



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Problematika uměleckých odlitků plastik,
včetně řešení životnosti s ohledem na okolní
prostředí

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Richard Klika

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klika** Jméno: **Richard** Osobní číslo: **493575**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Problematika uměleckých odlitků plastik, včetně řešení životnosti s ohledem na okolní prostředí

Název bakalářské práce anglicky:

Problematic of artistic plastic castings, including the solution of lifetime with regard to the surrounding environment

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky výroby uměleckých odlitků
2. Materiálové možnosti pro výrobu uměleckých odlitků
3. Návrh uměleckého odlitku a jeho technologičnost
4. Návrh a realizace výroby uměleckého odlitku

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **27.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem lidem, kteří se na projektu podíleli a vedoucímu práce doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za vedení práce.

Anotace

Název diplomové práce:	Problematika uměleckých odlitků plastik, včetně řešení životnosti s ohledem na okolní prostředí
Autor práce:	Richard Klíka
Vedoucí práce:	doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
Konzultant:	doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	64 stránek, 58 obrázků
Klíčová slova:	umělecký odlitek, technologický postup uměleckého odlitku, materiály uměleckých odlitků, odlitek busty, hliníkový umělecký odlitek

Annotation

Title of the final thesis: The issue of artistic plastic castings, including the solution of lifetime with regard to the surrounding environment

Author: Richard Klika

Supervisor: doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Consultant: doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Academic year: 2022/2023

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

Extent: 64 pages, 58 pictures

Keywords: art casting, technological process of art casting, materials of art castings, bust casting, aluminum art casting

Obsah

1	ÚVOD A CÍL PRÁCE	12
1.1	Cíl práce.....	12
2	ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝROBY UMĚLECKÝCH ODLITKŮ	13
2.1	Umělecké odlitky	13
2.2	Historie.....	13
3	MATERIÁLOVÉ MOŽNOSTI PRO VÝROBU UMĚLECKÝCH ODLITKŮ	15
3.1	Bronz	15
3.1.1	Cínový bronz	15
3.1.2	Tvářený cínový bronz.....	16
3.1.3	Hliníkový bronz	16
3.1.4	Manganový bronz.....	16
3.1.5	Olověný bronz.....	16
3.1.6	Zvonovina	16
3.2	Mosaz.....	17
3.3	Hliník	17
3.4	Litina.....	18
4	NÁVRH UMĚLECKÉHO ODLITKU A JEHO TECHNOLOGIČNOST	19
4.1	Zhotovení modelu a jeho postup.....	19
4.2	Technologický postup	19
4.3	3D scanner a skenování	20
4.4	Grafické a CAD programy na úpravu modelu	21
4.5	3D tisk modelu	22
4.5.1	3D tiskárna.....	22
4.5.2	Program pro 3D tisk.....	23

4.5.3	Materiály pro 3D tisk	23
4.5.4	Začištění a broušení modelu.....	24
4.6	Odlévání odlitku a jeho metoda	24
4.6.1	Metoda gravitačního lití do pískové formy	25
4.6.2	Metoda ztraceného modelu	26
4.6.3	Příprava a výroba rámu pro formu	27
4.6.4	Uchycení a příprava modelu do rámu	27
4.6.5	Výroba formy pomocí sádry	27
4.6.6	Vytavení modelu a předeřtí formy	28
4.6.7	Lití do formy.....	28
4.6.8	Pec	29
4.7	Začištění a broušení	29
4.7.1	Brusky	30
4.7.2	Tryskání.....	31
4.8	Práškové lakování	32
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
5.1	Návrh a realizace výroby uměleckého odlitku	34
5.1.1	3D skenování	34
5.1.2	Úprava 3D modelu v programu Blender	37
5.1.3	3D tisk modelu	38
5.1.4	Začištění a broušení modelu po 3D tisku	41
5.1.5	Příprava a výroba rámu pro formu	42
5.1.6	Uchycení a příprava modelu do rámu	43
5.1.7	Výroba formy pomocí sádry	43
5.1.8	Vytavení modelu a předeřtí formy	45
5.1.9	Odlití do formy.....	47

5.1.10	Začištění a broušení.....	48
5.1.11	Tryskání.....	51
5.1.12	Moření	51
5.1.13	Práškové lakování	52
5.1.14	Vyhodnocení kvality výrobku	53
6	ZÁVĚR	56
7	Bibliografie	57
8	Seznam obrázků	61
9	Přílohy.....	64

Seznam zkratk

3D trojrozměrný, 3 dimenze

tzv. takzvaný

CAD Computer aided design, počítačem podporované programování

STL Standard Triangle Language, nativní formát 3D souboru vhodný pro další úpravy

OBJ object, jednoduchý datový formát 3D souboru

Seznam použité symboliky

[mm]	milimetr
[cm]	centimetr
[°C]	stupeň Celsia

1 ÚVOD A CÍL PRÁCE

Jako cíl této bakalářské práce, je zhotovení konkrétního uměleckého odlitku navržení jeho technologického postupu. Pro praktickou práci byla konkrétně zvolena výroba umělecké busty. Jeden z častých typů uměleckých odlitků je busta, což lze charakterizovat jako ztvárnění hlavy, ramen a části hrudníku konkrétní postavy či pouze jenom hlavy. Busty mohou být umělecké či realistické. Do kategorie uměleckých bust lze zařadit všechny kreativní ztvárnění realistické či nerealistické postavy, neodpovídající skutečnosti, obohacené o různé nepřirozené umělecké prvky. Realistické busty se snaží naopak zachytit co nejpřesnější podobu konkrétní osoby. Takové busty mohou být v životní velikosti, či zmenšené nebo zmenšené v určitém měřítku.

Umělecké odlitky bust se běžně odlévají z různých materiálů. Jeden z nejtradičnějších používaných materiálů na odlitek bust, soch, či jiných uměleckých odlitků je bronz. Jelikož bronz je poměrně dražší materiál a umělecké odlitky, jako busty nebo sochy jsou velmi často následně určeny pro venkovní prostory, může docházet ke krádežím kvůli velkému množství materiálu, který lze následně snadno zpeněžit. Ohledně venkovních povětrnostních podmínek je bronz jako materiál ideální, další důvod používání je kvůli jeho pěknému vzhledu a barvě vhodné na umělecká díla.

1.1 Cíl práce

Hlavní myšlenka a cíl této práce je tedy zhotovit uměleckou bustu vzhledově připomínající bronzový umělecký odlitek, avšak za použití levnějšího materiálu. Jako materiál pro odlitek jsme zvolili hliník, jelikož je to relativně levný materiál, vhodný pro odlévání odlitků s vyhovujícími vlastnostmi, s ideálním použitím do venkovních prostor s dobrou odolností vůči vnějším meteorologickým vlivům.

K dosažení vzhledu a barvy bronzu se bude odlitek barvit na jinou barvu, jelikož hliník má sám o sobě barvu stříbrnou. Z několika možností povrchových úprav jsme vybrali technologii práškového lakování, jelikož je tento způsob relativně snadný, levný a dostupný s dobrou dosažitelností souvislé vrstvy barvy. Tato povrchová úprava je také vhodná pro venkovní použití.

2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝROBY UMĚLECKÝCH ODLITKŮ

2.1 Umělecké odlitky

Jako umělecký odlitek lze charakterizovat každý odlitek, který neslouží k funkčnímu využití v průmyslu, ale který je vyráběn pro svůj vzhled a uměleckou hodnotu. Do toho oboru tedy lze zahrnout širokou škálu různých typů výrobků, jako jsou sochy, sošky, busty, šperky, různé odlévané reliéfy, zbraně a další dekorativní předměty.

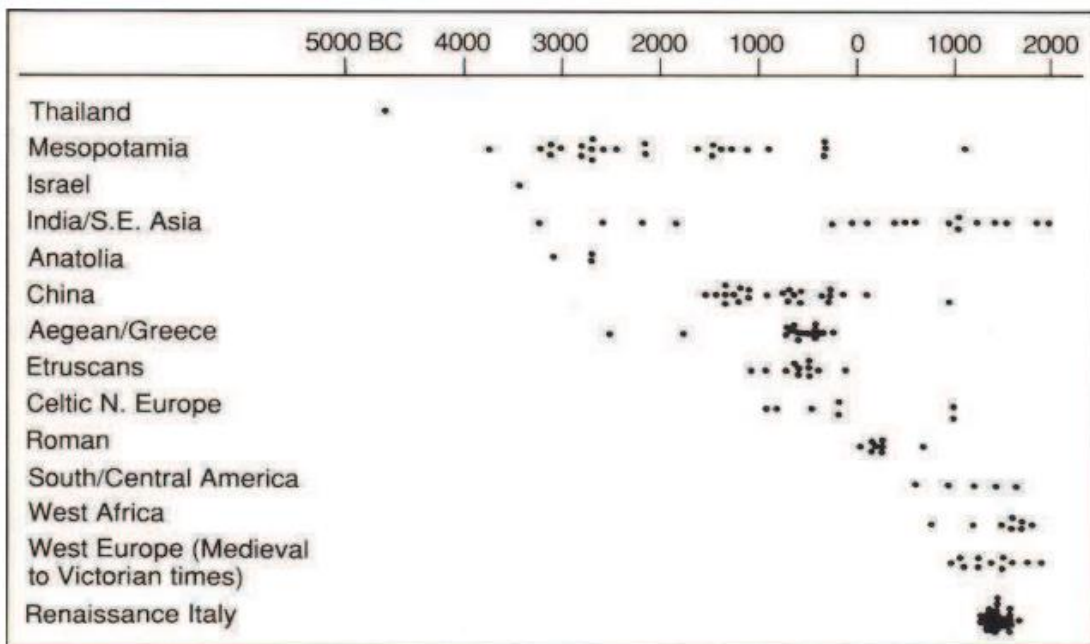
Přestože je princip odlévání stejný jako u běžného průmyslové slévání, jedná se o docela jiný obor. U klasického průmyslového slévárenství je největší důraz kladen na funkčnost, kvalitu materiálu, kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost. U uměleckého slévárenství nejsou vždy tak podstatné, u uměleckých odlitků je největší požadavek vždy na jeho vzhled. Umělecké odlitky mohou být abstraktní nebo realistické, díky tomu může být naopak žádoucí vznik vad při samotném lití, jako jsou praskliny, vzduchové bubliny, nedokonalý povrch a tak podobně.

Jelikož umělecký odlitek bývá velmi často socha či jiný umělecký předmět, který bude vystaven ve venkovních prostorách a bude zde odolávat vnějším vlivům, je třeba uvažovat vhodnou volbu materiálu nebo povrchové úpravy. Řešení volby materiálu zde nemá jen význam kvůli jeho vlastnostem, ale i kvůli jeho vzhledu a barvě, nebo například i korozním vlastnostem. Někdy se například povrch odlitku nijak neošetřuje, a jeho následná koroze je naopak žádoucí, kvůli lepšímu vzhledu. [1] [34]

2.2 Historie

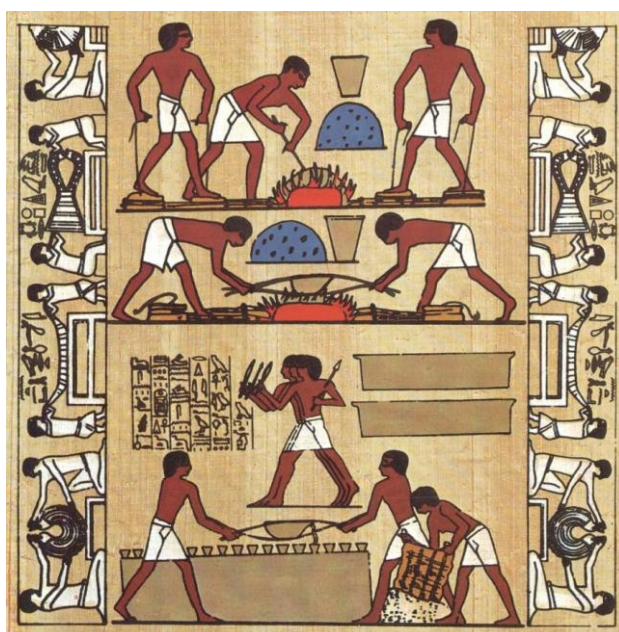
Kořeny slévárenství sahají až do pravěku, do doby kamenné, kdy si lidé vyráběli první nástroje a zbraně jako odlitek z roztaveného kovu, první nalezené předměty pochází z Asie z dob přibližně 4500 let před našim letopočtem, kdy se datují i počátky metody vytavitelného modelu, které se bude také věnovat tato práce. První principy výroby odlitku byly velmi prosté, kdy se odlévaný předmět (model), obtiskl do hlíny a následně zalil roztaveným kovem.

