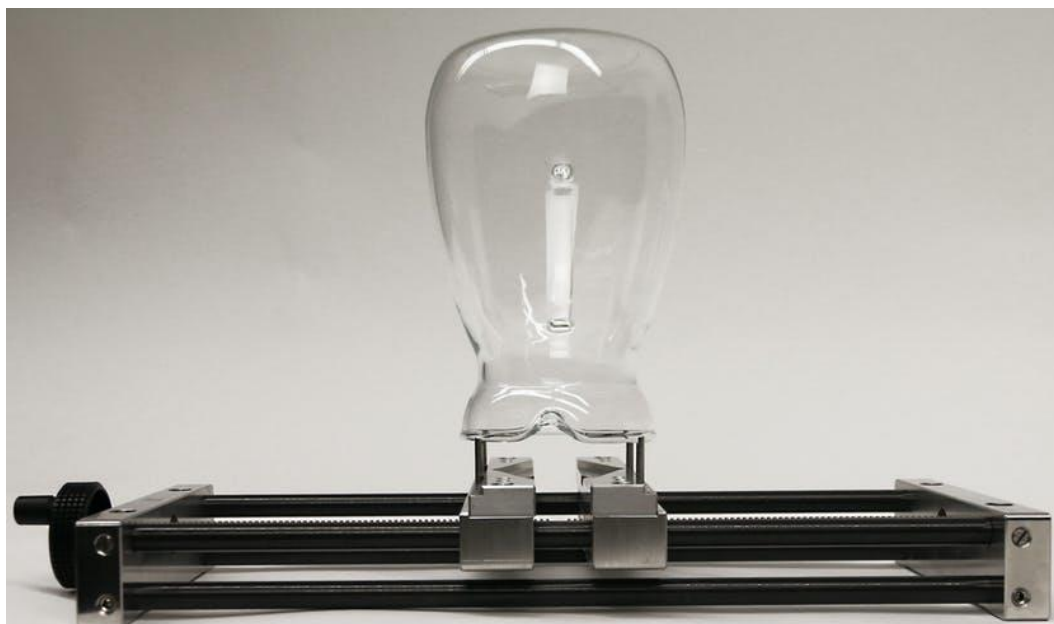
## 5. UPÍNACÍ SYSTÉMY

Upnutí měřeného objektu na otočný stůl tomografu je velice důležité. Musí být pevné, tak, aby se eliminovaly nechtěné vibrace, které by snižovaly kvalitu jednotlivých snímků, vznikající rotací pracovního stolu. Hustota materiálu, ze kterého je zhotoven upínací systém je také velmi důležitá, to proto, aby upínací systém vyrobený z materiálu se zbytečně vysokou hustotou nepohlcoval záření a „nestínil“ tak snímání objekt, čímž by snižoval výslednou kvalitu. Nespornou výhodou je i to, pokud systém umožňuje upínání předmětů organických tvarů a součástek různých velikostí.

Níže je uveden výčet všech aktuálně dostupných upínacích systémů pro průmyslovou tomografii.

V současné době lze na trhu najít pouze velice málo řešení určených přímo jako upínací systém pro průmyslovou tomografii. Jako příslušenství ke svým tomografům nabízí firma ZEISS přípravky řady OmniFix. Jedná se o celkem jednoduchý systém ve formě svěráku, který je vyráběn v několika rozměrových variantách. Jeho nespornou výhodou je robustní konstrukce umožňující spolehlivé upnutí rozměrnějších, avšak jen tvarově jednodušších dílů. Dalším benefitem je kompatibilita s ostatními produkty firmy ZEISS. Nevýhodou je však fakt, že tyto přípravky byly primárně určeny pro měření na souřadnicových strojích, kde jejich celokovová konstrukce, na rozdíl od tomografie, není překážkou. Konstrukce těchto přípravků není vhodná pro upínání menších dílů a komponent složitějších a organických tvarů, není možné ani jejich libovolné napolohování. Firma ZEISS nabízí speciálně pro průmyslová CT také příslušenství TomoStage. Výrobky řady TomoStage jsou v podstatě několikapatrové regálky vyrobené z uhlíkových vláken, do kterých se položí do polystyrenu nebo aranžovací hmoty ukotvené měřené

objekty. To umožňuje skenování více objektů najednou, což výrazně zefektivňuje měření, zejména v sériových výrobcích.



Obrázek 3 - OmniFix firmy ZEISS [6]



*Obrázek 4 - TomoStage, ZEISS [8]*

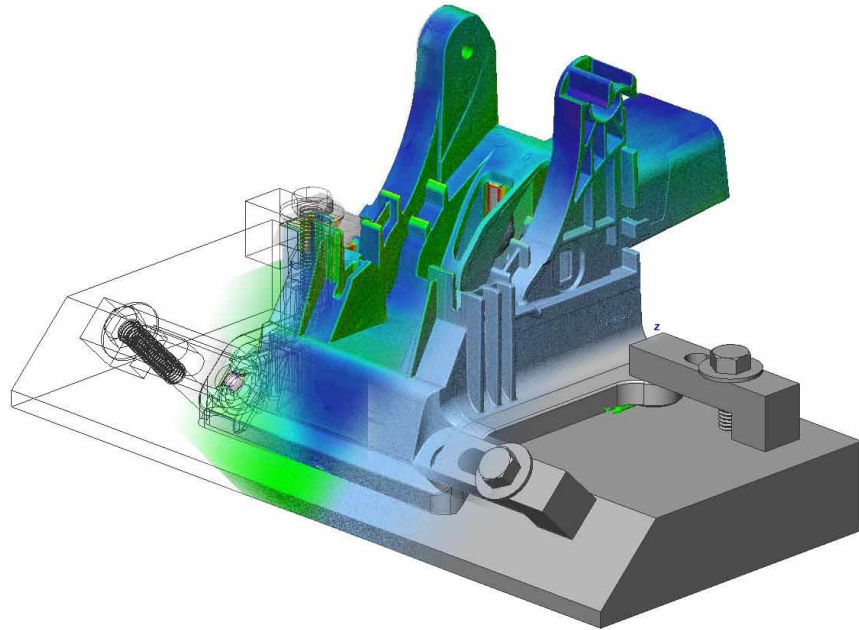
Nejsfistikovanější řešení, dnes dostupné na trhu, nabízí německá firma dk FIXIERSYSTEME GmbH & Co. KG se svým modulárním systémem SWA39. Tento systém se skládá z velké škály komponent, které jsou mezi sebou kompatibilní a pomocí nichž lze sestavit upínací systém v podstatě na míru měřené součástce. Konstrukce je celokovová, vyjma upínací části, ta může být buď ve formě čelistí pro sevření měřené součásti za vnější plochu nebo naopak rozepření v dutině. Další možností je upínací část ve formě kolíčku, obzvláště pro upínání menších komponent. Největší nevýhodou tohoto systému je jeho cena, která se pohybuje okolo 1000EUR za základní set bez většího příslušenství, viz obrázek 6 a 7.



Obrázek 5 - SWA39, dk FIXIERSYSTEME [6]

Dále se můžeme setkat se systémem, který využívá upínky z materiálů o nízké hustotě. Logika upnutí je víceméně stejná, jako např. při třískovém obrábění. Vzhledem ke své jednoduchosti má toto řešení velice omezenou škálu využití,

zejména proto, že ho lze využít jen na větší objekty specifického tvaru. Toto řešení je použitelné v podstatě pouze pro opakovaná měření součástí stejného, nebo podobného typu.



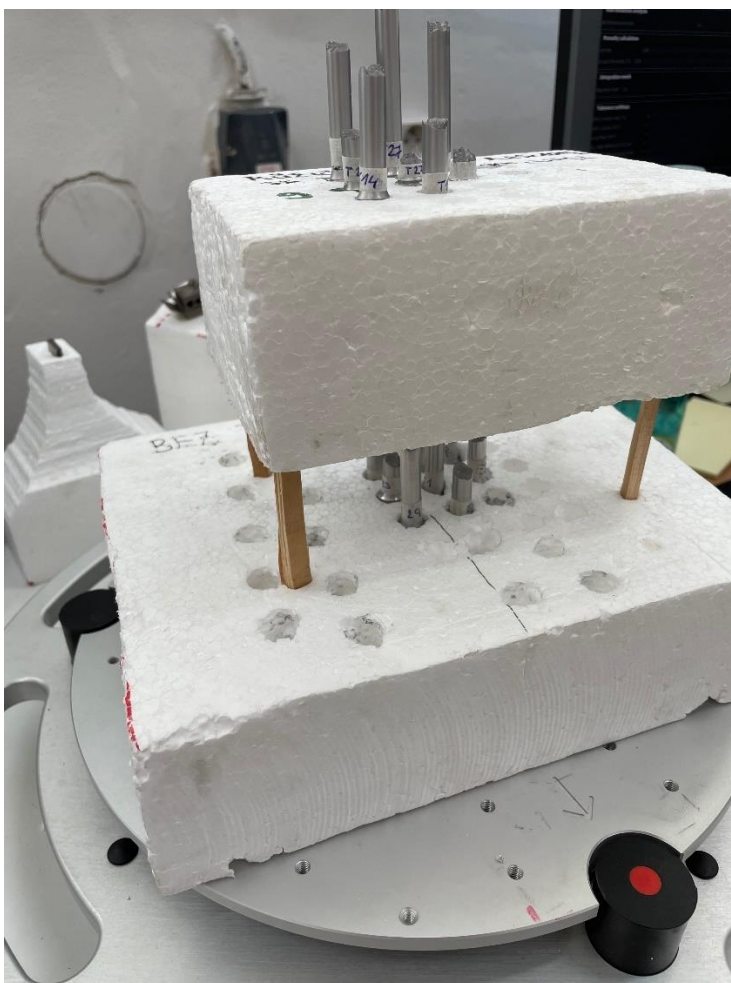
Obrázek 6 - upnutí pomocí upínek [9]

V poslední době se díky rozvoji a dostupnosti aditivních technologií naskytly úplně nové možnosti upínání. Nyní je možno doslova vytisknout přípravek přímo na míru měřenému objektu, a to relativně levně a dle představ uživatele. Největší výhoda spočívá v možnosti snímání několika objektů najednou, především tedy těch menších. Naopak nevýhodou je delší doba zhotovení přípravku a neuniverzálnost.



