



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH A VÝROBA PROTOTYPOVÉHO ZNAKU ZA VYUŽITÍ TECHNOLOGIÍ REVERSE ENGINEERING A RAPID PROTOTYPING

DESIGN AND PRODUCTION OF PROTOTYPE BADGE USING TECHNOLOGY REVERSE ENGINEERING  
AND RAPID PROTOTYPING

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Benáček

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný, Ph.D.

BRNO 2019



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Filip Benáček**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Slaný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh a výroba prototypového znaku za využití technologií Reverse Engineering a Rapid Prototyping**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se zaměřuje na vytvoření originálního předního znaku na osobní automobil, kde bude jako podklad sloužit znak originální a na něm bude vytvořena nová geometrie, které bude vycházet z 3D naskenovaných dat. Práce k realizaci předpokládá využití technologie Reverse Engineering a Rapid Prototyping, zejména pro pořízení scanu, následného postprocesingu a vytvoření nového originálního tvaru, který bude navržen na kusovou výrobu.

#### **Cíle bakalářské práce:**

- Popis problematiky.
- Pořízení a zpracování 3D scanů nezbytných pro další práci.
- Vytvoření CAD modelu, který slučuje pořízené scany.
- Navržení vhodné technologie pro výrobu Master modelu.
- Návrh kusové výroby.
- Ekonomické zhodnocení zvolené metody.

#### **Seznam doporučené literatury:**

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford University Press, 2005. pp. 651. ISBN 0-19-514206-3.

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno: CERM, 2006. 230 s. ISBN 80-214-2374-9.

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

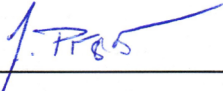
SEDLÁK, J. a PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.

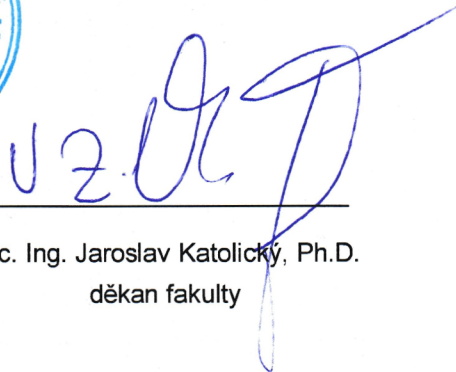
ROZKOŠNÝ, L. Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. [online]. Únor 2008. [cit. 20.01.2019]. Dostupné na World Wide Web: <[https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/jak-vyrobit-plne-funkcni-kovove-dily-primo-z-3d-cad-dat\\_13953.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/jak-vyrobit-plne-funkcni-kovove-dily-primo-z-3d-cad-dat_13953.html)>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Práce se zaměřuje na návrh kusové výroby automobilového znaku. Ve znaku se kombinuje geometrie z výchozích objektů. Tyto objekty byly převedeny do digitální podoby metodou reverzního inženýrství a následně spojeny v příslušném softwaru. Získaný model znaku byl vyroben technologií Rapid Prototyping. Tento model nadále posloužil k výrobě formy. Kusová výroba znaku byla zajištěna gravitačním odlitím epoxidu do formy.

**Klíčová slova**

Reverzní inženýrství, Rapid Prototyping, automobilový znak, silikonová forma

**ABSTRACT**

The work focuses on the design of piece production of the car character which combines geometry of the primary objects. These objects were converted into digital form by reverse engineering and subsequently merged using the appropriate software. The acquired model of the character was made by Rapid Prototyping technology and let to making the mold. Piece production of the character was ensured by gravity casting of the epoxide into the mold.

**Key words**

Reverse engineering, Rapid Prototyping, car character, silicone mold

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BENÁČEK, Filip. *Návrh a výroba prototypového znaku za využití technologií Reverse Engineering a Rapid Prototyping* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117228>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Martin Slaný.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh a výroba prototypového znaku za využití technologií Reverse Engineering a Rapid Prototyping** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Filip Benáček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Velký dík patří vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Slanému, Ph.D. za užitečné rady a pomoc při výrobě znaku. Jeho rady byly vždy cenné a přínosné. Dále doc. Ing. Josefu Sedlákovvi za vytištění 3D modelu.



**OBSAH**

ABSTRAKT .....	5
PROHLÁŠENÍ.....	7
PODĚKOVÁNÍ.....	8
OBSAH.....	9
ÚVOD.....	10
CÍLE PRÁCE.....	11
1 PRINCIP VYUŽITÝCH TECHNOLOGIÍ.....	12
1.1 Rapid Prototyping .....	12
1.1.1 Metody Rapid Prototyping.....	12
1.1.2 Materiály pro 3D tisk .....	19
1.2 Reverse Engineering .....	21
1.2.1 Digitalizace .....	22
1.2.2 Zařízení pro digitalizaci .....	22
2 NÁVRH A VÝROBA VLASTNÍHO AUTOMOBILOVÉHO ZNAKU.....	25
2.1 Digitalizace součástí .....	25
2.2 Úprava naskenovaných dat .....	27
2.3 Tvorba objemového tělesa .....	28
2.4 3D tisk znaku .....	30
2.5 Výroba formy.....	31
2.6 Výroba a následná úprava výrobku .....	34
2.7 Ekonomické zhodnocení výroby .....	36
ZÁVĚR .....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	41
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	42
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	43
SEZNAM TABULEK .....	45

## ÚVOD

Automobilový průmysl se za poslední dobu výrazně změnil. Před několika lety byly automobily vyráběny ve velkých sériích v několika provedení. Dnes je kladen důraz na konkrétní požadavky zákazníka a v mnohých případech je nový vůz modifikován přesně zákazníkovi na míru. Tomu se musí přizpůsobovat i výroba. Při požadavku na okamžitou výrobu prototypu je výhodné použít technologie Rapid Prototyping. Když je pro výrobu podkladem již fyzická součást, která vyžaduje jistou inovaci či výrazné změny geometrie, je na místě postupovat podle metody reverzního inženýrství.

Rapid Prototyping neboli 3D tisk je z hlediska samotné výroby časově náročná technologie. Z hlediska příprav výroby se ale jedná o technologii, která dokáže rychle reagovat na výrobu nové prototypové součásti. Mezi její výhody patří přesnost vytištěné součástky a možnost vyrobit téměř jakýkoli tvar. Použitý materiál se volí na základě požadavků na vlastnosti součásti. Technologie Rapid Prototyping je velice rozšířená nejen ve strojařské sféře. Své využití stále více uplatňuje v medicíně.

Díky metodě reverzního inženýrství je možnost obnovit výrobu součásti, od které už není dostupná výkresová dokumentace. Další možnost je začít výrobu úplně nové součásti, která vychází z tvaru fyzického modelu. Vše záleží na úpravě modelu získaného z digitalizace neboli převedení dat do digitální podoby.

## **CÍLE PRÁCE**

- Popis problematiky
- Pořízení a zpracování 3D skenů nezbytných pro další práci
- Vytvoření CAD modelu, který slučuje pořízené skeny
- Navržení vhodné technologie pro výrobu Master modelu
- Návrh kusové výroby
- Ekonomické zhodnocení zvolené metody

# 1 PRINCIP VYUŽITÝCH TECHNOLOGIÍ

První kapitola představuje teoretické řešení problému, technické vybavení a alternativní metody pro dosažení cíle. Je zde uveden princip technologie Rapid Prototyping, pomocí které bude probíhat výroba Master modelu znaku. Vytvoření vlastního automobilového znaku je vhodné realizovat metodou reverzního inženýrství.

Pro návrh a následující produkci tvarově složité součásti je výhodné použít technologii Rapid Prototyping. Tato technologie se využívá zejména při vývoji nové součásti, kdy je potřeba prototypu. Díky fyzickému prototypu je možno posuzovat smontovatelnost, vzhled, aerodynamiku anebo může tento model působit v představení nového výrobku zákazníkům. [1, 2]

Pro vytvoření 3D modelu v CAD systému je zapotřebí využít procesu Reverzního inženýrství. V tomto procesu je využito technologií, které dokáží naměřit data v relativně krátkém čase než konvenční postupy měření. Je možno naskenovat libovolně složitý tvar. Čím je tvar skenované součásti složitější, tím více se vyplatí využít této metody. [1]

## 1.1 Rapid Prototyping

Rapid Prototyping je velice výhodná technologie ve sféře výzkumu a vývoje nových součástí. Využívá se k výrobě prototypové součásti. Ve výsledku urychluje vývojovou etapu nové součásti. Během krátké doby lze vytvořit komplikovaný tvar, který by bylo obtížné vyrobit a v některých případech nemohl být vyroben vůbec na konvenčních strojích při třískovém obrábění. Pomocí Rapid Prototypingu lze zhotovit zmenšený model součásti, který získá uplatnění v marketingu. [1, 2]

Tato technologie navazuje na 3D modelování. Je potřeba mít prostorový virtuální model vytvořený ve vhodném 3D programu. Potřebná vstupní data jsou ve formátu \*.stl. Základním principem technologií Rapid Prototyping je opakované nanášení materiálu po vrstvách konstantní tloušťky. Mezi nejnovější a nejmodernější technologie Rapid Prototyping patří 3D tisk na principu inkoustových tiskáren. Hlavní částí této tiskárny je tisková hlava. V ní jsou umístěny trysková tělesa. Tyto tělesa zajišťují přísun stavebního materiálu na kovovou platformu. Podporový materiál je přiveden dalšími tryskovými tělesy. Po skončení tisku se snadno odstraní z hotové součásti pomocí proudu vody. Další důležitou součástí je UV lampa, která má za úkol vytvrzovat právě nanesenou vrstvu. [1, 2, 3]