K prvnímu doloženému rozvoji slévárenství a uměleckého slévárenství docházelo na území Mezopotámie, téměř 4000 let před našim letopočtem. V této době se vyráběly hlavně náboženské předměty, sochy a různé šperky. Nejstarší nalezené umělecké odlitky byly vyrobeny z bronzu a nebo z mědi. [1] [24] [25] [26] [27]



Obrázek 1: Nálezy odlitků vyrobené pomocí metody vytavitelného modelu, v závislosti na čase a místě

Další rozvoj nastal v starověkých civilizacích, jako je Egypt, Řecko a Řím, kde došlo ke značnému vývoji této technologie. Během středověku došlo k úpadku rozvoje uměleckého slévárství, jelikož se slévárství přeorientovalo spíše na výrobu zbraní, začátkem 15. století se začalo rozšiřovat železo, jako slévárský materiál. Během období novověku docházelo k dalšímu rozvoji až do současnosti, kdy se postupně objevovaly nové technologie a materiály, kdy v současnosti lze vyrábět umělecké odlitky mnoha technologiemi, z mnoha různých materiálů s téměř neomezenými možnostmi. [1] [24] [25] [26] [27]



Obrázek 2: Ukázka technologie výroby odlitků v Egyptě, přibližně 1500 let před našim letopočtem

3 MATERIÁLOVÉ MOŽNOSTI PRO VÝROBU UMĚLECKÝCH ODLITKŮ

Jak bylo řečeno v úvodu této práce, u uměleckých odlitků není kolikrát důležité vlastnosti materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, jako jeho pevnost, tvrdost, houževnatost a tak dále. Důležitý může být i jeho vzhled nebo dokonce i hodnota. Jako vhodné materiály pro výrobu uměleckých odlitků lze označit bronz, zlato, stříbro, olov, cín, ocel, hliník a další různé slitiny dalších kovových materiálů. Dá se tedy říct, že umělecký odlitek lze odlít z téměř všech kovových materiálů, ne všechny jsou však vhodné. Z hlediska univerzálnosti použití, ceny materiálu, vlastností materiálů a slévateľnosti jsou nejuvhodnější materiály bronz, mosaz, litina různé slitiny. [2] [3] [28]

3.1 Bronz

Jedná se o nejstarší a stále používaný materiál na výrobu uměleckých odlitků, zejména soch a bust. Obecně lze tuto slitinu popsat jako slitina mědi a cínu, přidávají se však další materiály jako hliník, mangan, olovo, fosfor, nikl, nebo železo, kdy přidané prvky mění vlastnosti bronzu, jako pevnost, tvrdost, tvárnost, odolnost proti korozi. Podle množství přidaných prvků se bronz dále dělí na cínový bronz, manganový bronz, niklový bronz olověný bronz a tak podobně. Je to vhodný materiál pro odlévání uměleckých odlitků, s velmi pěkným vzhledem, nevýhoda je však vyšší cena. [28] [29] [30]



Obrázek 3: Ukázka bronzového odlitku sochy

3.1.1 Cínový bronz

- nejvýše obsahuje 20% cínu, součet procentuálního obsahu mědi a cínu má být nejméně 99%
- malá elektrická vodivost
- používají se ve slévářství a na výrobu ložisek

3.1.2 Tvářený cínový bronz

- nejčastěji obsahují 6-9 % cínu
- kvůli oxidaci při výrobě bronzů se přidává fosfor nebo fosforovou měď
- vhodný pro namáhané věci, jako pružiny nebo ložiska, kvůli jeho vysoké tvrdosti a odolnosti oproti opotřebení

3.1.3 Hliníkový bronz

- nejčastěji obsahuje 5% hliníku
- díky hliníku jsou tyto slitiny odolné proti kyselinám a louhům
- vyrábí se z nich kohouty, potrubí, armatury a tak dále

3.1.4 Manganový bronz

- obsahuje 12-15% manganu a 2-4% niklu
- má nízkou hodnotu teplotního součinitele odporu, díky tomu se jeho odpor při změně teploty příliš nemění
- proto je vhodný jako materiál na nejpřesnější měření odporů, využití je v různých zařízeních, jako jsou různé etalony, rezistory, elektrody, měřicí přístroje a tak dále

3.1.5 Olověný bronz

- obsahuje maximálně 38% olova
- olovo má nízký součinitel tření, díky tomu je vhodné na namáhané a třené součástky
- nejčastěji se používá jako ložiskový kov, má výborné kluzné vlastnosti
- olovo se nazývá jako tzv. samomazný materiál, to znamená, že není potřeba použití mazacího oleje

3.1.6 Zvonovina

- jedná se o speciální typ cínového bronzů, používaný hojně ve středověku. Skládá se ze 78% mědi a 22% cínu
 - vlastnosti tohoto materiálu jsou obzvláště výhodné pro výrobu zvonů a patří k nejvýhodnějším materiálům ohledně zvonařství i v současnosti
 - tento materiál je houževnatý, ale zároveň dostatečně tvrdý s dobrými zvukovými vlastnostmi
- [28] [29] [30]

3.2 Mosaz

Je to slitina mědi a zinku, díky zinku připomínající zlatou barvu. Tento materiál má široké využití v různých odvětvích, například v elektrotechnice, modelářství, zbrojním průmyslu nebo jako malé součástky ve strojním průmyslu. Stejně jako u bronzu, do mosazi se přidávají další prvky jako hliník, síra, fosfor, nikl nebo železo. Podle složení se dělí mosaz na mosaz pro odlitky nebo pro tváření za studena či za tepla. Speciální typ mosazi se nazývá tombak, který obsahuje více než 80% mědi a používá se například na výrobu nábojnic do střelných zbraní. Mosazi lze dělit dále na mosaz niklové, hliníkové a cínové, podle převažujícího přídavného prvku. [24] [28]



Obrázek 4: Ukázka mosazného odlitku sochy

3.3 Hliník

Hliník, jako materiál, je v současnosti hojně používán ve slévárenském průmyslu pro výrobu různých průmyslových odlitků. Široké využití má ve všech průmyslech, kvůli svým mechanickým vlastnostem, jako je nízká hmotnost materiálu, relativní pevnost, korozivzdornost, a tak dále. Pro odlévání lze použít čistý hliník a nebo jeho slitiny. Přídavným prvkem je nejčastěji měď, hořčík, mangan, křemík a zinek. Měď zvyšuje pevnost a tvrdost, ale snižuje tvárnost, hořčík zvyšuje vytvrditelnost, ale snižuje pevnost a odolnost proti korozi. Křemík zvyšuje pevnost a odolnost proti korozi a zinek zvyšuje také pevnost, avšak snižuje odolnost proti korozi. Nikl zvyšuje pevnost, houževnatost a odolnost proti korozi.



Obrázek 5: Ukázka hliníkového odlitku

Pro odlévání uměleckých odlitků se nepoužívá, není příliš vhodný. Má však perspektivní vlastnosti, jako je váha, cena, odolnost proti vnějším vlivům nebo další výhodné vlastnosti, proto kvůli nim může být v některých konkrétních případech použit. [8] [3] [28]

3.4 Litina

Jedná se o slitinu železa a uhlíku, případně dalších příměsí, s obsahem uhlíku nad 2,14%.

Používá se ke slévání jak průmyslových tak uměleckých odlitků. Odolává vysokým tlakům teplotám, a zároveň je málo pružná. Litina se dělí do několika skupin:

- Litina s kuličkovým grafitem (Tvárná litina) – litina velmi podobná oceli
- Litina s lupínkovým grafitem (Šedá litina) – tzv. samomazná, dobře tlumí rázy, otřesy a chvění
- Litina s vločkovým grafitem (Temperovaná litina) – houževnatá a dobře obrobitelná

Existují pak další speciální druhy litin, v šestnáctém století v uměleckém slévárenství začala konkurovat dražším používaným materiálům, začaly se z ní vyrábět umělecké odlitky velmi často používané ve stavebnictví, jako různé ozdobné mosty, reliéfy, ploty a zábradlí a mnoho dalších variant. Jedna z nejznámějších staveb zhotovená z uměleckých odlitků v České Republice je například lázeňská kolonáda v Mariánských Lázních, kdy je konstrukce celé kolonády sestavena z uměleckých odlitků odlévaných z litiny. [31] [32] [33]

-

4 NÁVRH UMĚLECKÉHO ODLITKU A JEHO TECHNOLOGIČNOST

4.1 Zhotovení modelu a jeho postup

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, cílem této práce je vyrobit konkrétní uměleckou bustu. Budeme vyrábět realistickou bustu reálné osoby. Nejčastěji se zhotovují busty významných či slavných osob, jakožto trvalé zachování a ztvárnění jejich tváře či jako památka. Jelikož ale budeme i samotný model vyrábět na základě vlastních materiálů, zvolil jsem pro demonstrativní účely jako předlohu svoji osobu, jelikož ohledně praktických účelů a následných technologických postupů je tato varianta nejsnadnější a nejjednodušší ohledně navrhování a manipulace.

Jako konkrétní praktický cíl práce tedy bude vyrobit realistickou bustu, imitující bronzový povrch. Budeme vyrábět jeden kus busty v měřítku 1:1, jakožto hlavní a výsledný výrobek, a dále tři kusy bust v měřítku 1:2, tedy o padesát procent zmenšené modely, jakožto pokusné odlitky demonstrující technologie postupu hlavního konečného odlitku. [34]

4.2 Technologický postup

Výroba uměleckých odlitků lze provádět pomocí několika technologických postupů a kombinací variant, co se týče výroby modelu, výroby formy, způsobu odlévání a dalších konkrétních věcí. V této práci je zvolený takový technologický postup, který byl pro daný typ uměleckého odlitku nevhodnější z důvodu přesnosti, snadnosti, dostupnosti a na základně běžně používaných technologií pro výrobu uměleckých bust.

Postup celé výroby bude tedy následující. Nejprve budeme vyrábět model pomocí 3D skenování. Předlohový předmět, v tomto případě hlava mé osoby, bude naskenován pomocí 3D skeneru, čímž bude získán realistický model v měřítku 1:1, který lze vygenerovat jako CAD model k následným úpravám v počítači. Následně v příslušném grafickém programu bude postprodukčně model upraven, včetně dodělání a úpravy všech detailů. Hotový virtuální model bude pomocí 3D tiskárny vytisknutý v měřítku 1:1 a dále budou vytištěny další tři modely zmenšené o 50%. Plastové modely zhotovené na 3D tiskárně budou již finální modely použité pro odlévání, jelikož budeme odlévat pomocí technologie vytavitelného modelu. Tato technologie bude konkrétně v našem případě spočívat v použití sádky jako formy a plastových výtisků jako vytavitelný model. Plastový model bude tedy umístěn do rámu a poté zalit tekutou

sádrou. Po vytvrzení sádry bude plastový model vytaven a do vzniklé formy, kterou budeme předehtřívát, bude odlit roztavený hliník. Po následném vychladnutí odlitku budeme výrobek ještě začišťovat od předpokládaných vad, zaběhlých prasklin, nerovností či dodělování jiných detailů. Jako poslední krok bude povrchová za účelem imitace bronzového povrchu, kterou budeme provádět pomocí práškového lakování na lakovací stanici. Celý technologický postup a zvolené postupy pro konkrétní umělecký odlitek budou detailněji popsány v následujících kapitolách. [2] [3] [34]

4.3 3D scanner a skenování

Jak již bylo zmíněno, jako nejjednodušší a nejpřesnější varianta výroby realistického modelu je technologie 3D skenování. Jelikož ve školních prostorách a podmínkách disponuje ČVUT Fakulta strojní svými 3D skenery, konkrétně ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, budu používat a využívat tyto skenery. Jedná se o skener od společnosti Shining 3D. Tato společnost se věnuje především výzkumu, vývoji a výrobě vysoce přesné 3D digitalizace a 3D tisku, včetně výroby 3D skenerů. Tento podnik disponuje různými typy skenerů, určené pro různé užití, jako například profesionální skenery pro stomatologii nebo jiné zdravotnické odvětví, metalurgické skenery, využívané ve strojním průmyslu, automobilovém průmyslu či 3D designu, nebo jiné typy skenerů.

Pro účely této práce bude použit od společnosti Shining 3D použit skener EinScan SE V2 a Einscan SP V2, jelikož tyto dva skenery jsou k dispozici v pracovních podmínkách laboratoře. Tyto dva skenery jsou velmi podobné skener s označením SP je oproti řadě s označením SE kvalitnější, mezi jeho největší přednosti patří 2x vyšší přesnost skenování. Skener SE skenuje s přesností 0,1 mm, zatímco skener SP s přesností 0,05 mm. Další výhodou skeneru SP je i dvojnásobná rychlost skenování, avšak značná nevýhoda je jeho cena, kdy SP skener stojí k dnešnímu dni přibližně 70 000 Kč, zatímco skener SE pouze 30 000 Kč. Oba dva tyto skenery se používají pro skenování součástek do rozměru krychle o straně 200 mm a 5kg váhy, jelikož skenery disponují otočným stolem. S využitím stativu se dají skenovat objekty do rozměru krychle o hraně 700mm, avšak bez využití otočného stolku, který pomáhá se souvislým skenováním. Podmínkou funkčnosti skenování je matný, nikterak lesklý či reflexní povrch skenované součástky.

Jelikož budeme skenovat lidskou hlavu, nejvýhodnější by bylo použití skeneru EinScan H nebo EinScan HX. Tyto skenery jsou určeny přímo pro skenování lidského těla, včetně

obličej, vlasů a ostatních reflexních ploch. Cena těchto skenerů se však pohybuje od 150 000 do 300 000 Kč.

Důležitou věcí při skenování a úpravě 3D modelu je formát souboru, ve kterém bude zhotovený 3D sken, jelikož tento formát musí být podporovaný 3D tiskárnou. Nejvýhodnější formát výstupu 3D skenu je formát STL nebo OBJ, pro 3D tisk je nejvýhodnější formát STL, jelikož tento formát je určený k dalším úpravám souboru v CAD programech. [4] [5] [34]



Obrázek 6: 3D skener EinScan SP



Obrázek 7: 3D skener EinScan HX

4.4 Grafické a CAD programy na úpravu modelu

Po naskenování předlohového modelu, bez použití otočného stolku, lze předpokládat, že naskenovaný model nebude stoprocentně přesný či bude obsahovat nějaké chyby a nepřesnosti, z důvodu automatického sestavení modelu na základě několika snímků. Proto bude potřeba postprodukčně naskenovaný 3D model upravit v příslušném CAD nebo grafickém programu.

Ve strojírenství běžně používané CAD programy nejsou v tomto případě příliš výhodné, jelikož fungují na základě tří hlavních dimenzí a trojrozměrném prostotu, vhodným pro kreslení rozměrově přesných, rovných a atypických tvarů. Princip těchto CAD programů je kreslení na základě rotace, vysunutí či vyříznutí nakresleného tvaru ve směru jedné ze tří hlavních os, či roviny nakloněné o určitý úhel.

Jelikož vyráběný umělecký odlitek bude mít nepravidelný, nesymetrický, atypický tvar bez přesných rozměrů, je vhodné použít grafický software určený ke kreativnějším umělečtějším úpravám. Na trhu se nachází velké množství grafických programů, určené pro 3D modelování, z nichž některé jsou zpoplatněné, některé i k dispozici zdarma. Jako

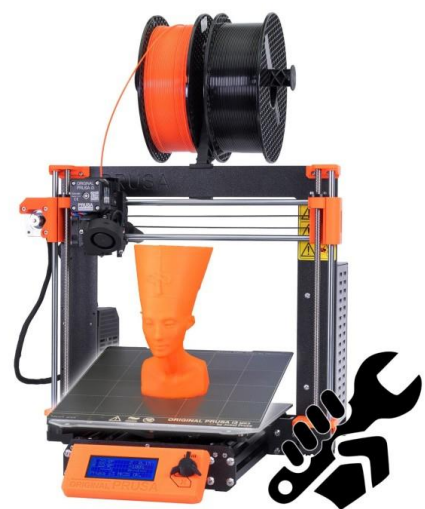
jednoznačně nejlepší program pro daný projekt se po vyzkoušení několika softwarů jevil program Blender. Oproti ostatním programům tohoto typu je Blender zdarma v plné verzi, má nejpřehlednější uživatelské prostředí, poměrně srozumitelné a snadné ovládání s možností českého jazyka a je nejkompletnější ohledně kreativních úprav. Blender je primárně otevřený a svobodný software, určený pro vytváření 3D grafiky, 3D modelů, animovaných filmů a postav, her, 3D uměleckých děl, digitální kreslení a další kreativní grafické práce. Samotný program má i několik režimů, jako objektový režim, sochařský režim, texturový režim či režim úprav, bude tedy i vhodný pro úpravu 3D skenu hlavy, jelikož program podporuje i výstupní formáty z 3D skeneru. [34]

4.5 3D tisk modelu

Po grafické úpravě 3D modelu v grafickém programu se upravený model vytiskne pomocí 3D tiskárny. Požadavek je vytisknout jeden model v měřítku 1:1 a tři modely zmenšené o 50% .

