



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Výroba náhradního dílu metodou reverzního inženýrství

Richard Havlík

Střední průmyslová škola strojnická,

škola hlavního města Prahy

110 00 Betlémská 4/287, Praha 1 – Staré Město

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Kopanica

Anotace:

Tento maturitní projekt se zabývá využitím metody reverzního inženýrství pro výrobu kliky u dveří historického automobilu Škoda 1203. V práci jsou nejprve teoreticky popsány procesy nezbytné k reprodukci nové kliky jako 3D skenování, 3D tisk a metoda přesného lití. Druhá část se zabývá praktickou výrobou kliky pomocí postupů popsaných v teoretické části. Praktická část je založena na popisu postupu výroby.

Klíčová slova: reverzní inženýrství, 3D skenování, 3D tisk, přesné lití

Anotation:

This graduation project focuses on the use of reverse engineering method for the production of the door handle of the historical Škoda 1203 automobile. The thesis first theoretically describes the processes necessary for reproducing a new handle, such as 3D scanning, 3D printing, and the investment casting. The second part focuses on the practical production of the handle using the procedures described in the theoretical section. The practical part is based on a description of the manufacturing process.

Key words: reverse engineering, 3D scanning, 3D printing, investment casting

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svůj maturitní projekt vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v přiloženém seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 31. 3. 2024

.....

Richard Havlík

Poděkování

Děkuji vedoucímu svého maturitního projektu, Ing. Zdeňku Kopanicovi, za cenné rady, připomínky a neocenitelnou pomoc při zajišťování všeho potřebného pro realizaci praktické části. Bez jeho podpory by tato práce nemohla vzniknout. Velké díky patří také mému tatínkovi, díky němuž vznikl nápad na téma reverzní inženýrství. Zároveň mi prostřednictvím neziskové organizace EDUteam umožnil pracovat s 3D skenery a tiskárnami. V neposlední řadě děkuji všem svým blízkým za jejich podporu během celé tvorby této práce.

Obsah

1	Úvod a cíl práce	2
2	Reverzní inženýrství	3
2.1	Reverzní inženýrství v odvětvích	3
2.1.1	Automobilový průmysl	3
2.1.2	Vojenství	4
2.1.3	Medicína	5
2.1.4	Software	5
3	3D skenování	6
3.1	Metody 3D skenování	6
3.1.1	Kontaktní 3D skenery (CMM)	6
3.1.2	Nekontaktní 3D skenery	6
3.2	Proces 3D skenování	8
3.2.1	Mračno bodů	8
3.2.2	Vytvoření trojúhelníkové sítě (polygonizace)	9
3.2.3	Úprava trojúhelníkové sítě	10
4	3D tisk polymerů v reverzním inženýrství	11
4.1	Slicery	11
4.2	Metody 3D tisku	12
4.2.1	FDM	12
4.2.2	SLA	13
4.2.3	SLS	14
4.3	Materiály pro 3D tisk polymerů	14
4.3.1	Filamenty – FDM	15
4.3.2	Resiny (pryskyřice) – SLA	16
4.3.3	Prášky – SLS	17

5	Přesné lití	17
5.1	Proces lití na vytavitelný model.....	18
5.1.1	Materiál vytavitelného modelu	19
5.2	Lití na spalitelný model	19
5.3	Výroba keramické formy	20
5.3.1	Materiál forem	20
5.3.2	Proces výroby keramické formy	20
5.4	Materiály na odlévání	21
5.4.1	Speciální slitiny odlévané metodou přesného lití	21
6	Praktická část	23
6.1	Původ kliky	23
6.2	Pracovní postup.....	24
6.2.1	Postup 3D skenování	25
6.2.2	Úprava STL souboru kliky	28
6.2.3	Výroba stromečku pro odlévání.....	29
6.2.4	3D tisk.....	29
6.2.5	Výroba forem.....	31
6.3	Odlévání metodou přesného lití.....	33
6.3.1	Použité pece	33
6.3.2	Odlitek 1	34
6.3.3	Odlitek 2	36
6.3.4	Odlitek 3	38
6.4	Postprocessing	40
7	Závěr	42

Seznam použitých zkratk

3D	Three dimensional	Trojrozměrné
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	Akrylonitril-butadien-styren
ASA	Acrylonitrile Styrene Acrylate	Akrylonitril-styren-akrylát
CAD	Computer aided design	Počítačem podporované navrhování
CAM	Computer aided manufacturing	Počítačem podporovaná výroba
CMM	Cordination measuring machine	Souřadnicový měřicí stroj
DLP	Digital light processing	Digitální projekce světla
FDM	Fused deposition modeling	Modelování roztaveného depositu
IPA	Isopropyl alcohol	Isopropyl alkohol
MSLA	Mask Stereolithography	Maskovaná stereolitografie
LPIC	Low pressure investment casting	Nízkotlaké přesné lití
SLA	Stereolithography	Stereolitografie
SLM	Selective laser melting	Selektivní laserové tavení
SLS	Selective laser sintering	Selektivní laserové spékání
PA	Polyamid	Polyamid
PETG	Polyethylene terephthalate glycol	Polyethylentereftalát Glykol
PLA	Polylactic acid	Kyselina polymléčná
USA	United States of America	Spojené státy americké
USB	Universal serial bus	Univerzální sériová sběrnice
UV	Ultraviolet	Ultrafialové

1 Úvod a cíl práce

Reverzní inženýrství je komplexní odvětví, které nachází široké uplatnění v mnoha průmyslových oblastech. Původně bylo využíváno především k analýze a replikaci konkurenčních výrobků, avšak v posledních několika desetiletích, zejména díky pokroku v oblasti 3D technologií, se jeho možnosti výrazně rozšířily. Mezi významné aplikace reverzního inženýrství patří například digitalizace archeologických nálezů pro jejich dlouhodobé uchování, vizualizace a analýza lékařských dat nebo rekonstrukce strojních součástí, k nimž již neexistuje potřebná dokumentace.

Práce se zaměřuje právě na poslední zmíněné využití reverzního inženýrství. Cílem je replikovat kliku od dveří vozu Škoda 1203, která bude naprosto identická s originálním dílem.

Teoretická část práce nejprve přibližuje historii a oblasti reverzního inženýrství. Následně se věnuje popisu jednotlivých procesů potřebných k realizaci replikace – konkrétně 3D skenování, 3D tisku polymerů a přesnému lití.

Praktická část se zaměřuje na samotnou výrobu náhradního dílu. K provedení využívá procesů popsaných v teoretické části. Nejprve je původní klika oskenována a digitální model upraven tak, aby odpovídal požadovaným parametrům. Následně je vytvořen fyzický prototyp pomocí 3D tisku. Posledním krokem je příprava formy pro přesné lití, do které je následně nalit kov, čímž vznikne finální výrobek.



Obr. 1 Předloha pro výrobu náhradního dílu

2 Reverzní inženýrství

Reverzní inženýrství je komplexní pojem, který zahrnuje velmi širokou škálu činností. Ať už nahrazujeme starou plaňku ve stávajícím plotě nebo se snažíme napodobit cokoliv jiného, tak se vždy jedná o reverzní inženýrství. Nicméně mezi reverzní inženýrství patří i složitější činnosti jako je například rekonstrukce součástky pro historický automobil, či napodobení zbraní ukořistěných na bojišti. [1,2,3]

Ze samotného názvu této výrobní metody lze již očekávat, že se tento proces proti klasickému inženýrství nějakým způsobem liší. Pojem reverzní vycházející z anglického slova „reverse“, což znamená, že se jedná o proces opačný. Hlavní rozdíl mezi těmito druhy inženýrství je, že samotný inženýr nevytváří nové těleso, ale snaží se co nejpřesněji napodobit již existující model. Často je tento model bez veškerých podkladů a jiných informací. Vždy je potřebné odečíst co nejvíce jeho vlastností. Důležité je zachytit jeho tvar, rozměry, materiál a případně i metodu výroby. V současnosti se nabízí mnoho možností, jak si celý proces usnadnit. Zásadními pro reverzní inženýrství se v poslední době stalo například rozšíření 3D skenerů a 3D tisku. [1,2,3]

2.1 Reverzní inženýrství v odvětvích

Reverzní inženýrství je často jedinou možností, jak dosáhnout požadovaného výsledku. Díky němu se často inovace dostávají rychleji, než kdybychom reverzní inženýrství nevyužívali. Představíme si tedy několik odvětví, kde je reverzní inženýrství téměř nezbytnou záležitostí. [1, 2, 4]

2.1.1 Automobilový průmysl

Snaha nezůstat za svými konkurenty pozadu je většinou hlavním důvodem, proč v průmyslu k reverznímu inženýrství vlastně dochází. Je mnoho strojírenských odvětví, v nichž se reverzní inženýrství takto využívá. Nejvíce patrná je tato problematika v automobilovém průmyslu. Jedná se tedy o takovou špionáž, kterou proti sobě automobilky vedou. [1, 2, 4]

Moderní automobily si jsou svým tvarem a provedením poslední dobou čím dál tím podobnější, než jak tomu bývalo v minulosti. Největší rozdíl mezi jednotlivými auty byl ve tvaru jejich karoserií. Nicméně v současnosti už ani toto pravidlo moc neplatí, a to zejména kvůli čínským automobilkám, které se kopírováním modelů jiných výrobců ani příliš netají. Jako příklad uvedu čínský automobil SR9 od značky Zotye, který je velmi podobný německému Porsche Macan. Jak lze poznat z **Obr. 2**, tak rozdíl mezi oběma vozy je velmi nepatrný. [1,4,5]



Obr. 2 Porovnání Porsche Macan s jeho čínskou kopií
[5]

2.1.2 Vojenství

Lidstvo mezi sebou svádí války již od počátku své existence. Pro získání převahy a následné vítězství se lidé vždy snažili využít jakoukoliv výhodu. Takovou výhodou může být právě technologická inovace. Jakmile se na jedné z válčících stran objevila taková novinka, druhá se ji snažila eliminovat. K tomu existuje mnoho způsobů. Jedním z nich je si podobnou výhodu pořídit také. To jde nejsnáze pomocí metody reverzního inženýrství. [1, 2, 4]

V průběhu historie bylo mnoho konfliktů, ve kterých bylo reverzní inženýrství využito. Nejlépe jsou popsány příklady z nedávné historie. Pro přiblížení si jeden z nich popíšeme. [1, 2, 4]

Psal se listopad roku 1942 a vojáci USA vstoupili do severní Afriky, aby ji osvobodili z područí států osy. V průběhu bojů se vojákům nacistického Německa podařilo ukořistit poměrně velké množství amerických zbraní. Mezi nimi i tzv. Bazuku. Tato zbraň se následně stala předlohou pro protipancéřovou zbraň německé výroby tzv.