### 1.1.1 Metody Rapid Prototyping

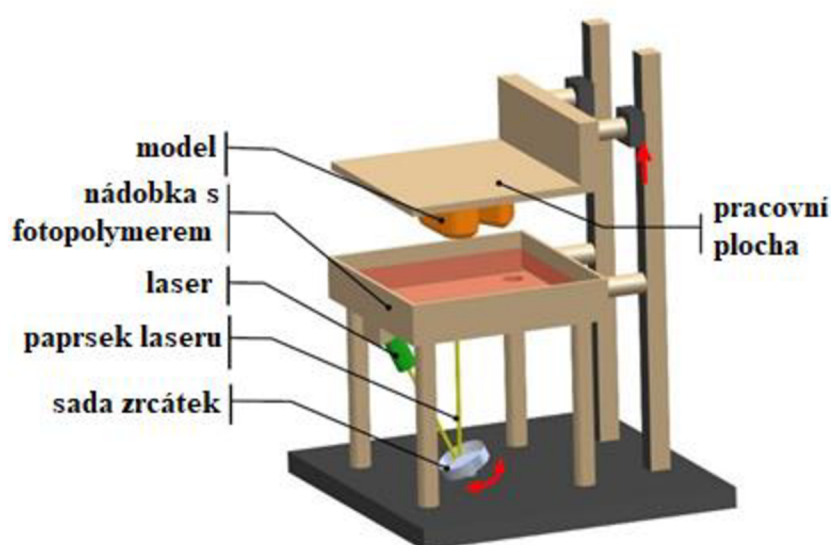
- SLA (Stereolitografie)

Stereolitografie je jedna z nejstarších metod Rapid Prototypingu. Vzniká velmi přesná prototypová součást. Vytisknutý model dosahuje přesnosti pohybující se v rozmezí 0,05 až 0,2 mm na 100 mm délky. Často se tato metoda používá jako prostředek k vytvoření nástroje či formy. Také se využívá v automobilovém průmyslu, kde se používá k výrobě modelů aut. Při použití epoxidové pryskyřice, jako stavebního materiálu, je možné kvalitní dokončení povrchu. Využívá se jemné broušení, pískování nebo třeba dokonalé vyleštění, které vede

k velice dobrému povrchu. Při dobrém povrchu vytištěné součásti vzniká také kvalitní forma. [1, 3, 4]

Metoda pracuje na dvou základních principech. V prvním případě je pracovní plocha postupně ponořována do fotopolymery. Vždy se ponoří o velikost jedné vrstvy. Výsledný model je postupně vytvrzován na pracovní ploše pomocí laserového paprsku. Laserový paprsek působí z horní části zařízení. [5]

Druhý princip začíná úplným ponořením pracovní plochy do fotopolymery. Model vzniká postupným vytvrzováním vrstev pomocí UV záření. Laserový paprsek je přiveden ze spodní části zařízení a prochází přes nádobu s fotopolymery. Schematicky je metoda zobrazena na Obrázku 1. [5]



Obrázek 1: Schematické zobrazení Stereolitografie [5].

Opticko-laserový systém bývá složen z plynového či pevnolátkového laseru, čoček a soustavy zrcadel. Zrcadla usměřují paprsek do místa vytvrzování. Celý proces je kontrolován počítačem v řídicí jednotce. Podpory vznikají ze stejného materiálu jako výsledná součást. Jsou ale na nosné desce orientovány ke snadnému odstranění po skončení tisku. [1, 3]

**Výhody:** možnost zhotovení objemnějších modelů, výborná přesnost a jakost povrchu, vyrobiteľnosť tenkých stěn a malých otvorů, široký výběr materiálu, plynulý průběh procesu a skutečnost, že není potřeba obsluhy během procesu [1, 2, 5]

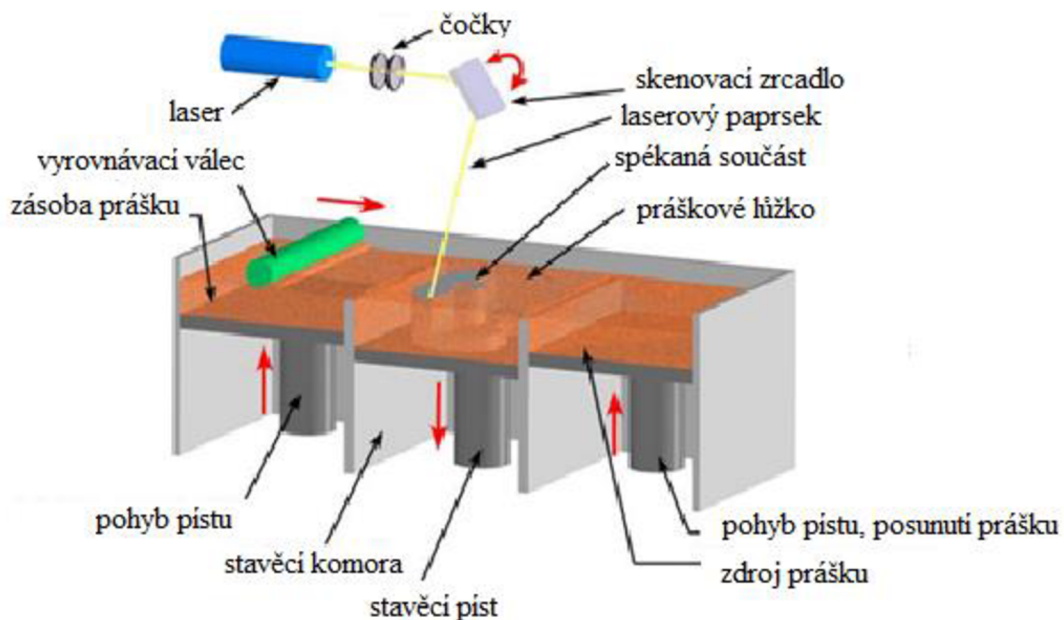
**Nevýhody:** toxické vlastnosti fotopolymery, malá tepelná odolnost modelu, nutná úprava povrchu modelu po ukončení tisku a následné sušení [1, 2, 5]

- SLS (Selective Laser Sintering)

Výroba modelů je podobná jako u SLA (Obrázek 2). Může se zde použít materiál jako je termoplast nebo kov. Výsledná součást má lepší mechanické vlastnosti a také vysokou teplotní odolnost. Je tedy možné vyrábět funkční prototypy. Materiál bývá ve formě velmi jemného prášku, který je natavován teplem vygenerovaným z CO<sub>2</sub> laseru. Intenzita laserového paprsku je řízena řídicí jednotkou tak, aby byl přímo v požadovaném místě materiál spečen. Jako podpůrný materiál slouží nespečený prášek v komoře. Ten je jednoduše odstraněn po ukončení tisku. Dále je v komoře inertní plyn (obvykle dusík). Plyn zabraňuje oxidaci. V komoře je také vertikálně posuvná deska. Na ní je vždy nanášena vrstva prášku na každou vrstvu. Na závěr je nutné nechat součást vychladnout. [1, 3, 4]

**Výhody:** vynikající pevnost, součásti nepotřebují podpory a vyžadují minimální post-processing, velký výběr materiálů včetně kovových, nízká cena materiálu [1, 2, 5]

**Nevýhody:** prostorově a energeticky náročné zařízení, kvalita povrchu je v porovnání s ostatními metodami poměrně nízká kvůli velikosti prachových částic vstupního materiálu, nutnost dokončovací operace pro odstranění podpůrné struktury, otryskání povrchu, broušení a leštění [1, 2, 5]



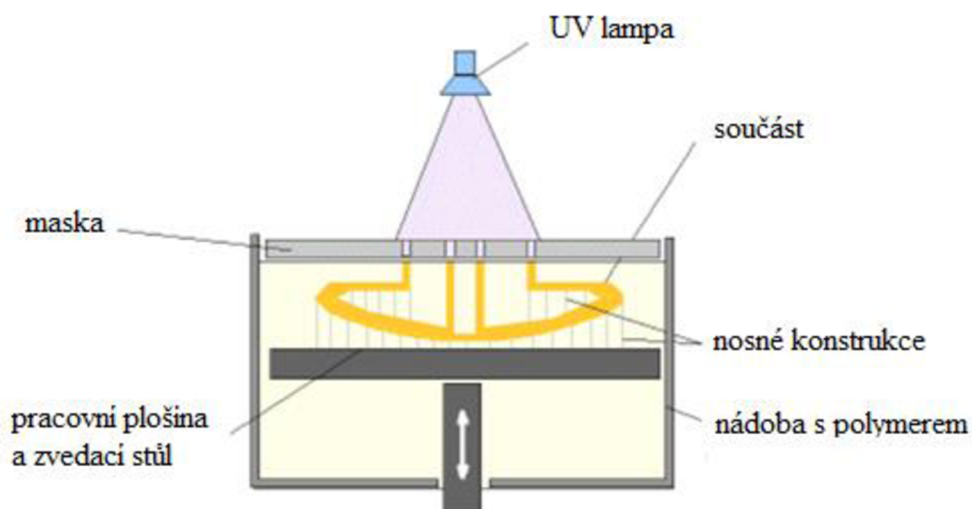
Obrázek 2: Selective Laser Sintering [6].

- SGC (Solid Ground Cutting)

Princip je velice podobný metodě SLA (Obrázek 3). Rozdíl je ve skutečnosti, že se vrstva nanesené pryskyřice vytvrzuje celá najednou. K vytvrzení je v zařízení obsažena UV lampa. Po skončení kroku vytvrzení je zbylá nevytvrzená pryskyřice vakuově odsáta. Na místo odsáté pryskyřice je přiveden roztavený výplňový vosk, který slouží jako podpora další vrstvě. Tímto způsobem se vystaví celý model. V některých případech se dodatečně vytvrzuje celá součást pomocí UV lampy. Podpory ve formě vosku se na závěr odstraňují ponořením do kyseliny citrónové, která vosk rozpouští. [1, 6]

Tato metoda se používá pro posuzování designu, funkce a smontovatelnosti strojních součástí. Je vhodná pro prezentování nových výrobků na trhu nebo pro zakázkovou výrobu chirurgických pomůcek v medicíně. [6]

- Výhody: dobrá struktura modelu, minimální smrštění modelu po procesu, nevzniká žádný zápach při procesu [1]
- Nevýhody: usazeniny vosku, tvorba odpadu, hlučnost zařízení, velké rozměry zařízení [1]



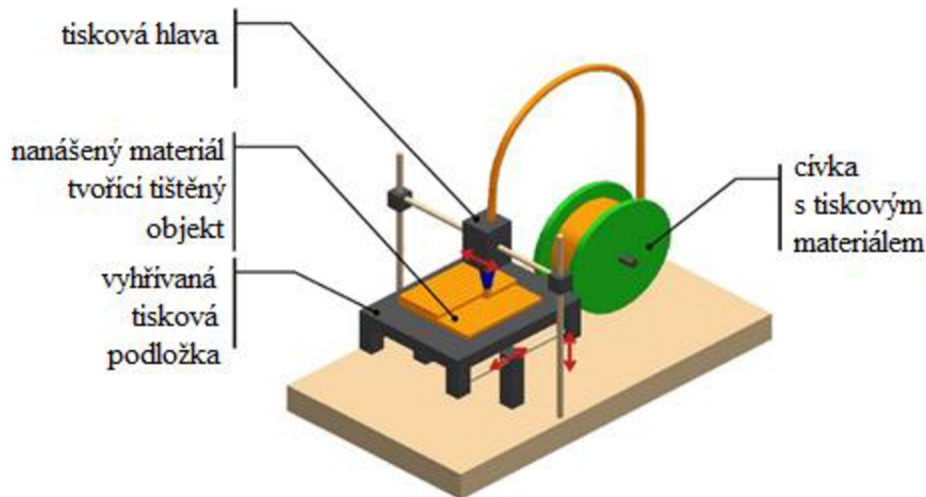
Obrázek 3: Solid Ground Cutting [6].