Obrázek 7 - přípravek pro snímání více součástí najednou vyrobený metodou 3D tisku [10]

Aktuálně je nejrozšířenějším způsobem „upnutí“ položení nebo vsazení měřeného objektu do, nebo na blok polystyrenu, či aranžérské hmoty, která je v některých případech z důvodu lepší fixace objektu obrobena. 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 hmota (polystyren/pěna) má tak nízkou hustotu, že nevnáší do výstupních dat nepřesnosti a po měření není ve valné většině případů nutno přípravek z výstupu měření odstranit, protože se jeví jako neviditelný.



Obrázek 8 - upnutí měřených předmětů do bloku polystyrenu. Konkrétně v tomto případě se jedná o improvizované víceúrovňové skenování pro zvýšení produktivity.

## 6. 3D TISK

Vzhledem ke stále více stoupající popularitě technologie 3D tisku a její dostupnosti, zejména tedy 3D tisku plastů, jsem se rozhodl pro její využití při vývoji vlastního upínacího zařízení. Za největší benefit této metody považuji relativně rychlou výrobu samotného upínacího zařízení, případně různých nástavců pro použití při měření nestandardních součástí či sestav.

Tato kapitola pojednává o technologii 3D tisku, její historii, použité metodě, strojích a materiálech. Dále je zde popsán výběr a zdůvodnění použitých materiálů.

### 6.1. HISTORIE 3D TISKU

3D tisk, jinými slovy aditivní výroba, je přírůstková výrobní technologie (anglicky 3D printing neboli additive manufacturing (AM)), jejíž podstatou, je proces tvorby třírozměrných objektů digitálního souboru. V aditivních procesech je objekt vytvořen pokládáním souvislých vrstev materiálu, dokud není celý objekt dokončen. Každá z těchto vrstev může být považována za úzce rozříznutou horizontální sekci daného objektu.

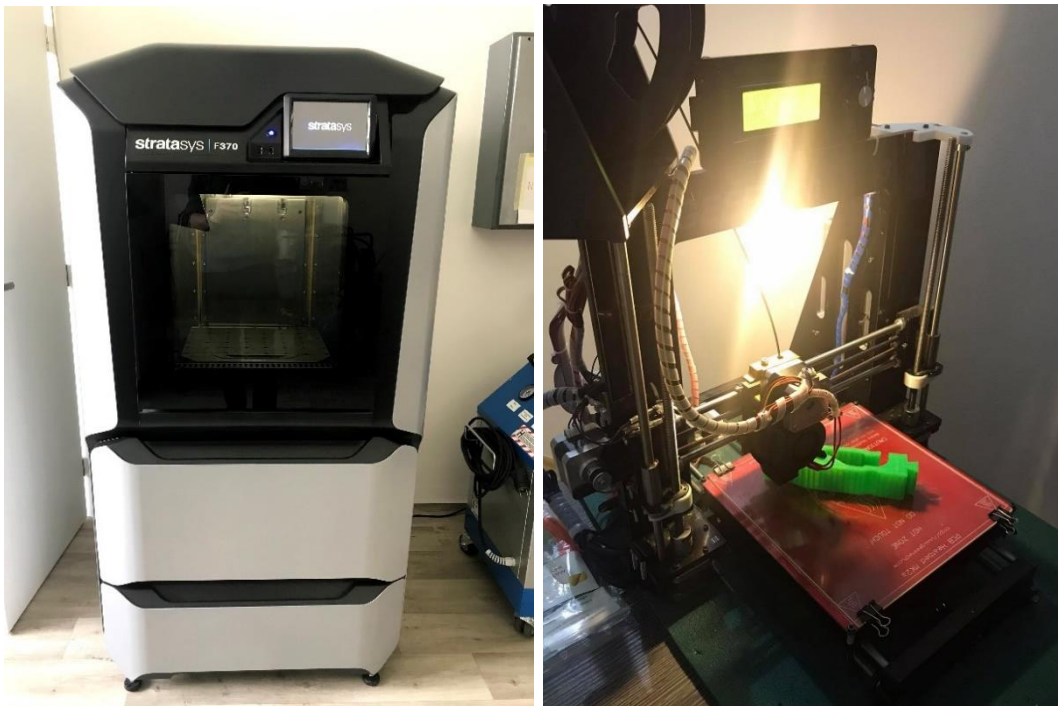
Historie 3D tisku sahá do první poloviny 80. let 20. století, kdy si Charles Hull nechal patentovat techniku stereolitografie, která spočívá ve vytvrzování vrstev fotopolymeru pomocí UV záření. V našem případě se však budeme zabývat metodou FDM (Fused Deposition Modeling), někdy také nazývanou FFF (Fused Filament Fabrication), jejíž princip spočívá v pohybu tiskové hlavy v osách X, Y, Z, po softwarem vygenerovaných drahách. Tisková hlava nanáší roztavený materiál, který je dodáván ve formě strun. Ten po vyextrudování zchladne a získá pevné skupenství. Počátky této technologie se datují k roku 1989, kdy byla vynalezena S. Scottem Crumpem. Od roku 2004 se tato technologie začala stávat dostupnou pro širší veřejnost, díky projektu RepRap<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> RepRap je první stroj ve všeobecném použití, schopný vlastní replikace. Má podobu opensource stolní 3D tiskárny, schopné vytisknout plastové předměty použitelné k její stavbě. Nyní na projektu pracuje komunita stovek vývojářů z celého světa. [15]

## 6.2. POUŽITÁ METODA

Důvodů, proč volím technologii FDM je hned několik. Tisk na tiskárnách tohoto typu je výrazně levnější ve srovnání s alternativními technologiemi. FDM technologie umožňuje tisk rozměrnějších a mechanicky namáhaných komponent v uspokojivé kvalitě. Největší výhodou je velká škála dostupných materiálů pro tisk. V neposlední řadě je to i dostupnost tiskáren samotných. Samotný tisk bude realizován na tiskárnách typu Stratasys F370 a Prusa/RepRap i3.



Obrázek 9 - 3D tiskárna Stratasys F370 (vlevo) a tiskárna typu Prusa i3 (vpravo)

## 6.3. MATERIÁLY

Na následujících řádcích jsou shrnuty potenciálně použitelné materiály pro výrobu upínacího systému. Nejprve pro samotnou konstrukci, nosné namáhané prvky, a poté pro samotnou kontaktní plochu měřené součásti s upínačem.

### 6.3.1. KONSTRUKČNÍ PRVKY

Z běžně dostupných materiálů pro 3D tisk konstrukčních prvků, především tedy přímo součástí upínačů, jako jsou čelisti a svorky, se logicky jeví jako nejvhodnější ty, které mají co nejmenší hustotu, z důvodu lepší prostupnosti



rentgenových paprsků a zároveň vyšší pevnost, která umožní upínání těžších a rozměrnějších předmětů. Přípravek bude používán při teplotách okolo 25 °C. Této provozní teplotě vyhovují všechny materiály dostupné pro 3D tisk. Mezi tyto materiály můžeme řadit následující:

- Akrylonitrilbutadienstyren neboli ABS je amorfní termoplastický polymer, vyznačující se vysokou odolností proti mechanickému poškození. Je to tuhý, houževnatý materiál, odolný proti kyselinám, hydroxidům. ABS zpracované pomocí technologie FDM je odolné teplotám do 100°C. Teplota zpracování ABS se pohybuje 210–250°C. Nevýhodou oproti ostatním materiálům je jeho vysoká smrštitelnost (0,3 - 0,7 %). ABS lze lepit pomocí acetonu, toluenu, případně metylenchloridu a poly-akrylátovými lepidly. Nejznámější použití ABS je pro výrobu LEGO kostiček. Dále ABS najdeme na většině výrobků, se kterými se setkáváme v každodenním životě, v elektronických zařízeních (notebooky, mobilní telefony), v automobilech, v kuchyňském vybavení (mixéry, rychlovarné konvice) a další. Cena ABS struny je velmi příznivá, od 0,35 Kč/g, což tento materiál řadí zároveň k těm nejlevnějším. [7]
- High impact polystyrene, zkráceně Hips je houževnatý polystyren, má velmi podobné vlastnosti jako ABS. HiPS lze snadno lepit, natírat. HiPS se vyznačuje výbornou prostorovou stabilitou, zejména pro tisk rozměrnějších objektů. Je vhodný pro tisk mechanických a funkčních součástí. Teplota zpracování HiPS se pohybuje v rozmezí 200–250°C. Cena od 0,40 Kč/g. [7] Z HiPS jsou vyráběny například obaly na CD, žiletky nebo laboratorní pomůcky.
- ASA je Obdoba materiálu ABS, ve složení je butadien nahrazen znovu akrylátem, proto Akrylonitrile Styrene Akrylát. Oproti ABS má menší smrštitelnost. Z důvodu vysoké odolnosti vůči povětrnostním vlivům je ASA jako jeden z mála plastů vhodných pro 3D tisk použitelný pro venkovní aplikace, vyrábí se z něj například krytky a vstupy/výstupy vzduchu

v použití ve vzduchotechnice. Teplota zpracování se pohybuje v rozmezí 250–280°C. Cena struny je průměrně 0,60 Kč/g. [7]

- PLA (Polyactid acid) – kyselina polymléčná je bioplast vyráběný z kukuřičného škrobu. Jeho vlastnosti se blíží klasickým plastům vyráběných z ropy. Je zdravotně nezávadný a rozložitelný pomocí kompostování. [7] Ve srovnání s ostatními materiály používanými pro 3D tisk se nejlépe tiskne a je nenáročný na HW vybavení tiskárny. Teplota tisku se pohybuje okolo 200°C, cena se pohybuje přibližně okolo 0,50 Kč/kg.