Panzerschreck. Rozdíl mezi oběma zbraněmi není na **Obr. 3** příliš patrný. Spíš, než vzhledem si jsou zbraně podobné svým technickým provedením. [1, 6, 7]



Obr. 3 Porovnání původní americké zbraně a její německé kopie [7]

2.1.3 Medicína

V medicíně se reverzní inženýrství využívá z velkého množství důvodů. Často je na něj navázána i technologie 3D tisku. Jedním ze způsobu využití obou technologií je vizualizace částí lidského těla, které budou následně operovány. Dalším využitím může být tzv. personalizovaná medicína. Ta umožňuje vytvořit předmět jako ušitý na míru danému pacientovi. [4, 8, 9]

Využití reverzního inženýrství společně s 3D tiskem nalezneme také v protetice. V té je nezbytné přizpůsobit protézu přímo potřebám pacienta. V současnosti se s reverzním inženýrstvím můžeme setkat ve stomatologii při opravě a výměně zubů, v chirurgii při výrobě různých endoprotéz a celkově obecně při výrobě jakýchkoliv implantátů. Velmi zmiňovaný je v souvislosti s medicínou tzv. biotisk, který by dokonce mohl umožňovat výrobu nových a konkrétnímu pacientovi přizpůsobených orgánů. [8,9]

2.1.4 Software

Reverzní inženýrství v oblasti softwaru je proces, při kterém se analyzuje již existující aplikace nebo systém, aby se zjistilo, jak funguje, aniž by programátoři měli přístup ke zdrojovému kódu. Tato metoda se často využívá k odhalování softwarových chyb, optimalizaci výkonu, nebo přizpůsobení programů pro jiné platformy. Důležitou roli hraje také v kybernetické bezpečnosti, kde pomáhá analyzovat malware a odhalovat zranitelnost. Reverzní inženýři tak mohou vyvíjet bezpečnostní záplaty nebo obranné

mechanismy. Další využití je například při ladění aplikací nebo zajištění kompatibility mezi různými softwarovými systémy. [10]

3 3D skenování

Je-li potřeba pomocí zpětného inženýrství vyrobit nějakou součástku, tak je nutné ji nejprve rozebrat. Tím jsou získány potřebné vědomosti o jejích vnitřních mechanismech a detailech. V následném kroku je nezbytné potřebné funkční plochy proměřit. Dnes se k provedení těchto měření většinou používají různé metody 3D skenování. Tato kapitola bude pojednávat o samotném procesu 3D skenování a také si přiblížíme nejběžnější metody, se kterými bychom se mohli setkat. [4]

3.1 Metody 3D skenování

3D skenování se dá podle způsobu načítání dat rozdělit na dvě hlavní větve, a to na kontaktní a nekontaktní. Nekontaktní metoda může být nadále rozdělena na aktivní a pasivní. [11, 12]

3.1.1 Kontaktní 3D skenery (CMM)

Kontaktní skenování se provádí na pevné platformě, na které může být připevněno kloubové mechanické rameno. Na konci ramene je připevněna tzv. měřicí hlava, která na povrchu skenovaného tělesa zaznamenává souřadnice X, Y, Z. Souřadnicové měřicí stroje se ve strojírenství používají převážně ke kontrole přesnosti rozměrů výrobků. [4, 11, 12]

Metoda CMM má několik nesporných výhod i nevýhod. Mezi zásadní výhody patří využitelnost metody CMM prakticky v jakémkoliv případě, ať už jde o velmi malý členitý předmět nebo předmět vyrobený téměř z jakéhokoliv materiálu. Nevýhodami je, že při skenování větších objektů je proces časově nákladný a zároveň hrozí, že by mohl poškodit povrch měřeného tělesa. [4, 11, 12]

3.1.2 Nekontaktní 3D skenery

Je několik druhů bezkontaktních skenerů. Na rozdíl od kontaktních 3D skenerů se skenovaného tělesa žádným způsobem nedotýkají. Obvykle jsou založeny na nějaké formě měření světla, nejčastěji tzv. triangulaci. Výjimkou je medicína, ve které se používá

rentgenové záření, ultrazvuk a magnetická rezonance. U nich dochází k pozorování elektromagnetického záření, zvuku a magnetického pole. Aby došlo k triangulaci musí skener disponovat zdrojem světla a kamerou. Způsob, jakým ke skenování dat dochází si můžeme představit jako projekci velkého množství bodů vytvářených na povrchu skenovaného tělesa. K tvorbě bodů se nejčastěji používají polovodičové lasery. Tyto body se od tělesa odráží a pod určitým úhlem a dopadají na čočku snímací kamery. Z údajů o poloze bodů sesbíraných čočkou se nám následně vytvoří tzv. mračno bodů, s nímž se dá následně pracovat. Metod využívajících triangulaci existuje v současnosti velmi mnoho, nicméně základní princip zůstává většinou velmi podobný. Jak je uvedeno v předchozím textu nekontaktní skenování se dále dělí na aktivní a pasivní. Rozdíl mezi těmito dvěma druhy skenování je ten, že aktivní skener snímá umělé světlo vytvořené třeba laserem skeneru, zatímco pasivní skenery neemitují žádné záření a jsou nuceny pracovat s odrazy jiného světla od modelu. Často snímají běžně viditelné světlo. [4, 11, 12]

Bezkontaktní metoda skenování má oproti svému technologickému předchůdci několik výhod, ale i nevýhod. Přínosné je, že nedochází ke kontaktu mezi skenerem a tělesem, a díky tomu nemůže dojít k případnému poškození tělesa. Dalšími nespornými výhodami je vysoká rychlost a schopnost skenovat členitější nebo třeba rozměrově větší předměty než při skenování kontaktním. Nevýhodou je potíže se skenováním transparentních nebo lesklých modelů. Zároveň při něm musíme brát ohled na okolní



*Obr. 4 Nekontaktní 3D skener –
3DMakerPro Mole*

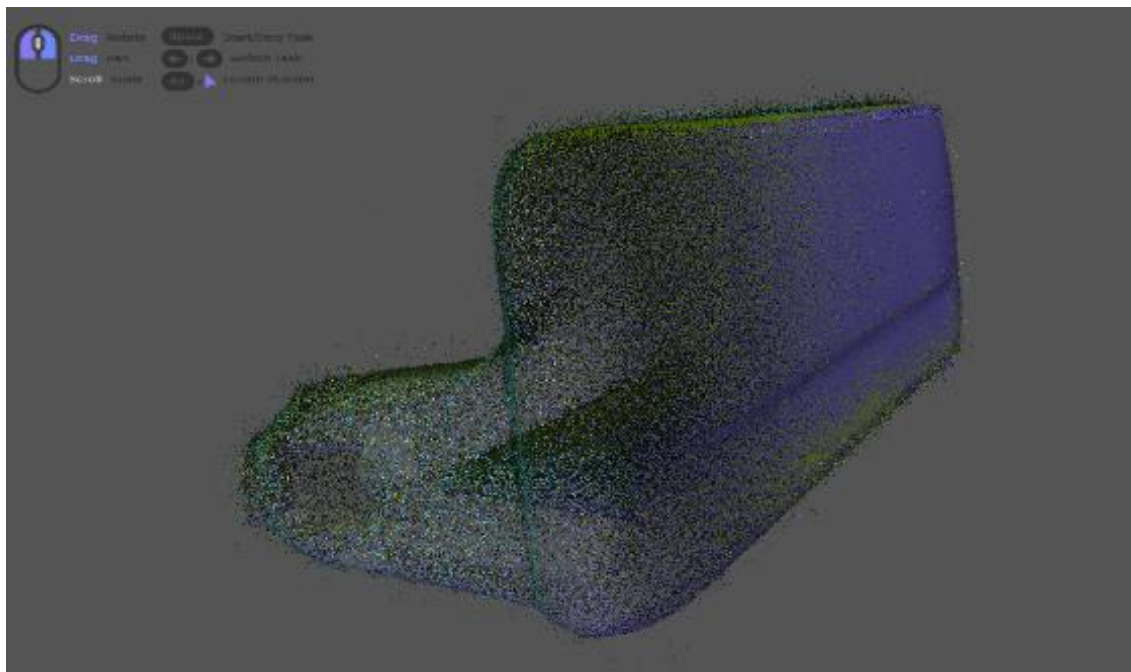
prostředí, a to především na světelné podmínky. Jak může takový bezkontaktní skener vypadat je názorně ukázáno na **Obr. 4**. [4, 11, 12, 13, 14]

3.2 Proces 3D skenování

Nejprve si vybereme z výše popsaných metod jednu, která je pro naši práci nejvhodnější. Provedením skenování získáme z již existující fyzické předlohy její digitální napodobeninu. Skenování se většinou provádí vícekrát, protože nemusí být vždy možné zobrazit všechny plochy tělesa naráz. U nekontaktního skenování bývá výstupem tzv. mračno bodů. Celý proces zahrnuje tři stěžejní operace, a těmi jsou: úprava mračna bodů, provedení triangulace bodů a na závěr vytvoření parametricky upravitelného tělesa. [4, 12, 14]

3.2.1 Mračno bodů

Mrak bodů viz **Obr. 5** definuje skenovaný 3D objekt jako velké množství bodů vytvořených triangulací. Tyto body nemají mezi sebou žádné vazby. Jedinou vlastností každého bodu jsou jeho prostorové souřadnice (x, y, z). Aby v následném kroku proběhlo vše podle představ, tak je naprosto nezbytné mračno očistit od bodů, které ke tvaru skenovaného předmětu nepatří, popřípadě nejsou pro další zpracování důležité. Kromě čištění je také potřeba zajistit rovnováhu počtu bodů. Velmi vysoké množství bodů



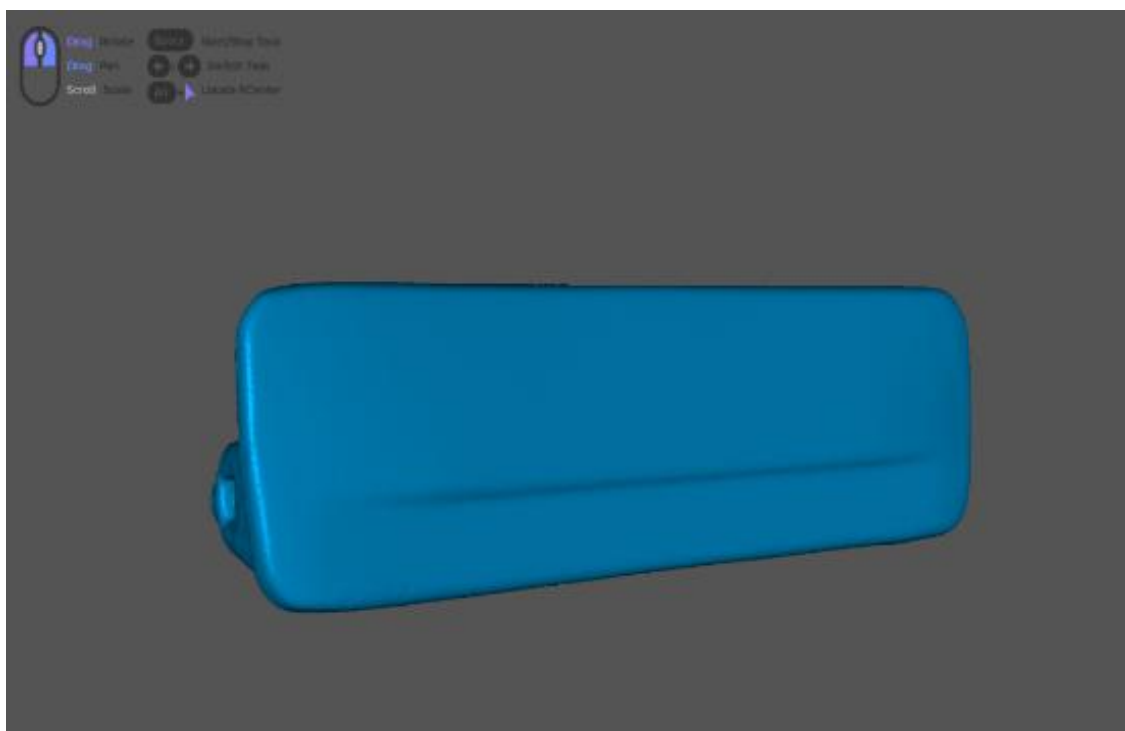
Obr. 5 Seskupené mračno bodů

zajišťuje větší detail, ale je náročnější na softwarové zpracování. Počet bodů ovlivníme zejména vhodným nastavením 3D skeneru. [4, 12, 14]

V případě, že je potřeba pro zajištění dostatečného množství bodů všech částí tělesa jej skenovat vícekrát, tak je následně nutné dílčí skeny složit do jednoho výsledného mračna reprezentujícího celé těleso. Existuje více způsobů skládání. Jedním z nich je skládání pomocí charakteristických bodů. Uživatelem jsou označeny dostatečně výrazné a bezpečně identifikovatelné body. Je nutné tyto body vytvořit alespoň tři. Pomocí těchto bodů je více mračen spojeno do jednoho. [4, 12, 14]