- FFF/FDM (Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modeling)

Označení FDM je velice rozšířené, ale znamená prakticky to samé, co technologie FFF. Rozdíl je v tom, že FDM je registrovaná ochranná značka společnosti Strasys a pod označení FFF ji používají ostatní výrobci. [6]

Princip výroby modelu je opět ve vrstvení materiálu. Zde však dochází k nanášení roztaveného materiálu v tenké vrstvě pomocí trysky. Tryska je pohyblivá

v osách X a Y. V ose Z se pohybuje platforma, na které je umístěn model. Schematickou konstrukci zařízení lze vidět na Obrázku 4. V procesu je využito dvou materiálů: stavební a podpurný. Podpory jsou z modelu odstraněny chemicky na konci procesu. Do zařízení je přiveden materiál ve formě drátu, který je navinutý na cívkách. Jsou zde tedy dvě cívky, jedna se stavebním materiálem a druhá s materiálem podpor. [1, 4, 6]



Obrázek 4: Fused Deposition Modeling [5].

Výsledný model má dobré mechanické vlastnosti a vysokou teplotní odolnost. Dále je tu možnost součástí obrábět a povrchově upravovat pro dobrý vzhled. Součásti vyrobené touto technologií se používají pro přípravu formy či nástroje, pro testování funkčnosti nebo k posouzení designu. [1, 4]

Z finančního hlediska není výhodná výroba více kusů díky delším časům na tisk. Nejčastěji se tiskne jediný prototyp, který podstoupí požadované zkoušky. Při použití materiálu ABS je testování funkčnosti velice směřodonné, jelikož má téměř stejné mechanické vlastnosti jako sériově vstříkovaný ABS. [1, 4]

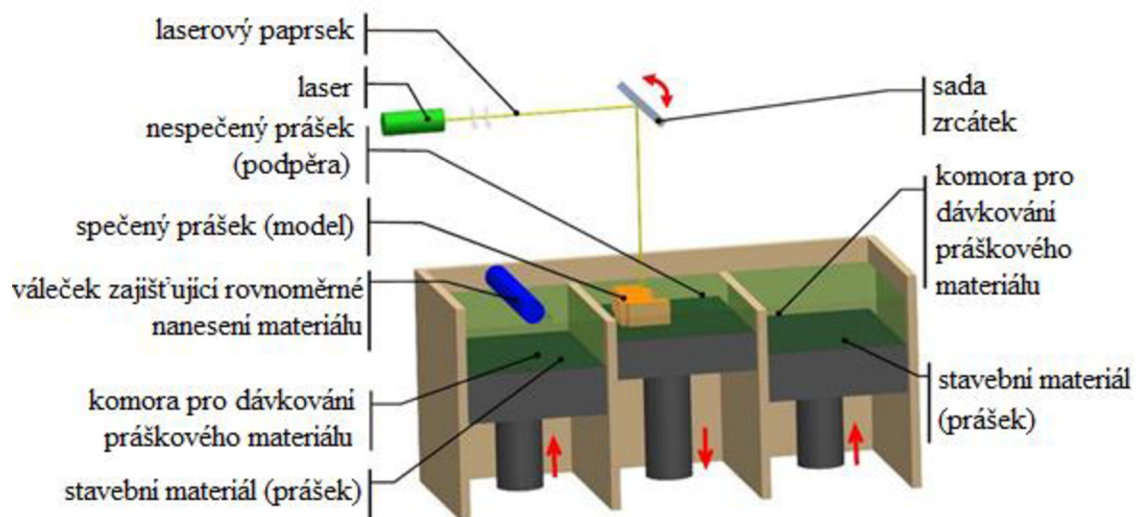
- Výhody: výroba funkčních prototypů s dobrými mechanickými vlastnostmi, vysoká teplotní odolnost, minimální odpad (jediný odpad je materiál podpor), nepřítomnost škodlivých emisí [1, 2, 4]
- Nevýhody: náročné povrchové úpravy, nižší přesnost, delší časy tisku, smrštění během chlazení, model nemá stejné mechanické vlastnosti v různých směrech [1, 2, 4]



- DMLS (Direct Laser Sintering)

Tato metoda využívá postupného tavení malých vrstev pomocí laserového paprsku. Princip je stejný jako u metody SLS. Zde je však potřeba podstatně vyšší teplota na přetavení kovového prášku. Nastavení tloušťky vrstvy na začátku procesu ovlivňuje přesnost modelu, ale i rychlost tisku. Čím je vrstva menší tím je výsledná součást přesnější ale zároveň je třeba více času na vytištění a naopak. Dále je možnost nastavení různých vlastností (pórovitost, homogenita...) a také materiálu. [1, 5]

Model součásti je vystavován na ocelové platformě. Materiál ve formě prášku je přiváděn dávkovacím zařízením pro každou vrstvu zvlášť. Následuje rovnoměrné rozprostření prášku na požadovanou tloušťku vrstvy pomocí ramena s keramickým břitkem. Laserový paprsek je zaměřován ovládacím softwarem do místa, kde má být prášek lokálně roztaven. Postupně po vrstvách je vystavěn celý model. Teplo z roztaveného materiálu je dobře odváděno ocelovou platformou. Díky tomu materiál tuhne velmi rychle. Pracovní komora bývá pro většinu materiálů vyplněna dusíkem. Tak je součást chráněna vůči oxidaci. Metoda je schematicky znázorněna na Obrázku 5. [1]



Obrázek 5: Direct Laser Sintering [5].

Metoda DMLS produkuje plně funkční prototypy s vysokou přesností. Dále je velice ekonomická, protože veškerý nespotebovaný prášek je znovu používán. Metoda však vyžaduje dokončovací operace jako odstranění podpůrné struktury, tryskání, broušení, leštění nebo obrábění. [1, 6]

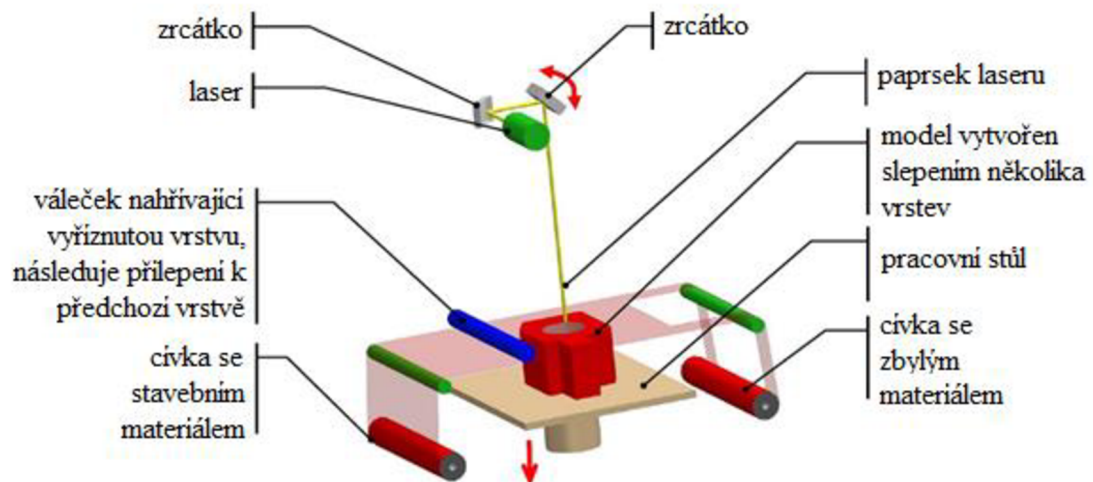
Výhody: výborná pevnost, kvalitní povrch, velká nabídka materiálů, minimální post-procesing, výroba složitých tvarů bez použití podpor [1, 5]

Nevýhody: prostorově a energeticky náročné zařízení, vysoká cena 3D tiskárny [1, 5]

- LOM (Laminated Object Manufacturing)

Vyrobená součást touto technologií se skládá z několika vrstev fólií. Tyto fólie jsou z jedné strany nanесeny lepivým nátěrem, který je spojuje s předchozí vrstvou. Z takto vzniklého bloku materiálu je laserem vyřezán tvar požadované součásti. Fólie bývají z materiálů jako papír, plast nebo keramika. Jednotlivé vrstvy fólie jsou vždy větší, než je třeba, aby přesahovaly přes konečný model. Při jejich spojování na ně působí přítlak válce, který je zahřátý cca na 330 °C. Tato teplota je pro aktivování lepicí složky. Hotovou součást je třeba oddělit od nosné desky pomocí tenkého drátu či dláta. Jako podpurný materiál zde slouží oddělená část vrstev od modelu, kterou je nutné odstranit po skončení procesu. Na závěr se součást brousí, leští i barví. Lze využít i technologie frézování nebo soustružení. Důležitý krok je pokrýt povrch součásti silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem. To zabrání vsakování vlhkosti do součásti, které by vedlo ke zvětšování objemu. [1, 6]

Další možnost postupu je vyříznutí každé vrstvy před samotným přilepením. V tomto případě je fólie s materiálem převijena z jedné cívky na druhou. Na pracovní ploše je pomocí laseru vyřezávána požadovaná vrstva a následně je přilepena k předchozí vrstvě (Obrázek 6). [5]



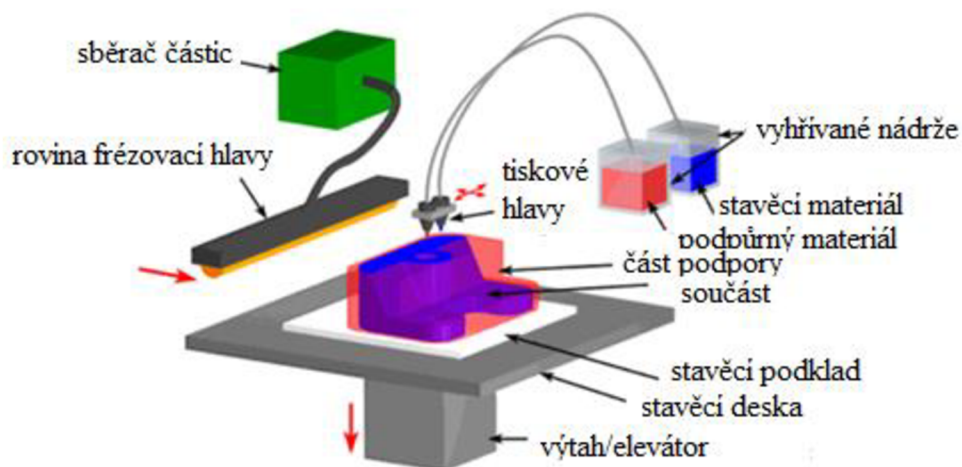
Obrázek 6: Laminated Object Manufacturing [5].