4.5.1 3D tiskárna

V návaznosti na laboratorní podmínky máme k dispozici dva druhy 3D tiskáren. První 3D tiskárna je 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S od společnosti Prusa Research, jedná se o českého výrobce, specializujícím se na 3D tiskárny. Je to již několikátá generace úspěšných předchozích modelů tiskáren, umožňující vytisknout objekty vysoké až 210 mm (široké 210x250) s přesností 0,1-0,3 mm. Druhá 3D tiskárna je 3D tiskárna kombinace tiskárny Creality Ender 5 Plus od společnosti Creality 3D , což je čínská společnost ,jedna z předních v oblasti 3D tisku a tiskárny Mercury One od společnosti ZeroG Design, která je kompatibilní s 3D tiskárnou Creality Ender 5 a funguje na její konstrukci. Tato výsledná 3D tiskárna je vhodná zejména pro pokročilejší uživatele, kteří již mají určité zkušenosti, potřebující výkonnou a přesnou 3D tiskárnu, vhodnou pro složité a velké výtisky. Tato 3D tiskárna je vhodná pro výtisky až do výšky 400 mm a šířky 350x350 mm s přesností 0,1 mm. [6] [7][8] [34]



Obrázek 8: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S

4.5.2 Program pro 3D tisk

Pro samotný tisk na 3D tiskárně je potřeba ještě další program, který hotový 3D model převede na zdrojový kód pro dráhu trysky zhotovující samostatný 3D tisk. Jedna se o takzvané slicovací programy, neboli slicery, vycházející z anglického slova slice, což lze volně přeložit jako plátek či krájet, slicovací programy nebo slicery lze tedy přeložit jako krájecí či plátkovací programy nebo kráječe či plátkovače. Jejichž název přesně charakterizuje jejich činnost a funkci. Programy tedy počítačový model dokáží automaticky takzvaně nakrájet na jednotlivé vrstvy, jdoucí vertikálně po sobě, kde jednotlivá vrstva představuje konkrétní dráhu trysky v dané výšce. Dále se v používaném sliceru nastaví parametry pro tisk, jako tip materiálů, teplota tavení materiálu, rychlost podávání materiálu, teplota podložky, umístění objektu včetně jeho můstků a tak dále. Finálním výstupem tohoto programu je takzvaný G-code, což lze jednoduše charakterizovat jako sadu příkazů ovládající 3D tiskárnu.

Na trhu je k dispozici velké množství těchto programů, velmi často dodávané přímo od výrobců 3D tiskáren, tyto programy jsou však relativně podobné, snadno ovladatelné a kompatibilní s různými druhy 3D tiskáren. Mezi nejznámějšími a nejpoužívanějšími jsou programy PrusaSlicer, Cura, Slic3er, Simplify3D nebo KISSlicer. Většina programů je zdarma, některé zpoplatněné, mezi sebou se liší různými vlastnostmi, jako je například rychlost slicování, profesionální nebo začátečnické využití, styl tvorby podpěr nebo další pokročilé možnosti. [9][10][34]

4.5.3 Materiály pro 3D tisk

V dnešní době existuje velké množství materiálů pro 3D tisk, nejčastěji z plastových materiálů, lze i tisknout například z kovových materiálů, vosku, betonu a tak podobně. Jelikož pro účely této práce bude potřeba plastový model, budeme vybírat z plastových materiálů. Materiál se pořádává ve formě filamentů, což je konkrétní vlákno natočené na cívku.

Mezi nejčastější plastové filamenty patří PLA, PETG, ABS, Nylon, ASA, PA, PP, PC a další., lišící se vlastnostmi jako pevnost, houževnatost, křehkost, elasticita, odolnost vůči UV záření, teplota tání, složení a tak dále. Jelikož budeme používat metodu ztraceného modelu, nejvýhodnější by bylo použití voskového filamentu. Vosk má nejlepší tavné vlastnosti v porovnání s ostatními možnými materiály. Cena tohoto filamentu je však téměř trojnásobná, tudíž z důvodu úspory financí a obsahu dílenského vybavení použijeme materiál PLA.

Název PLA je zkratka pro polylaktid, neboli kyselinu polymléčnou. Tento druh plastu je velmi často přezdívaný jako ekologický plast, jelikož se jedná o biologický odbouratelný a

bioaktivní termoplastický alifatický polyester, který je vyroben z rostlinných produktů bez použití ropy. Pro výrobu se jako základní surovina používá bramborový škrob, kořeny manioku, štěpky nebo cukrová třtina. Tento bioplast tedy při zahřívání neprodukuje žádné toxické látky, výpary či zápach, nikterak nereaguje s jídlem a je pro člověka bezpečný. Jeho hlavní výhody jsou snadná dostupnost, nízká cena, univerzálnost použití a jeho tavné vlastnosti. Je to materiál s nejlepší tisknutelností, pevný a tuhý, vhodný i pro tisk detailních malých částí, vyráběný v nespočet barevných variantách. Mezi jeho nevýhody patří především vyšší křehkost, nesnášenlivost ohybu, pohlcování vzdušné vlhkosti, špatná obrobitelnost a nevhodnost k venkovnímu použití, jelikož UV záření tento materiál silně degraduje a zároveň také měkne a začne se deformovat již při 50 °C. Teplota tisku tohoto materiálu, tedy kdy materiál teče, je 185–235 °C. Dalším zvyšováním teploty se materiál stává více tekutým, k hoření začne docházet při teplotě 400 °C a více. [11] [12][13] [34]

4.5.4 Začištění a broušení modelu

I přes dobré nastavení 3D tiskárny a použití kvalitního materiálu je pravděpodobné, že na 3D výtisku vzniknou nějaké vady a nedokonalosti. Z tohoto důvodu se výtisk začistí ještě před dalšími kroky, jelikož plastový materiál se obrábí snadněji než kovový. Materiál PLA lze opracovávat běžnými způsoby stejně jako kovové výrobky, není však příliš vhodný ke strojnímu obrábění a broušení. Díky jeho nízké tavné teplotě se o brusný papír či obráběcí nástroj rychle zahřeje a materiál začne měknout. Tento problém lze vyřešit chlazením obrobku. Jelikož ale vady nebývají nijak velké, lze použít ruční broušení, které bude dostatečné. [34]

4.6 Odlévání odlitku a jeho metoda

Při odlévání uměleckých odlitků jako jsou busty či sochy lze použít několik způsobů odlévání, od těch nejstarších až po ty nejmodernější, princip lití je stejný jako u průmyslových odlitků. Cíl této práce je vyrobit odlitek busty člověka, tudíž odlitek, který bude mít členitou strukturu s mnoho detaily, výstupky a dutinami, jako například uši, nos a tak podobně. Hlavní nároky na odlitek tedy budou detailní struktura povrchu, zachování detailů a jemný povrch odlitku.

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, k výběru je několik metod lití. Vzhledem k nárokům a požadavkům na odlitek busty a také vzhledem k požadavkům na cenu a dílenském vybavení uvažujeme dvě metody lití. Jedná se o metodu gravitačního lití do pískové a o metodu ztraceného modelu. [1] [2][3] [34]

4.6.1 Metoda gravitačního lití do pískové formy

Tato metoda je tradiční metoda, hojně a běžně používaná i v současnosti. Princip této metody spočívá v umístění modelu do formovacího rámu a následným zasypáním a formováním formovací směsí. Formovací směs se skládá z pojiva a ostřiva, kdy jako ostřivo se používají materiály jako křemičitý písek, šamot, korund nebo magnezit. Pojivo jsou buď organická nebo anorganická, patří sem například kaolinit, bentonit, cement, sádra, vodní sklo či různé oleje a sacharidy nebo pryskyřice. Úkol pojiva je spojit a zpevnit ostřivo.

Formovací rámy jsou většinou složené ze dvou a více částí, které lze po zaformování modelu rozebrat a model vyndat. Formování je pěchování formovací směsí za účelem její zhutnění. Formování probíhá buď mechanicky nebo chemicky. Mechanické formování se provádí pomocí střešení, lisování, metání nebo ručního pěchování, zatímco chemický způsob formování funguje na principu chemické reakce pojiva.

Po zaformování modelu a zpevnění formy následuje vyndání modelu. Jelikož model bude vysouván z formy, musí mít takové konstrukční řešení, aby jeho tvar, dutiny a vystouplé části nestrhly hotovou formu. Pro účel takovýchto prvků se používají jádra. Jedná se o předem vyrobený kus části formy z formovací směsí, který se vloží do formovacího rámu společně s modelem a zaformuje ke zbytku nové formy. Díky tomu lze docílit složitějších tvarů a detailů i v jiných směrech, než je směr vytahování modelu. Jádra se vyrábí v jaderníku, což je forma tvaru negativu jádra.

Mezi hlavní nevýhody této metody pro účely této práce patří nutnost použití více jader a horší kvalita povrchu. Díky složitému tvaru výrobku s mnoha detaily, výstupky a dutinami by byla složitá výroba formy, protože by bylo zapotřebí použití více jader na prvky jako například uši či nos. Využití jader by znamenalo zároveň i složitější úpravu modelu na více částí, výrobu jaderníků a jader, jejich skládání a přesné umístění a celkový složitější postup, což by mohlo přinést za následek další problémy a nedostatky. Proto tato metoda je relativně příliš složitá a nepříliš vhodná pro tento typ odlitku. [1] [2][3] [34]



Obrázek 9: Gravitační lití do pískové formy, za použití formovacích rámu

4.6.2 Metoda ztraceného modelu

Jedná se o velmi starou metodu lití pocházející z pravěku, přibližně 4000 let před našim letopočtem, známou také pod názvy metoda vytavitelného modelu, metoda voskového modelu, metoda ztraceného vosku nebo i metoda přesného lití. Její hlavní princip je na základě modelu ze snadno roztavitelného materiálu a pevné jednodílné nerozebírací formy.

Model se vyrábí tradičně z vosku, lze však použít i modernější materiály s nízkou teplotou tání, například plasty. Vosk je velmi ideální materiál, díky jeho nízké teplotě tání v rozmezí 60-70 °C se velmi snadno zahřeje a díky jeho dobré viskozitě a tekutosti z formy snadno vyteče na základě gravitace. V konkrétním případě této práce budeme model tisknout pomocí 3D tiskárny. Jak již bylo řešeno v kapitole ohledně materiálu pro 3D tisk, pro 3D tiskárny se na trhu vyrábí a prodávají přímo voskové filamenty. Jelikož smysl práce je i snaha o využití nízkonákladových technologických variant, model bude vytisknut z plastu PLA.

Forma je v tomto případě vyrobena z formovací hmoty, což je ve své podstatě žáruvzdorná vytvrditelná hmota. Jako formovací hmota se používají různé vhodné materiály jako keramická hlína, sádra, syntetická žáruvzdorná keramika a další kombinace. Formovací směs se nechá po zaplnění vyschnout a ztuhnout. Pro účel této práce se bude vyrábět forma z modelářské sádry. Je to levný a dostupný materiál s velmi snadnou aplikací, dostatečně vhodný pro požadavky odlitku.

Postup celého procesu lití metodou ztraceného modelu je poměrně jednoduchý a přesný, díky pevné nerozebíratelné formě můžeme odlévat odlitky jakýchkoliv tvarů s přesnými detaily. Následující postup popisuje proces lití metodou ztraceného modelu, kdy bude tedy použita forma vyrobena z modelářské sádry a vytavitelný model vytisklý na 3D tiskárně z materiálu PLA. Nejprve se připraví formovací rám nebo nádoba, v případě použití sádry vodotěsná, kam se následně upevní model. Následně se formovací rám nebo nádoba s modelem zalije tekutou sádrkou, třesením se docílí vniknutí sádky do všech míst a zbavení se vzduchových bublin. Sádra následně několik dní bude tuhnout, po dostatečném proschnutí přijde na řadu vytavení modelu a lití. Model se vytaví předehřátím v peci kdy se poté do předehřáté formy lije roztavený kov, v tomto případě hliník. Po vychladnutí odlitku se sádrová forma rozbije a model začistí a zabrousí.

Tato metoda je velmi vhodná pro typ uměleckého odlitku jako je busta, protože je velmi přesná, umožňuje odlitky jakýchkoliv tvarů a detailů a je poměrně dostupná, levná a

poměrně technologicky nenáročná. Jednotlivé kroky této metody budou popsány podrobněji v následujících kapitolách. [2][3] [14] [15] [16][17]

4.6.3 Příprava a výroba rámu pro formu

Ve slévárenství se běžně používají ocelové rámy, které jdou skládat na sebe, v uměleckém slévárenství se často formy vyrábějí, jelikož jsou často potřeba formy různých specifických rozměrů. Používané materiály na výrobu rámu pro formu jsou málo porézní materiály, nejčastěji plast, dřevo nebo kov. V případě sádrové formy musí být formovací rám vodotěsný, jelikož sádra bude tekutá, formovací rám tedy musí být utěsněný. Místo formovacího rámu lze použít například plastovou čtvercovou nebo válcovitou nádobu. [2] [34]

4.6.4 Uchycení a příprava modelu do rámu

Pomocí příčky přes formovací rám nebo nádobu bude model připevněn k formovacímu rámu a upevněn pomocí upínek nebo fixačních lepících pásek. Model busty se umístí horní částí modelu směrem k dolejšku formovacího rámu, pomyslný krk busty bude tedy sloužit jako licí jamka. Jelikož model bude vyroben z plastu PLA a má uzavřený profil, v tekuté sádře bude mít tendenci směřovat směrem k hladině sádry díky vztlaku, z tohoto důvodu je model potřeba pevně zafixovat. [2] [3] [34]

4.6.5 Výroba formy pomocí sádry

Na trhu se prodávají různé druhy sádry, jako stavební sádra, univerzální sádra, modelářská či dražší speciální typy. Nej kvalitnější sádra by byla speciální umělecká sádra určená přímo k výrobě například soch, pro její vysokou cenu je však sádra modelářská dostatečná, s velmi podobnými vlastnostmi vhodná pro tento typ odlitku. Tato sádra má jemná zrna například oproti klasické univerzální. Jemnost zrn je důležitá pro výslednou hladkost a zachování struktury povrchu odlitku. Sádra se prodává v práškové formě a následně se smíchá s vodou. Vždy je třeba přimíchávat sádro do vody a nikoliv naopak, kvůli chemické reakci sádry. Pro výrobu sádrových forem se doporučuje poměr sádry a vody 1:3. Pro zpevnění formy použijeme drátěné pletivo jako výztuhy, které se umístí po obvodu formy. Před nalitím sádry se formovací rám nebo nádoba a model ještě musí ošetřit souvislou vrstvou mazadla, většinou například různého oleje, tuku, mazadla či látky která zabrání přilnutí sádry k modelu a rámu. Po ošetření povrchu se dobře spojená směs sádry a vody následně rychle naleje do formovacího rámu nebo nádoby s modelem a zaleje se až do požadované výšky formy. Zalití sádry je třeba provádět velmi rychle, jelikož sádra během 6-8 minut začne tuhnut. Po zalití

sádrou se umístí předem připravené průduchy a sádra se nechá zatuhnout. Tuhnutí sádry je lepší provádět pomalu, tudíž ideálně nechat vyschnout při pokojové teplotě nebo na slunci. Podle objemu sádry záleží na době vysychání, ideální doba je minimálně 7-14 dní. Během vysychání, když už je sádra tuhá, je třeba odstranit formovací rám nebo nádobu, aby forma proschla a větrala ze všech stran. [34]

4.6.6 Vytavení modelu a předehřátí formy

Vysoušení sádrové formy lze urychlit v žíhací nebo kalící komorové peci. Sádrová forma se vloží do pece a postupně se po intervalech zvyšuje teplota, začne se nejdříve na teplotě 50 °C, tato teplota se udržuje po určitý čas, následně se zvedne na 100 °C a v posledním intervalu na 150 °C, při vyšší teplotě by hrozilo, že se veškerá zbylá voda v sádře začne silně vařit a začne způsobovat praskání sádrové formy. Čas po který je třeba udržet konkrétní teplotu záleží na objemu formu.