3.2.2 Vytvoření trojúhelníkové sítě (polygonizace)

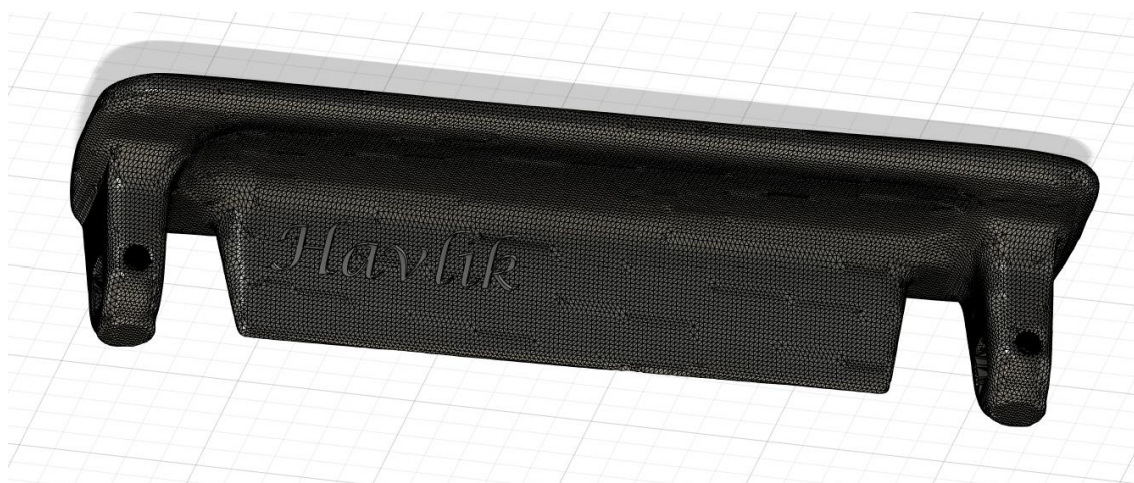
Dalším krokem je tzv. polygonizace. Jednotlivé body jsou spojeny do trojúhelníků, čímž nám z dat vznikne trojúhelníková síť. Tímto způsobem síť definuje objem a povrch objektu. Většina CAD softwarů dokáže STL soubory načíst pouze jako grafické objekty, což vyžaduje jejich další parametrizaci pro efektivní úpravy. STL formát se běžně používá jako zdroj dat pro přímý 3D tisk, jelikož nabízí jednoduchou reprezentaci tvaru modelu. Tento typ souboru však neobsahuje dodatečné informace, jako je například barva. Nicméně existují i soubory, které mohou obsahovat informace o barvě. Jedním z nich je formát OBJ. Mračno bodů převedené do trojúhelníkové sítě je ukázáno na **Obr. 6**. [4, 12]



Obr. 6 Polygonizovaný objekt

3.2.3 Úprava trojúhelníkové sítě

Ve strojírenství je kladen důraz na přesnost výrobků. Z toho důvodu je nutné provést takzvanou parametrizaci, tedy proces, který převede trojúhelníkovou síť do formátu upravitelného v některém z programů pro konvenční inženýrství. Těmi jsou myšleny programy jako Autodesk Inventor, Fusion 360 nebo SolidWorks. V nich jsme schopni navrhout tělesa s téměř neomezenou přesností. Proč nejsme schopni upravovat rozměry trojúhelníkové sítě do největších detailů je patrné z **Obr. 7**. Takto velké množství ploch totiž není možné upravovat tak, aby výsledek měl námi požadované rozměry. Pokud ale není nezbytné dosahovat tak velkých přesností nebo je potřeba provést úpravy, které nezasahují do funkčních ploch, tak lze upravovat pouze trojúhelníkovou síť. K tomu může být použito opět mnoho programů. Vhodný je např. Fusion 360. Dále můžeme použít Meshmixer nebo Blender. Trojúhelníkové sítě se dají lehce upravovat i v programech určených pro přípravu 3D tisku, tzv. Slicerech. Zde můžou posloužit programy jako PrusaSlicer, Bambu Studio a některé další. [4, 12, 14]



Obr. 7 STL soubor v programu pro jeho částečnou úpravu (Fusion 360)

3.2.3.1 Parametrizace

V předchozím odstavci byla zmíněna parametrizace. Ta je v profesionálním využití v CAD nebo CAM programech téměř nepostradatelná. Parametrizaci můžeme zjednodušeně popsat jako převod trojúhelníkové sítě na čtyřhranné plochy, které se poté snáze upravují. Existuje několik programů umožňujících tento proces. Mezi nejrozšířenější programy patří Geomagic Design X, VXmodel a Scan to 3D. Avšak pro běžného uživatele jsou tyto programy kvůli velmi vysokým cenám pohybujících se ve stovkách tisíc českých korun prakticky nedostupné. [4, 12, 14]

4 3D tisk polymerů v reverzním inženýrství

3D tisk je automatizovaný proces, při kterém se z digitální předlohy vytváří trojrozměrný fyzický model. Výsledný model je vytvářen z postupně přidávaného materiálu. Tento typ procesu se nazývá proces aditivní. Všechny obráběcí stroje využívají proces ke 3D tisku opačný, tedy proces, při kterém se materiál odebírá. Ten nazýváme proces subtraktivní. Při používání 3D tisku vzniká mnohem méně odpadu než při používání běžných výrobních postupů. Zároveň můžeme díky neúplné výplni vytvořit předměty o menší hmotnosti než za použití obrábění. [2, 4, 15, 16]

V reverzním inženýrství je 3D tisk hojně využíván k tvorbě prototypů. Jde o levný způsob, jak zhmotnit napodobované těleso a zjistit, zda odpovídá našim požadavkům. Pro tento účel je nejvhodnější 3D tisk polymerů. Většinou 3D tisk nepoužíváme k výrobě finálních výrobků, přestože jde také o jednu z možností. Bezkonkurenční je 3D tisk z hlediska výroby velmi levných a snadno získatelných prototypů, tedy modelů sloužících pouze pro představu, zda je tvar, velikost a cokoliv dalšího podle představ zadavatele. [2, 15, 16]

Existuje mnoho technologií 3D tisku polymerů. Nejznámější technologií mezi širokou veřejností je technologie FDM. V současnosti je možné kromě polymerů a různých plastových materiálů tisknout i z kovů, písku, potravin (např. čokolády), betonu a biologického materiálu. [2, 4, 15, 16]

4.1 Slicery

Před samotným 3D tiskem je tištěný model podle určitých parametrů nezbytné upravit. Tento proces se provádí v tzv. slicerech. Jedná se o specializovaný software, který převádí digitální 3D modely do podoby instrukcí pro tiskárnu ve formátu G-code. Hlavním úkolem sliceru je „rozřezat“ model na jednotlivé vrstvy a určit, jak se bude tisknout. V sliceru můžeme nastavit mnoho parametrů, které ovlivňují kvalitu, pevnost i rychlost tisku. Mezi nejdůležitější patří výška vrstvy, hustota výplně, rychlost tisku, teplota trysky a podložky nebo způsob generování podpor. Dále umožňuje optimalizovat trajektorii pohybu tiskové hlavy, což pomáhá minimalizovat chyby a zkrátit dobu tisku. Nejpopulárnější slicery jsou PrusaSlicer, Cura nebo Bambu Studio.

4.2 Metody 3D tisku

Všechny technologie 3D tisku jsou založeny na stejném principu, tedy nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Více metod vzniklo zejména kvůli nárokům a chování různých materiálů. Nejznámější technologie 3D tisku lze rozdělit do tří hlavních větví. První větev spočívá v postupném nanášení roztavené tiskové struny (filamentu) na tiskovou podložku. Další metoda spoléhá na vytvrzování tekutého materiálu (nejčastěji pryskyřice) na předem definovaných místech. Poslední základní technologie spéká jemný prášek pomocí výkonného laseru. [15, 16, 20]

4.2.1 FDM

Tato metoda je momentálně nejdostupnější a nejrozšířenější. Úspěchu dosáhla zejména díky tomu, že oproti ostatním metodám 3D tisku je uživatelsky jednodušší a zároveň bezpečnější. Je vhodná pro tisk prototypů, ale i funkčních modelů. Nejčastěji používaným materiál bývá plastová struna (filament). Tištěný model je vytvářen tak, že tisková hlava (extruder) za neustálého pohybu nanáší roztavený materiál na tiskovou podložku. Způsob pohybu tiskové hlavy v trojrozměrném prostoru ještě dělí tiskárny na delta a kartézské. [4, 16, 18, 21]

4.2.1.1 Kartézské 3D tiskárny

Jejich název je odvozen od Kartézské souřadnicové soustavy. Tisková hlava (extruder) se zde pohybuje na dvou lineárních osách (x, z). Pohyb po třetí ose (y) je obstarán pohybem podložky. Výrobou 3D tiskáren tohoto typu se proslavila česká firma PRUSA REASERCH. Na obrázku **Obr. 8** je první zleva jejich tiskárna MK4. [16, 18, 21]

4.2.1.2 Delta 3D tiskárny

U této 3D tiskárny je extruder zavěšen na třech ramenech. Název je odvozen od vzhledu 3D tiskárny. Zavěšená ramena připomínají řecké písmeno delta (Δ). Tiskárny jsou rychlejší a nabízejí větší tiskový prostor než kartézské 3D tiskárny. Nevýhodou je složitá stavba a kalibrace tiskárny. Zároveň je potřeba provádět pro pohyb ramen poměrně složité výpočty. 3D tisk je velmi perspektivní obor, a proto se v něm angažuje značné množství čínských firem. Jednou z nich je firma FLSUN, které se zaměřuje právě na tiskárny typu delta. Na **Obr. 8** je tato tiskárna zachycena uprostřed. [16, 19]

4.2.2 SLA

Tato technologie je založena na vytvrzování fotosenzitivní pryskyřice (resinu) většinou pomocí UV laseru. Tištěný materiál se přichytává na platformu (tiskovou podložku), ta podle konstrukce tiskárny sjíždí buď dolů nebo nahoru. Podložka se před vytvrzením každé nové vrstvy malinko posune, a tím vznikne prostor pro vytvoření nové vrstvy. Tím je způsoben vysoký detail výrobků. Nevýhodami tohoto typu 3D tisku je na rozdíl od technologie FDM poměrně dlouhá doba tisku a zároveň schopnost vytvářet jen menší modely. Zároveň není možný vícebarevný tisk. Technologie může být dále rozdělena podle způsobů osvětlování pryskyřice. [4, 16, 20]

4.2.2.1 SLA – laser

Tato metoda funguje jako postupný osvit tiskové vrstvy pomocí jednoho laserového UV paprsku. Doba tisku jedné vrstvy je závislá na velikosti plochy. Tato metoda je tedy poměrně časově náročná. [4, 16]

4.2.2.2 DLP

Od Stereolitografie, která využívá laser, se odlišuje tím, že celá vrstva je pomocí digitálního projektoru osvětlena najednou. Díky tomu je ušetřeno poměrně velké množství času. Zároveň 3D tisk více těles zabere stejně jako těleso jedno. [4, 16]

4.2.2.3 MSLA

Princip MSLA je velmi podobný technologii DLP. Rozdíl je v tom, že rozsah zdroje UV světla se nemění, ale tvar vytvrzované vrstvy je určován LCD panelem, který se nachází mezi zdrojem záření a vaničkou s resinem. UV světlo prostoupí jen tam, kde