- Výhody: lze použít různé materiály jako fólie, velká rychlost tvorby modelu, protože je materiál řezán po každé vrstvě, je to velmi přesná metoda, žádná zbytková pnutí [1]
- Nevýhody: komplikované řízení intenzity laserového paprsku (je důležité nenarušit předchozí řezanou vrstvu), není vhodné pro tenké stěny, hrozí poškození modelu před odstraňování podpór, vznikají nežádoucí výpary [1, 2]

- MJM (Multi Jet Modeling)

Jedná se o nanášení materiálu pomocí speciální tiskové hlavy, která je vybavena 352 tryskami. Tak je zaručeno rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Trysky postupně nanášejí termopolymer na jednotlivé vrstvy. Díky obslužnému softwaru je možnost nastavit potřebnou tloušťku vrstvy a další parametry. Tisková hlava se pohybuje v osách X a Y. Základní deska, na které je umístěn model, je postupně posouvána o tloušťku vrstvy v ose Z. Detailnější znázornění zařízení je na Obrázku 7. [1, 6]

- Výhody: jednoduché řešení, ekonomická výroba, výhodný čas na výrobu, nepřítomnost škodlivých emisí, tenké vrstvy materiálu [1, 2]
- Nevýhody: určeno pro menší součásti, malá přesnost, omezená volba materiálu, model nemá stejné mechanické vlastnosti v různých směrech [1, 2]



Obrázek 7: Multi Jet Modeling [6].

### 1.1.2 Materiály pro 3D tisk

Rozdělení:

1. Na bázi fotopolymerů – stavba prototypové součásti probíhá v prostředí obsahující pryskyřici. Vytvrzení probíhá postupně pod hladinou. Využívají metody SLA a SGC. [1]
2. Na bázi práškových materiálů – využití jemného prášku. Využití u metod SLS a DMLS. [1]
3. Na bázi tuhých materiálů – výsledné vlastnosti modelu jsou ovlivněny volbou materiálu, který je v tuhé fázi. Metody LOM, FDM a MJM. [1]

Konkrétní materiály ve formě struny – tuhé materiály (Obrázek 8):

- PLA – je to nejuniverzálnější materiál pro technologii FDM. Vlastnosti PLA jsou velká pružnost a vysoká tvrdost. Materiál při tavení má minimální zvětšení objemu, proto má minimální sklon ke kroucení. Při velmi nízkých teplotách si součást zachovává dostatečnou pevnost. Nevýhoda materiálu je pohlcování vzdušné vlhkosti, která způsobuje změny v objemu. [7]
- ABS – velice využívaný materiál odolný vůči mechanickému poškození. Odolává teplotním změnám, kyselinám, hydroxidům i mastnotám. Je houževnatý, málo nasákavý a zdravotně nezávadný. Vyrábí se z něj funkční vzorky či hotové součásti. Mezi jeho nevýhody patří škodlivý zápach, jelikož je vyroben z ropy. Smršťování součásti při tisku, které se může napravit pomalým ochlazováním modelu. Základní deska se preventivně nahřívá. Vyrobená součást z materiálu ABS špatně snáší povětrnostní podmínky. [7]



Obrázek 8: Struna s materiálem do 3D tiskárny [7].

Další používané tuhé materiály:

3DXNANO – elektrická vodivost

ASA – alternativní k materiálu ABS

CPE – odolný materiál

ESD – elektrotechnika

HIPS – pro velké součásti, nedochází ke kroucení materiálu

PC – pro namáhané součásti

PEEK – zachování mechanických vlastností až do 250 °C

PET – bezbarvý, tvrdý materiál

Nylon (PA) – funkční součásti

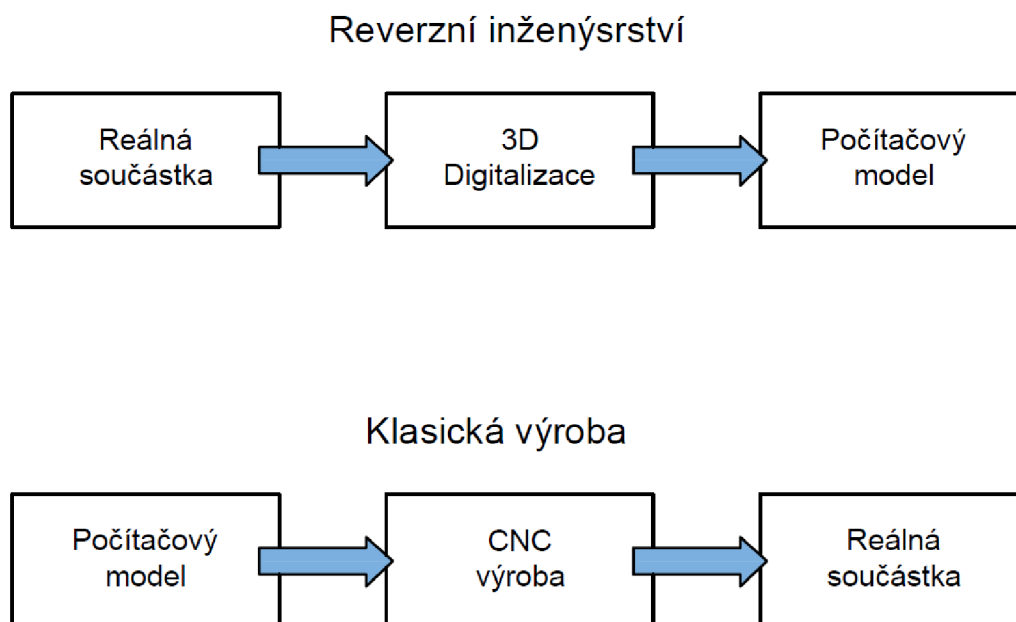
A další... [7]

Estetické materiály – Tyto materiály obsahují vždy příměs, která dává vytištěnému modelu vzhled dané příměsi. Patří sem BAMBOOFILL, který obsahuje přibližně 80 % PLA a 20 % bambusu. Výsledkem je součást s organicky vzhlízejícím povrchem, které maskuje vrstvení při tisku. Dále BRASSFILL, který má vysoký podíl mosazných částic a vzniklá součást má vzhled mosazného odlitku. BRONZEFILL je materiál věrně napodobující vzhled bronzového odlitku nebo COPPERFILL s napodobením měděného odlitku. [7]

## 1.2 Reverse Engineering

V běžném výrobním procesu je vytvořen návrh, popřípadě model součásti, který je předlohou pro výrobu. Reverse engineering, česky reverzní inženýrství, pracuje v opačném pořadí (Obrázek 9). Je vycházeno z fyzické součásti, která je digitalizací převedena na trojrozměrný objekt v digitální podobě. Pomocí digitálně upraveného modelu součásti je možné zajistit výrobu. [1, 2]

Zhotovení modelu ze získaných dat bývá dosaženo na CNC obráběcích centrech nebo pomocí technologie Rapid Prototyping. Podmínkou je formát digitálního modelu s příponou \*.stl. Vhodné CAD systémy jsou jak střední třídy, tak i velké systémy. Důležitou funkcí je zde vytváření objemových nebo uzavřených plošných objektů. [2]



Obrázek 9: Rozdíl mezi klasickou výrobou a Reverzním inženýrstvím [1].

### 1.2.1 Digitalizace

Pomocí digitalizace získáváme digitální podobu reálné součástky. Převod součástky do digitální podoby se zajišťuje 3D skenerem. Po naskenování objektu je k dispozici mrak bodů. Jednotlivé body mají tři souřadnice: X, Y a Z. Pro další využití je mrak bodů převeden do trojúhelníkové sítě. Při této přeměně dojde ke ztrátě části informací a vzniká chyba. Nastavením parametrů u kvantování, což je zpracování obrazu ve světelných pruzích, a vzorkování lze minimalizovat chybu. Post-processing odstraňuje chybné a nespojené body v trojúhelníkové síti. Celá polygonální síť je vyhlazena a zbavena chyb. [1, 2, 8]

Faktory, které ovlivňují volbu způsobu skenování jsou: vlastnosti digitalizovaného objektu (velikost, vnější povrch, ...) a požadavky na kvalitu digitalizovaných dat (rozměrová přesnost, prokreslení geometrie). Je rozlišována 2D digitalizace a 3D digitalizace. V případě 2D digitalizace se jedná např. o naskenovaný výkres. Lze vytvářet animace z více obrázků za sebou nebo vytvořit 3D model z více naskenovaných průmětů. [1]

Metody digitalizace se dělí na destruktivní a nedestruktivní z pohledu skenovaného předmětu. U destruktivní metody je dosaženo digitalizace celého předmětu včetně vnitřních dutin. Metoda je velice přesná, ale za cenu zničení digitalizovaného předmětu. Při nedestruktivní metodě je předmět nepoškozen, ale není možné digitalizovat určité tvarové složitosti jako jsou dutiny. Nedestruktivní digitalizaci lze provádět kontaktní či nekontaktní metodou. [1, 2]

### 1.2.2 Zařízení pro digitalizaci

Na proces má výrazný vliv jak softwarové zpracování, tak hardwarová konfigurace. Co se hardwaru týče, je potřeba digitizéru (skeneru) skládající se ze sensorové a výpočetní jednotky. Sensorová jednotka snímá povrch dotykovým, optickým nebo polohovým senzorem. Výpočetní jednotka zpracovává získaná data. [1, 8]