Postupné a pomalé předehřívání je důležité dodržet i pro následný ohřev a vytavování plastu. Plastový model lze vytavit různými variantami. Jedna varianta je předehřátí plastového modelu na jeho teplotu tavení a což je v případě PLA ideálně kolem 260°, kdy je plast velmi tekutý. Další varianta je plastový model předehřát na teplotu vyšší než 400 °C, čímž se docílí hoření a spálení plastového modelu. Poslední používanou metodou je ponechání plastového modelu v sádrové formě a zalití roztaveným kovem, kdy roztavený kov sám spálí plast, při této variantě stejně jako při druhé je dobré vyrobít do formy kanálek pro odtok spáleného plastu. Při menším objemu plastu se plast téměř spálí, může se ale takzvaně nalepit na vnitřní povrch sádrové formy. [34]



Obrázek 10: Kalící komorová pec

4.6.7 Lití do formy

Jelikož lící roztavený materiál bude hliník, bude se vycházet z jeho slévárenských vlastností. Hliník má bod tání přibližně 660 °C. Výsledný odlitek bude mít velmi tlustou stěnu, lící teplota tedy bude stačit menší, přibližně 660–680 °C. Pro tenkostěnné odlitky se používá teplota vyšší. Kvůli riziku praskání sádrové formy a kvůli lepší zabíhavosti se je důležité formu předehřát alespoň na 300–400 °C. Jelikož v předchozím technologickém kroku se provádělo vytavování plastového modelu, kde se model ohříval na teplotu 400 °C a více, z ekonomického

a praktického hlediska je vhodné lití provádět ihned po vytavení modelu, kdy je již forma nahřátá na dostatečnou teplotu pro následné lití. Pomocí licí naběračky se nabere roztavený hliník z pece a lije se do přehřáté formy, kde se následně nechá odlitek zchladnout, kvůli tuhnutí je lepší zvolit delší dobu chladnutí při pokojové teplotě. Při roztavování hliníku bude docházet na hladině povrchu silné oxidaci, proto se do pece přidávají jako pojiva různé organické soli, což jsou většinou směsi kryolitu a chloridu sodného nebo draselného.

Z konstrukčního řešení vychází, že do výrobku lze umístit jádra pro úsporu materiálu a vytvoření odlitku s dutinou. Kvůli nepravidelnému tvaru busty přichází v úvahu jádra válcovitého tvaru, umístěné směrem od pomyslného dolejšku krku směrem k horní části modelu, limitující je však právě šířka krku, která je poměrově daleko užší než zbytek hlavy, tudíž uspořené materiálu by byl minimální a kvůli následné celkové náročnější technologii celého procesu jádra použita nebudou. [2] [3]

4.6.8 Pec

Pro tavení hliníku lze používat různé typy průmyslových tavicích pecí. Na základě dílenského vybavení a pecí k dispozici se bude hliník tavit v indukční kelímkové peci. Tato pec se skládá ze žáruvzdorného, většinou keramického kelímku, umístěného uprostřed válcového induktoru složeného z cívek. Díky indukci se materiál začne roztavovat, pokud induktorem prochází elektrický proud, začne docházet k aktivnímu víření roztavené vsázky, což má za důsledek vznik homogenní směsi. Tato pec je tedy zároveň i vhodná pro výrobu slitin a je zcela dostatečná pro výrobu uměleckého hliníkového odlitku. [18] [19]

4.7 Začištění a broušení

Po odlití a zchladnutí na vzduchu přijdou na řadu poslední manuální úpravy odlitku, jako broušení, odstranění vad, sjednocení povrchu a tak dále. Nejprve se rozbije sádrová forma a pomocí tryskání odstraní zbytky sádry ze všech míst a štěrbin. I když metoda ztraceného modelu je velmi přesná, lze i tak předpokládat následné nedostatky, jako například praskliny formy, což bude mít za následek příbytek materiálu, který bude třeba obrousit a začistit. Další pravděpodobnost, co může nastat, je nesjednocený nepravidelný povrch s různými drsnostmi. Pro úpravu těchto nedostatků se používá běžné dílenské vybavení pro broušení a začištění, jako různé brusky, frézky, pily a tak podobně. Pro sjednocení povrchu bude použito tryskací zařízení s ocelovými broky. [34]

4.7.1 Brusky

Jelikož hotový odlitek má požadavky na co největší zachování detailů, bude třeba používat brusné zařízení malých rozměrů s možností detailního odebírání materiálu.

Pro vady větších rozměrů se nejčastěji používá úhlová bruska s různými kotouči, jako jsou řezné kotouče, lamelové kotouče na kov nebo lamelové kotouče na měkkí materiály. Hliník má při vyšších otáčkách kotouče z tvrdého materiálu (například korundu) tendenci se takzvaně přilepovat a stává se poměrně plastickým, tudíž je vhodnější použít brusné kotouče určené na měkkí materiály, kde k tomuto jevu nedochází.

Pro vady a nedokonalosti menších rozměrů bude vhodná přímá bruska, někdy také nazývaná jako ruční frézka. Jedná se o malý ruční přístroj, umožňující výměnu jeho obráběcího nástroje. Obráběcí nástroj jsou k dispozici ve velké škále rozmanitých tvarů, materiálů a hrubosti, od různých fréz malých rozměrů až po různé tvary malých brusných kotoučů. Na trhu se prodávají brusky poháněné buď elektrickým proudem, nebo stlačeným vzduchem, lze je tedy rozdělit na elektrické a pneumatické. Brusky poháněné stlačeným vzduchem jsou schopné dosahovat vyšších otáček, což může být v mnoha případech výhodnější pro snadnější a rychlejší odebírání materiálu. Rychlost otáček však souvisí s typem broušeného materiálu a na řezných podmínkách nástroje. [34]



Obrázek 11: Úhlová bruska od společnosti Bosch



Obrázek 12: Přímá bruska od společnosti Dremel



Obrázek 13: Nástroje pro přímou brusku

4.7.2 Tryskání

Jedná se o činnosti nazývanou také otryskávání, abrazivní tryskání nebo pískování. Smyslem tohoto technologického kroku je očištění, opracování a sjednocení povrchu. Provádí se buď v uzavřených tryskacích strojích nebo externě pomocí tryskacích pistolí. Pro účel této práce se bude používat uzavřené tryskací zařízení. Toto zařízení obsahuje komoru, kam se umístí předmět určený k otryskání. Na základě stlačeného vzduchu dojde k víření abrazivních částic uvnitř komory a jejich pohybu, čímž se dosáhne souvislého opracování vloženého předmětu. Abrazivní částice se vyrábějí z různých materiálů, je to vlastně sypká směs složená z malých zrněk tvrdého materiálu. Nejčastěji se jedná o ocelové broky nebo granulát, křemičitý písek, korund, keramické kuličky, drť z ocele nebo litiny a tak podobně. Tato směs v tryskacím zařízení zároveň koluje pře zabudované filtry, kde se čistí od odebraných mechanických nečistot z materiálu.

Tato operace se také velmi často provádí před další povrchovou úpravou výrobku, aby měl jednolité a homogenní povrch. Častým dalším důvodem použití je odstranění mechanických nečistot a mikročástic, které vznikly při broušení a dalších úpravách, nebo při použití například předmětů již s hotovou povrchovou úpravou, která je třeba odstranit. [34]



Obrázek 14: Tryskací zařízení od společnosti S.A.F. Praha

4.8 Práškové lakování

V dnešní době existuje velké množství druhů povrchových úprav, od tradičních metod až po ty nejmodernější, pro vyráběný umělecký odlitek byla zvolena metoda práškového lakování. Tato moderní technologie lakování vznikla teprve v 50. letech 20. století, kdy v 80. letech došlo k masivnímu nárustu používání této metody. V dnešní době se jedná o jednu z nejčastěji používaných technologií lakování v průmyslu. Tato technologie je relativně levná, splňuje přísné ekologické požadavky, umožňuje přesný souvislý povrch s homogenní tloušťkou, umožňuje snadné nanášení barvy do všech míst lakovaného předmětu a je také velmi rychlá, do přibližně třiceti minut lze mít hotový, nalakovaný a vytvrzený výrobek.

Pro dobré, spolehlivé a kvalitní nanesení barvy je potřeba před aplikací barvy povrch předmětu mít důkladně čistý a nemastný. Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, povrch se nejprve otryská, čímž se zbaví mechanických částic, jako prachu, okují pilin nebo dalších částic vzniklých během předchozích operací. Proces tryskání se řadí do mechanických předúprav povrchu. Po tryskání následuje moření, což je další technologická operace, řadící se do chemických předúprav povrchu. Moření je činnost prováděná za účelem chemického odstranění mastnoty, solí, prachu, koroze a okují. Provádí se nanesením nebo ponořením do kapaliny, což je roztok vody a silné kyseliny.

Samotné nanášení barvy probíhá pomocí speciální lakovací pistole. Pistole obsahuje zásobník na barvu v práškové formě a je do ní přiváděný stlačený vzduch. Kombinací stlačeného vzduchu a prášku vznikne tekutina, která je směrodatná pro následné další nanášení. Takováto tekutá směs se nanáší pomocí pistole dále na výrobek na základě elektrostatického pole, kdy jednotlivé částice prášku jsou nabitы elektrostatickou energií, díky které jsou přitahovány na základě fyzikálních vlastností k lakovanému výrobku, který je nabitý opačnou polaritou.

Po nanesení barvy se barva vytvrzuje v peci, při teplotách 180 – 200 °C. Výsledkem je rovnoměrný tvrdý povrch, odolný vůči vnějším meteorologickým vlivům, korozi, nárazům, zvětrávání, poškrábání či odlupování. Nalakovaný povrch lze i znovu přelakovat stejným způsobem. V průmyslové velkovýrobě, při potřebě lakování velkého množství výrobků, nebo ve specializovaných lakovnách se používá automatizované lakování, kdy lakovací stanice je zařízení rozkládající se na ploše i několik desítek až stovek metrů čtvereční. Obsahuje většinou pohyblivý závěsný pás, na který se nejprve výrobky navěsí, dále pokračují do sekce oplachování či moření, odkud následně putují do lakovací stanice, kde se nanese prášková

barva. Po lakování pokračují výrobky na závěsném páse do průchozí pece, kde prochází po určitou dobu. Po vyjetí z pece se výrobky sundají a celý proces se opakuje. Díky neustálému pohybu pásu, který je zároveň uzavřený okruh, lze snadno nepřetržitě automatizované výroby.

Prášek nebo prášková barva je syká směs složená z různých směsí, pryskyřic, plastů a pigmentů. Na trhu se prodává velké množství různých druhů a odstínů práškových barev, podle obsahu barvy záleží také na výsledné struktuře povrchu, kdy lze docílit povrchu lesklého, pololesklého, matného či vzorovaného. Podle materiálu prášku a způsobu výroby prášku lze rozdělit práškové barvy na epoxidové, polyesterové, epoxipolyesterové, polyuretanové či akrylátové. [20] [21] [34]



Obrázek 15: Ukázka automatizované práškové lakovny s pohyblivým závěsným pásem

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Návrh a realizace výroby uměleckého odlitku

V experimentální praktické části této práce bude cílem zhotovit umělecký odlitek busty podle předem zvoleného technologického postupu. Následující část tedy bude popisovat konkrétní technologický postup pro konkrétní tip uměleckého odlitku. Jednotlivé kroky technologického postupu budou následovné:

- 1) 3D skenování
- 2) Úprava 3D modelu v programu Blender
- 3) 3D tisk modelu
- 4) Začištění a broušení modelu po 3D tisku
- 5) Příprava a výroba rámu pro formu
- 6) Uchycení a příprava modelu do rámu
- 7) Výroba formy pomocí sádry
- 8) Vytavení modelu a předeřtí formy
- 9) Odlití do formy
- 10) Začištění a broušení
- 11) Tryskání
- 12) Moření
- 13) Práškové lakování
- 14) Vyhodnocení kvality výrobku

5.1.1 3D skenování

Prvním krokem bude samotné naskenování předlohového předmětu, který se bude vyrábět, v tomto případě busta lidské hlavy. K dispozici jsou skenery EinScan SE V2 a EinScan SP V2 od společnosti Shining 3D. Jelikož skenovaný rozměr hlavy bude vyšší než maximální rozměr pro skenování pomocí otočného stolku, skener se bude muset umístit na stativ. Jelikož je skener připojený ke stolnímu počítači, skenování probíhá pomocí programu od společnosti Shining 3D, dodávaného společně se skenery. Jelikož skenovaný předmět je lidská hlava, je třeba připravit speciální pracovní prostředí. Připraví se otočná židle, na kterou se skenovaná osoba posadí. Aby byl sken kvalitní, skenovaný povrch musí být minimálně lesklý, aby odrazil co nejméně světla. Jelikož je lidská pokožka přirozeně mastná, je potřeba pokožku důkladně umýt a zbavit lesku. Ukázalo se, že pro dostatečnou úpravu stačí použít obyčejnou vodu