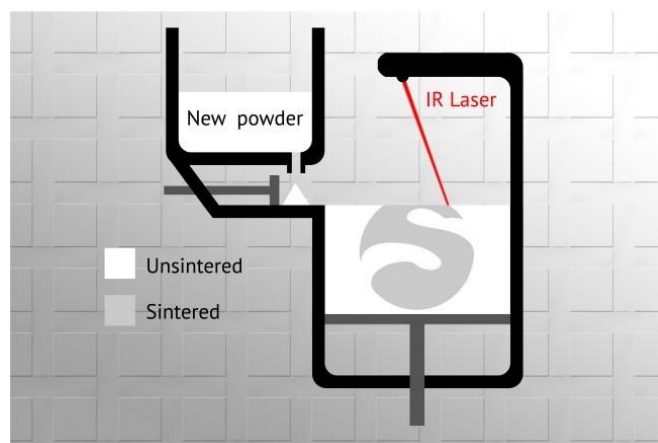


Obr. 8 3D tiskárny (řazeny z leva) - kartézská, delta, MSLA [18, 19, 18]

je panel aktivovaný. Této technologie využívá například resinová 3D tiskárna SL1S od firmy PRUSA REASERCH, která je na **Obr. 8** nejvíce vpravo. [4, 16]

4.2.3 SLS

Vstupním materiálem pro tento typ 3D tisku jsou částice obvykle o velikosti 20 až 100 μm . Prášek je následně působením laserového paprsku roztaven. Po roztavení prášku dojde v důsledku rozdílu teplot mezi okolním prostředím a teplotou nataveného prášku k jeho zchladnutí a vytvoření souvislé vrstvy. V okamžiku, kdy je vrstva hotová, tak válečkový nanašeč přesune určité množství prášku ze zásobníkové komory do tiskové komory. Tím celý proces (viz **Obr. 9**) nastává nanovo a opakuje se, dokud není model hotový. Pomocí tohoto způsobu výroby může být dosaženo velmi vysoké přesnosti. [4, 18, 20]



Obr. 9 Schéma SLS [18]

Metoda velmi podobné této se pod zkratkou SLM používá pro 3D tisk kovů. [17, 18]

4.3 Materiály pro 3D tisk polymerů

Polymery jsou makromolekuly, které utvářejí velmi dlouhé řetězce. Odtržením části řetězce nedojde k žádné změně v rámci celku. Jednotlivé druhy polymerů, ze kterých následně vytváříme fyzický model se mohou od sebe různě lišit. Zásadním rozdílem není barva materiálu nebo pouhým okem viditelný vzhled. Zásadní jsou jeho technické parametry a různé mechanické vlastnosti. Podle toho, pro jaký účel bude model používán je nezbytné zvolit nejprve vhodný způsob 3D tisku a následně druh materiálu. [2, 16]

4.3.1 Filamenty – FDM

FDM je v současnosti z hlediska tisku polymerů zdaleka nejvyužívanější metodou. Proto je na trhu široká škála materiálů jak z hlediska ceny, tak i variability. Také jsou nejlevnějším materiálem pro 3D tisk. Pomocí technologie FDM kromě běžných materiálů různých barev lze tisknout i kompozitní materiály připomínající dřevo nebo různé typy kovů, materiály svítící ve tmě, materiály měnící barvu po změně teploty nebo flexibilní (gumové) materiály. Existuje i filament Polycast vytvořený přímo pro požadavky přesného lití. Ten může být hned po vytištění využit jako vytavitelný model. Pro běžnou potřebu je však vhodné sáhnout po jednom z obvyklých materiálů. Těmi jsou plasty PLA, PETG, ABS a ASA. Filamenty jsou většinou skladovány namotané na cívce **Obr. 10**, ze které se v průběhu tisku odmotávají. [2, 4, 16, 18]

4.3.1.1 PLA

Materiál, se kterým se velice snadno tiskne. Ke svému roztavení potřebuje poměrně nízkou teplotu (215 °C). Na rozdíl od svých konkurentů se může vyrábět z obnovitelných surovin, jako je kukuřičný škrob. Proto je také poměrně biologicky nezávadný. Z toho pramení i výhoda, že při tisku nevzniká žádný zápach. Zároveň se jedná o nejlevnější a nejlépe dostupný typ filamentu. Tyto nesporné výhody jsou však vykoupeny problémy s mechanicko-tepelnými vlastnostmi materiálu. Materiál je tvrdý, ale zároveň křehký. Při namáhání v ohybu dojde rychle k jeho prasknutí. Další nevýhodou je neschopnost odolávat vyšším teplotám. K poškození modelu může dojít již při teplotách kolem 50°C. Kvůli svým vlastnostem je tedy velice vhodný pro tvorbu modelů a prototypů, nikoliv však pro praktické využití, ve kterém by mohl být mechanicky nebo teplotně namáhán. [16, 18, 21]

4.3.1.2 PETG

PETG je další často používaný materiál pro 3D tisk. Jde o skvělou volbu, protože jeho vlastnosti jsou kompromisem mezi náročností tisku a mechanicko-tepelnými vlastnostmi. Má vysokou teplotní odolnost a zároveň je velmi pevný a houževnatý. Při tisku je také jako PLA téměř bez zápachu. Nicméně samotný tisk PETG je přeci jen o něco náročnější než PLA. Například silně přilne k podložce a může být problematické jej z podložky sundat. Nicméně pro tisk mechanicky nebo tepelně namáhaných součástí se jedná o skvělou volbu. Není náhodou že firma PRUSA REASERCH z tohoto materiálu tiskne komponenty pro své 3D tiskárny. [16, 18, 21]

4.3.1.3 Polycast

Tento materiál se chová velmi podobně jako PLA. Má podobnou teplotu tisku jako PLA a výtisky z něj jsou velmi přesné. Navíc jeho vlastnosti umožňují vyleštit povrch v IPA. Díky tomu pak na kovovém odlitku nejsou viditelné jednotlivé vrstvy způsobené tiskem. Stěžejním důvodem, proč se pro metodu přesného lití používá filament Polycast a nikoliv PLA, je skutečnost že Polycast hoří beze zbytku. Po jakémkoliv jiném materiálu by ve formě zůstal popílek, což je při odlévání metodou přesného lití nežádoucí.

4.3.1.4 ASA a ABS

ASA je pevný a všestranný materiál. Má vyšší teplotu tání než ostatní materiály. Jeho předchůdce materiál ABS byl jedním z prvních polymerů, které se pro 3D tisk používaly. Příkladem využití ABS mohou být lego kostky. Rozdíl mezi ABS a ASA není na první pohled příliš viditelný. ASA je pro své mechanické vlastnosti vhodnější pro 3D tisk. Jinak pro materiál ASA platí totéž jako pro ABS. ASA má velmi vysokou teplotní odolnost. Znamky deformace může vykazovat až při teplotách okolo 100°C. Ve srovnání s PLA a PETG však v průběhu tisku citelně zapáchá a kvůli jeho teplotní roztažnosti dochází ke komplikacím tisku jako je kroucení nebo odlepování od podložky. Výhodou je možnost lepení více modelů k sobě pomocí acetonu nebo model pomocí acetonových par vyleštit. [16, 18, 21]



Obr. 10 Filament PETG Prusa Orange [18]

4.3.2 Resiny (pryskyřice) – SLA

Resin je materiál využívaný v technologii SLA tisku. Má tekutou formu a k jeho vytvrzení je nutné použít světelný paprsek. Tisk SLA metodou je obecně nákladnější než FDM technologie, především kvůli ceně samotného materiálu, která se pohybuje od přibližně 1 000 do 10 000 Kč za litr. Výrobky z resinu mají nižší mechanickou odolnost

a větší křehkost než produkty z běžného filamentu, svými vlastnostmi se mohou blížit sklu. Při pořizování resinu je důležité znát vlnovou délku světla, při níž dochází k jeho vytvrzení, protože ne každý resin je kompatibilní se všemi tiskárnami. Ačkoli se zdá, že existuje mnoho druhů resinů, jejich základ je stejný. Rozdíly v jejich vlastnostech jsou většinou způsobeny přidanými složkami, jako jsou různá barviva nebo jiné příměsi. Jak vypadá výrobek vytištěný na resinové 3D tiskárně i s podpěrami je ukázáno na **Obr. 11**. [16, 18]

4.3.3 Prášky – SLS

Plastové materiály jsou kvůli své nízké teplotě tání a nízké teplotní vodivosti pro spékání nejvhodnější. Prášek se skládá z velkého množství zrn o velikosti 20 až 100 μm . Laserem je roztaven pouze prášek potřebný pro tisk, takže z hlediska využitelnosti materiálu je technologie SLS velmi praktická. Pro 3D tisk plastů technologií SLS používáme nejčastěji polyamidy (nylon). Příkladem označení může být PA 12 (Polyamid 12), ale lze použít i jiné materiály jako například ABS. [4, 18, 22]



Obr. 11 Model vytištěný na resinové 3D tiskárně

5 Přesné lití

Přesné neboli investiční lití, z anglického „investment casting“, je neopomenutelná metoda výroby kovových odlitků. Je také možné setkat se s názvy jako metoda ztraceného vosku nebo metoda vytavitelného modelu. Tyto názvy odkazují na skutečnost, že dochází k roztavení primárního modelu v budoucí formě. [23]

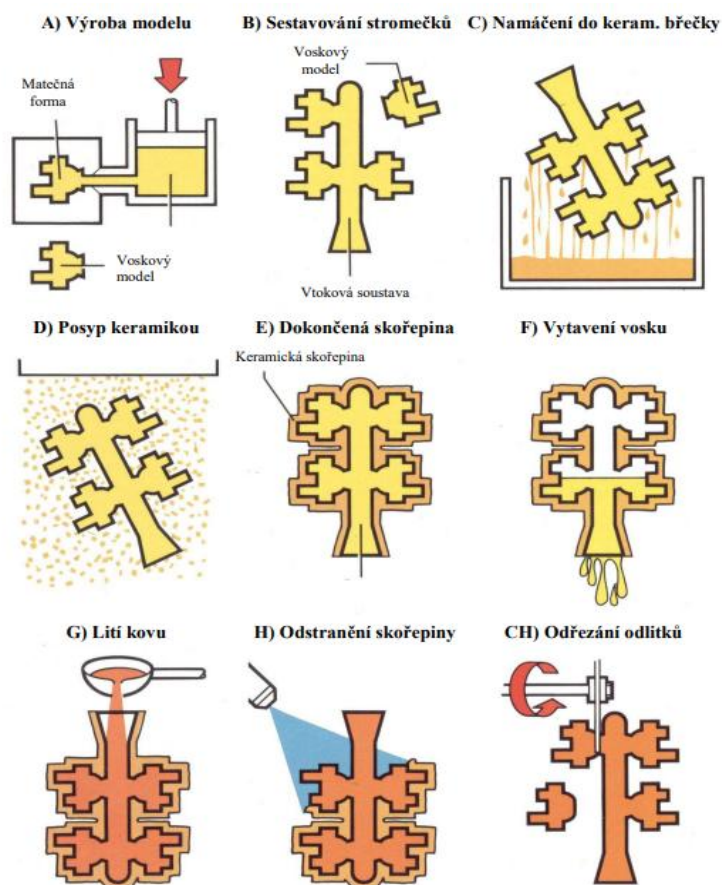
První odlitky touto metodou byly podle předpokladů archeologů vyrobeny už ve 4. až 3. tisíciletí před naším letopočtem. Jako vytavitelný model byl používán včelí vosk.