Dále lze použít materiály, které nejsou běžně dostupné, řadí se k nim ty, které jsou doslova na míru ušité jednotlivým 3D tiskárnám. V našem případě, pro výše zmíněnou tiskárnu Stratasys F370, jedná o následující:

- PC-ABS (Polykarbonát-Akrylonitrilbutadienstyren) je vysoce odolný termoplast, který je ideální pro funkční prototypování, výrobu nástrojů a výrobu v malém objemu. Nabízí to nejlepší ze dvou FDM materiálů, pevnost a tepelnou odolnost PC a flexibilitu ABS. Jeho pevnost v tahu je 41MPa a hustota 1100 kg/m<sup>3</sup>. Je použitelný pro aplikace do 110°C. [8]
- Diran 410MF07 je materiál pro technické účely založený na nylonu. 7% jeho hmotnosti je tvořeno minerální výplní. Vykazuje výjimečnou houževnatost a rázovou pevnost a nabízí nízký kluzný odpor. Diran je vhodný pro výrobu přípravek a komponent s namáhanými spoji. Vhodný pro použití do 90°C. [9]

Materiál	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu [MPa]
ABS	1050	31
PLA	1240	45
HiPS	1040	35
ASA	1070	29
PC-ABS	1100	41
Diran	1120	40

Tabulka 1 - srovnání hustot a pevností potenciálně použitelných materiálů

### 6.3.2. KONTAKTNÍ PLOCHA

Pro co nejjednodušší analýzu a postprocessing naskenované součásti je důležité, aby kontaktní plocha mezi měřenou součástí a upínačem byla zhotovena z materiálu, který bude v ideálním případě na výstupu „neviditelný“, tedy má co nejmenší schopnost pohltit rentgenové záření. To proto, aby se z výstupních dat dal oříznout nebo odfiltrvat nežádoucí, avšak nutný, respektive nevyhnutelný sken samotného upínacího zařízení. Pokud by nebyla kontaktní plocha takto upravená, na výstupních datech z CT by byl velmi špatně rozeznatelný přechod upínač-měřený objekt. Takto upravené kontaktní plochy upínače umožní to, že při práci s výstupními daty z CT se bude mezi měřeným objektem a upínačem jevit mezera, což umožní jednoduchou separaci nechtěného, avšak nevyhnutelného snímku upínače. Z toho plyne, že pro zhotovení samotné kontaktní plochy je nejlepší použít materiál s velmi nízkou hustotou, nižší než hustota samotného upínacího přípravku, především tedy upínacích čelistí, svorek atp.... Pokud bude materiál vhodně poddajný, přináší to další výhodu z pohledu zafixování měřeného předmětu.

Jako nejlepší řešení se jeví použití molitanů, polyuretanových a polyethylenových pěn nebo polystyrenů, které mají hustotu okolo 18-50 kg/m<sup>3</sup>. Sekundárně mohou pěnové materiály taktéž snížit potenciální vibrace vzniklé pohybem měřeného předmětu. Jako další přichází do úvahy kontaktní plochy zhotovené z oboustranných lepících pásek, které opět přispívají k lepšímu zafixování předmětu. V určitých případech by bylo možné zhotovit kontaktní plochu z přírodních materiálů jako je například korek.

Materiál	Průměrná hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Pěnový polystyren	25
Molitan	25
Polyethylenová pěna	30
Korek	250

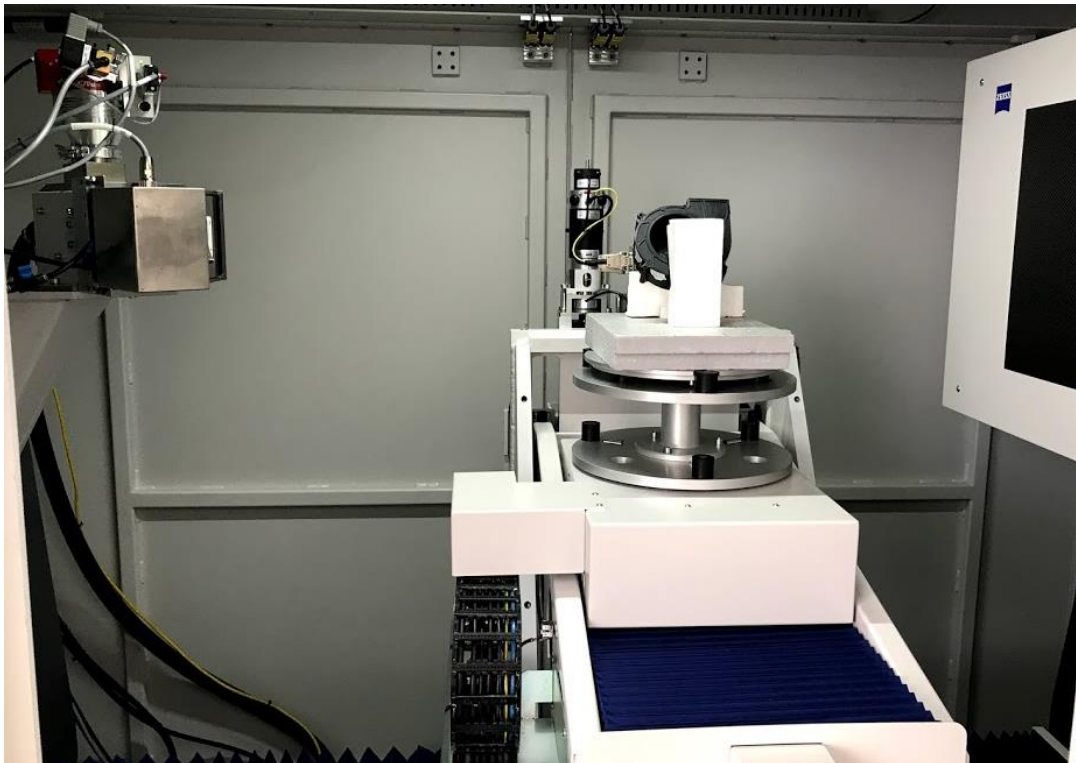
Tabulka 2 - Orientační porovnání hustot materiálů potenciálně použitelných pro výrobu kontaktní plochy

## 7. NÁVRH A VÝROBA VLASTNÍHO UPÍNACÍHO SYSTÉMU

Na řádcích níže je detailně popsána konstrukce navrženého upínacího systému a jeho příslušenství. Text je doplněn o obrázky CAD modelu a reálného hotového výrobku.

### 7.1. DESIGN A KONSTRUKCE

Tvar, vzhled a velikost, vlastně celá konstrukce upínacího systému je limitována rozměry tomografu samotného, ale hlavně principem jeho funkce. Při návrhu se budu řídit rozměry tomografu ZEISS Metrotom 1500 v laboratořích školy, na tomto přístroji bude následně ověřována funkčnost celého systému a jeho částí.



*Obrázek 10 -Pracovní prostor tomografu ZEISS Metrotom 1500, za povšimnutí stojí měřený předmět zafixovaný pomocí bloků polystyrenu*

### 7.1.1. POŽADAVKY

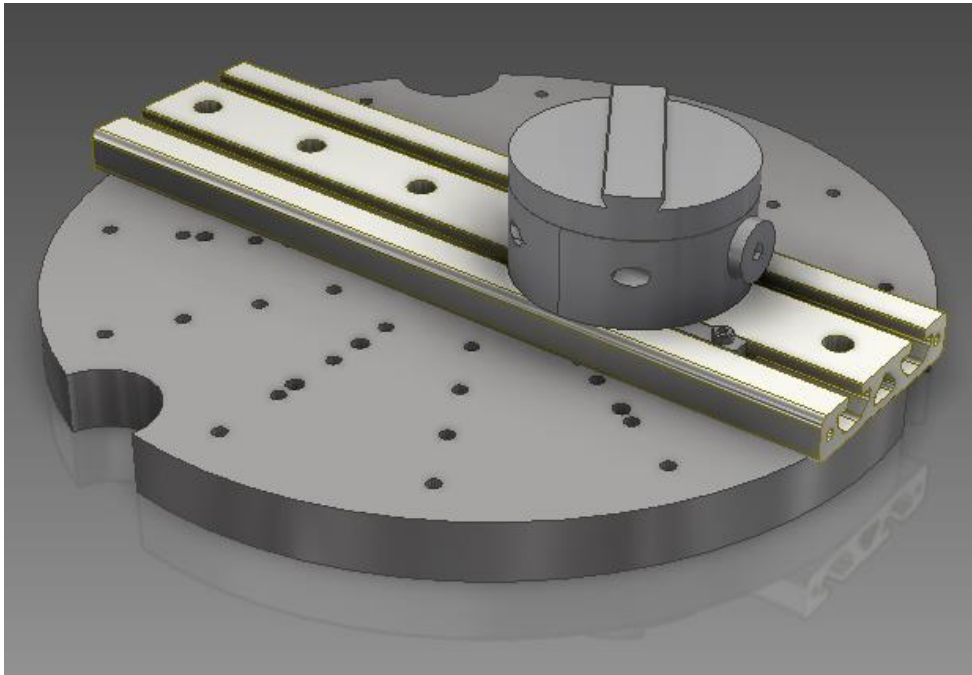
Níže je uveden soupis veškerých požadavků a některých omezení pro hledané řešení:

- Uživatelsky přívětivé – jednoduché upnutí součástí, výměna upínacích nástavců a příslušenství.
- Univerzálnost – Možnost upnout součástky různých tvarů, velikostí a hmotnosti, avšak při dodržení co možná nejmenší kontaktní plochy upínač-součást.
- Polohovatelnost měřené součástky.
- Tvar – Robustní, odolné řešení s ohledem na vytisknutelnost jednotlivých komponent.
- Materiál – Co možná nejnížší hustota, z důvodu minimalizace pohlcení CT paprsků, avšak dostatečná pevnost.
- Velikost pracovního prostoru stroje – Upínací systém musí být možno umístit na kruhový stůl o průměru 300 mm.