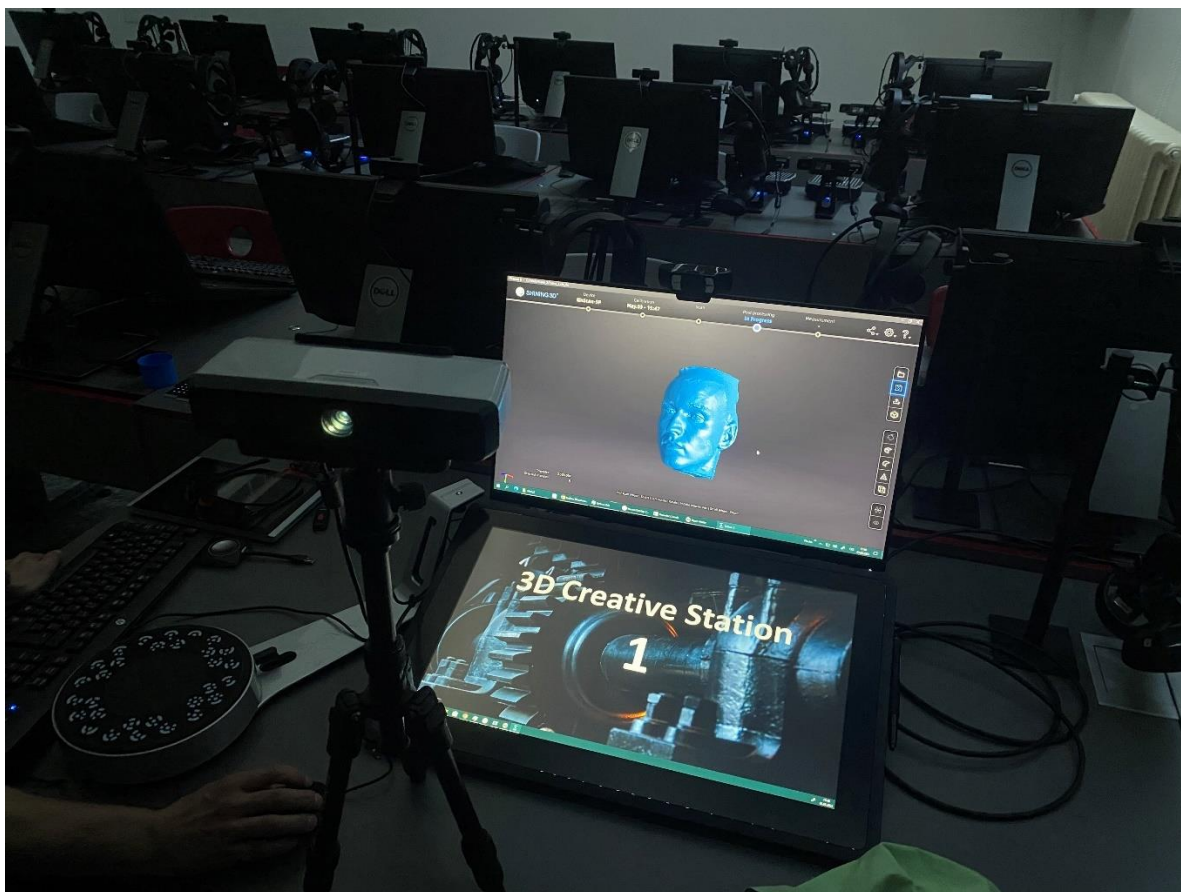
s mýdlem, a kosmetický pudr. Následně obsluha skeneru spustí proces skenování. Celý proces jednoho skenování trvá přibližně 45 sekund, ideální je obvod hlavy rozdělit na co největší počet částí, a jednotlivé části skenovat postupně. Aby byl naskenovaný model ze všech stran, po jednotlivých skenech se vždy osoba na otočné židli otočí o určitý úhel a pokračuje se ve skenování další části. Součet všech úhlu pootočení musí dát dohromady 360°. V případě této práce se rozdělil obvod hlavy na deset částí o přibližně 36°. Při dostatečném počtu 3D skenů program díky svému softwaru spojí všechny jednotlivé snímky automaticky do jednoho výsledného modelu. Díky tomu není třeba dodržovat přesné úhly otočení skenovaného předmětu, zároveň lze i jednu část skenovaného předmětu skenovat i vícrát, z pravidla čím více jednotlivých skenů uděláme, tím bude výsledný model detailnější, jelikož software bude mít k výslednému sestavení více dat.

Jako největší a hlavní nedostatek při skenování lidské hlavy se ukázalo neschopnost snímat vlasy, jelikož jsou moc tenké a lesklé. Tento problém nešel odstranit ani jakýmkoliv zmatněním či sjednocením vlasů do homogenní struktury. (obr.16) Použitím skeneru EinScan H nebo EinScan HX od společnosti Shining 3D, který je přímo určen ke skenování osob a vlasů, by se problém odstranil, z finančních důvodů se však bude uvažovat levnější varianta. Jelikož primárním cílem umělecké busty je zachycení

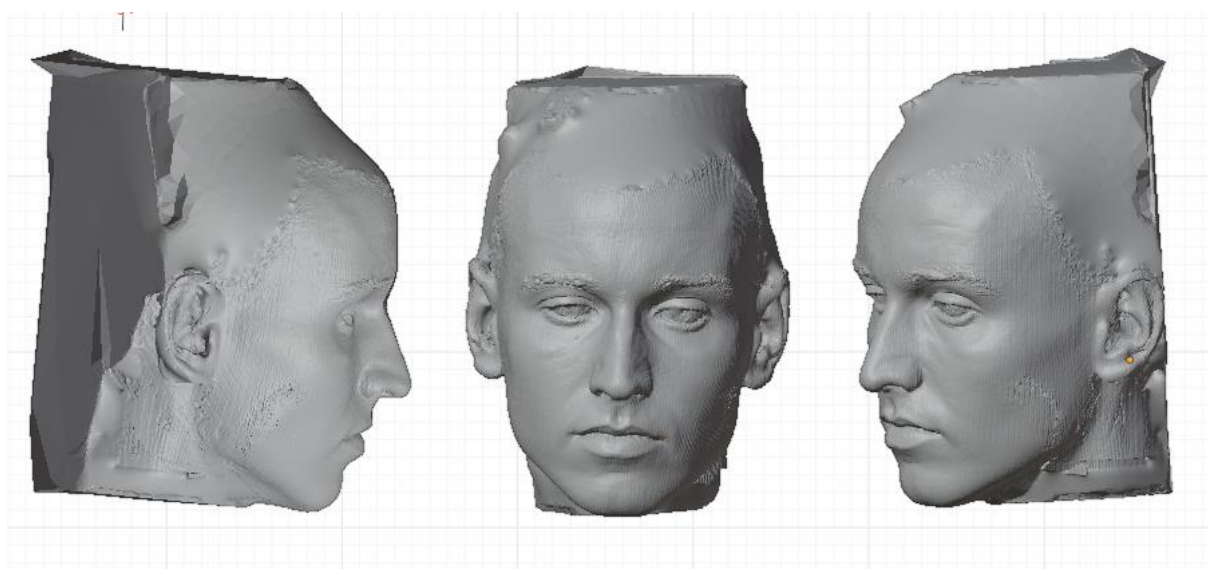


Obrázek 16: Ošetření vlasů proti lesku a jejich sjednocení

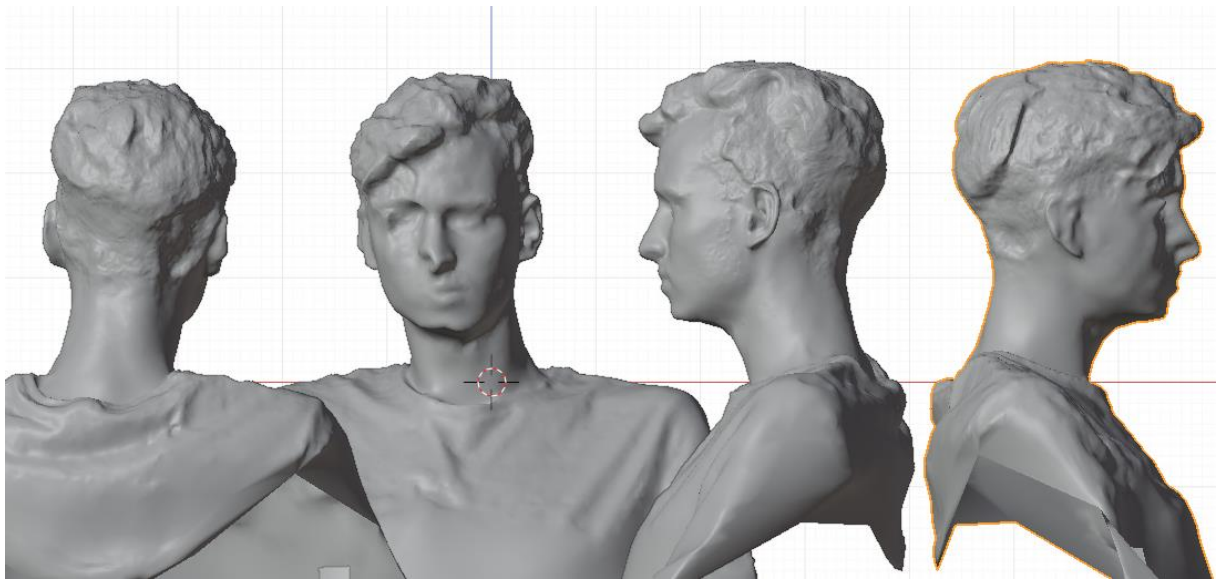
výrazu obličeje, myšlenka je dodělat vlasy manuálně. V současné době existují již i mobilní aplikace, zvládající 3D skenování. po testování se však zjistilo, že výsledná kvalita výstupu není nikterak dokonalá, mobilní 3D skener však dokáže zachytit poměrně dostatečně tvary skenovaného předmětu, což by bylo pro vlasy dostatečné. Zároveň mobilní skener dokáže kompletně nasnímat i vlasy. Bude použita mobilní aplikace Polycam 3D Scanner od společnosti Polycam, pomocí této aplikace uděláme další nový sken celé hlavy. Jelikož se jedná o mobilní aplikaci, skenování i ovládaní je velmi jednoduché, princip postupu je stejný jako u předchozího 3D skeneru. [34]



Obrázek 17: 3D skener EinScan SP umístěný na stativu a program pro skenování



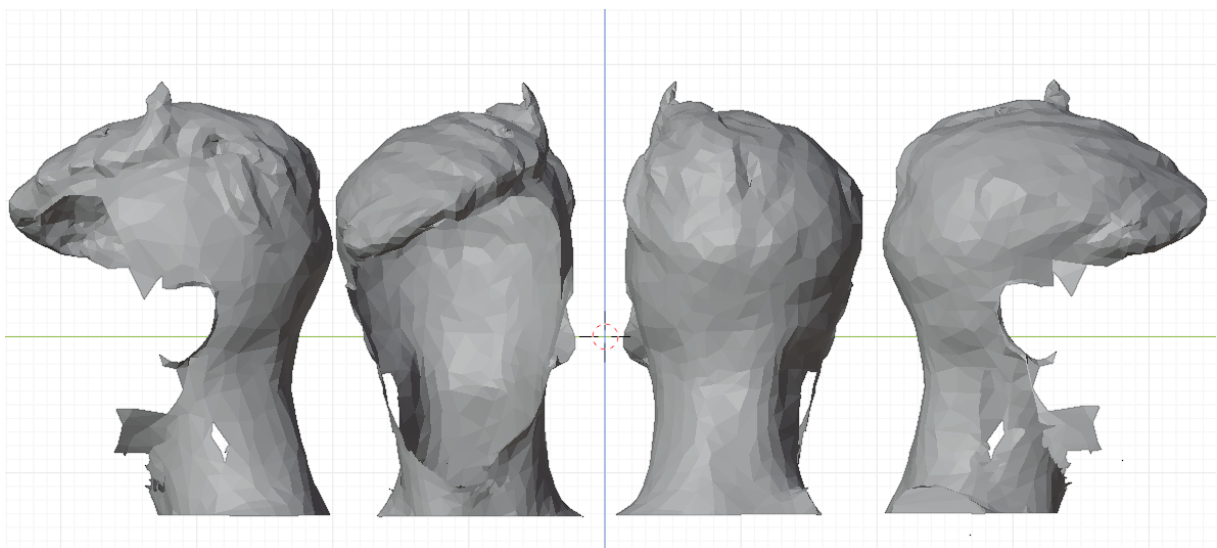
Obrázek 18: Naskenovaný 3D model pomocí skeneru EinScan SP



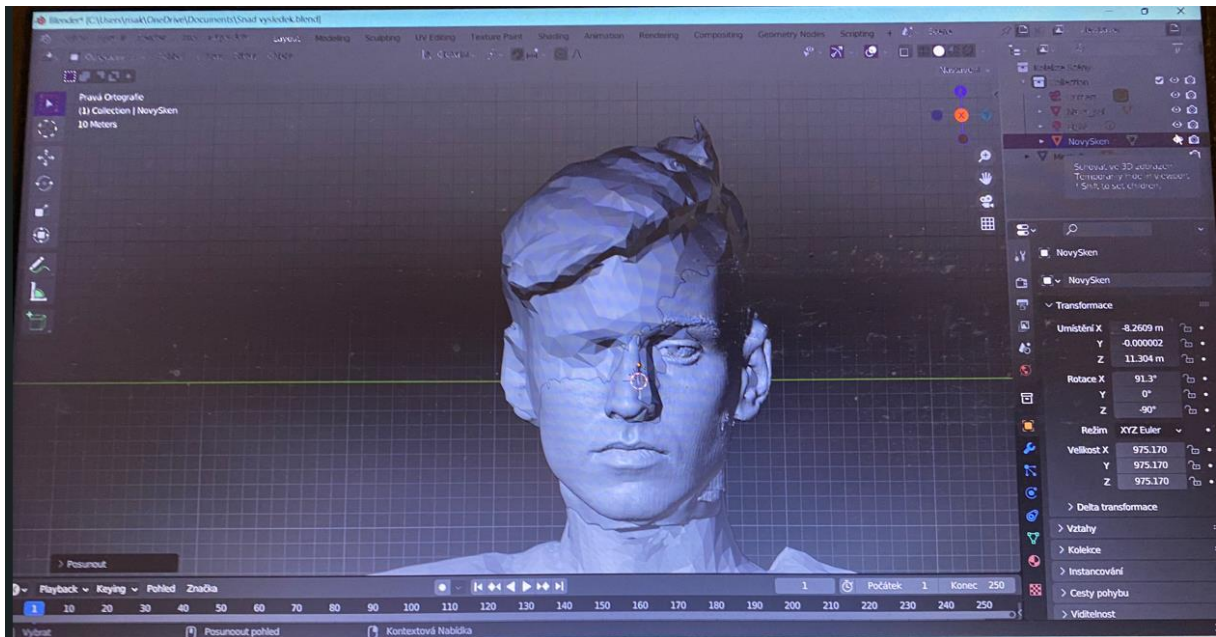
Obrázek 13: Naskenovaný 3D model pomocí mobilní aplikace PolyCam

5.1.2 Úprava 3D modelu v programu Blender

Kvůli objevenému nedostatku v neschopnosti skenování vlasů bude třeba nyní oba dva modely spojit. Program Blender je na to dostatečný a ideální, jelikož umožňuje kreativní manuální úpravy a režim sochařství. V programu se tedy oba modely spojí (obr.21), následuje úprava detailů a vad skenu, jako například zahmlzení povrchu, zjemnění struktury skenu, zkosení ostrých hran a tak podobně. Je důležité, aby byl celý model uzavřený a neobsahoval žádné takzvané díry, jelikož pro následný 3D tisk by 3D tiskárna nebyla schopná model vytisknout.