Nejstarší předměty pochází z oblasti blízkého východu a jihovýchodní Asie. Následně se technologie prostřednictvím velkých starověkých civilizací jako byla Čína nebo Řím rozšířila do celého světa. [23]

V průběhu středověku a novověku se od průmyslového využití přesného lití upustilo. Využívalo se pouze pro umělecké účely, jako je výroba šperků, zbraní, náboženských předmětů a zdobených zbraní. Zlom nastal až ve 20. století. Od 30. let 20. století se investiční lití začalo považovat za užitečný nástroj k výrobě přesných odlitků. Stěžejní pro rozvoj přesného lití se však stala až 2. světová válka, a to kvůli vysokým nárokům na přesnost komponent využívaných v té době v nejmodernějších zbraních. Dalším důvodem se stal rozvoj neželezných slitin v průběhu 20. století, které jsou díky své zabíhavosti schopny dosahovat přesnějších tvarů, než odlitky z oceli nebo litiny.[23]

5.1 Proces lití na vytavitelný model

Výstupem lití na vytavitelný model je těleso velmi podobné finálnímu výrobku. Díky tomu poté není nutné těleso příliš obrábět, případně velmi málo. Musí ale být



Obr. 12 Princip technologie přesného lití [25]

dodrženy všechny aspekty přesnosti. Mezi ty řadíme drsnost povrchu, rozměrovou přesnost a detaily tvaru modelu. [23, 24]

Proces se sestává ze čtyř základních kroků. Prvním krokem je vytvoření vytavitelného modelu. Druhým krokem je vytvoření skořepiny na povrchu vytavitelného modelu. Třetím krokem je vytavení vytavitelného modelu. Čtvrtým a posledním krokem je nalití kovu do formy a po jeho ztuhnutí rozbití formy a vyjmutí výrobku. Proces je detailněji popsán na **Obr. 12** Princip technologie přesného lití [25] [24, 25]

Pro ekonomickou návratnost celého procesu je nezbytné, aby při jednom lití nedocházelo k výrobě pouze jednoho kusu, ale rovnou více kusů najednou. Toho se docílí skládáním více odlitků do jednoho celku, tzv. stromečku. Při konstrukci stromečku je nezbytné brát v potaz několik parametrů závislých na druhu odlévaného materiálu. Mezi ty patří zabíhavost kovu do formy, způsob krystalizace, tuhnutí materiálu, smršťování při tuhnutí a z něj vyplývající staženiny. Ty následně ovlivňují kvalitu odlitků. [25, 26]

5.1.1 Materiál vytavitelného modelu

Historie této strojírenské výroby sahá do dávného starověku. V té době lidé nebyli schopni výroby syntetických materiálů, jako je tomu dnes. Z toho důvodu byl prvním materiálem využitým na přesné lití včelí vosk. Vosk se velmi osvědčil, a proto je používán i v současnosti. Nepoužívá se však už včelí vosk, ale pro co nejlepší vlastnosti vosku se používají směsi zhotovené z mnoha druhů vosků. Požadované vlastnosti pro vosk jsou: minimální tepelná roztažnost, měl by vytvořit čistý hladký povrch, chemická odolnost proti materiálu formy (keramické břecce), měl by obsahovat minimum popela, měl by přesně reprodukovat mateční formu a doba tuhnutí vosku by měla být co nejkratší. Výroba se provádí buď gravitačním litím nebo vstřikováním. Gravitační lití je však spíš ojedinělou záležitostí. [27]

5.2 Lití na spalitelný model

Při lití na spalitelný (nebo přesněji řečeno odpařitelný) model se zhotoví odlitek z pěnového polystyrenu. Na rozdíl od ostatních způsobů lití zůstává model ve formě až do samotného odlévání. Jedná se pak o tak zvanou metodu „plné formy“. Stykem s roztaveným kovem při lití se model spálí (odpaří se) a kov vyplní dutinu vytvořenou spálením modelu. Spaliny odchází z formy kanálkem určeným pro jejich odchod.

5.3 Výroba keramické formy

5.3.1 Materiál forem

Keramická forma pro odlévání se vždy skládá ze tří základních složek. Těmi jsou pojiva, plniva a ostřiva. Plniva smíchaná s pojivem vytváří tzv. keramickou břečku. Ostřiva se dále dělí na modelový a výplňový písek. Modelový písek je nový řádně upravený písek, který se pěchuje na keramickou břečku. Většinou se jedná i o písek s menší zrnitostí. Výplňový písek slouží pouze k vyplnění ostatních prostorů formy a je to recyklovaný starý písek. [27, 28]

Existují dva základní typy pojiv. Alkosily na bázi alkoholu a hydrosily na bázi vody. Alkosily mají lepší pojící vlastnosti, ale oproti hydrosilům jsou agresivnější k životnímu prostředí a způsobují horší pracovní podmínky pro zaměstnance. Hydrosily jsou zároveň levnější než alkosily. [24, 27]

Ostřiva neboli žáruvzdorné materiály jsou určující pro parametry výsledné formy. Musí splňovat hned několik parametrů jako je žáruvzdornost, nízká tepelná roztažnost a chemická netečnost vůči odlévanému materiálu. Při vývoji nové formy je také podle požadavků na formu potřeba zvážit cenu ostřiv a jejich dostupnost. Žáruvzdorných materiálů je velmi mnoho. Patří mezi ně například křemičitý písek, zirkon, šamot a korund. [24, 27]

5.3.2 Proces výroby keramické formy

Pro výrobu keramické formy je nejprve nezbytné na povrchu vytavitelného tělesa vytvořit keramickou skořepinu, která se následně spojí s ostřivem a tím se vytvoří keramická forma. Samotná skořepina se vytvoří tak, že je namočena v keramické břečce. Po namočení musí forma odkapat. Poté je na skořepinu nanášen žáruvzdorný materiál (ostřivo). Zrnitost ostřiva prvních dvou vrstev určuje kvalitu povrchu hotového odlitku. Proto se na něj zpravidla používají písky s nižší zrnitostí (0,15 – 0,25 mm). Písek je na skořepinu nanášen buď sprchovým nebo fluidním posypem. Při fluidním posypu se v posypovém loži vzduchem načeří ostřivo. Takto obalený stromeček se nechá v suché

místnosti usušit. Proces sušení a obalování se podle potřeb vlastností formy provádí vícekrát. [24, 27, 28]



Obr. 13 Hotové keramické formy v sušící místnosti

5.4 Materiály na odlévání

Metodou vytavitelného modelu můžeme odlévat širokou škálu kovových materiálů. To je kromě zvýšení nároků na přesnost důvod, proč je technologie přesného lití opět na vzestupu, přestože byla známá po tisíce let. V praxi se touto metodou běžně odlévají slitiny hliníku a superslitiny, u kterých je přesné lití téměř jediným způsobem výroby. Důležitým aspektem při lití na vytavitelný model je zabíhavost materiálů. Materiály se špatnou zabíhavostí, jako mohou být například slitiny železa by pro samotné gravitační lití byly nevhodné. Tento problém může být do budoucna vyřešen metodou LPIC, při které se v prostoru s roztaveným kovem vytváří podtlak a do formy je tedy kov vháněn pod tlakem. Tím se dosáhne vyšší zabíhavosti. [27, 29, 31, 32]

5.4.1 Speciální slitiny odlévané metodou přesného lití

Superslitiny se vyznačují extrémně vysokou pevností při vysokých teplotách. Ty na bázi niklu a kobaltu se téměř jinak, než pomocí metody přesného lití neodlévají. Superslitiny jsou velmi drahé materiály a vyrábějí se z nich pouze velmi teplotně a mechanicky namáhané součástky, jako jsou například lopatky pro letecké turbíny. Současné letectví by se bez superslitin téměř neobešlo. [30, 31]

Přesné lití nabízí při odlévání superslitin mnoho výhod. První výhodou je, že umožňuje tvorbu například velmi složitých chladících kanálků uvnitř lopatek turbín.

Další výhodou je, jak už ze samotného názvu technologie vyplývá, že disponují kvalitním povrchem. Z toho důvodu již není odlitky potřeba dále obrábět, čímž se ušetří opad. To je kvůli vysokým cenám superslitin velmi výhodné. [29, 30, 31]

6 Praktická část

Praktická část této práce se zaměřuje na kompletní postup výroby náhradního dílu metodou reverzního inženýrství. Jako předmět reprodukce byla zvolena klika od dveří vozidel Škoda, která byla běžně používána v automobilech 70. a 80. let 20. století, tato konkrétní pochází z modelu Škoda 1203. Pro vytvoření nových klik bylo nejprve nutné zhotovit jejich digitální model pomocí 3D skenování. Tento model byl následně upraven dle požadavků zadavatele a připraven pro 3D tisk. Další krok spočíval v kombinaci více klik a vtokové soustavy do stromečku, který jsme následně rovněž připravili pro 3D tisk. K výrobě stromečku jsme použili materiál Polycast, vhodný pro tvorbu vytavitelných modelů. Posledním krokem experimentu bylo odlévání a následné zpracování odlitků.

6.1 Původ kliky

Replikovaná klika od dveří pochází konkrétně z historického automobilu Škoda 1203 minibus. Tento vůz se začal vyrábět v Československu v druhé polovině roku 1968. Šlo o reakci Československého vedení a na nedostatek užitkových vozů. Předchozí užitková varianta Škoda 1202 (Station) přestávala být dostačující variantou. Došlo tedy na představení nového modelu. Jelikož v podmínkách komunistického Československa na přelomu 60. a 70. let 20. století bylo nemyslitelné začít s kompletní výrobou nového automobilu, tak se tento užitkový vůz skládá z velké části z dílů pro osobní automobily. Replikovaná klika měla přesně takový osud. Kromě Škody 1203, na které se tato verze kliky objevila v roce 1974, kdy došlo ke „kosmetickým změnám“, se naprosto identická klika využívala i na vozech Škoda 100. Dalším příkladem využívání komponent z různých automobilů mohou být i ikonické „slzičky“, tedy zadní světla, která najdeme i na automobilu Škoda 1000 MB. Výroba automobilu Škoda 1203 skončila



Obr. 14 Škoda 1203 minibus De Luxe

oficiálně v roce 1997. Za téměř 30 let výroby se vyrobilo 69 727 kusů. Jelikož se tyto vozy nevyrábí už téměř 30 let, tak shánění nových náhradních je poměrně komplikované. K tomu nepřispívá ani fakt, že vozidlo nepatří k nejčastějším sběratelským kouskům. V současnosti existuje pouze několik desítek pojízdných kusů. [33]

6.2 Pracovní postup

Experiment byl prováděn jako důkaz, že reverzní inženýrství je efektivní způsob strojírenské výroby. Využitelné reverzní inženýrství může být například v případech, kdy je rekonstruovaná komponenta špatně dostupná, nevyrábí se nebo je potřeba ji vylepšit. Následující popis pokrývá všechny fáze experimentu a zahrnuje všechny kroky, které byly provedeny.

1. 3D skenování
2. Úprava STL souboru
3. 3D tisk finálního prototypu
4. Tvorba stromečku
5. 3D tisk stromečku
6. Výroba formy pro odlévání
7. Odlévání
8. Následné zpracování odlitku (Postprocessing)

6.2.1 Postup 3D skenování

1. Typ 3D Skeneru

K 3D skenování jsem využil 3D skenery zapůjčené od organizace EDUteam. Měl jsem k dispozici dva modely: Shining 3D Einstar a 3DMakerPro Mole (Krték). Nejprve jsem se seznámil s oběma zařízeními i jejich specializovaným softwarem a naučil se s nimi pracovat. Pro svůj projekt jsem nakonec zvolil skener 3DMakerPro Mole, protože nabízí vyšší rozlišení pro zachycení jemných detailů. Naopak Shining 3D Einstar je lépe využitelný pro skenování větších objektů. Oba 3D skenery jsou zobrazeny na Obr. 15 Porovnání využívaných 3D skenerů



Obr. 15 Porovnání využívaných 3D skenerů

2. Software

Oba z představených skenerů mají pro práci s nimi svůj vlastní software. Vývojáři navíc vytvořili své vlastní video návody, čímž se celý proces seznámením se skenováním usnadní. Shining 3D Einstar pracuje se softwarem EXstar, 3DMakerPro Mole pracuje v programu JMStudio. Oba programy jsou na internetu zdarma ke stažení.

3. Propojení s počítačem

Pro zahájení 3D skenování je nezbytné mít skener připojený k elektrické síti a propojený s počítačem prostřednictvím nejčastěji kabelu USB. Během skenovacího procesu skener načítá všechny potřebné parametry a odesílá je do počítače, kde následně probíhá jejich zpracování. Z tohoto důvodu je důležité disponovat počítačem s výkonným

procesorem, ale hlavně grafickou kartou. Hardwarově je velmi náročný program EXstar. JMStudio by mělo být schopné pracovat téměř na jakémkoliv zařízení.