### 7.1.2. ZÁKLADNA

Základem celého upínacího systému je základna, na kterou se upíná příslušenství, dle tvaru upínané součásti. Základna se sestává z hliníkového extrudovaného profilu o rozměrech 16×80×300 mm a posuvného prvku s otočnou platformou. Profil je pomocí imbusových šroubů připevněn do otočného stolu tomografu a plní roli lineárního vedení, ve kterém je pohyblivě nasunut posuvný prvek s otočnou platformou. Posuvný prvek platformy se sestává ze dvou polovin, sešroubovaných pomocí dvou šroubů a matic M3. Mezi poloviny posuvného prvku je s dostatečnou vůlí, umožňující rotaci, sevřena otoč. Ta je opatřena vnější rybinovou drážkou, pomocí které se na ni upevňují upínací nástavce a příslušenství. Pro zafixování v jedné stabilní poloze jsou výše zmíněné prvky opatřeny stavěcími šrouby pro vzepření vůči hliníkovému profilu, resp. posuvnému prvku. Na hliníkový profil je v případě potřeby možno nasunout více posuvných

prvků pro montáž více upínacích nástavců, což umožní upnutí rozměrných a nehomogenních těles, jako jsou například řemeny, řetězy nebo tkaniny.



Obrázek 12 - 3D model základny upínacího systému

### 7.1.3. UPÍNACÍ NÁSTAVCE

Na platformu se upne takový nástavec, který bude korespondovat s tvarem a hmotností měřené součásti. Všechny upínací nástavce a jejich příslušenství se upevňuje spojením pomocí rybinové drážky a stavěcího šroubu. V následujících podkapitolách budou uvedeny dvě názorné možnosti řešení.

#### 7.1.3.1. SVĚŘÁK

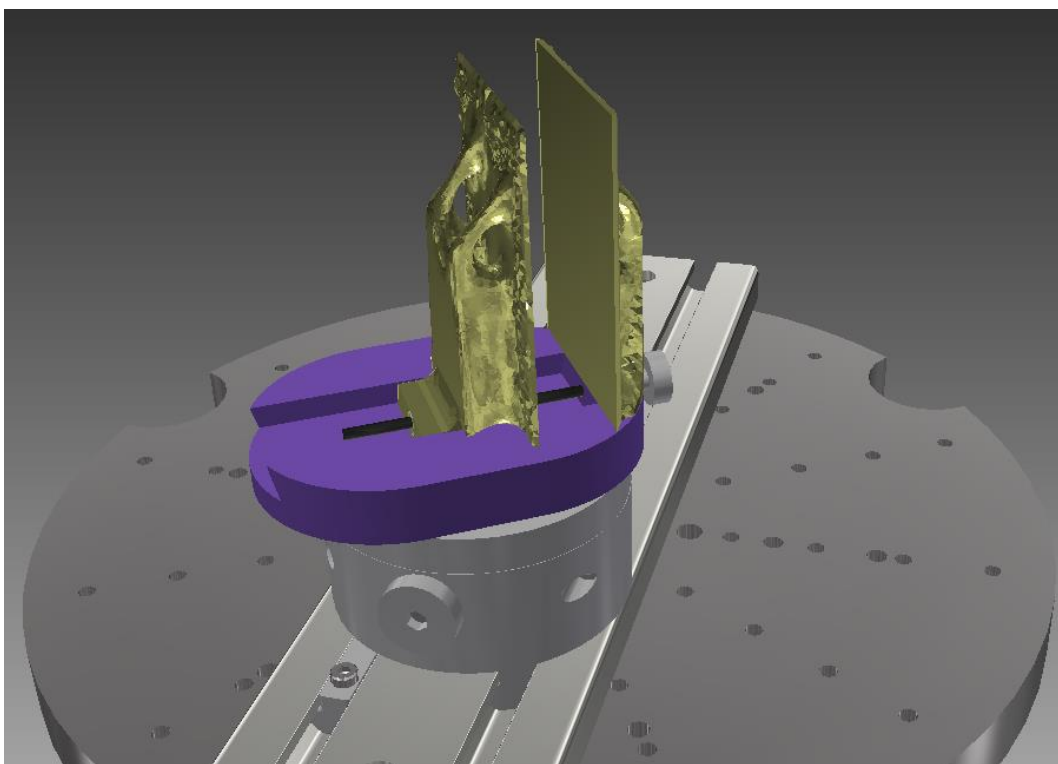
Upínač pro rozměrnější a těžší součásti s dvěma čelistmi, kde jedna čelist je pevná a druhá posuvná, posuv je realizován pomocí závitové tyče a matice. Čelisti jsou koncipovány jako výměnné z důvodu vyšší univerzality. Při návrhu bylo využito metody topologické optimalizace<sup>2</sup> konstrukce čelistí, a to z důvodu

---

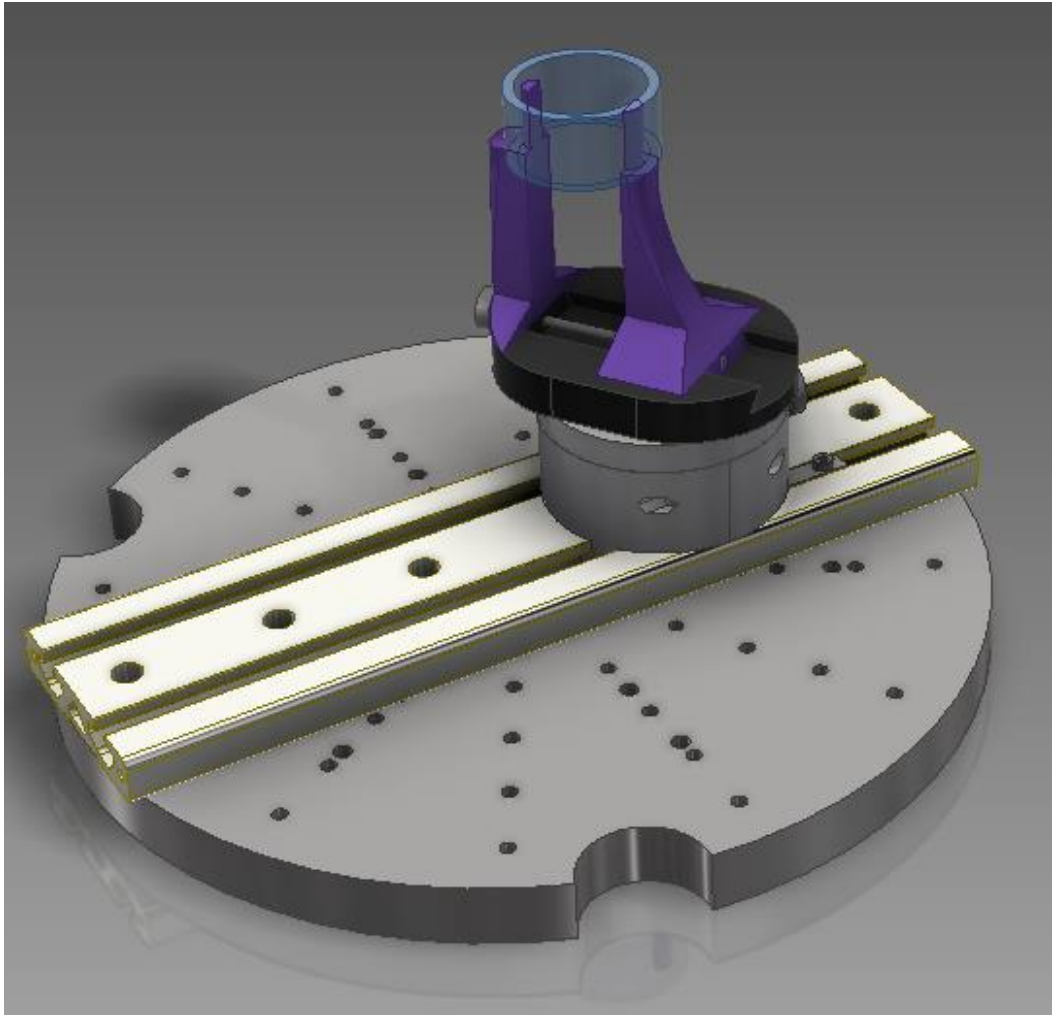
<sup>2</sup> Topologická optimalizace je metoda používající se pro návrh co nejvhodnějšího tvaru tělesa při zadaných okrajových podmínkách. Díky topologické optimalizaci je možno navrhovat tvary výrobků s citelnou úsporou objemu, resp. hmotnosti se zachováním požadovaných mechanických vlastností. Nejsnazším a nejvhodnějším typem výroby pro topologicky optimalizovaných součástí je vzhledem k organickým tvarům výsledku aditivní výroba.

minimalizace objemu použitého materiálu při zachování dostatečné tuhosti součásti a zároveň minimalizace potenciálního pohlcení rentgenového záření. Styková plocha čelistí je dimenzována pro sevření součástek tlakem odpovídajícím hodnotě 1,5kPa. Pro topologickou optimalizaci byl použit doplněk softwaru Autodesk Inventor.

Druhá možnost použití svěráku je pro upnutí součásti za její vnitřní průměr (v případě např. mezikruží, přírub, ložisek) nebo dutinu. Toto použití ilustruje obrázek č. 12.