Software je nutný k řízení procesu digitalizace. Velice oblíbený je třeba Atos. V tomto programu je možné provádět úpravy na digitalizovaném modelu. Dalšími softwary se kontroluje kvalita a důležité parametry. Na závěr je potřeba program na tvorbu simulací a analýzy. [1]

Zařízení, která zajišťují převod trojrozměrného fyzického objektu do digitální podoby, jsou již zmíněné 3D skenery. Ty pracují na základě nasnímání povrchu objektu v diskrétních bodech. Výsledkem je mrak bodů. Skenery lze rozdělit podle kontaktu se skenovaným objektem na kontaktní a bezkontaktní. [2]

Mezi hlavní parametry skenerů patří přesnost, rozlišení, rychlost, flexibilita, robustnost a použitelnost. Přesnost je dána odchylkou v pixelech. Rozlišení je veličina určující minimální vzdálenost dvou bodů, kterou je schopno rozlišit. Dále je směrodatný čas, za který je snímek pořízen. Flexibilita určuje schopnost přizpůsobení skeneru v různých podmínkách (materiál, rozměry skenovaného objektu). Robustnost značí citlivost skeneru na pracovní podmínky. Použitelnost je myšlena jako míra znalostí, kterou uživatel musí disponovat. [9]

- Kontaktní skenery

Využití elektro kontaktní sondy. Sonda pracuje na principu piezokrystalu nebo pomocí optické sondy. Konkrétně měřící ramena Faro (na Obrázku 10) využívající odečítání přesných poloh bodů v prostoru. Lze je snadno a kdekoliv upnout. Měřící přístroj zvládá kompenzaci teploty a tím zpřesňuje samotné měření. [1, 9]



Obrázek 10: FARO Edge ScanArm ES [9].

Mechanické rameno MicroScribe 3D je ruční digitizér, který zaručuje dostatečnou přesnost měření poloh bodů v prostoru. Zařízení obsahuje velmi přesně vyvážené rameno. Při samotném skenování je podstatné upevnění skenovaného předmětu k podložce. Jakýkoliv nežádoucí pohyb má negativní vliv na měření bodů. [1]

Možnost kontaktně skenovat nabízí i CNC stroje. Tyto zařízení, které jsou na principu CNC frézek, jsou vybaveny snímací sondou namísto obráběcího nástroje. [1]

Hlavně pro kontrolu výrobků se používá souřadnicový měřicí systém CMM. Pro digitalizaci je vhodný také. Zaručuje velice přesné výsledky. Zobrazen na Obrázku 11. Mezi nevýhody přístroje patří časová náročnost digitalizace, řídká data a velké pořizovací náklady. [1]



Obrázek 11: CMM Helmet Phoenix [9].

- Bezkontaktní skenery

Bezkontaktním skenováním předmětu nehrozí deformace od kontaktní sondy. Není třeba speciálních přípravků, do kterých by se digitalizovaný předmět umístil. Bezkontaktní skenery využívají metody optické, laserové nebo ultrazvukové digitalizace. Mezi optické digitalizace patří systémy ATOS, Triop, Argus a Pontos. Laserová digitalizace se nejčastěji využívá při kontrole výroby díky své přesnosti. Patří sem systémy Vivid (Obrázek 11) a HandyScan 3D. Ultrazvuková digitalizace je prováděna manuálně pomocí ultrazvukové sondy. Tato metoda je nejméně přesná, ale také finančně nejmíň náročná. [1, 9]



Obrázek 12: Konica Minolta Vivid-9i [9].

Bezdotkový optický skenovací systém Atos, vybavený dvěma snímacími kamerami, využívá promítání světelných pruhů na digitalizovaný objekt. Promítání světelných pruhů zajišťuje stereoefekt umístěný uprostřed skenerové hlavy (Obrázek 13). Skenery Atos jsou schopny produkovat snímky o rozlišení pohybující se mezi 2 000 000 až 16 000 000 pixelů. Patří mezi velice rychlé digitalizace. [9]



Obrázek 13: ATOS Compact Scan 5M [9].



## 2 NÁVRH A VÝROBA VLASTNÍHO AUTOMOBILOVÉHO ZNAKU

Druhá kapitola se zabývá konkrétním postupem výroby a získání dat potřebných pro výrobu prototypu technologií Rapid Prototyping. Jako základní stavební kámen byl původní znak a těleso, které bude představovat novou geometrii znaku. Tyto dvě tělesa byly digitalizovány 3D skenerem. Následně se v digitální podobě spojily a upravily ve vhodném CAD programu. Dalším krokem bylo pořízení fyzického znaku pomocí 3D tisku. Ten posloužil k vytvoření formy. Kusová výroba pak funguje na základě gravitačního odlévání epoxidu do formy.

Již zmíněné těleso pro tvorbu výsledného modelu znaku představovala hlavice řadící páky ve tvaru lebky. Ta je vyobrazena na Obrázku 14. Původní sériový znak je pak na Obrázku 15. Další práce a tvorba vlastního automobilového znaku byla zajištěna na základě 3D skenů těchto dvou částí.



Obrázek 14: Hlavice řadící páky.



Obrázek 15: Původní sériový znak.

### 2.1 Digitalizace součástí

Součásti na obrázcích 14 a 15 byly digitalizovány. Výstupní 3D skeny byly nezbytné pro tvorbu vlastního znaku. S ohledem na komplexnost ploch na modelu lebky bylo vhodné upřednostnit bezdotykový skener před dotykovým. Ultrazvukový skener nebyl použit pro jeho menší přesnost. Laserový i optický skener zaručují přesné výsledky. Použití těchto skenerů by bylo v tomto případě rovnocenné. Výběr optického 3D skeneru ATOS Compact 2M byl na základě jeho přítomnosti při práci na návrhu.

Před začátkem skenování bylo potřeba skener zkalibrovat. To se uskutečnilo pomocí kalibračních desek. Samotné skenování součástí, které je vyobrazeno na Obrázku 16, fungovalo na principu snímání zakřivení světelných pruhů, které byly na součást vyzařovány. Data snímaly dvě snímací kamery obsažené v 3D skeneru. Pomocí softwarové části skeneru byl tvořen výsledný obraz.

V průběhu skenování nastávaly komplikace se zaostřením. Problém se zaostřením způsobovaly vibrace způsobené chvěním celé soustavy 3D skeneru. Tyto vibrace bylo nutné eliminovat. Byla použita tlumivá podložka pod skenerem a samotný skener byl řádně zaaretován. Při nedostatečném zaostření vznikaly méně přesné dílčí skeny. Dílčí sken vznikne při jednom nasnímání 3D skenerem. Celý digitalizovaný model pak bývá tvořen několika dílčími skeny z důvodu vyobrazení všech tvarových složitostí ze všech stran. Nepřesnost vyhodnocoval senzor. Při nižší kvalitě dílčího skenu byla oznámena nepřesnost udaná v pixelech např.  $\pm 0,2$  pixelu. Rozhodnutí, zda tento dílčí sken použít byl jen na obsluze. Stále se však jednalo o přesné a detailní skeny.



Obrázek 16: Skenování modelu.

Dílčí skeny je třeba propojit do konečného 3D skenu. Tomu je napomáháno díky referenčním bodům, díky kterým skener vyhodnocuje i velikost digitalizované součásti. Bez bodů by software skládal dílčí skeny do konečného jen pomocí tvarové podobnosti. To by bylo daleko méně přesné. Další možností bylo umístit model lebky do klece, která je referenčními body vybavena. Zde by nevznikaly nenaskenovaná místa pod referenčními body umístěnými přímo na modelu. Ve výsledku bylo rozhodnuto pro jednodušší variantu, a to nalepit referenční body přímo na digitalizovanou součást. V tomto případě vzniká nenaskenovaný prostor pod bodem umístěným na součásti. Tato nedokonalost se snadno odstraňuje v programu určeném pro úpravu 3D skenů.

Problémem pro optický skener jsou lesklé a černé plochy s kterými si snímací kamery jen těžko poradí. Zde byl použit antireflexní sprej. Nanesením antireflexního poprašku na součást umožnilo bezproblémové naskenování tvaru součásti. Tento poprašek k součásti nepřilnul, takže po skenování byl snadno ze součásti odstraněn.

## 2.2 Úprava naskenovaných dat

Výsledkem pořízení 3D skenů byl soubor obsahující informaci o poloze každého naskenovaného bodu. Nejednalo se tedy o objemové těleso ale pouze o mrak bodů. Polygonizací mraku bodů vznikla síť popisující povrch tělesa. Úpravy zpolygonizované sítě započaly v programu GOM Inspect 2018.

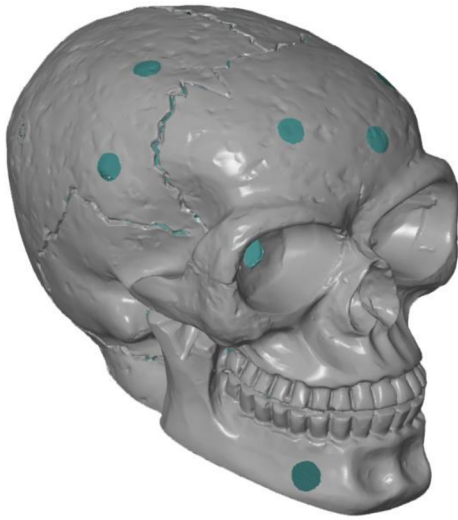
V prostředí programu GOM Inspect byl sken zobrazován jako plošné těleso z důvodu uživatelsky příjemnější obsluhy. Při promítnutí plošného tělesa uživatel dostává lepší orientaci v prostoru než jen u mraku bodů. Myšlený model lebky je možné vidět na Obrázcích 18 a 19. Byla zde i možnost zobrazit sken jako mrak bodů (Obrázek 17).

V programu GOM Inspect byl upravován uvažovaný povrch a jeho nedokonalosti. Byl zpracován sken lebky i znaku z nichž sken lebky byl daleko složitější na úpravu. Na 3D skenu byly zalepeny otvory po referenčních bodech a další nespojitosti povrchu. Tyto otvory jsou dobře viditelné na Obrázku 18. Otvory a necelistvé oblasti byly propojovány na základě tvarové podobnosti okolí.



Obrázek 17: Mrak bodů.