4. Světelné podmínky

Pro usnadnění procesu 3D skenování je důležité zajistit vhodné světelné podmínky. Místnost, ve které skenování probíhá, by měla být dostatečně osvětlená, avšak světelné paprsky by neměly dopadat přímo na skenovaný objekt. Některé povrchy mohou být pro skenování nevhodné, zejména ty, které světlo propouštějí nebo silně odrážejí. V našem případě jsme se s tímto problémem setkali, a proto jsme před skenováním použili speciální skenovací sprej. Tento sprej zmatňuje povrch objektu a umožňuje tak přesnější načtení bodů. Během skenování jsme pracovali se dvěma typy sprejů – prvním byl sprej na bázi křídly, který je nutné po skenování očistit, a druhým sprej na bázi cyklodekanu, jenž se přirozeně odpařuje při běžné pokojové teplotě.



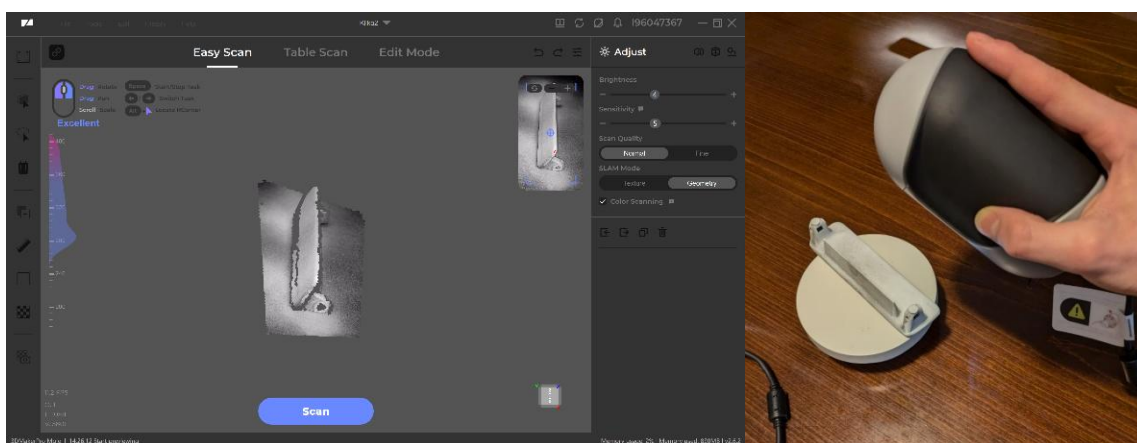
Obr. 14 Klika nastříkaná skenovacím sprejem

5. Kalibrace

Pro správné fungování 3D skeneru je nezbytné před jeho použitím provést tzv. kalibraci. Ta spočívá ve skenování pevně daných bodů na speciální podložce. Tím se zajistí vhodná poloha kamery snímající body emitované laserem na skenovaný objekt. U těchto dvou skenerů je pravidelná kalibrace nutná pouze u Shining 3D Einstar.

6. Skenování

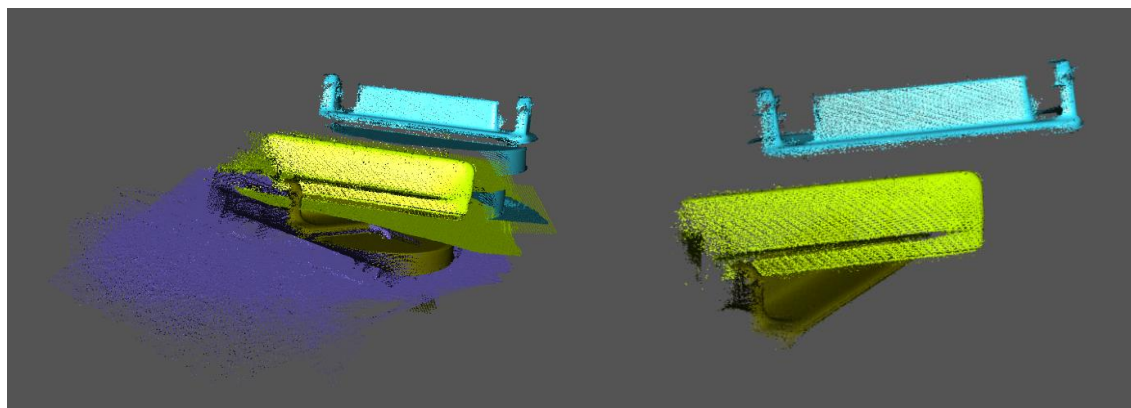
Samotný proces skenování je pak uživatelsky velmi jednoduchý. Na obrazovce počítače připojeného ke skeneru (v našem případě výkonnému notebooku) sledujeme již naskenované části tělesa a snažíme se pomocí kamer na skeneru zabrat co nejvíce částí objektu. Výstupem skenování je mračno bodů. Jelikož nejsme schopni jedním skenováním zobrazit všechny strany povrchu tělesa, tak jsme nuceni skenování provádět vícekrát.



Obr. 16 Skenování

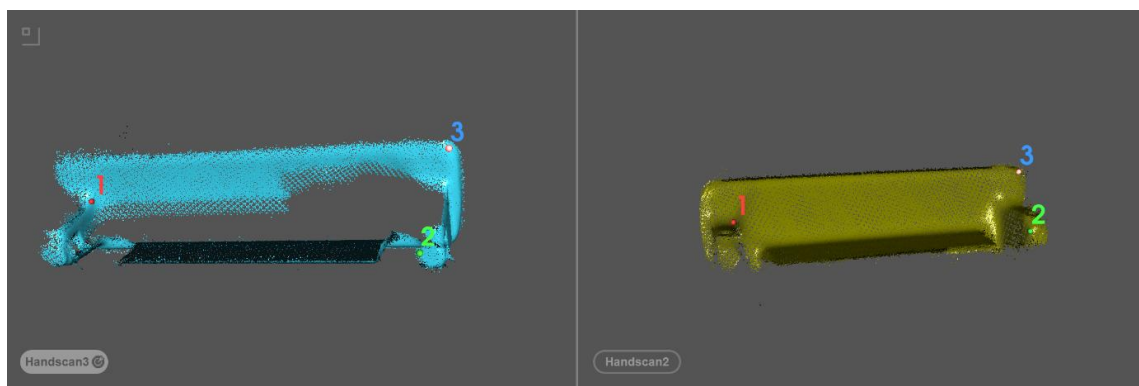
7. Optimalizace mračen bodů

Výstupem skenování je několik neuspořádaných mračen bodů, která je před triangulací nutné upravit a sloučit do jednoho celku. Nejprve je třeba odstranit body, které neleží na povrchu skenovaného tělesa – například body z podložky, na které je těleso umístěno. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Rozdíl mezi mračky před a po odstranění přebytečných bodů je zobrazen na **Obr. 17**. Jakmile jsou přebytečné body odstraněny,



Obr. 17 Mračno před a po odstranění přebytečných bodů

nastává fáze spojování jednotlivých mračen. Tento program nabízí dvě možnosti seskupení – automatické zarovnání nebo manuální spojení pomocí charakteristických bodů. Vzhledem k neuspokojivým výsledkům automatického seskupení jsme se rozhodli pro manuální metodu. Proces výběru charakteristických bodů je znázorněn na **Obr. 18** Propojení mračen pomocí charakteristických bodů. Celý proces skenování a spojování je pro uspokojivý výsledek nutné několikrát opakovat. My jsme z toho důvodu celý proces prováděli čtyřikrát. Finální podoba čtyř seskupených mračen je zobrazena na **Obr. 5** Seskupené mračno bodů. Body jednotlivých každého mračen jsou zobrazena v jiných barevných provedeních.



Obr. 18 Propojení mračen pomocí charakteristických bodů

8. Triangulace

Posledním krokem 3D skenování je převedení mračna bodů do formátu STL. Tento proces je plně automatizovaný. Uživatel pouze ovlivňuje, jaký požaduje počet trojúhelníků vzniklých spojením jednotlivých bodů. Tím se vytváří balanc mezi přesností prostorové sítě na jedné straně a velikostí výstupních dat a složitostí procesu polygonizace na straně druhé. Finální polygonizovaná klika pro export v souboru STL je na **Obr. 6** Polygonizovaný objekt.

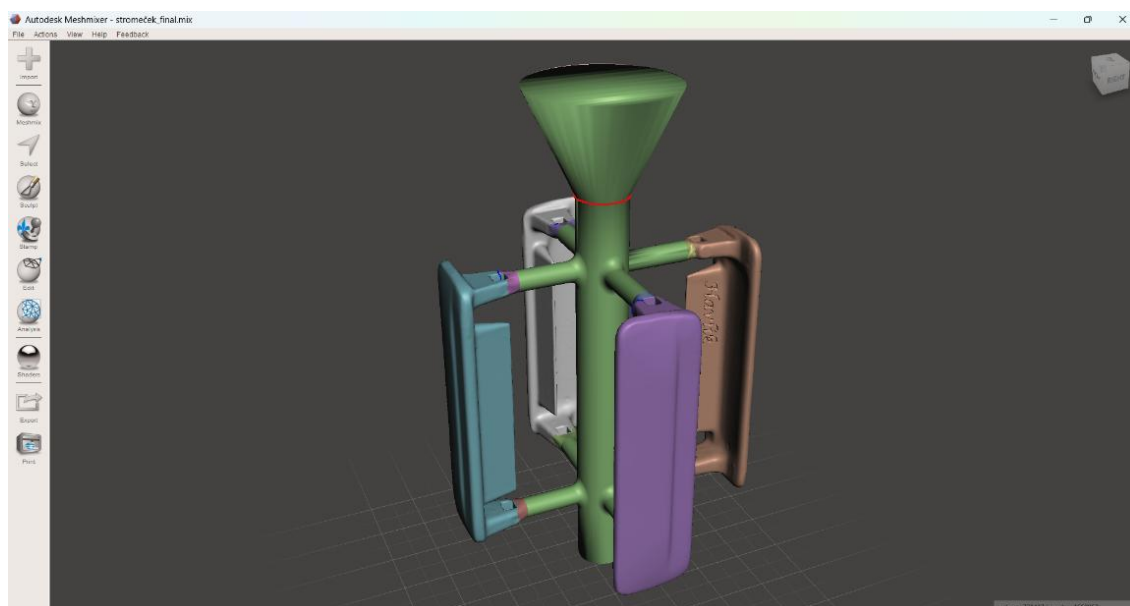
6.2.2 Úprava STL souboru kliky

Pokud by reverzním inženýrstvím byla reprodukována nějaká funkční součást a bylo by potřeba přesně změnit její funkční rozměry, tak by přišla na řadu parametrizace. Jelikož toto není u naší kliky potřebné, tak tento krok přeskočíme a budeme se věnovat pouze lehkým úpravám tělesa ve formátu STL. Naši kliku jsme si chtěli jen lehce personifikovat napsáním jména na zadní stranu kliky. To jsme provedli v programu Fusion 360. Dále bylo v této výrobní fázi potřeba odstranit přebytečné nerovnosti. Některé z nich byly způsobeny skenováním, jiné se už na původní klice. Odstraňování

nerovností bylo provedeno v programu Meshmixer. Kliky bez přebytných nerovností a s vepsaným jménem je na **Obr. 7**. Takto upravená kliky byla připravena k tisku jako finální verze prototypu.