*Obrázek 11 - 3D model svěráku s topologicky optimalizovanými čelistmi*

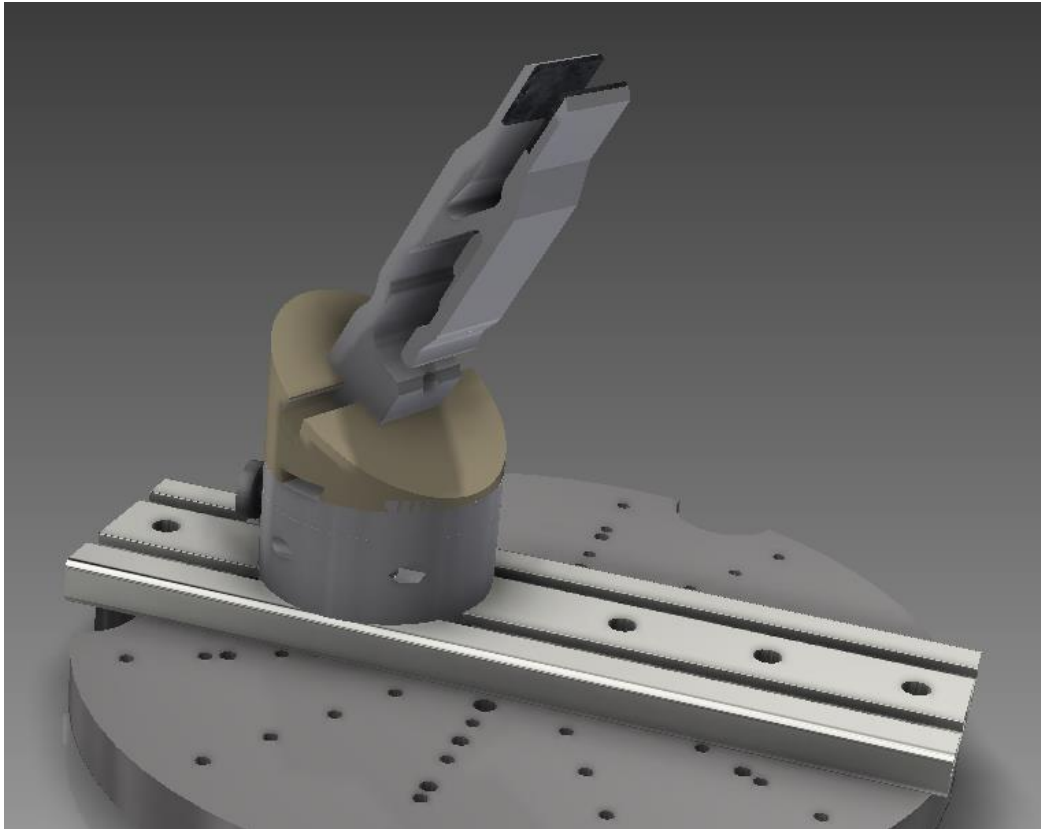


Obrázek 12 - Upínání součástek za vnitřní průměr nebo dutiny.

#### 7.1.3.2. SVORKA

Pro upnutí drobnějších součástek slouží monolitní svorka, ta se připevňuje ve vertikální poloze přímo na otočnou platformu, nebo pod úhlem pomocí speciálních mezikusů s předem definovaným sklonem. Upevnění měřené součástky je realizováno pomocí vlastní pružnosti svorky. Její čelisti jsou pro lepší fixaci předmětu opatřeny tenkou vrstvou molitanu nebo pěnové pásy. Svorku je možno vytisknout v různé procentuální velikosti dle rozměrů měřené součástky.



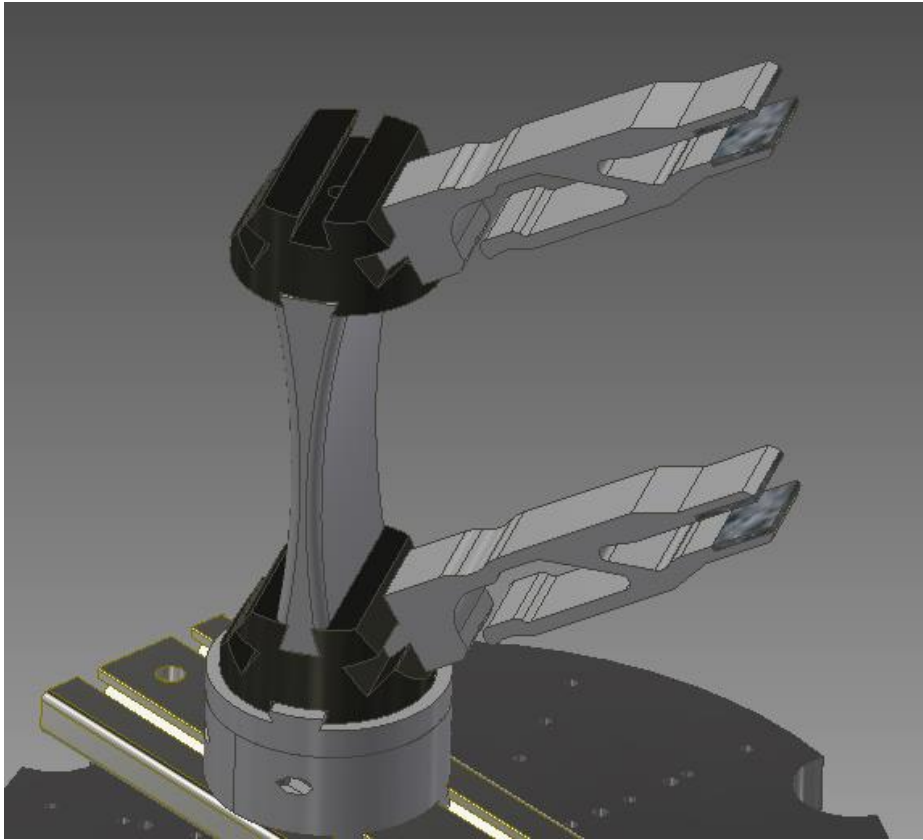


Obrázek 13 - 3D model monolitní svorky

#### 7.1.4. PŘÍSLUŠENSTVÍ

##### **ÚHLOVÉ MEZIKUSY**

Plní spojovací funkci mezi otočnou platformou a upínacími nástavci. Jsou vyrobené s předem definovanými úhly náklonu (15°, 30°, 45°, 60°, 90° a 180°) vůči vodorovné rovině. Vrstvením mezikusů na sebe ve vertikálním směru lze snadno vytvořit několikpatrová základna pro měření více součástek najednou.



Obrázek 14 - příklad použití úhlových mezikusů a spojky pro měření více kusů najednou

## SPOJKY

Spojky jsou konstruovány jako lišty opatřené vnějšími rybinovými drážkami, umožňují připojování příslušenství k mezikusům, nebo přímo kombinované připojování mezikusů.

## VÝMĚNNÉ ČELISTI

Výměnné čelisti pro použití na svěráku, jsou navrženy v různých velikostech odsazení, šířkách a výškách pro pokrytí co největší možné rozměrové a tvarové škály měřených předmětů.

## 7.2. VÝROBA

V této podkapitole je popsán samotný proces výroby upínacího systému včetně přípravy dat pro tisk a postprocessingu vytisknutých komponent.

### 7.2.1. PŘÍPRAVA PODKLADŮ PRO TISK

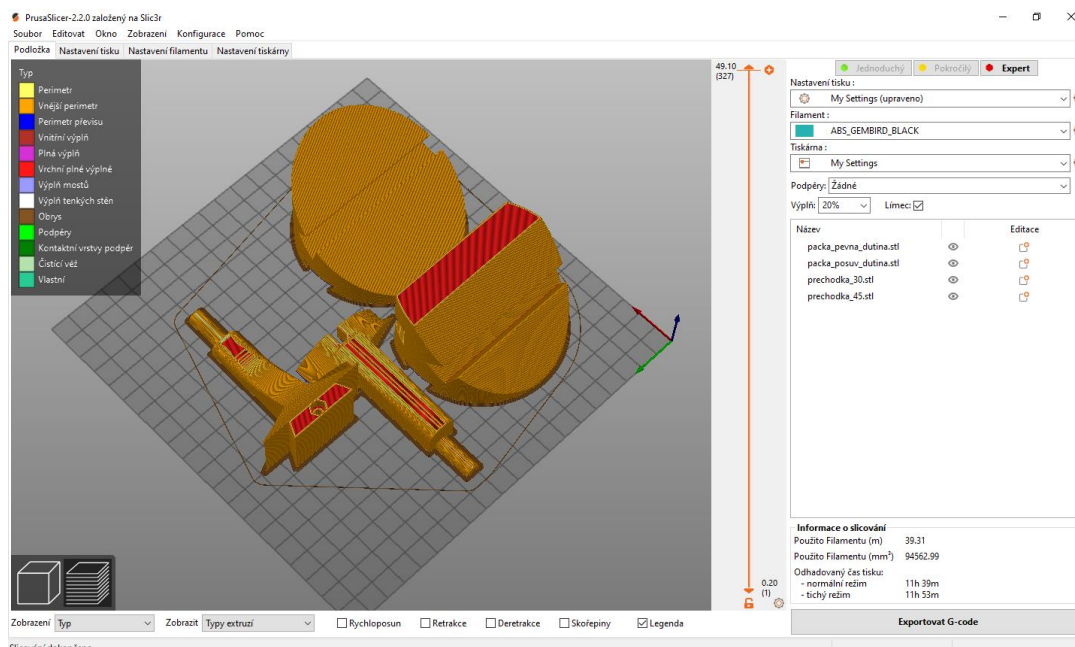
Jedním z nejdůležitějších, ne-li vůbec nejdůležitějším krokem při použití metody 3D tisku je příprava podkladů pro tisk a nastavení tiskárny. Z CAD modelu je nutno vyexportovat jednotlivé součásti, nejčastěji ve formátu .stl<sup>3</sup>, se kterým se pak dále pracuje v softwaru pro přípravu dat pro samotný tisk.

### 7.2.2. PRUSA SLICER / REPRAP I3

V softwaru Prusa Slicer byly připraveny podklady pro tisk na tiskárně typu Prusa i3. Jednalo se zejména o tisk prvotních návrhů některých dílů pro ověření funkčnosti, dále pak tisk všech konstrukčních prvků, kromě čelistí svěráku a svorek. Tyto díly jsou vytištěny z materiálů ABS a PLA, z důvodu snadného tisku, dostupnosti materiálů a tiskárny, ke které má autor práce nepřetržitý přístup. Zmíněný SW je univerzální a lze s jeho pomocí připravovat data pro většinu tiskáren, ať už dostupných běžně na trhu, tak i doma sestavených. Je to dáno možností nastavit si libovolný parametr tisku (od velikosti tiskové plochy, po velikost a rychlost retrakcí materiálu) dle vlastních potřeb. Dokonalé ovládnutí programu vyžaduje notnou dávku praxe. Tisk prototypu proběhl s důrazem na rychlost a úsporu materiálu, pro případné opravy a úpravy konstrukce. Největší nevýhodou tisku na této tiskárně je tisk pouze jednoho typu materiálu, což občas komplikuje odstraňování podpor při nutnosti tisku pod malými úhly či přemostěními vůči horizontální rovině.