Mrak bodů, který byl popsán sítí bylo nutné upravit. Jednotlivé uzlové body sítě jsou spojeny přímými spojnicemi. Délka této hrany udává přesnost povrchu. Redukcí uzlů sítě bylo dosaženo menší složitosti sítě. Dále byl zredukován počet uzlových bodů na menší počet tak, aby sken příliš neztratil na kvalitě. Tak byla síť dostatečně vyhlazená. Výsledkem byl opět pouze mrak bodů. Na Obrázku 19 je vyobrazen jako vyhlazený a celistvý povrch. Takto byl upraven model lebky i znaku. Výsledná součást lebky obsahovala 72 111 bodů proti 527 512 bodů před začátkem úpravy skenu.

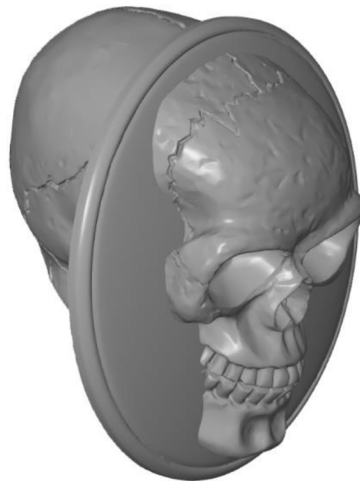


Obrázek 18: Zobrazení povrchu.



Obrázek 19: Vyhlazený sken.

Posledním úkolem v programu GOM Inspect bylo ustavení skenu do souřadného systému. To mělo usnadnit následující práci v dalším softwaru. Byl určen kartézský souřadný systém ve skenu lebky a znaku tak, aby měly oba skeny vůči sobě přesně danou polohu a vnikla tak geometrie výsledného produktu. Při otevření obou souborů najednou byly oba skeny ustaveny do souřadného počátku. Ustavení je vyobrazeno na Obrázku 20. V této poloze byly skeny dále upravovány.



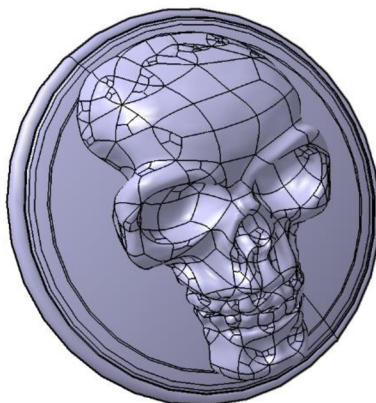
Obrázek 20: Ustavení pomocí souřadného systému.

### 2.3 Tvorba objemového tělesa

Následně bylo potřeba z mraku bodů vytvořit objemové těleso, které bude sloužit jako podklad pro výrobu. Potřebné úpravy byly provedeny v programu Catia P3 V5-6R2017. Cílem zde také bylo odříznout zadní část lebky. Výsledný model byl vyhlazený, spojený a připravený na 3D tisk.

Skeny lebky a znaku byly vůči sobě ustaveny do souřadného systému. Vzájemně pak byly upravovány, ale každý sken zvlášť. Model znaku byl vytvořen pomocí náčrtu, který přibližně kopíroval tvar znaku v průřezu. Po rotaci náčrtu byla hotova plocha, která byla základem pro tvorbu objemového tělesa. Bylo nutné provést rozměrovou analýzu, zda vytvořená plocha souhlasí s uvažovanou plochou skenu.

Převedení skenu lebky na objemové těleso bylo ztíženo složitostí tvaru lebky. Jelikož tu byly převážně křivky s C2 spojitostí, bylo nutné získat povrch lebky automatickým vygenerováním. Po tomto kroku byly k dispozici dvě plošná tělesa s uzavřeným povrchem, který neobsahoval žádné díry.



Obrázek 21: Upravený model v Catii.

Následujícím krokem bylo oříznutí zadní části lebky podle plochy znaku. Pak bylo nutné plochy lebky a znaku nástrojem Sešit spojit do jediného útvaru. Geometrie nového znaku již byla dána, stačilo tedy jen vyplnit plochy objemem. Výsledkem bylo objemové těleso, které je na Obrázku 21. Pro dobrou prezentaci vzniklého výsledku byl znak otevřen v programu GOM Inspect. Zde je už objemové těleso zobrazeno vyhlazené a připravené pro technologii Rapid Prototyping. Vyobrazeno na Obrázku 22.



Obrázek 22: Objemový hotový model automobilového znaku.

## 2.4 3D tisk znaku

Po získání objemového tělesa z digitalizovaných částí bylo možné vyrobit prototypový kus technologií Rapid Prototyping. Vytisknutý Master model automobilového znaku posloužil k výrobě formy, která zajistila navazující kusovou výrobu.



Obrázek 23: 3D tiskárna uPrint Dimension.

Využitá 3D tiskárna uPrint Dimension (Obrázek 23) pracuje na základě metody FDM. Princip tvorby modelu byl v nanášení tenkých vrstev roztaveného materiálu. Stavební i podpurný materiál zde byl ve formě struny, vedené z dvou oddělených cívek. Jako stavební materiál byl použitý ABS plast. Orientace znaku byla podle Obrázku 24. Model byl orientován na výšku, aby bylo co nejméně patrné vrstvení materiálu. Lebka byla otočena hlavou dolů z důvodu využití co nejméně podpurného materiálu na čelo lebky. Podpurný materiál je vidět hnědou barvou na Obrázku 25.



Obrázek 24: Orientace modelu v 3D tiskárně.

Model znaku byl po vyjmutí z tiskárny zbaven podpůrného materiálu. Na tomto modelu byly viditelné jednotlivé vrstvy naneseného materiálu od 3D tisku. Při tvorbě formy jsou tyto vrstvy nežádoucí. Proto bylo nezbytné se jich zbavit. První možností bylo brousit samotný plastový model. Druhou možností, která byla realizována, bylo na celý model nanést vrstvu tmele. Byl použit jednosložkový tmel ve spreji pro rovnoměrné nanesení na povrch. Při jemném ručním přebroušení této vrstvy vznikl velice dobrý výsledek. Model byl hladký oproti původnímu vrstvenému modelu. Výsledek je možné vidět na Obrázku 26, kde už probíhala výroba formy.



Obrázek 25: Vyjmutý znak z 3D tiskárny.

Nepříjemné vrstvení modelu výrazně zhoršuje kvalitu povrchu. Pro lepší výsledek by bylo vhodné využít jinou technologii Rapid Prototyping. Například metoda SLS produkuje modely s velice jemným povrchem díky využívanému stavebnímu materiálu. Je používán velice jemný prášek, který má také funkci podpůrného materiálu. Jemnost prášku určuje kvalitu povrchu. Touto metodou by vznikl kvalitnější model znaku pro tvorbu formy. Další metodou, která vytváří kvalitní modely vhodné pro výrobu forem je metoda SLA. Tato metoda je podobná metodě SLS. Metoda DMLS vytváří také pěkný povrch. Je ale určena především pro funkční výtisky. Využívaný materiál je především kovový prášek. Dále výrobní čas touto metodou je větší než využitou metodou FDM.

## 2.5 Výroba formy

Vyrobený model znaku technologií Rapid Prototyping s vyhlazeným povrchem byl připravený na výrobu formy. Model znaku po povrchové úpravě je viditelný na Obrázku 26. Forma je určena pro kusovou výrobu. Mohou zde vznikat plastové odlitky s lepšími mechanickými vlastnostmi, hladším povrchem a také rychleji než při výrobě metodou Rapid Prototyping. Proto je výroba formy na místě. Při výrobě více kusů by bylo možné vyrobít větší formu s více dutinami pro model znaku. Při gravitačním odlití epoxidem by bylo vyrobeno více kusů najednou. Tak by mohla být zajištěna sériová výroba namísto kusové.



Obrázek 26: Výroba formy.

Výroba formy pro automobilový znak probíhala následovně. Na čistou pracovní podložku se umístil upravený model. Plocha podložky představovala dělicí rovinu pro celou formu. Okraje formy byly zajištěny sklíčky přilepenými k podložce tavnou pistolí (Obrázek 26). Pro ustavení druhé části formy zde musely být přidány tvarové složitosti. Byly použity tři jehlany. Tyto jehlany zaručí správné spasování druhé části formy. Jako výplň formy byl použit silikon RTV 4234-T4 base. Pro aktivaci silikonu bylo použito tužidlo Vermetzer silastic T-40, které se smíchalo se silikonem v poměru 1:10.

Po důkladném rozmíchání silikonu s tužidlem bylo potřeba zbavit se vzduchu ve formě bublin v namíchaném silikonu. Proto byl podstoupen proces ve vakuové komoře, která je na Obrázku 27. Během procesu se mírně zvýšila objemová hustota silikonu. Díky této změně silikon více vytlačuje vzduchové bubliny ze svého objemu. Ve vakuové komoře jsou mikrobublinky odstraněny a ze zbylých bublin se stávají bubliny podtlakové, takže po vyplnění formy silikonem byly podtlakové bubliny vytláčovány k hladině formy. Další výhodou vakuování je menší pomezita vytvořené formy.

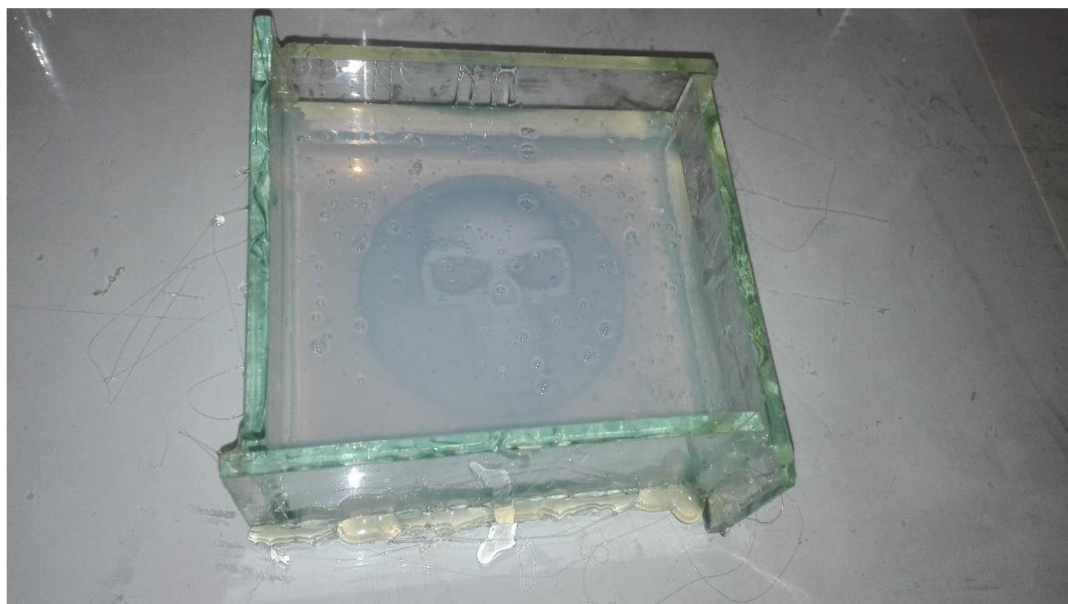
Při přípravě silikonu bylo potřeba blíže určit potřebné množství. To bylo jednoduše určeno vypočítáním objemu formy. Výška byla počítána cca do 2/3 výšky sklíčka. Půdorys formy byl čtverec. Objem byl tedy vypočítán jako obsah čtverce vynásobený výškou zalití formy. Od vypočítaného objemu byl odečten objem znaku. Ten byl přesně určen díky digitálnímu modelu, který byl vytvořen v programu Catia a měl příponou \*.stl. S touto příponou bylo možné otevřít model v programu Inventor. Zde určit objem modelu je již jednoduché. Pro druhou část formy bylo potřebné množství objemu spočítáno také jako objem hranolu. Zmenšený byl pouze o zde umístěný vtok.