6.2.3 Výroba stromečku pro odlévání

Stromeček se skládá ze dvou hlavních částí. První z nich jsou kliky, kterých je na stromečku umístěno více, což zvyšuje efektivitu a ekonomičnost odlévání. Druhou část tvoří vtoková soustava, která nejen propojuje jednotlivé kliky, ale také usnadňuje nalévání tekutého kovu do formy. Před připojením na stromeček bylo nutné kliky upravit



Obr. 19 Hotový stromeček v programu Meshmixer

v programu Meshmixer. Od finálního prototypu se liší absencí otvoru pro zašroubování ke dveřím auta, jelikož tento otvor je příliš úzký a nevhodný pro odlévání. Proto byl digitálně odstraněn a během následného opracování odlitku bude znovu vyvrtán. Vtoková soustava byla navržena v programu Fusion 360. Po dokončení úprav na klikách a vytvoření vtokové soustavy byly všechny komponenty, tedy čtyři kliky a jedna vtoková soustava, spojeny v programu Meshmixer. Výsledný model byl poté exportován ve formátu STL, který je vhodný pro další postup.

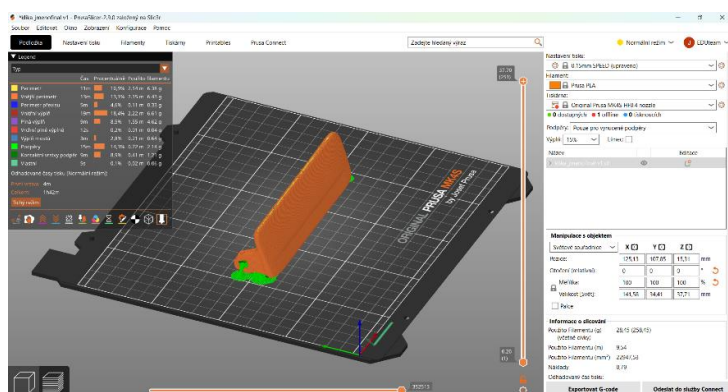
6.2.4 3D tisk

Dalším krokem bylo vytištění všech připravených souborů. Vzorové modely byly vytištěny na tiskárně MK4S od firmy Prusa. Stromečky se tiskly na tiskárně Bambu Lab X1C. Příprava modelů probíhala ve dvou slicerech PrusaSlicer a Bambu Studio.

Důvodem bylo používání tiskáren od různých výrobců. Přestože by slicery měly být s tiskárnami od různých výrobců kompatibilní, tak z důvodů komfortnějšího nastavování byly použity ty od stejných výrobců.

Parametry 3D tisku prototypu kliky

Prototyp kliky byl vytištěn na tiskárně Prusa MK4S. Na úpravu digitálního modelu byl použit Slicer od stejného výrobce jako je tiskárna – PrusaSlicer. Důležitý je tvar a povrch modelu, jelikož bude sloužit jen pro ukázkou, tak nijak zvlášť nezáleží na

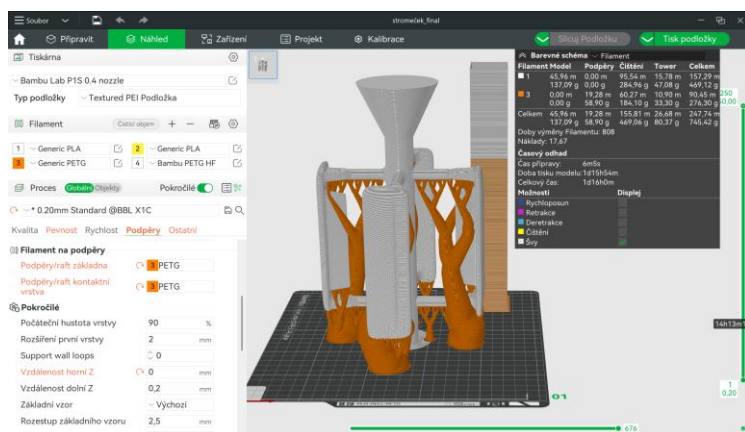


Obr. 20 Nastavení parametrů tisku kliky a vytištěný model kliky

jeho odolnosti proti mechanickému a tepelnému opotřebení. Z těchto důvodů je ideální pro tisk filament PLA. Pro kvalitnější povrch výtisku byl tištěn s podpěrami a pro co nejmenší náklady na materiál se tiskl s co nejmenší výplní.

Parametry 3D tisku stromečků

Stromečky byly vytištěny na tiskárně Bambu Lab X1C. Výhodou této tiskárny oproti Prusa MK4S je schopnost tisknout větší modely a schopnost více materiálového



Obr. 21 Nastavení parametrů tisku stromečku s vytištěným stromečkem

tisku. Jako Slicer bylo použito Bambu Studio. Stromečky byly vytištěny v celkovém počtu čtyř kusů. Tři posloužili jako vytavitelné modely. Jeden byl vytištěn pro ukázkou. Na tisk stromečků byly použity tři druhy filamentů. Filamenty PLA, PETG a **Polycast**. Filament PETG posloužil pro tisk podpěr, jelikož stromeček by bez podpěr nebylo možné metodou FDM vytisknout. Důvod, proč byl na podpěry použit filament PETG, a ne PLA jako na modelu je ten, že přilnavost mezi oběma filamenty je poměrně nízká. Díky tomu bylo následně poměrně snadné odstranit podpěry od zbytku modelu.

Předmětem zkoumání byla také závislost kvality odlitku na materiálu použitém k 3D skenování. Z toho důvodu se každý stromeček použitý jako vypalitelný model odlišoval. První byl vytištěn materiálem PLA s malou výplní. Druhý byl vytištěn z materiálu Polycast se stejnou výplní jako ten předchozí. Poslední byl vytištěn úplně bez výplně – docházelo pouze k tisku perimetru.

6.2.5 Výroba forem

Nejprve bylo nutné připravit stromečky k zalití do sádry. V důsledku nedokonalostí tisku se na několika stromečcích objevily díry, které bylo potřeba zacelit, aby tekutá sádra nevnikla dovnitř modelu a nevyplnila tím část tvaru budoucí dutiny. K tomu byla použita tavná pistole. Dalším krokem bylo zašroubování ocelového vrutu s okem do horní části vtokové jamky. Do těchto ok se následně přivázal provázek, který umožnil přesné vyměření vzdálenosti mezi spodní plochou stromečku a spodní plochou formy. Poslední



Obr. 22 Příprava stromečků

úpravou před zalitím do sádry bylo ovázání stromečku žíhaným drátem, který zpevňuje formu a zabraňuje jejímu poškození během vypalování i samotného lití.

Formovací rám byl pro potřeby naší práce nahrazen plastovými kbelíky o objemu 10 litrů. Stromeček byl zavěšen na provázku upevněném ke stropu a umístěn do středu kbelíku. Pomocí provázku bylo možné stromeček zvedat a spouštět. Nakonec byl zavěšen tak, aby spodní plocha vtokové soustavy stromečku byla ve vzdálenosti 45 mm od dna kbelíku. Tato výška byla dostatečná k zabránění poškození formy tepelným namáháním.



Obr. 23 Stromeček zavěšený ve formovacím rámu a odlévání sádry

Pro naše formy byla jako formovací hmota použita běžně dostupná bílá stavební sádra. Nejprve bylo nutné si sádro smícháním s vodou připravit. Osvědčilo se, že je vhodné sádro postupně přisypávat do vody, což zajišťuje vyšší viskozitu směsi a minimalizuje tvorbu hrudek. Jakmile byla směs hotová, následovalo zalití stromečku do



Obr. 24 Hotové formy

sádry. Při nalévání do kbelíku bylo důležité postupovat opatrně, aby stromeček zůstal přibližně uprostřed rámu. Na přípravu tří forem bylo spotřebováno 40 kg sádry. Po vytvrdnutí sádry forem se kbelíky odstranily.

6.3 Odlévání metodou přesného lití

Jelikož naším materiálem stromečku je plast (PLA, Polycast), tak se nejedná o metodu na vytavitelný model, kde je materiálem vosk, tak ani metodu na spalitelný model, kde materiálem většinou bývá polystyren. Spojením metody přesného lití s 3D tiskem vznikne metoda označovaná jako hybridní přesné lití (hybrid investment casting). [34]

Slitinou použitou na odlévání klik byl Silumin. Silumin je slitina hliníku s křemíkem. Tento konkrétní obsahoval 90% hliníku, 8% Křemíku a 2% Mědi.

Postup odlévání

K výrobě klik je nejprve nutné odstranit plastový stromeček uvnitř formy. Toho se dosáhne zahřátím a výdrží formy na teplotách v rozmezí 500–900 °C, čímž dojde k vypálení modelu. Po dostatečné teplotní výdrži se forma vyjme z pece a připraví na zalití kovem. Po nalití kovu do formy se forma nechá vychladnout. Po vychladnutí se forma rozbije a odlitek se z formy vyjme.

6.3.1 Použité pece

K provedení celého postupu jsme použili dvě odporové pece. Jedna pec sloužila k zahřátí formy a vypálení stromečku. Tato pec obvykle slouží k tepelnému zpracování. Druhá byla použita k roztavení kovu, který se následně lil do formy. K tomuto procesu se běžně používá.



Obr. 25 Použité pece

6.3.2 Odlitek 1

Na odlitek 1 byla použita forma s modelem z materiálu Polycast.

Vypalování modelu

Forma byla nejprve vložena do pece na vypálení modelu, kde setrvala 6 hodin na teplotě 750°C. Poté byla v azbestových rukavicích vyndána z pece a vložena do kbelíku. Ten byl na vozíku dovezen k peci s roztaveným kovem.



Obr. 26 Forma na začátku vypalování a před vyjmutím z pece 1

Odlévání

Před naléváním kovu do formy bylo nutné vyplnit prázdná místa uvnitř kbelíku, ve kterém byla forma umístěna, formovacím pískem. Tento krok sloužil jako prevence proti úniku kovu v případě poškození formy.



Obr. 27 Proces odlévání 1

Následně proběhlo samotné odlévání. Během tohoto procesu však nastaly komplikace. Nedostatečné vypálení modelu způsobilo, že zbytky modelu začaly hořet

přímo ve formě, což vedlo ke vzniku plamene. V důsledku spalování se vzniklé spaliny snažily uniknout z formy. Po jejich úniku bylo pokaždé nezbytné dolít do formy další kov, aby byl proces odlévání dokončen.

Po vychladnutí formy s kovem bylo potřeba formu rozbít. Nástrojem použitým k rozbíjení formy bylo kladivo.



Obr. 28 Rozbíjení formy

Výsledek

První odlévání nebylo úspěšné. Výsledkem byl neúplný stromeček, na kterém zůstaly pouze dvě kliky. Další dvě kliky se pravděpodobně odlomily při nešetrném rozbíjení formy. Hlavním důvodem neuspokojivého výsledku byl pravděpodobně nedostatečně vypálený model, což způsobilo, že tekutý kov nepronikl do všech částí dutiny formy. Během lití zároveň docházelo ke spalování zbytků modelu, což vedlo ke vzniku viditelných dutin na výsledném odlitku.



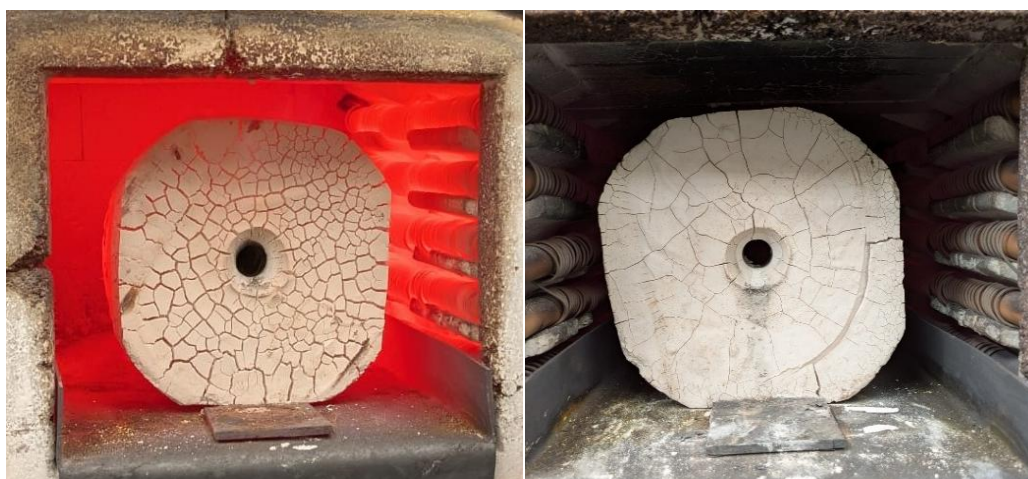
Obr. 29 Výsledek 1. odlévání

6.3.3 Odlitek 2

Na odlitek 2 byla použita forma s modelem z materiálu PLA. Model byl vytištěn pouze s vnějšími perimetry.