---

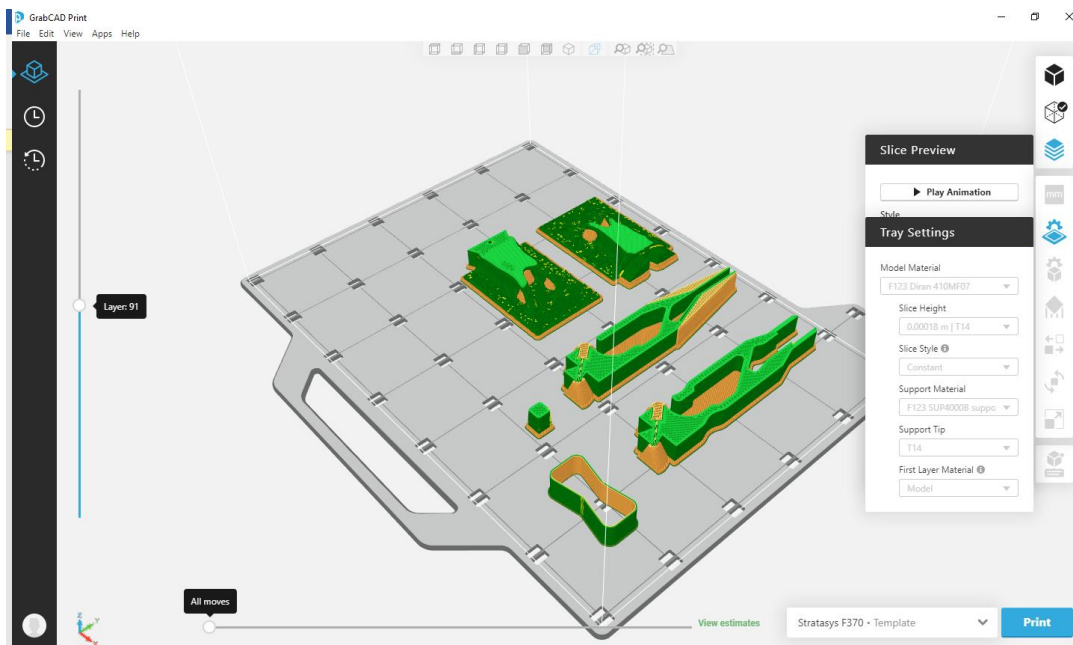
<sup>3</sup> STL, zkratka ze stereolitografie, je nativní formát souboru CAD softwaru společnosti 3D Systems. Formát STL je podporován mnoha programy pro aditivní výrobu a popisuje povrch součásti převedený na síť tvořenou velkým množstvím polygonů, resp. trojúhelníků.



Obrázek 15- Uživatelské prostředí softwaru Prusa Slicer

### 7.2.3. GRABCAD PRINT / STRATASYS F370

GrabCAD Print posloužil k přípravě dat pro tisk čelistí svěráku a svorek, tedy součástí, na kterých se bude testovat vhodnost materiálů a jejich následný výběr, pro budoucí použití při výrobě upínacích prvků. Tento SW je přímo určen tiskárnám firmy Stratasys, tedy i pro námi použitou tiskárnu F370. Program Grabcad Print je uživatelsky velice přívětivý a pro obsluhu jednoduchý. To je dáno i faktem, že je přímo ušitý na míru zmíněné tiskárně a nabízí oproti např. Prusa Sliceru minimum nastavitelných parametrů. Hlavními parametry, které se v programu nastavují jsou: druh materiálu (v našem případě ASA a PC-ABS), výška vrstvy a rozmístění tištěných předmětů na tiskovou plochu. V porovnání s jednoduššími tiskárnami typu Prusa má Stratasys F370 poněkud odlišnou strategii tisku. Konkrétně to, že tištěný objekt se netiskne ve většině případů přímo na podložku, ale vrstvu podpůrného materiálu, ze kterého jsou tvořeny i případné podpory převisů (v tomto případě např. tisk topologicky optimalizovaných čelistí svěráku). Podpurný materiál se po dokončení tisku odstraní mechanicky nebo rozpuštěním pomocí hydroxidu sodného. Díky tomu je dosahováno vyšších kvalit tisku, zejména vnějšího povrchu součástek.



Obrázek 16 - Uživatelské prostředí softwaru GrabCAD Print

#### 7.2.4. POSTPROCESSING

Postprocessing, neboli dodatečná úprava je u některých výtisků nevyhnutelná. Ať už z důvodů estetických (např. stržení hran jemné dobroušení nebo protažení děr a otvorů), tak z ryze funkční stránky. Vybrané vytištěné komponenty je nutno pro použití mírně upravit. Především jde o odstranění podpor u součástí s převisem, těch je ovšem díky tvaru předem navrhovaným pro 3D tisk naprosté minimum. Dále se jedná o nalisování posuvových matic do čelistí svěráku, nalisování mosazných vložek s vnitřním závitem do všech komponent pojišťovaných proti posuvu stavěcími šrouby.



Obrázek 17 - hotový prototyp modulárního upínacího systému + některého příslušenství

## 8. TESTOVÁNÍ V PRAXI

V první části této kapitoly je popsán test a výsledný výběr materiálů pro výrobu kontaktní plochy upínačů. Druhá část se zabývá testováním a výběrem vhodného materiálu pro komponenty upínačů vyrobené metodou 3D tisku. Pro vizualizaci a porovnání naměřených dat z různých vzorků byl použit software VG STUDIO MAX.

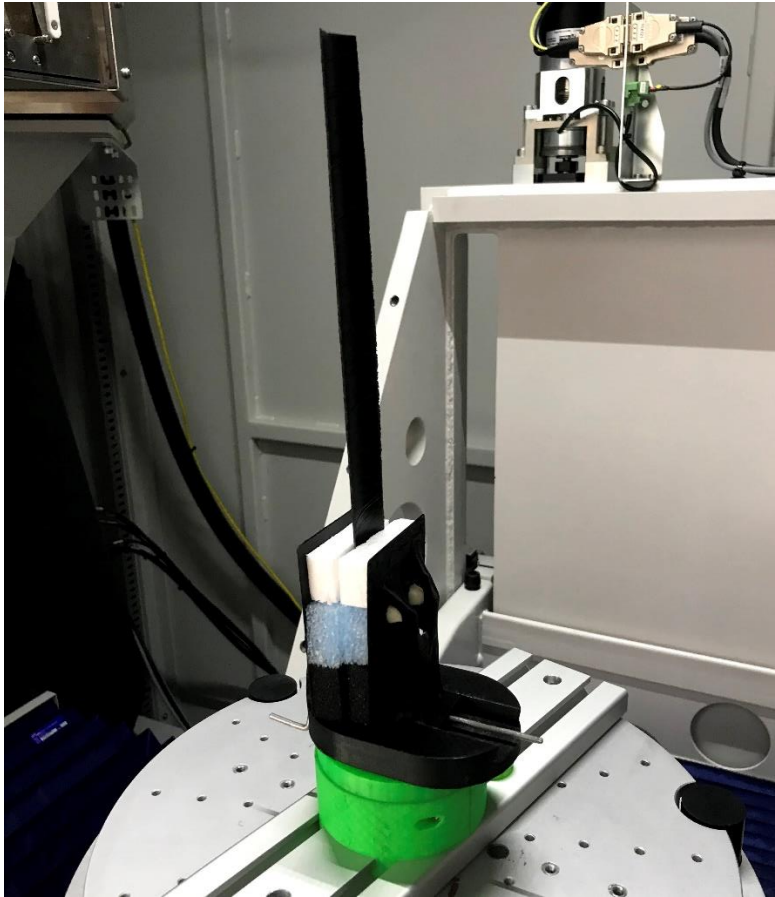
### 8.1. MATERIÁL PRO VÝROBU KONTAKTNÍ PLOCHY

Pro test materiálu na výrobu kontaktní plochy byly vybrány tyto 3 materiály: molitan, polyethylenová pěna a pěnový polystyren, viz foto. Z těchto materiálů