Obrázek 27: Vakuová komora.

Připraveným silikonem byla zalita forma (Obrázek 28). Vzduchové bubliny obsažené v objemu formy se postupně dostávaly k povrchu, kde jednoduše popraskaly. V tomto stavu bylo potřeba počkat přibližně den, než byla silikonová forma dostatečně zatuhlá. Silikonový materiál formy dokonale zkopíroval tvar znaku i každou nedokonalost. Kdyby vytištěný model nebyl povrchově upraven, na formě by bylo viditelné vrstvení od 3D tisku i každá nedokonalost. Následovala výroba druhé části formy.



Obrázek 28: Odlití formy.

Druhá část formy byla vyrobena podobným postupem. První díl formy se oddělil od podložky. Forma se otočila dělicí rovinou vzhůru. Okraje formy byly opět tvořeny sklíčky. Plocha dělicí roviny na první části formy musela být opatřena separátorem Trennmittel T1-1, který zaručoval že se oba díly formy k sobě nepřilepí. Následně stačilo zalít první díl formy spolu s modelem stejně připraveným silikonem. Na tomto dílu formy byl umístěn vtok pro následující odlití. Na prvním dílu formy tedy vznikl druhý díl formy. Jeho přesnou polohu zajišťovaly výčnělky ve tvaru jehlanu, které přesně pasovaly do zahloubení stejného tvaru v první části formy.

## 2.6 Výroba a následná úprava výrobku

Když byla k dispozici hotová forma, následovala výroba znaku. Forma byla vyrobena s jednou dutinou pro výrobu právě jednoho znaku. Produkce tedy má hodnotu kusové výroby. Materiál produkované součásti byl zvolen na epoxidové bázi. Konkrétní epoxid SG 2000 měl složky A a B. Pro aktivaci epoxidu musely být složky důkladně smíchány v poměru 1:1. Dále se do epoxidu může přimíchat práškové aditivum. Tyto aditiva zlepšují mechanické vlastnosti odlité epoxidové součásti. Jelikož automobilový znak není nijak nadměrně namáhán při jeho funkci, tak nebyl žádný důvod použít práškové aditivum.

Pro namíchání složek epoxidu bylo vyžadováno přesné naměření jejich potřebného množství. Objem znaku byl již zjištěn při výrobě formy v programu Inventor. K objemu znaku byl ještě připočítán objem vtoku. Výsledný objem, který měl být namíchán byl navíc zvětšen z důvodu smršťování epoxidu při vytvrzení.

Práce s namíchaným epoxidem musela být velice rychlá, jelikož epoxid tvrdnul rychle. Zároveň nesměly být do směsi epoxidu vneseny vzduchové bubliny příliš rychlým mícháním složek epoxidu. Vzduchové bubliny v plastovém modelu by narušovaly jeho strukturu. Odlití bylo provedeno přes vtok v horním dílu formy. Epoxid byl vytvrzený za několik desítek minut.

Hotová a vytvrzená epoxidová součást byla následně nalakována. K lakování byly použity barvy a chemikálie ve spreji. Před lakováním byla součást řádně odmaštěna. Jako první nanosená vrstva na součást byl bezbarvý základ na plasty, který zajišťuje přilnavost dalších vrstev na plastovém povrchu. Na Obrázku 29 je první zleva. Byl nanesen ve dvou vrstvách s přestávkou cca 5 minut na odvětrání první vrstvy. Po deseti až dvaceti minutách bylo možné nanést další vrstvu. Touto vrstvou byl rychleschnoucí akrylátový barevný plnicí základ. Na Obrázku 29 je druhý zleva. Stačilo nanést dvě až tři vrstvy tak, aby po celém lakovaném povrchu byla tenká vrstva plnicího základu. Schnutí jedné vrstvy bylo přibližně deset minut.

Pro další práci byla vhodná pomůcka na zakrytí jisté části lebky. Jedná se o samolepící vzor ve tvaru půdorysu lebky. Tato samolepka v následující práci zakryla plochu podstavce znaku, který byl již nalakován a umožnila nalakovat pouze plochu samotné lebky ve znaku. Pro pořízení samolepky bylo nezbytné vrátit se k modelu znaku. Ten byl z formátu \*.stl otevřen opět v programu Inventor. Zde byla obkreslena geometrie tvaru lebky při kolmém pohledu na celý znak. Po vytvoření přesného tvaru samolepky byl soubor s náčrtem vyexportován ve formátu \*.dxf. Poté byla samolepka vyřezána na plotteru. Její uplatnění je na Obrázku 30.



Obrázek 29: Využité barvy a základy ve spreji.

Model byl následně nalakován barvou. Nejdříve byl celý povrch nalakován červeným akrylovým autolakem. Jednotlivé vrstvy byly nanášeny po deseti minutách. Dále bylo potřeba nechat vrstvu barvy řádně vytvrdnout minimálně dvě hodiny. Dalším krokem bylo zakrytí okraje znaku vytvořenou samolepkou, který měl mít odstín předchozí červené barvy. Pak bylo možné lakovat samotnou lebku ve znaku. Vybraná barva napodobující chromový povrch s vysokým leskem byla nanášena v několika vrstvách. Na Obrázku 29 je druhá zprava a předchozí červený lak je uprostřed. Poslední vrstvou byl bezbarvý dvousložkový lak. Na Obrázku 29 je úplně vpravo. Bezbarvý lak po jeho nanesení zareagoval s chromovou barvou natolik, že změnila svůj odstín. Tento rozdíl je viditelný na Obrázku 30. Díky bezbarvému laku má výsledná podoba znaku vysoký lesk a výbornou odolnost proti povětrnostním podmínkám.



Obrázek 30: Změna odstínu chromové barvy po bezbarvém laku.

## 2.7 Ekonomické zhodnocení výroby

Zde je uvedena kalkulace výrobních nákladů na výrobu automobilového znaku. Tedy konkrétně náklady na technologii Rapid Prototyping, na výrobu formy a na produkci modelu znaku odlitím. Je počítáno pouze s materiálovými náklady. Není zde započítaná mzda pracovníka ani režijní náklady.

Vytištění modelu znaku určeného na výrobu formy technologií Rapid Prototyping vyžadovala využití stavebního i podpůrného materiálu. 3D tisk byl hotov cca za 3 hodiny. Pro výrobu licí formy byl potřeba silikon. Dále menší množství chemikálií, které je možné z finančního hlediska zanedbat. Mezi tyto chemikálie patří separátor a tužidlo do silikonu. Na sériovou výrobu znaku byl využit dvojsložkový epoxid. Potřebné množství epoxidu záleželo na objemu znaku (uveden v Tabulce 1).

Tabulka 1: Důležité vlastnosti plastového modelu

Objem znaku	45,74 cm <sup>3</sup>
Hmotnost znaku	0,047 kg

Při technologii Rapid Prototyping byl využit stavební materiál o objemu znaku, který je uvedený v Tabulce 1. Dále podpůrného materiálu bylo potřeba o objemu 2,87 cm<sup>3</sup>. Celkový objem materiálu, který byl při tisku vyprodukován, je v Tabulce 2. Je zde také uvedena cena za vytištění jednoho modelu znaku.

Tabulka 2: Náklady na Rapid Prototyping

Celkový objem materiálu [cm <sup>3</sup> ]	Cena materiálu za 1 cm <sup>3</sup> [Kč]	Částka potřebná na výrobu [Kč]
48,61	14,40	700

Na výrobu formy byl potřeba silikon o objemu celé formy zmenšený o objem znaku (45,74 cm<sup>3</sup>) a o objem vtoku. Při měrné hmotnosti přibližně 1000 kg/m<sup>3</sup> odpovídá hmotnost formy řádově objemu uvedenému v cm<sup>3</sup>. Objem silikonové formy je 739 cm<sup>3</sup>. Z objemu je odvozena hmotnost v Tabulce 3. Cena silikonu za 1 g je vypočtena podle vztahu (2.1).

$$C_s = \frac{N_s}{M_s} \quad (2.1)$$

$$C_s = \frac{3630}{5000} = \underline{\underline{0,73 \text{ Kč}}}$$

$C_s$  ..... cena silikonu za 1 g

$N_s$  ..... cena za balení silikonu

$M_s$  ..... hmotnost celého balení silikonu

Tabulka 3: Náklady na silikonovou formu

Hmotnost silikonu [g]	Cena silikonu za 1 g [Kč]	Celkové náklady za silikon [Kč]
739	0,73	540

Při výrobě znaku z epoxidu byla směrodatná hodnota hmotnosti, která byla zjištěna v programu Inventor. K hmotnosti znaku byla přičtena hmotnost vtoku. Cena epoxidu je určena pro 1 g epoxidu. V Tabulce 4 je dopočtena cena materiálu za jeden odlitý znak. Cena epoxidu za 1 g je vypočten vztahem (2.2).

$$C_e = \frac{N_e}{M_e} \quad (2.2)$$

$$C_e = \frac{625}{1000} = \underline{0,525 \text{ Kč}}$$

$C_e$  ..... cena epoxidu za 1 g

$N_e$  ..... cena za balení obou složek epoxidu

$M_e$  ..... hmotnost celého balení epoxidu

Tabulka 4: Náklady na odlití jednoho znaku

Hmotnost znaku [g]	Cena epoxidu za 1 g [Kč]	Výsledná cena [Kč]
52	0,625	32,5

Vyrobená forma má jistou životnost. Přibližný výrobitelný počet kusů je 30. Výrobní náklady zahrnující pouze materiál na jeden vyrobený kus jsou vypočteny pomocí vztahu 2.3. Zde je zohledněna i životnost formy.

$$N_v = \frac{30 \cdot N_z + N_f}{30} \quad (2.3)$$

$$N_v = \frac{30 \cdot 32,5 + 540}{30} = \underline{50,5 \text{ Kč}}$$

$N_v$  ..... výrobní náklady na jeden znak

$N_f$  ..... náklady na vyrobení silikonové formy

$N_z$  ..... náklady na odlití jednoho znaku

Výrobní náklady jednoho kusu jsou 50,5 Kč. V porovnání s technologií Rapid Prototyping, kde vytištěný znak s horší kvalitou povrchu stál 700 Kč, je výroba automobilového znaku odlitím nejen levnější, ale i produktivnější. Ve výsledku výrobní proces nejvíce komplikuje životnost formy a nutnost její výroby po třicátém vyrobeném kusu.