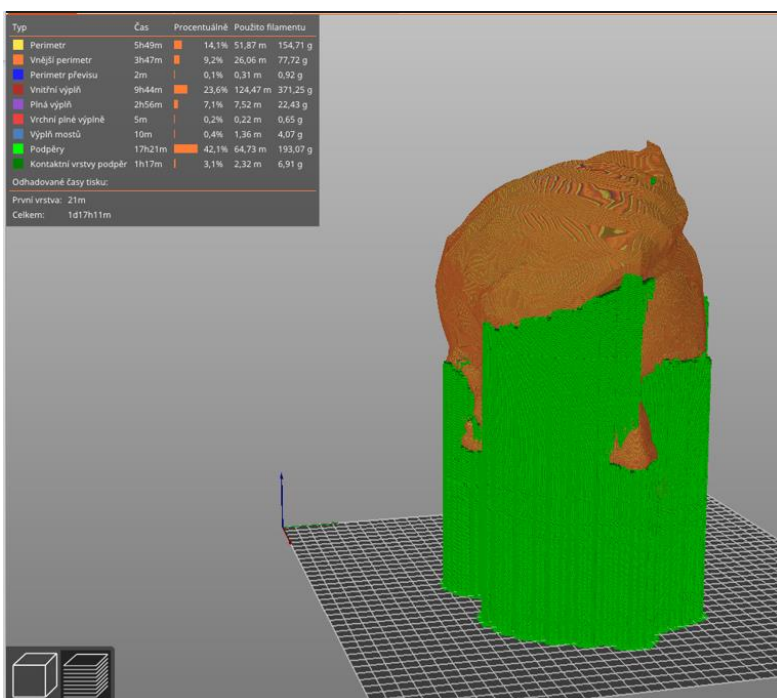
Obrázek 20: Vyjmutí vlasů ze skenovaného 3D modelu (mobilní aplikací PolyCam) pomocí programu Blender



Obrázek 21: Spojování dvou 3D skenů (ze skeneru EinScan a mobilního skeneru PolyCam) do jednoho skenu v programu Blender

5.1.3 3D tisk modelu

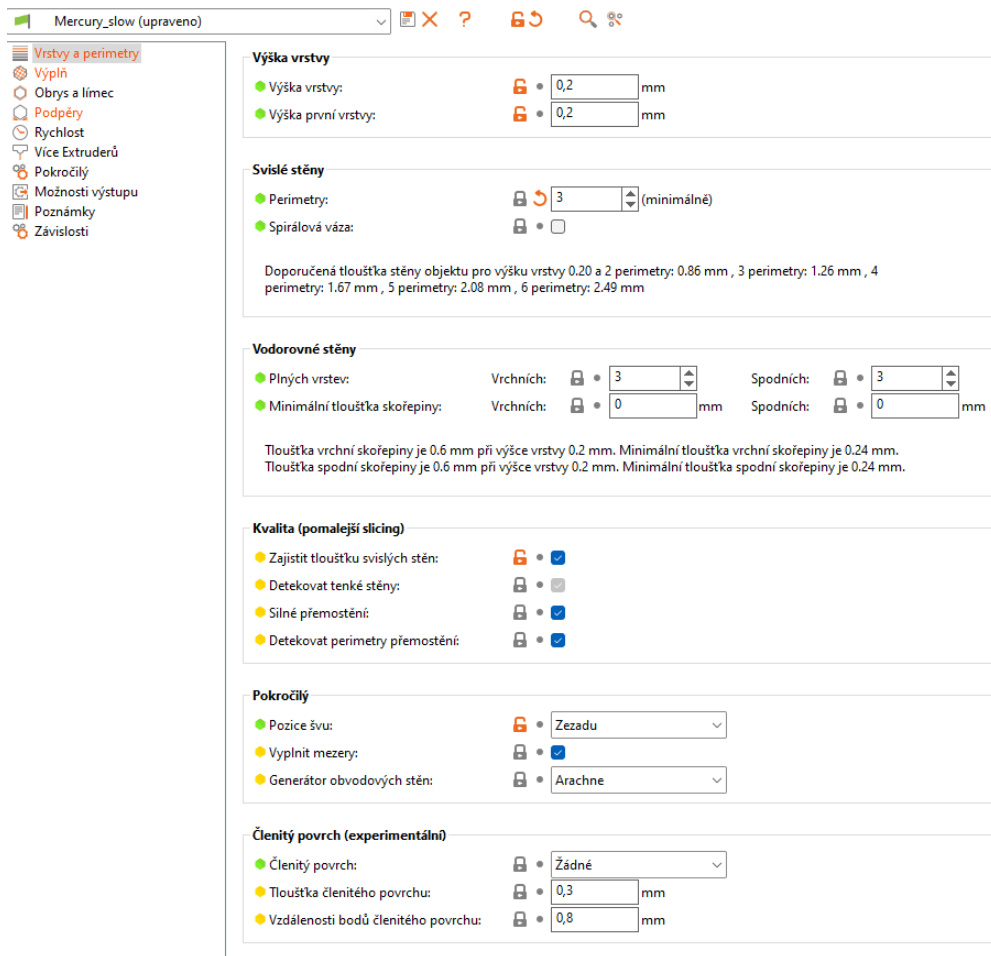
Jednotlivé modely se budou tisknout na dvou tiskárnách, v programu PrusaSlicer se nastaví konkrétní tiskové podmínky, výplň modelu a rozmístění můstků. Můstky jsou podpory pro tisknutí 3D modelu v místě, kde stěna modelu překračuje úhel 45° vůči podložce. Konkrétní nastavení tisku je popsáno na následujících obrázcích. (obr.24-28) [34]



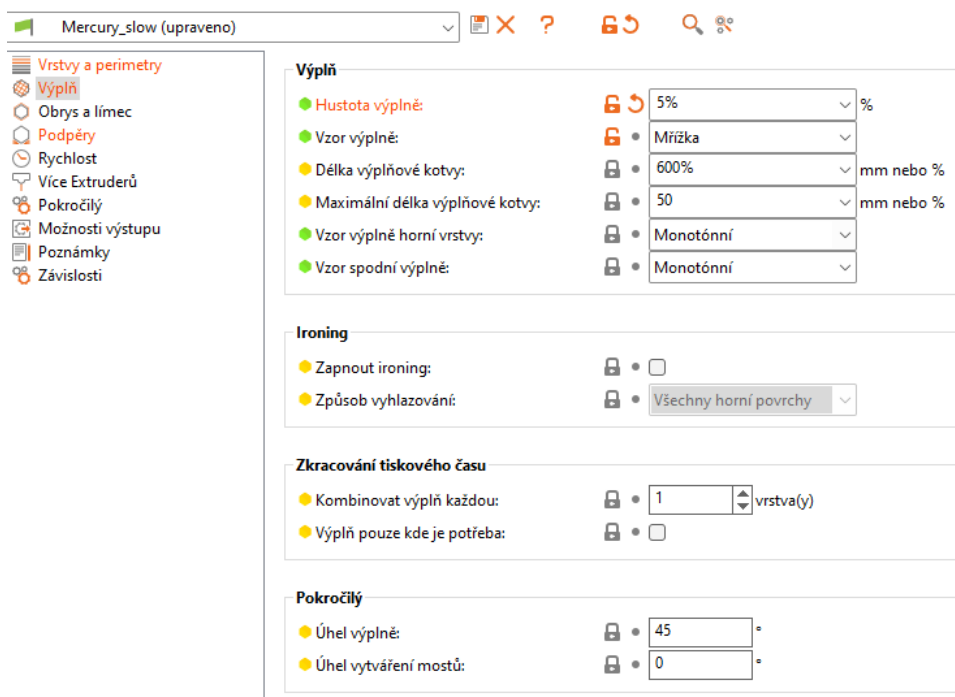
Obrázek 22: Simulace 3D tisku v programu PrusaSlicer



Obrázek 23: Tisknutí velkého modelu na 3D tiskárně Mercury One



Obrázek 24: Nastavení vrstev a parametrů pro 3D tisk



Obrázek 25: Nastavení výplně pro 3D tisk

Mercury_slow (upraveno)

Vrstvy a perimetry
 Výplň
 Obrys a límeček
 Podpěry
 Rychlost
 Více Extruderů
 Pokročilý
 Možnosti výstupu
 Poznámky
 Závislosti

Podpěry

- Generovat podpěry:
- Automaticky generované podpěry:
- Mezní úhel převisu: 45°

Raft

- Vrstev raftu: 0 vrstva(y)
- Mezera mezi objektem a raftem v ose Z: 0,1 mm

Volby pro podpěry a raft

- Styl: Mřížka
- Mezera nad podpěrami v ose Z: 0,2 mm
- Mezera pod podpěrami v ose Z: Stejně jako vrchní mm
- Vzor: Přímočarý
- Rozteč podpěr: 2 mm
- Poloměr uzavření: 2 mm
- Vrchní kontaktní vrstvy: 2 (výchozí) vrstva(y)
- Spodní kontaktní vrstvy: Stejně jako vrchní vrstva(y)
- Vzor kontaktní vrstvy: Výchozí
- Rozteč kontaktních vrstev: 0,2 mm
- Pouze na tiskové podložce:
- XY vzdálenost mezi objektem a podpěrami: 110% mm nebo %
- Nevytvářet podpěry pod mosty:

Obrázek 26: Nastavení podpěr pro 3D tisk

Vrstvy a perimetry
 Výplň
 Obrys a límeček
 Podpěry
 Rychlost
 Více Extruderů
 Pokročilý
 Možnosti výstupu
 Poznámky
 Závislosti

Rychlosti pohybů tiskárny

- Perimetry: 150 mm/s
- Malé perimetry: 50% mm/s nebo %
- Vnější perimetry: 50% mm/s nebo %
- Výplň: 200 mm/s
- Plná výplň: 80% mm/s nebo %
- Vrchní plně výplně: 50% mm/s nebo %
- Podpěry: 150 mm/s
- Kontaktní vrstvy podpěr: 100% mm/s nebo %
- Mosty: 100 mm/s
- Výplň tenkých stěn: 100 mm/s
- Ironing: 15 mm/s

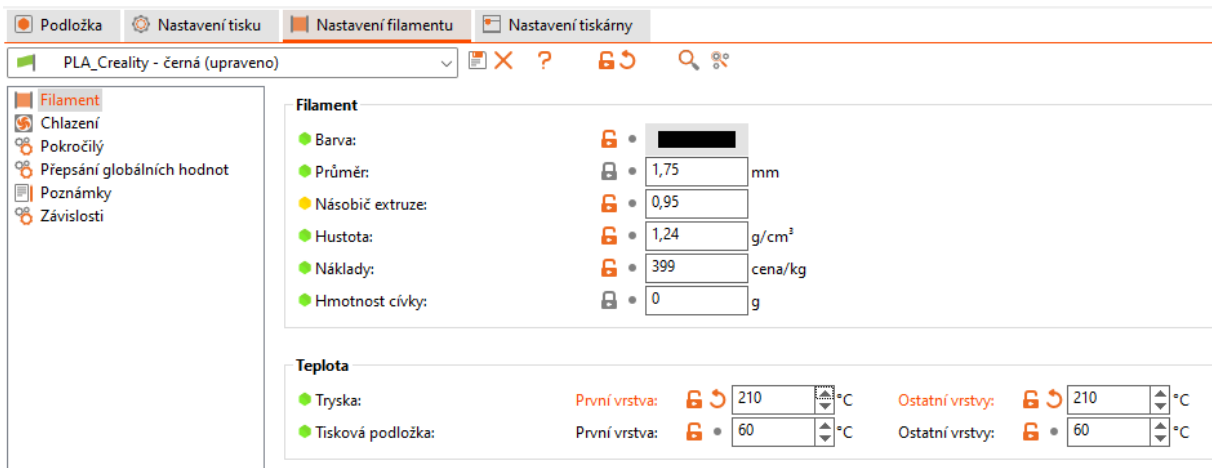
Netiskové rychlosti

- Rychloposun: 250 mm/s
- Posun v ose Z: 0 mm/s

Modifikátory

- Rychlost první vrstvy: 50 mm/s nebo %
- Rychlost první vrstvy objektu nad raftem: 30 mm/s nebo %

Obrázek 27: Nastavení rychlosti pro 3D tisk



Obrázek 28: Nastavení filamentu pro 3D tisk

5.1.4 Začištění a broušení modelu po 3D tisku

I když je 3D tisk velmi přesná technologie, na výtisku se objevily nedostatky, u větší hlavy došlo k malému posunutí jedné vrstvy, zároveň jsou slabě viditelné jednotlivé vrstvy 3D tisku. K opravení těchto drobností postačí ruční broušení pomocí smirkového papíru, který postačí i k sjednocení povrchu a jednotlivých vrstev 3D tisku. Ubírat materiál je možný pouze v tenké vrstvě, jelikož nesmí dojít k probroušení steny modelu a model musí mít uzavřený profil, z důvodu dalších technologických operací. [34]



Obrázek 29: Výsledné 3D modely vytisknuté na 3D tiskárně

5.1.5 Příprava a výroba rámu pro formu

Jelikož se bude odlévat do sádrové formy a umělecký odlitek má poměrně atypická tvar, není vhodné použít běžné univerzální formovací rámy. Pro větší odlitek se zkonstruuje formovací rám z plexisklových desek, slepených do tvaru kvádru. Rozměry této formy jsou limitující rozměry žíhací pece, kam se následně bude forma umísťovat. Rozměry otvoru použité pece jsou 50x30x25 cm. Výrobek velké hlavy má rozměry zabírající kvádr o rozměrech 30x23x18 cm, tloušťka stěny formy byla stanovena minimálně na 3 cm, výsledná forma bude mít tedy rozměry 35 x 30 x 25. Objem velké hlavy je přibližně 5 litrů, objem formy přibližně 20 litrů, na výrobu formy je tedy potřeba přibližně 15 litrů tekuté sádry.

Pro odlitky hlavy zmenšené o 50 % se použijí plastové nádoby válcového tvaru. Díky menšímu rozměru odlévaného modelu bude použito i menší množství sádry, zároveň rozměr formy nebude již tolik limitující rozměrem otvoru žíhací pece, a tedy lze udělat stěny tlustší. [22] [34]



Obrázek 30: Výroba a konstrukce formovacího rámu

5.1.6 Uchycení a příprava modelu do rámu

Plastový 3D model se přichytí pomocí lepení na dřevěné prkno, jako technologie lepení je použita tavná pistole. (obr.31) Tento lepený spoj má velmi nízkou pevnost, v tomto případě je to však žádoucí, protože v dalších krocích bude třeba plastový model opět oddělit od dřevěného prkna. Následně se model s dřevěným přípravkem umístí do formovacího rámu a zafixuje se.