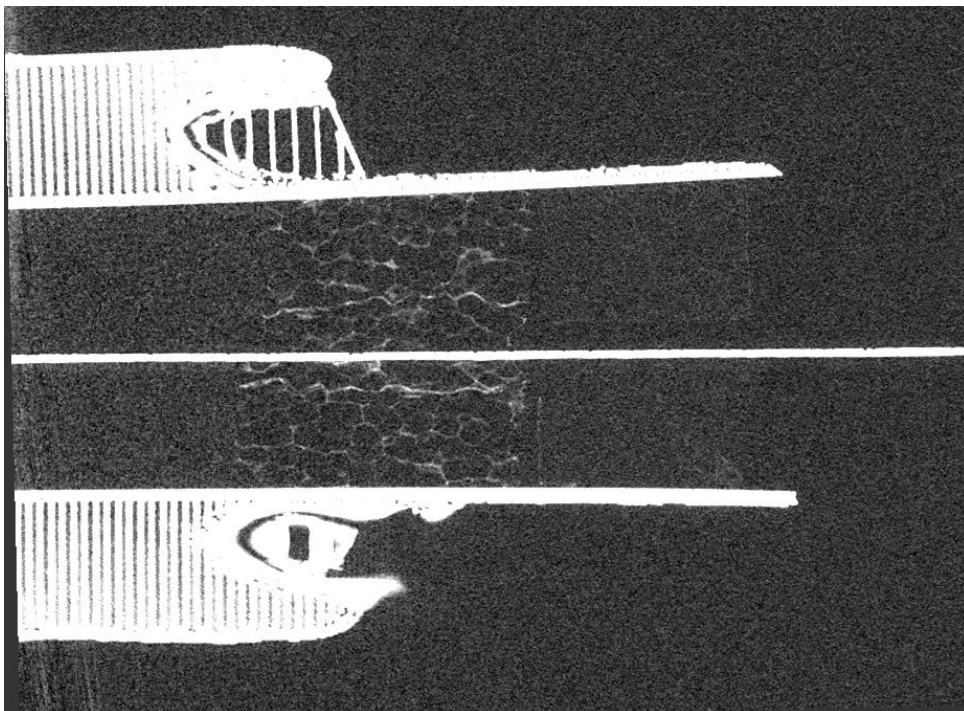
byly zhotoveny vzorky o takové velikosti, aby je bylo možno upevnit naráz vedle sebe na plochu čelistí svěráku. Tato konfigurace umožnila naskenování vzorku, následné porovnání a efektivní vyhodnocení dat z jednoho měření. Čelisti pro tento test byly zhotoveny z materiálu ASA a měřeným vzorkem byla uhlíková pásnice. Díky této konfiguraci bylo relativně snadné vyhodnocení. Na snímcích níže je zřejmé, že nejvhodnějším materiálem je pěnový polystyren, který do snímku vnáší nejméně rušivých vlivů, o něco málo hůře dopadl molitan, polyethylenová pěna do snímku vnáší nejvíce šumu díky vyšší hustotě materiálu mezi jednotlivými vzduchovými kapsami. Pěnový polystyren bude tedy použit pro finální verzi upínacího systému.



*Obrázek 18 - testované materiály pro zhotovení kontaktní plochy (zleva: pěnový polyethylen, pěnový polystyren, molitan)*

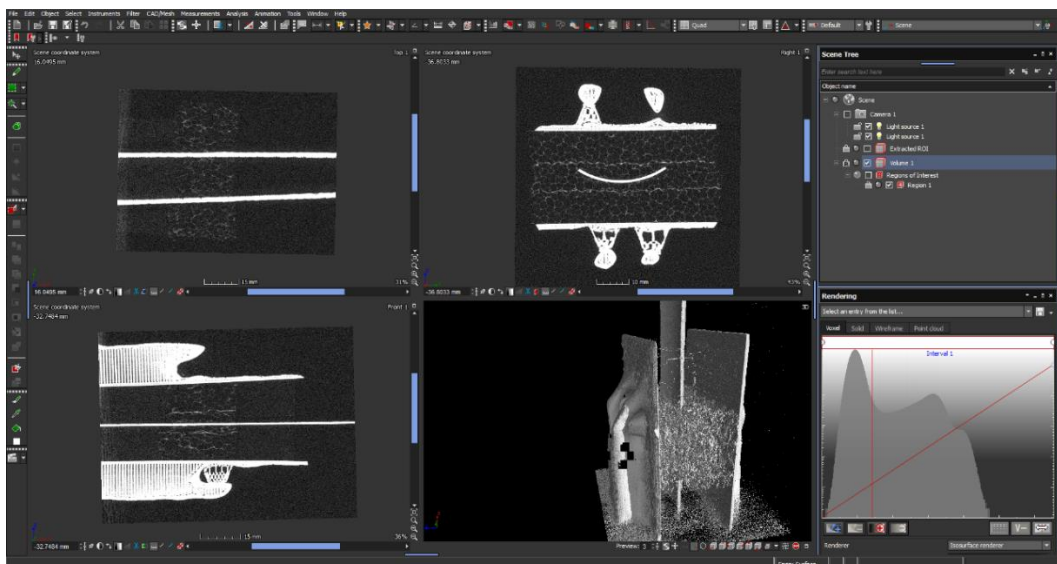


Obrázek 19 - Upínací systém s mezi vzorky materiálu pro kontaktní plochu s upnutým testovacím artefaktem.



Obrázek 20 - Snímek pro porovnání vhodnosti materiálů kontaktní plochy (vlevo molitan, uprostřed polyethylenová pěna a pěnový polystyren vpravo).

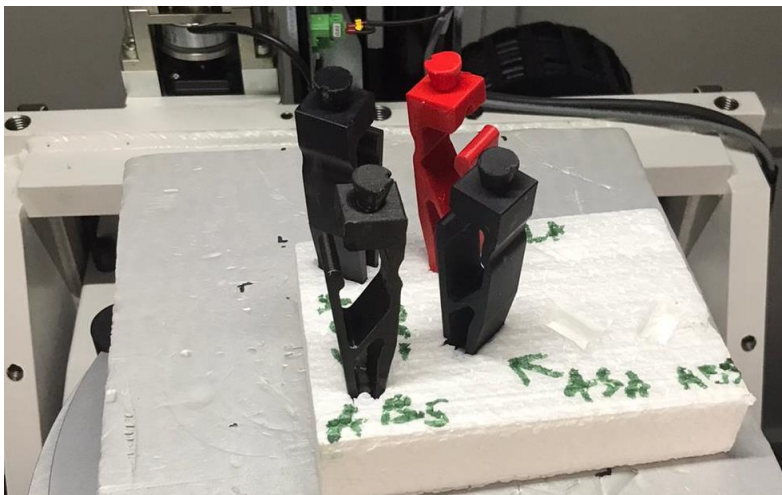




Obrázek 21 - Printscreens vyhodnocení naměřených dat pomocí softwaru VG STUDIO MAX (v jednotlivých oknech na levé straně jsou jasně patrné rozdíly mezi materiály kontaktní plochy, v prostředním okně spodní řady je 3D obraz s vypnutým filtrem šumu).

## 8.2. MATERIÁLY PRO VÝROBU KONSTRUKCE UPÍNAČŮ

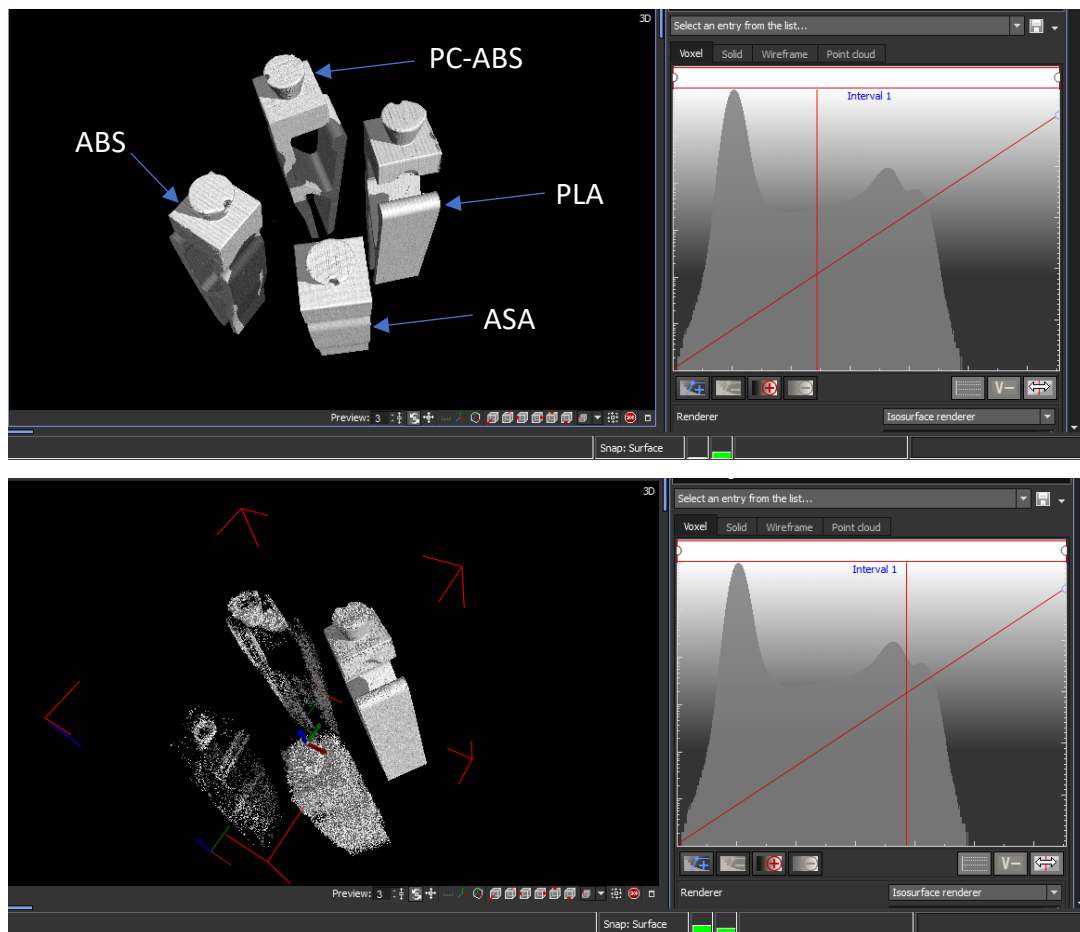
Po výběru nejlepšího materiálu pro zhotovení kontaktní plochy, tj. pěnového polystyrenu pokračoval test a analýza nejvhodnějšího materiálu pro zhotovení samotné konstrukce upínačů. Testování probíhalo ve 2 fázích. V první fázi došlo k porovnání CT skenu 4 tvarově totožných vzorků (monolitní svorka) zhotovených z různých materiálů. Ve druhé části byla testována odolnost vzorků vůči opotřebení, způsobenému upínáním. Byly testovány a porovnány upínače z materiálů ABS, ASA, PLA a PC-ABS.