Výroba je nyní kusová. Pro navýšení sériovosti by byla potřeba větší forma s více dutinami. Výrobní cena znaku by se příliš nezměnila. Množství materiálu potřebného na vyrobení jak formy, tak znaku by se maximálně zvýšil o rozměrnější vtokovou soustavu. Výrobní cena znaku by se jen mírně zvýšila. Ovšem produkce by byla násobně vyšší o počet dutin ve větší formě. Takto složitá forma by byla na výrobu zbytečně komplikovaná. Byl by problém s vtokovou soustavou a hrozilo by nezatečení epoxidu.

Další možností by bylo vyrobení kovové formy s daleko větší životností. Forma by byla určená pro gravitační odlití epoxidem jako současná forma nebo by forma mohla být navržena pro vstřikování plastu. Výroba kovové formy by byla daleko složitější a hlavně nákladnější. S jednou dutinou by hliníková forma stála přibližně 32 000 Kč a stále by se jednalo pouze o kusovou výrobu. Tato forma by ale měla daleko větší životnost. Nelze ji ovšem vyrobit v provedení jako současnou formu, a to z důvodu vyjmutí součásti po odlití. Současná silikonová forma umožňuje snadné vyjmutí znaku díky své elasticitě. U kovové formy by v tomto případě musela dělicí rovina vést jinudy.

## ZÁVĚR

Práce se zaměřovala na návrh a výrobu unikátního automobilového znaku. Při použití technologie Rapid Prototyping a postupu reverzního inženýrství bylo možné okamžitě reagovat na dané požadavky. Znak byl hotový v poměrně krátkém čase a odpovídal zákaznickým představám.

Digitalizace objektů pro tvorbu znaku byla provedena 3D optickým skenerem. Alternativní metodou bylo využití skeneru laserového. Pořízené 3D skeny byly vyhovující a byly vhodné pro vytvoření objemového tělesa, které kombinuje tvary původního znaku s novou geometrií. Po této digitální úpravě dat bylo možné vyrobit model pro tvorbu formy. Z technologií Rapid prototyping byla zvolena metoda FDM. Výsledek z 3D tiskárny bez povrchových úprav nebyl vhodný na výrobu formy. Proto musel být model tmelen a broušen. Tak bylo dosaženo velice hladkého povrchu namísto vrstveného modelu. Využitím metody SLS nebo SLA by byl vyroben model bez viditelného vrstvení modelu a povrchová úprava by nebyla nutná.

Použitím silikonu jako materiálu na formu vznikl povrch kopírující přesně povrch součásti i s jejími nedokonalostmi. Povrchová úprava modelu zajistila vyhovující povrch formy bez nedokonalostí povrchu. Forma byla vyrobena s jednou dutinou na gravitační odlití epoxidem. Tato forma zcela vyhovuje nároku na kusovou výrobu. Další možnosti na výrobu formy nejsou zcela přijatelné. Blíže jsou popsány v podkapitole ekonomické zhodnocení výroby. Silikonová forma je tak tím nejlevnějším a nejrychlejším řešením pro výrobu daného automobilového znaku.

Odlité znaky byly lakovány. Byly nanášeny základ na plasty, plnicí základ, dva barevné odstíny laku a bezbarvý lak. Pro dostatečné odvětrání mezi nanášenými vrstvami bylo důležité dodržování postupu uvedenému na každém konkrétním laku nebo základu. Po nalakování je znak připravený na umístění na automobil. Je plně odolný vůči povětrnostním vlivům.

Rychlá reakce na poptávku zákazníka je důležitým faktorem pro získání zakázky na výrobu. Proto je vhodné využívat ten nejrychlejší postup na přípravu výroby. Díky výrobě prototypů technologií Rapid Prototyping má tato technologie své místo v návrhu nového dílu. Lze vyrobit součástky se složitou geometrií, někdy nevyrobitelné na konvenčních strojích. Použitím metody reverzního inženýrství je možnost urychlit etapu návrhu nové součásti využitím již existujícího tvaru. Dále je možnost obnovit výrobu v případě kdy už není k dispozici výkresová dokumentace.

Postup, kterým byl vyroben znak, má své místo pro firmy zabývající se návrhem a výrobou nových součástí. Zejména technologie Rapid Prototyping má široké uplatnění napříč různými odvětvími.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. PÍŠKA, Miroslav a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. Brno: CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. SEDLÁK, J. a PÍŠA, Z. *Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů*. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
3. Využití rapid prototyping. *CAD* [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2715-vyuziti-rapid-prototyping-technologie.html>
4. Aplikace technologií Rapid Prototyping. *MM Spektrum* [online]. 31.01.2001 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-technologie-rapid-prototyping.html>
5. Přehled technologií 3D tisku. *DK Metal prominet s.r.o* [online]. 09.01.2018 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3D-tisku>
6. ŠULA, Martin. Výroba náhradního dílu chlazení k elektromotoru s využitím technologie Rapid Prototyping. *Core* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30292723.pdf>
7. Materiálový slovník. *Materialpro 3D* [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
8. PALOUŠEK, David. *3D optická digitalizace a rapid prototyping v ortotice a protetice*. Brno: Vutium, 2014. ISBN 978-80-214-4849-0.
9. WEIDNER, Lukáš. Trojrozměrné skenovací systémy. *Ústav konstruování* [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1044/Weidner.pdf>



**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK****Zkratka – Význam zkratky**

2D	– dvojrozměrný
3D	– trojrozměrný
ABS	– Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	– Akrylonitril-styren-akryl
CAD	– Computer aided drawing
CMM	– Coordinate measuring machine
CNC	– Computer numeric control
CPE	– Kopolyester
DMLS	– Direct Laser Sintering
FDM	– Fused Deposition Modeling
FFF	– Fused Filament Fabrication
HIPS	– High impact polystyrene (houževnatý polystyrén)
LOM	– Laminated Object Manufacturing
MJM	– Multi Jet Modeling
PA	– nylon
PC	– Polykarbonát
PEEK	– Poly Ether Ether Ketone
PET	– Polyethylentereftalát
PLA	– Polylactic acid (kyselina polymléčná)
SGC	– Solid Ground Cutting
SLA	– Service-level agreement
SLS	– Selective Laser Sintering
UV	– Ultrafialové

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ**

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Význam</b>
$C_e$	[Kč]	cena epoxidu za 1 g
$C_s$	[Kč]	cena silikonu za 1 g
$M_e$	[g]	hmotnost celého balení epoxidu
$M_s$	[g]	hmotnost celého balení silikonu
$N_e$	[Kč]	cena za balení obou složek epoxidu
$N_f$	[Kč]	náklady na vyrobení silikonové formy
$N_s$	[Kč]	cena za balení silikonu
$N_v$	[Kč]	výrobní náklady na jeden znak
$N_z$	[Kč]	náklady na odlití jednoho znaku

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1:	Schematické zobrazení Stereolitografie [5].....	13
Obrázek 2:	Selective Laser Sintering [6] .....	14
Obrázek 3:	Solid Ground Cutting [6].....	15
Obrázek 4:	Fused Deposition Modeling [5].....	16
Obrázek 5:	Direct Laser Sintering [5].....	17
Obrázek 6:	Laminated Object Manufacturing [5].....	18
Obrázek 7:	Multi Jet Modeling [6].....	19
Obrázek 8:	Struna s materiálem do 3D tiskárny [7].....	20
Obrázek 9:	Rozdíl mezi klasickou výrobou a Reverzním inženýrstvím [1].....	21
Obrázek 10:	FARO Edge ScanArm ES [9].....	23
Obrázek 11:	CMM Helmet Phoenix [9].....	23
Obrázek 12:	Konica Minolta Vivid-9i [9]. .....	24
Obrázek 13:	ATOS Compact Scan 5M [9].....	24
Obrázek 14:	Hlavice řadící páky.....	25
Obrázek 15:	Původní sériový znak.....	25
Obrázek 16:	Skenování modelu.....	26
Obrázek 17:	Mrak bodů.....	27
Obrázek 18:	Zobrazení povrchu.....	28
Obrázek 19:	Vyhlazený sken.....	28
Obrázek 20:	Ustavení pomocí souřadného systému.....	28
Obrázek 21:	Upravený model v Catii.....	29
Obrázek 22:	Objemový hotový model automobilového znaku.....	29
Obrázek 23:	3D tiskárna uPrint Dimension.....	30
Obrázek 24:	Orientace modelu v 3D tiskárně.....	30
Obrázek 25:	Vyjmutý znak z 3D tiskárny.....	31
Obrázek 26:	Výroba formy.....	32

Obrázek 27: Vakuová komora.....	33
Obrázek 28: Odlití formy.....	33
Obrázek 29: Využití barvy a základy ve spreji.....	35
Obrázek 30: Změna odstínu chromové barvy po bezbarvém laku.....	35

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1:	Důležité vlastnosti plastového modelu.....	36
Tabulka 2:	Náklady na Rapid Prototyping.....	36
Tabulka 3:	Náklady na silikonovou formu.....	37
Tabulka 4:	Náklady na odlití jednoho znaku.....	37