Po umístění a připevnění modelu do formovacího rámu se celý model a vnitřek rámu vymaže mazadlem, aby se následně formovací rám a plastový model lehce oddělil od sádry. Jako mazadlo je použito starý olej určený k promazání strojů. Lze použít i například indulonu. Výhodné je předem na model připravit i průduchy, v podobě ocelových drátů o průměru 3 mm. Průduchy mají za úkol vytlačení vzduchu při zaplňování dutiny formy taveninou, umísťují se na vystouplá místa, kde by mohl vzduch ve formě zůstat. Vzhledem ke konstrukčnímu řešení budou použity tři průduchy, a to od pravého ucha, od levého ucha a od nosu. [34]



Obrázek 31: Uchycení, vložení pletiva a nanesení oleje na model a formovací rám

5.1.7 Výroba formy pomocí sádry

Když je formovací rám připravený a ošetřený včetně modelu, do formovacího se nalije tekutá sádra. Před samotným litím sádry se do obvodu formovacího rámy umístí pletivo, kvůli

zpevnění celé formy. Jako sádra je zvolena modelářská sádra od výrobce Roko. Připraví se tekutá směs v poměru 1:3 sádry ku vodě. Dle doporučení je však směs příliš řídká, bylo zjištěno, že více vyhovující poměr je 1:2 sádry ku vodě. Čím více sádry se přidává, tím je výsledná směs hustší, avšak také rychleji tuhne. Po rozmíchání směsi je třeba postupovat rychle a co nejdříve rozmíchanou tekutou sádrou nalít do formovacího rámu s modelem. Běžný postup lití sádry je po vrstvách, to znamená nejprve nalít sádrou například do jedné čtvrtiny formy a následným třesením se docílí dobré zabíhavosti. Dále se nalije další vrstva sádry a celý proces se opakuje. Je však důležité celou tuto operaci dělat velmi rychle, jelikož sádra v tomto poměru začíná tuhnout zhruba po osmi minutách a je nežádoucí ztuhnutí jednotlivých vrstev samostatně. Následně se forma nechá jeden týden vyschnout při pokojové teplotě, jakmile bude forma tuhá (ne však vysušená), odstraní se formovací rám, aby mohla vysychat ze všech stran, přestože na povrchu formy byla sádra již suchá, po odstranění formovacího rámu lze vidět, že uvnitř je stále velmi vlhká.

Z časových důvodů je nutné použít vysychání pomocí zahřátí v žíhací komorové peci. Stanovili se půlhodinové intervaly pro vydržení na teplotách 50 °C, následně 100 °C a následně 150 °C. Tyto intervaly se ukázali jako krátké, jelikož sádra byla stále pořád vlhká, intervaly proto budou změněny alespoň na hodinu pro každou jednotlivou teplotu. [34]



Obrázek 32: Odlité sádrové formy



Obrázek 33: Odstranění formovacího rámu pro lepší schnutí

5.1.8 Vytavení modelu a předehřátí formy

Jak bylo řečeno v teoretické části, předpoklad je roztavit PLA materiál na teplotu jeho tání. Teplota 260 °C je teplota, při které je PLA materiál při 3D tisku velmi tekutý, ještě se však nepřipaluje na trysku 3D tiskárny, tudíž tato teplota by byla vhodná k roztavení modelu. Tato metoda se však ukazuje jako nevyhovující, protože po nahřátí formy s modelem na tuto teplotu se PLA plast nestává tekutým a je stále tuhý a pevný. Proto zvýšíme teplotu na 400 °C, což je minimální teplota pro následný předehřev formy. Při ohřívání na tuto teplotu již začíná docházet k tavení plastu, plast však pouze odkapává ve formě malých kapek, tudíž tento proces by trval v řádu několika hodin, což je velmi nevýhodně a neekonomické. Naskytla se však nová varianta řešení vyndání modelu z dutiny formy, při ohřevu se plastový materiál začal stávat plastickým a ohebným, jeho vlastnosti si lze představit jako vlastnosti silikonu nebo gumy. Díky novým plastickým vlastnostem PLA plastu se začal materiál ztrácet i svou pevnost a lze snadno takzvaně trhat. Pomocí kleští a vhodných nástrojů se tedy model vyndá horní dutinou ve formě malých útržků. Následně se teplota zvýší na 450 °C, na této teplotě se forma nahřívá alespoň jednu hodinu.

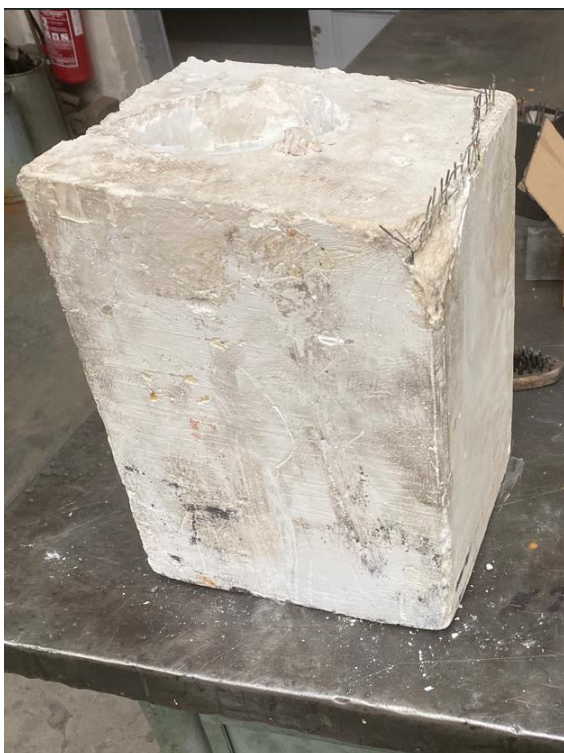
Při předhřívání poslední formy došlo k silnému popraskání a částečnému rozpadu formy. (obr.35, obr.37) [34]



Obrázek 34: Nahřívání v kalici komorové peci



Obrázek 35: Praskání a rozpad poslední sádrové formy



Obrázek 36: Předehřátá vysušená forma



Obrázek 37: Praskliny a pórovitost povrchu vnitřku formy

5.1.9 Odlití do formy

Licí teplota hliníku bude 670 °C. Roztavení hliníku v indukční kelímkové peci na požadovanou teplotou bude trvá přibližně 1-2 hodiny. Kvůli oxidaci na hladině roztaveného se přidá speciální směs kryolitu a chloridu sodného.(obr.38) Když je hliník roztavený na ideální teplotu, přichází na řadu samotné lití pomocí licí naběračky. Při lití do formy velkého modelu je potřeba lití pomocí dvou osob, jelikož se bude lít na více fází a je důležité lít materiál co nejrychleji a souvisle. Při lití do menších forem stačí lití z jedné licí naběračky, protože její objem je větší než objem odlitku. Kvůli lepší tepelné vodivosti a rozpadu formy se sádrová forma před samotným lití ještě takzvaně zahrabe do nádoby křemičitým pískem pro výrobu pískových forem. [2] [3] [34]



Obrázek 38: Přidávání soli kvůli oxidaci



Obrázek 39: Samotné lití roztaveného kovu do sádrové formy

5.1.10 Začištění a broušení

Po dostatečném zchladnutí odlitku se sádrová forma rozbije. Na odlitku se objevilo hodně výstupku a blán, z důsledku popraskání formy. Ve formě se při předehřívání na 450 °C začaly objevovat praskliny, kam následně zatekl roztavený hliník. Tvar odlitku však zůstal zachován, tudíž se pokračuje na závěrečné začišťovací operace. Velké praskliny a blány se odřezají pomocí úhlové brusky. Pomocí přímé elektrické brusky od společnosti Dremel se odstraní menší nedokonalosti a vyfrézují zaniklé detaily, jako struktura uší, očí a tak dále. (obr.44) Ukázalo se, že výhodnější je použít pneumatickou přímou brusku, jelikož díky vyšším otáčkám se materiál rychleji ubírá, zatímco u elektrické přímé brusky probíhalo ubírání materiálu velmi málo a pomalu.

Nakonec se zesponu odlitků do každého vyvrtá díra, a pomocí závitníku udělá závit, do kterého následně všroubovány háky kvůli následnému snadnému uchycení při lakování. Průměr a rozměr díry a závitu není důležitý. (obr.46) [34]



Obrázek 40: Ztuhlý odlitek po odlití



Obrázek 41: Rozbití sádrové formy



Obrázek 42: Malá odlitek se všemi vadami



Obrázek 43: Velký odlitek se všemi vadami



Obrázek 44: Frézování s přímou bruskou a doděláné detailů



Obrázek 45: Hotové odlitky před povrchovou úpravou

5.1.11 Tryskání

Po dokončovacích úpravách se umístí odlitky do tryskacího zařízení od společnosti S.A.F. Praha. Na ovládacím panelu se nastaví doba tryskání, dostatečné je zhruba 90 sekund. Po dokončení tryskání mají odlitky jednotný a celistvý povrch. [23] [34]



Obrázek 46: Vkládání do tryskacího zařízení

5.1.12 Moření

Na základě odborného posouzení odlitku po otryskání bylo vyhodnoceno, že vzhledem k materiálu odlitku není třeba použít proces moření, dostatečný bude oplach odmašťovací kapalinou. Odmašťovací kapalina je roztok látky izopropylalkohol. [34]



Obrázek 47: Odmašťování povrchu

5.1.13 Práškové lakování

Samotné lakování bude probíhat v lakovací stanici, kam se odlitky zavěsí pomocí přidělaného háku. Při lakování je třeba pistoli protřepávat, aby se zajistila homogenita směsi. Po nanesení se umístí nalakované výrobky do pece předeřáté na 180 °C. Následně se na této teplotě nanosený práškový povrch vytvrdí, doba vytvrzování je 20 minut. Při umísťování výrobků do pece se udržovaná teplota sníží, 20 minut je tedy třeba počítat od doby, kdy se pec znovu vyhřeje na 180 °C. Po vytvrzení se výrobky vyndají z pece a nechají vychladnout, chladnutí díky dobré absorpci tepla hliníku trvá v řádu několika hodin. Nakonec se vyndají háky pro uchycení výrobku. [34]



Obrázek 48: Prášková lakovací stanice



Obrázek 49: Nanášení práškového laku pomocí práškovací pistole



Obrázek 50: Vytvrzování práškového laku v peci



Obrázek 51: Prášková barva

5.1.14 Vyhodnocení kvality výrobku

Nyní je výrobek kompletně hotový. Jako poslední krok technologického postupu je jeho vyhodnocení. Jelikož se jedná o umělecký odlitek, nebyli zde žádné požadavky na přesné rozměry, tloušťku vrstvy laku, kvalitu povrchu a tak podobně. Z tohoto hlediska je tedy výrobek v pořádku.

Objevily se zde však i nedostatky. Kvalita celkového povrchu odlitku není příliš dobrá, vyskytlo se zde hodně bublin a nerovností v povrchu a povrch je na některých místech velmi porézni, dále došlo k malým deformacím některých částí busty, způsobené pravděpodobně přechozí deformací modelu nebo formy. Největší nedostatek se objevil v oblasti uší, kde téměř u každého odlitku chybí detailní struktura ucha. Došlo zde pravděpodobně ke stržení a zborcení formy při vytahování plastového modelu, což se tedy jeví jako nevhodný způsob vytahování modelu. Další nedostatek je odstín barvy, který je spíše šedý, než bronzový.

Původní plán byl ještě výrobek opravit pomocí tmelu a zatmelit všechny póry, aby se docílilo hladkého jednolitého povrchu. Tento krok se však již dělat nebude, jelikož tyto vady dodávají výrobku zajímavější a umělečtější vzhled.



Obrázek 52: Výsledný výrobek v porovnání s 3D plastovým modelem



Obrázek 53: Výsledný výrobek v porovnání s 3D plastovým modelem, přední strana



Obrázek 54: Porovnání výsledného výrobku, skenované osoby a plastového 3D modelu



Obrázek 55: Odlitek ze zborcené formy



Obrázek 56: Vady odlitku



Obrázek 57: Levé ucho velké hlavy



Obrázek 58: Pravé opravované ucho velké hlavy

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo primárně navrhnout a vyrobit umělecký odlitek, konkrétně bustu. Tento cíl práce se podařil splnit, během celého procesu se však objevilo mnoho dalších věcí a nedostatků. Při skenování se zjistilo, že použitý skener není vhodný pro skenování osob a vyplatilo by se použít dražší skener tomu určený. 3D tisk modelu proběhl bez komplikací, vhodnější by bylo však použití voskového filamentu a 3D model tisknout z vosku, nikoliv z plastu. I když je sádra běžně používaný materiál pro výrobu forem, tento materiál se jevil jako velmi křehký a při vystavení vyšší teplotě začal praskat. To však bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečným vysušením. Díky tomu také bylo třeba následně daleko větší čas na dokončovací operace, praskliny zároveň narušily některé detaily na modelu. Odstín výrobků po vytvrzení barvy je více tmavý a šedý, než byl plánovaný bronzový odstín, to bylo způsobeno špatným namícháním barvy od výrobce, kdy i když šlo o barvu s imitací patiny, byla i tak příliš tmavá a šedá. Dále by bylo tedy třeba navrhnout řešení, jak dosáhnout co nejvíce identického imitace bronzu a změnit směs prášku se zaměřením na pigment. V porovnání s tradičními metodami výroby uměleckých odlitků se tato metoda jeví jako ekonomická, avšak ne tak kvalitní.