Obrázek 22 - testovací svorky z různých materiálů připravené pro měření v CT

### 8.2.1. CT TEST

Pomocí tomografu bylo provedeno měření pro vyhodnocení nejvhodnějšího materiálu z hlediska pohlcení, resp. „propustnosti“ CT paprsků. Měření bylo provedeno na 4 tvarově totožných svorkách, které byly pro korektnost vytištěny se stejnými parametry (procento výplně, perimetry). Tyto 4 svorky byly vsazeny do polystyrenového bloku (viz obrázek výše) a oskenovány najednou, pro co nejjednodušší analýzu. Pro vyhodnocení dat byl opět použit SW VG STUDIO MAX. Jako nejsnáze softwarem odfiltrovatelné se jeví svorky z ABS a PC-ABS, nejhůře dopadlo PLA. Tento výsledek koresponduje s teorií, viz hustoty v tabulce potenciálně použitelných materiálů.



Obrázek 23 - Printscreeny vyhodnocení nejvhodnějšího materiálu pro výrobu samotných upínačů. Patrné rozdíly mezi ABS (vlevo) a PLA (vpravo).

### 8.2.2. TEST ODOLNOSTI

Test odolnosti svorky, respektive jejího pružného členu, který zajišťuje sevření čelistí byl proveden tak, že se každá svorka zafixovala pomocí malé truhlářské svorky v otevřené poloze po dobu tří hodin. Poté byla z polohy maximálního rozevření uvolněna a byla změřena velikost mezery mezi čelistmi v neutrálním (uzavřeném) stavu. Čím je větší odchylka před a po působení zatížení, tím je materiál méně vhodný pro použití ve finálním produktu z důvodu menší trvanlivosti.

Materiál	$\Delta$ rozevření [mm] (180 min.)
ABS	0,8
PC-ABS	3,2
PLA	2,9
ASA	3,5

Tabulka 3 - porovnání velikosti deformace jednotlivých materiálů

Z tabulky je patrné, že největší trvanlivost, tedy odolnost vůči plastické deformaci, vykazuje vzorek z ABS, odolnost zbylých 3 materiálů je až třikrát horší.

## 9. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A VÝBĚR NEJLEPŠÍHO ŘEŠENÍ

Z výsledků obou testů je zřejmé, že nejvhodnějším materiálem pro výrobu upínačů pro výsledný produkt je ABS. To vykazovalo největší odolnost a trvanlivost vůči opotřebení. Zároveň má díky nejnižší hustotě z testovaných materiálů nejmenší vliv na měřenou součást z hlediska pohlcení záření, tudíž měření za pomoci upínačů z ABS by mělo být nejpřesnější. Pomyslným bonusem je cenová dostupnost materiálu a možnost tisku na jednodušších stolních tiskárnách.

## 10. UŽIVATELSKÝ MANUÁL

Na následujících řádcích je bodově shrnut manuál pro správné použití upínacího systému v praxi.

- Na otočný stůl tomografu pomocí alespoň 2 šroubů připevníme hliníkový profil sloužící jako lineární vedení.
- Na hliníkový profil nasuneme jednu nebo více upínacích platform, na jejíž rybinovou drážku vsuneme typ upínače dle tvaru, velikosti a hmotnosti měřené součástky.

Volitelně lze mezi upínač a platformu umístit úhlový mezikus či nástavce pro zvýšení efektivity.

- Ujistíme se, že není poškozena kontaktní plocha (pěnový polystyren) upínacích čelistí, v případě potřeby nalepíme pomocí oboustranné pásky novou.
- Do upínače (svorky/svěráku) upneme měřený předmět.
  - Svěrák – měřený předmět umístíme mezi čelisti a pomocí klíčky šetrně sevřeme.
  - Svorka – rozevřeme svorku pomocí stisknutí volných konců s ergonomickými plochami, vložíme mezi čelisti měřený předmět, uvolníme stisknuté konce. Postup podobný jako při použití klasického kolíčku na prádlo.
- Pomocí centrovacího zařízení napolohujeme měřenou součást zafixovanou v upínacím zařízení do středu stolu.
- Upínač zafixujeme vůči platformě a nástavcům pomocí inbusového šroubu, který je nedílnou součástí každého prvku i upínacího systému.
- Stůl, respektive celou sestavu stůl - upínač - měřený předmět umístíme do pracovního prostoru stroje.
- Nyní je možno provést měření na CT.
- Po ukončení měření vyjmeme sestavu ze stroje.

- Měřené součástky se z upínače vyjmou způsobem přesně opačným způsobu upnutí.
  - Svěrák – pomocí kličky povolíme sevření čelistí, vyjmeme měřený předmět
  - Svorka – stiskneme volné konce, vyjmeme z čelistí měřený předmět

V případě jakéhokoliv poškození či opotřebení, které by znemožňovalo dostatečně pevné upnutí, snížený rozsah nebo podobné nežádoucí jevy, a to zejména u monolitních svorek, které jsou díky své jednoduché konstrukci nenáročné na výrobu a užívání, avšak ne tolik odolné vůči cyklickému namáhání, je nutno danou součást vyměnit za novou.

## 11. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení čtenáře s problematikou upínání měřených objektů na průmyslových tomografech, dále s návrhem, výrobou a otestováním vlastního řešení upínacího systému vyrobeného s použitím metody 3D tisku, který bude eliminovat nevýhody současných upínacích systémů a přinese nová praktická vylepšení práce při manipulaci s objektem, vlastním měřením a jeho vyhodnocením.

Úvodní část práce obsahuje seznámení čtenáře s principy a použitím průmyslových tomografů. Následuje nastínění problematiky upínání na CT a stručné zhodnocení momentálně na trhu dostupných a používaných řešení.

Hlavní část práce je věnována 3D tisku. Počínaje základními informacemi o této metodě, pokračujíc přes výběr potenciálně použitelných materiálů a konče samotnými návrhy CAD modelů. Na tuto část plynule navazuje výroba jednotlivých součástek a jejich testování, zda jsou vhodné z pohledu životnosti a nejsou příliš velkou překážkou pro CT paprsky.

Finále obsahuje porovnání a výběr nejvhodnějších materiálů pro výsledný produkt a stručný uživatelský manuál.

Ze získaných dat je zřejmé, že nejvhodnějším materiálem pro výrobu upínacího systému, minimálně tedy samotných upínačů je nejvhodnějším materiálem ABS, který vykázal největší odolnost a zároveň, vzhledem k jeho hustotě, nejmenší schopnost pohlcovat záření. Pro nosné části a ostatní konstrukční prvky se vzhledem k velmi snadnému tisku a uspokojivé odolnosti hodí materiál PLA, ze kterého jsou vyrobeny i části prototypu.

Největší výhodou navrženého systému je jeho snadná výroba na jakémkoliv 3D tiskárně, snadné použití a možnost návrhu a modifikace jednotlivých upínačů či prvků konstrukce dle libosti uživatele. To vše oproti konkurenčním řešení za zlomkovou cenu.

## BIBLIOGRAFIE

1. Li, & Zhang. ResearchGate. *Hydration Mechanism and Hardening Property of  $\alpha$ -Hemihydrate Phosphogypsum*. [Online] 2019. [https://www.researchgate.net/publication/337619553\\_Hydration\\_Mechanism\\_and\\_Hardening\\_Property\\_of\\_a-Hemihydrate\\_Phosphogypsum/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/337619553_Hydration_Mechanism_and_Hardening_Property_of_a-Hemihydrate_Phosphogypsum/citation/download). Minerals. 9. 733. 10.3390/min9120733..
2. CAD. *Počítačová tomografie pro přesné měření, defektoskopii i reverzní inženýrství*. [Online] <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2114-pocitacova-tomografie-pro-presne-mereni-defektoskopii-i-reverzni-inzenyrstvi.html>.
3. 11 *MM Průmyslové spektrum*. 181119 Vyšlo v MM : 2018 / 11, 14.11.2018 v rubrice Inovace / Měření, Strana 82.
4. CHRISTOPH, Ralf a Hans J. NEUMANN. *Rentgenová tomografie v průmyslové*. Uherský Brod : PRIMA Bilavčík, 2011.
5. ZEISS. [www.ZEISS.cz](http://www.ZEISS.cz). [Online] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/computed-tomography/metrotom.html>.
6. ZEISS. *Easy clamping – even for the most complex workpieces*. [Online] <https://www.zeiss.com/metrology/products/accessories/machine-accessories/clamping-devices.html>.
7. na3d.cz. *Přehled dostupných materiálů*. [Online] <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>.
8. Stratasys.com. *PC-ABS*. [Online] <https://www.stratasys.com/materials/search/pc-abs>.
9. Stratasys.com. *Diran 410MF07*. [Online] <https://www.stratasys.com/materials/search/diran-410mf07>.

10. 3D engineering solutions. *Utilizing 3D Printed Fixtures in Industrial CT Scanning*. [Online] <https://www.3d-engineering.net/utilizing-3d-printed-fixtures-in-industrial-ct-scanning/>.
11. Haven Metrology. *Low Density Fixtures for Industrial X-Ray & CT Scanning*. [Online] <http://www.havenmetrology.com/industrial-ct-fixtures/>.
12. prusa3d. *Průvodce materiály*. [Online] <https://www.prusa3d.cz/materialy/>.
13. plot-it.co.uk. *Stratasys F370 3D Printer*. [Online] [https://www.plot-it.co.uk/p/stratays\\_f370\\_3d\\_printer#product-images-1](https://www.plot-it.co.uk/p/stratays_f370_3d_printer#product-images-1).
14. ZEISS. *TomoStage, 6 levels*. [Online] [https://shop.metrology.zeiss.com/INTERSHOP/web/WFS/IMT-US-Site/en\\_US/-/USD/ViewProduct-Start?SKU=626140-9400-001&CategoryName=430300&CatalogID=400000](https://shop.metrology.zeiss.com/INTERSHOP/web/WFS/IMT-US-Site/en_US/-/USD/ViewProduct-Start?SKU=626140-9400-001&CategoryName=430300&CatalogID=400000).
15. RepRap. *Welcome to RepRap.org*. [Online] <https://reprap.org/wiki/RepRap>.
16. dk-fixiersysteme.de. *Modular fixating system for computed tomography*. [Online] <https://www.dk-fixiersysteme.de/computertomographie/?lang=en>.