7 Bibliografie

- [1] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. Základy strojírenské technologie I. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06056-8
- [2] BERNÁŠEK, Vladimír a František ČERNÝ. Technologie slévání, tváření a svařování. Plzeň: Fakulta strojní, 1996. ISBN 80 - 7082 - 100 - 0.
- [3] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. Technologie slévání. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-491-0.
- [4] 3D skener - EinScan SP. (n.d.). BOTLAND. <https://botland.cz/3d-skenery/14910-3d-skener-zarici-3d-einscan-sp-6970163088129.html>
- [5] Overview of SHINING3D's 3D technologies - SHINING 3D. (n.d.). SHINING 3D. <https://www.shining3d.com/about-us/>
- [6] SHINING3D is committed to promoting 3D scanners at a large scale. (n.d.). SHINING 3D. <https://www.shining3d.com/3d-digitizing-solutions/>
- 3d tisk
- [7] O mně - Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny. (n.d.). Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny. <https://josefprusa.cz/>
- [8] Creality Ender 5 Plus SkyShowtime na měsíc gratis! (n.d.). CZC.cz - rozumíme vám i elektronice. https://www.czc.cz/creality-3d-tiskarna-ender-5-plus/308017/produkt?gad=1&gclid=Cj0KCQjw6KunBhDxARIsAKFUGs_I57I9Qa0_0klgXdlxwxo4pzjMvZCyNFa0RjDG_ixPBLa1n7d3-uoaAnGdEALw_wcB
- [9] Nejlepší slicery 2022 - Sharplayers. (n.d.). [eshop.sharplayers.cz. https://eshop.sharplayers.cz/a/nejlepsi-slicery-2021](https://eshop.sharplayers.cz/a/nejlepsi-slicery-2021)
- [10] Jaké máme typy Slicerů – MakersLab | 3D tiskárny, 3d tisk Praha, firemní školení a workshopy. (n.d.). MakersLab | 3D tiskárny, 3d tisk Praha, firemní školení a workshopy. <https://makerslab.cz/slicer/>
- [11] Jak vybrat materiál pro 3D tisk - premo. (2022, May 12). ▷ PREMO | Jsme experty na tonery a inkousty do tiskáren. <https://www.premocz.eu/jak-vybrat-material-pro-3d-tisk>
- [12] MATERIÁLY FDM – 3D tisk-Online. (n.d.). 3D tisk-Online – 3D tisk pro každého. <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-prehled-materialu-pro-3d/>
- [13] PLA filamenty FDM tisk materialpro3d.cz. (n.d.). [materialpro3d.cz. https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/](https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/)
- [14] Instructables. (2017, October 29). Casting Aluminium With Lost PLA Investment Mold. <https://www.instructables.com/3D-Printed-Lost-PLA-Investment-Casting-Aluminium/>

- [15] ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU. (2009). Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [16] Ztracený vosk | Odlévání z bronzu | KEDAR Foundry. (n.d.). Ztracený vosk | Lost Wax Casting | KEDAR. <http://www.kedarfoundry.com/cs/odlevani-bronzu-na-ztraceny-vosk.html>
- [17] Lost Wax Casting Guide: Definition & Process [+ How To Start]. (n.d.). The Crucible. <https://www.thecrucible.org/guides/metalworking/lost-wax-casting/>
- [18] Pece pro slévárny | Realistic. (n.d.). Průmyslové pece | Realistic. <https://www.realistic.cz/pece-pro-slevarny>
- [19] Indukční ohřev (3) - Časopis Elektro - Odborné časopisy. (n.d.). Odbornecasopisy.cz. <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655>
- [20] Jak se provádí práškové lakování v lakovnách? | Sunsystem.cz. (n.d.). SUN SYSTEM | Stínící technika pro vás. <https://www.sunsystem.cz/novinky/jak-se-provadi-praskove-lakovani-v-lakovnach-/>
- [21] Prášková barva a její druhy. (n.d.). ALBIXON a.s. <https://www.praskovalakovna.cz/praskove-lakovani/druhy-barev/>
- [22] Sádra modelářská Roko bílá, 5 kg. (n.d.). Stavebniny DEK. https://www.dek.cz/produkty/detail/3616059806-sadra-bila-5kg?gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNtREdj9bGXPF2lZyKmduAOrcrci1GAYvwXpBKOhN27_tvAA0Fcd4Y25hoCX8gQAVD_BwE
- [23] Homepage SAF. (n.d.). SAF – Technologie pro tryskání, metalizaci a lakování. <https://saf.cz/>
- [24] O slévárenství | Odbor slévárenství. (n.d.). ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/uvod/o-slevarenstvi>
- [25] Dějiny umění, Ivana Hájková (n.d.). Střední škola obchodu a služeb.
- [26] Metal Technologies: History of Metal Casting. In: [online]. <http://www.metal-technologies.com/HistoryofMetalCasting.aspx>
- [27] HŘEBÍČEK, Lukáš. Název: Ověřování původních technologií pro výrobu uměleckých odlitek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 65s., 2 příloh. doc. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [28] Bronz | MetalCentrum s.r.o. (n.d.). Hutní materiály, mosaz, měď, bronz, hliník, ocel, nerez. <https://www.metalcentrum.cz/bronz/https://www.dekmake.com/cs/bronz-vs-mosaz/>
- [29] Bronz – Multimediaexpo.cz. (n.d.). Encyklopedie - Multimediaexpo.cz. <http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Bronz>
- [30] O bronzu | Bronz.cz. (n.d.). Bronz.cz | PLECHY, PÁSY, DRÁTY, TRUBKY, TYČE. <https://www.bronz.cz/o-bronzu/>

- [31] Zvonovina. Masarykova univerzita (n.d.). | Kov.
https://digilib.phil.muni.cz/_flysystem/fedora/pdf/121867.pdf
- [32] Umělecká litina - Oficiální stránka městyse Komárov. (n.d.). Městys Komárov - Oficiální stránka městyse Komárov. <https://www.ikomarov.cz/turistika/muzeum/umelecka-litina/>
- [33] Druhy litin, Anna smetanová (n.d.). Střední odborná škola a Střední odborné učiliště Kuřim | Web střední školy, na které jsou studenti vždy na prvním místě.
https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/12_Sada_Materialy_1/VY_32_INOVACE_12_07_Druhy_litiny.pdf
- [34] Citace na základě konzultace s odborníky, vlastních zkušeností nebo vlastních zdrojů
- [35] BEELEY, Peter R. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.
- [36] O slévárenství | Odbor slévárenství. (n.d.-b). ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE.
<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/uvod/o-slevarenstvi>
- [37] (n.d.-a). Aukční síň - Galerie umění.(n.d.-a).
https://galerieumeni.cz/www/files/image/auction/items/81_7129_1.jpg
- [38] Mosazná socha Šivy, 2,82 kg - GovindaButik.cz. (n.d.). GovindaButik.cz.
<https://govindabutik.cz/shop/siva-nataraj/1481-pan-siva-v-zehnajici-pozici.html>
- [39] Materiály.Festo. (n.d.). Hutní a nerezový materiál Olomoucký kraj | FESTO-ŠTODT s.r.o. https://www.stodt.cz/w/sablona/small/stodt/cache/hlinik_1600x900ms.jpg
- [40] Shining3D Einscan-SP V2 3D skener s točnou - 3D Manufaktura s.r.o. (n.d.). [eshop.3dmanufaktura.cz. https://eshop.3dmanufaktura.cz/shining-3d-einscan-sp-3d-skener-stocnou/?gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNtSk4wv0RVxdwDpww3ZqF2EKedVJsgYNK_PHLKpqqaHqGyJdoAFVlshoCRfoQAvD_BwE](https://eshop.3dmanufaktura.cz/shining-3d-einscan-sp-3d-skener-stocnou/?gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNtSk4wv0RVxdwDpww3ZqF2EKedVJsgYNK_PHLKpqqaHqGyJdoAFVlshoCRfoQAvD_BwE)
- [41] Shining 3D EinScan HX – R.E.D. Bundle balíček 3D skeneru a inženýrského softwaru - 3Dwiser. (n.d.). [eshop.3dwiser.com. https://eshop.3dwiser.com/3d-skenery/shining-3d-einscan-hx-r-e-d-bundle/?gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNtfSdjlR2XfRAJSAwoWdd57oYcJj5WV0tzLPGS59qq-C8W7WGxCbRxoChpwQAvD_BwE](https://eshop.3dwiser.com/3d-skenery/shining-3d-einscan-hx-r-e-d-bundle/?gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNtfSdjlR2XfRAJSAwoWdd57oYcJj5WV0tzLPGS59qq-C8W7WGxCbRxoChpwQAvD_BwE)
- [42] Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S+ | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši. (n.d.). Prusa3D by Josef Prusa.
https://www.prusa3d.com/cs/produkt/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s-3/?country=CZ¤cy=czk&gad=1&gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNtRhwHEBtDPvS8qPEecOWJ2ir8xm7YVzyu_hoFEzZBJzxvE__cFjArBoC2c8QAvD_BwE

- [43] Weiterleitungshinweis. (n.d.). Google.
<https://www.google.com/url?sa=i&url=http://www.sub.cz/mep-postrelmov/slevarna/gravitacni-liti-do-forem.aspx&psig=AOvVaw2ANBxS467DAf34PhLK3xcO&ust=1693463796925000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBAQjRxqFwoTCPCFsbLig4EDFQAAAAAdAAAAABAE>
- [44] Kalicí, žíhací a cementační pec pro náročné. (n.d.). Průmyslové pece a sušárny | Žárové betonové tvarovky LAC. <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/komorova-kalici-pec-pk>
- [45] Úhlová bruska, bruska na beton (elektrická) - GWS 7-125. (n.d.). Oficiální e-shop Bosch elektrické nářadí. https://bosch-shop.cz/products/uhlova-bruska-gws-7-125-professional?variant=43967819088038&gad=1&gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNteITyGMCdCWptrFeb5ORxBklw0gwRdkljlkqKcanLon3mdaS5T_AgRoCOP4QAvD_BwE
- [46] BScom s.r.o. (n.d.). Dremel 3000 series. https://www.bscom.cz/prima-bruska-dremel-3000-series-f-013-300-0jw_d1100745/
- [47] Parkside® příslušenství K Jemné Vrtací Brusce PDZ 276 ... lidl.cz – Vždy.Více.Online. (n.d.). https://www.lidl.cz/p/parkside-prislusenstvi-k-jemne-vrtaci-brusce-pdz-276-a2/p100341512?mktc=shopping&gclid=CjwKCAjwrranBhAEEiwAzbhNtXWv526EXv-rrXd-p4jEOiP5VfhD86bq4pV9jwj2aFhz1gDGTvyYXhoCgxYQAvD_BwE
- [48] Studio F13 - Webdesign & Design Studio [www.f13.cz]. (n.d.). Největší Prášková Lakovna v evropě S možností lakování a dekorování. Tvstav.cz - stavební portál. <https://tvstav.cz/clanek/2702-nejvetsi-praskova-lakovna-v-evrope-s-moznostmi-lakovani-a-dekorovani>
- [49] Vlastní fotografie autora.

8 Seznam obrázků

Obrázek 1: Nálezy odlitků vyrobené pomocí metody vytavitelného modelu, v závislosti na čase a místě [35].....	14
Obrázek 2: Ukázka technologie výroby odlitků v Egyptě, přibližně 1500 let před našim letopočtem [36].....	14
Obrázek 3: Ukázka bronzového odlitku sochy [37]	15
Obrázek 4:Ukázka mosazného odlitku sochy [38]	17
Obrázek 5: Ukázka hliníkového odlitku [39].....	17
Obrázek 6: 3D skener EinScan SP [40]	21
Obrázek 7: 3D skener EinScan HX [41]	21
Obrázek 8: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [42]	22
Obrázek 9: Gravitační lití do pískové formy, za použití formovacích rámu [43].....	25
Obrázek 10: Kalící komorová pec [44]	28
Obrázek 11: Úhlová bruska od společnosti Bosch [45]	30
Obrázek 12: Přímá bruska od společnosti Dremel [46]	30
Obrázek 13: Nástroje pro přímou brusku [47]	33
Obrázek 14: Tryskací zařízení od společnosti S.A.F. Praha [49].....	31
Obrázek 15: Ukázka automatizované práškové lakovny s pohyblivým závěsným pásem [49]	33
Obrázek 16: Ošetření vlasů proti lesku a jejich sjednocení	35
Obrázek 17: 3D skener EinScan SP umístěný na stativu a program pro skenování	36
Obrázek 18: Naskenovaný 3D model pomocí skeneru EinScan SP.....	36
Obrázek 19: Naskenovaný 3D model pomocí mobilní aplikace PolyCam.....	37
Obrázek 20: Vyjmutí vlasů ze skenovaného 3D modelu (mobilní aplikací PolyCam) pomocí programu Blender [49].....	37
Obrázek 21: Spojování dvou 3D skenů (ze skeneru EinScan a mobilního skeneru PolyCam) do jednoho skenu v programu Blender [49]	38
Obrázek 22: Simulace 3D tisku v programu PrusaSlicer [49]	38
Obrázek 23: Tisknutí velkého modelu na 3D tiskárně Mercury One [49]	38
Obrázek 24: Nastavení vrstev a parametrů pro 3D tisk [49]	39
Obrázek 25: Nastavení výplně pro 3D tisk [49]	39
Obrázek 26: Nastavení podpěr pro 3D tisk [49]	40

Obrázek 27: Nastavení rychlosti pro 3D tisk [49]	40
Obrázek 28: Nastavení filamentu pro 3D tisk [49]	41
Obrázek 29: Výsledné 3D modely vytisknuté na 3D tiskárně [49]	41
Obrázek 30: Výroba a konstrukce formovacího rámu [49]	42
Obrázek 31: Uchycení, vložení pletiva a nanesení oleje na model a formovací rám [49].....	43
Obrázek 32: Odlité sádrové formy [49]	44
Obrázek 33: Odstranění formovacího rámu pro lepší schnutí	45
Obrázek 34: Nahřívání v kalici komorové peci [49]	46
Obrázek 35: Praskání a rozpad poslední sádrové formy [49]	46
Obrázek 36: Přehřátá vysušená forma [49]	47
Obrázek 37: Praskliny a pórovitost povrchu vnitřku formy [49]	47
Obrázek 38: Přidávání soli kvůli oxidaci [49]	48
Obrázek 39: Samotné lití roztaveného kovu do sádrové formy [49]	48
Obrázek 40: Ztuhlý odlitek po odlití [49]	49
Obrázek 41: Rozbití sádrové formy [49]	49
Obrázek 42: Malá odlitek se všemi vadami [49]	49
Obrázek 43: Velký odlitek se všemi vadami [49]	49
Obrázek 44: Frézování s přímou bruskou a dodělání detailů [49]	50
Obrázek 45: Hotové odlitky před povrchovou úpravou [49]	50
Obrázek 46: Vkládání do tryskacího zařízení [49]	51
Obrázek 47: Odmašťování povrchu [49]	51
Obrázek 48: Prášková lakovací stanice [49]	52
Obrázek 49: Nanášení práškového laku pomocí práškovací pistole [49]	52
Obrázek 50: Vytvrzování práškového laku v peci [49]	52
Obrázek 51: Prášková barva [49]	52
Obrázek 52: Výsledný výrobek v porovnání s 3D plastovým modelem [49]	53
Obrázek 53: Výsledný výrobek v porovnání s 3D plastovým modelem, přední strana [49].....	54
Obrázek 54: Porovnání výsledného výrobku, skenované osoby a plastového 3D modelu [49]	54
Obrázek 55: Odlitek ze zborcené formy [49]	55

Obrázek 56: Vady odlitku [49]	55
Obrázek 57: Levé ucho velké hlavy [49]	55
Obrázek 58: Právě opravované ucho velké hlavy [49]	55

..

9 Přílohy

1 ks hotového výrobku busty ve velikosti 1:1

3ks hotového výrobku busty ve velikosti zmenšené o 50%

1ks plastového 3D modelu zmenšené o 50%