Vypalování modelu

Na základě zkušeností získaných při odlévání prvního odlitku jsme dospěli k závěru, že pro dosažení kvalitnějšího výsledku je nutné prodloužit dobu vypalování modelu. Z tohoto důvodu byla forma vložena do pece již večer před samotným odléváním. Celková doba vypalování tak činila přibližně 18 hodin. Teplota při tomto pokusu nebyla tak vysoká jako při předchozím – byla nastavena na 600 °C. Díky tomu nebyla forma pro druhý odlitek tak popraskaná jako při prvním pokusu. Popraskání formy může způsobovat nedokonalosti na odlitku, zvyšuje křehkost formy a může způsobit i její protékavost.



Obr. 30 Porovnání popraskání formy pro odlitek 1 vlevo a odlitek 2 vpravo

Odlévání

Příprava před odléváním probíhala identicky jako při výrobě odlitku 1. Novinkou bylo, že do dutiny formy byl přiveden natlakovaný vzduch. Ten sloužil k odstranění popílku. Materiál PLA totiž ve formě zanechává větší množství popela než Polycast.

Odlévání druhého odlitku proběhlo bez komplikací.



Obr. 31 Proces odlévání 2

Výsledek

Druhé odlévání dopadlo lépe než první, avšak výsledek byl stále neuspokojivý. Model byl z formy kvalitně vypálen a samotné odlévání proběhlo bez komplikací.



Obr. 32 Výsledek 2. odlévání

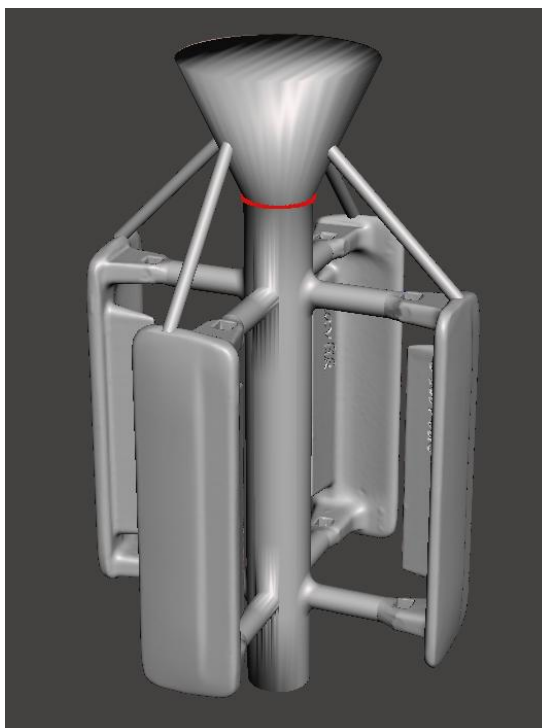
Problém však nastal již při výrobě formy. Model, který byl tištěn pouze s vnějšími perimetry a bez výplně, nebyl zcela precizně vytištěný, což vedlo ke vzniku drobných skulin. Ty největší byly zaplněny pomocí tavné pistole. Přesto některými skulinami v průběhu vytváření formy pronikla sádra do modelu, čímž se změnil tvar dutiny určené pro odlévání. Výsledkem bylo, že odlitkům chyběly některé části. Navíc při nešetrném rozbíjení forem došlo k odlomení dvou klik od stromečku.

6.3.4 Odlitek 3

Pro výrobu odlitku 3 byla vytvořena nová forma, přičemž byly využity zkušenosti z předchozích dvou pokusů. Vypalitelný model byl vytištěn z materiálu Polycast, ke kterému byly navíc přidány odvzdušňovací kanálky. Tyto kanálky měly zajistit odvod plynů z formy a zabránit vzniku pórů.

Vypalování modelu

Jelikož se vypalování při druhém odlévání osvědčilo, model byl vypalován na podobné hodnoty. Forma byla umístěna do pece na 16 hodin při teplotě 600 °C. Vzhledem k tomu, že vypalovaný model byl vyroben z materiálu Polycast, ve formě nezůstal žádný popel.



Obr. 33 Vypalitelný model s odvzdušňovacími kanálky pro odlitek 3

Odlévání

Příprava formy před odléváním probíhala identicky jako při předchozích dvou pokusech. Odlévání proběhlo bez komplikací.

Výsledek

Poznatky získané z předchozích dvou pokusů nám umožnily celý proces optimalizovat a tím dosáhnout co nejlepšího výsledku. U odlitku 3 jsme dosáhli již relativně uspokojivého výsledku. Jedna klika se odlila bez větších vnějších vad. Další disponují menšími vadami, které by však bylo možné při velmi pečlivém následném zpracování odstranit. Při rozbíjení formy jsme tentokrát postupovali opatrněji a společně s větší materiálovou odolností se nám povedlo získat stromeček v celistvé podobě. Jedinou nedokonalostí je absence jednoho odvodušňovacího kanálku, což však nemá vliv na funkci.



Obr. 34 Výsledek 3. odlévání

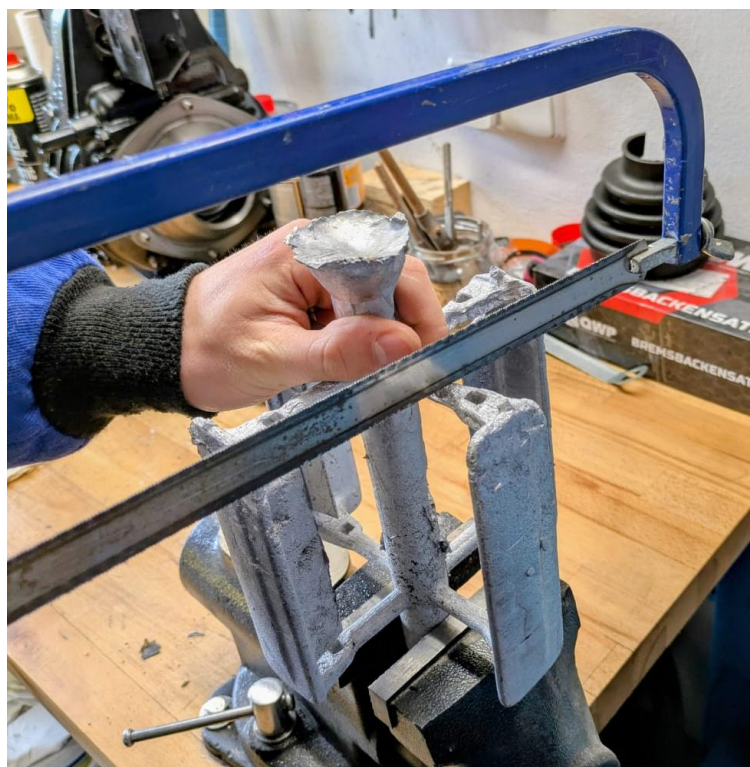
6.4 Postprocessing

Čištění

Nejprve bylo potřeba odlitky očistit od zbytků sádry. To bylo provedeno nejprve mechanicky za pomoci kartáče. Pro odstranění menších kusů a prachu byl odlitek opláchnut teplou vodou.

Odstranění nálitků a vtoků

Následujícím krokem bylo odstranění všech částí sloužících pro potřeby odlévání. Těmi jsou náletek, vtoková jamka a odvzdušňovací kanálky. Oddělení klik od těchto částí bylo provedeno pilkou na kov.



Obr. 35 Oddělení klik od vtokové soustavy

Povrchová úprava

Na odlitku 1, který nesplňoval požadované tvarové vlastnosti, bylo vyzkoušeno otryskání povrchu brokovým tryskačem. Tím došlo k odstranění hrubých nedostatků, avšak povrch byl natolik poškozen, že jeho vyleštění by již nebylo možné. Z tohoto důvodu nebyla tato metoda povrchové úpravy u dalších odlitků použita.

Nejvýraznější povrchové vady, jako zatečeniny vzniklé přehřátím formy a jejím popraskáním, byly odstraněny dlátem. Následně proběhlo broušení, při němž byl nejprve použit smirkový papír s větší zrnitostí, která se postupně snižovala. Pro dosažení co



Obr. 36 Odlitek 1 zavěšený v brokovém tryskači a použitý brokový tryskač

nejkvalitnějšího povrchu bylo nakonec aplikováno mokré broušení. Na závěr byla použita lešticí pasta, která povrchu kliky dodala potřebný lesk.

7 Závěr

Teoretická část této práce se zabývá pojmem reverzní inženýrství a popisuje kroky nezbytné k realizaci praktické části. Nalezneme v ní tedy základní informace o 3D skenování, 3D tisku polymerů a přesném lití.

Praktická část popisuje proces výroby náhradního dílu s využitím kroků popsaných v teoretické části. Součást byla nejprve oskenována pomocí bezkontaktního skeneru a následně připravena v několika softwarových programech tak, aby mohla sloužit jako vytavitelný model pro odlévání. Pro porovnání byly použity dva různé materiály modelů – PLA a Polycast, přičemž byl testován také odlišný způsob 3D tisku. Optimalizací všech parametrů, jako je i teplota a doba vypalování modelu, se podařilo dosáhnout kvalitnějšího výsledku.

Pomocí této metody jsme dosáhli relativně uspokojivého výsledku. Jediným nedostatkem byla kvalita povrchu kliky. Klíčovým faktorem, který by mohl zvýšit kvalitu povrchu odlitků, je změna materiálu formovací hmoty. Sádra během vypalování modelu popraskala, což vedlo ke vzniku zatečenin zhoršujících povrch odlitků. Tento problém by mohl být vyřešen nahrazením sádry keramickou břeckou. Dalším faktorem je snížená kvalita odlitků v závislosti na snižující se vzdálenosti od vtokové jamky, což je způsobeno poklesem hydrostatického tlaku v horní části formy. Jedná se o nedostatek gravitačního lití. Tento nedostatek by mohl být odstraněn zvětšením vtokové. Další možností by bylo využití technologie LPIC viz kapitola 5.4 **Materiály na odlévání**.

Výsledkem mého maturitního projektu je náhradní díl, který splňuje funkční a estetické vlastnosti původní kliky. Tato práce pro mě byla velmi přínosná, neboť mi umožnila hlouběji pochopit principy reverzního inženýrství a metody přesného lití. Získané poznatky mě zároveň motivují k dalšímu studiu této problematiky a jejímu praktickému využití.



Obr. 37 Finální podoba kliky vyrobené metodou reverzního inženýrství

Citace

- [1] FRONK, Martin. *Reverzní inženýrství*. Bakalářská, vedoucí Jan Šimota. Praha 6, Technická 1902/4: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní Ústav strojírenské technologie, projektování a metrologie, 2017. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72939/F2-BP-2017-Fronk-Martin-Bakalarska%20prace%20-%20Martin%20Fronk.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [2] BLAŽEK, Jiří. *Reverzní inženýrství*. Bakalářská, vedoucí Ing. Jan Šimota. Praha 6, Technická 1902/4: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní Ústav strojírenské technologie, projektování a metrologie, 2018. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79919/F2-BP-2018-Blazek-Jiri-reverseengineering.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
- [3] RAJA, Vinesh a FERNANDES, Kiran J. *Reverse engineering: An industrial perspective*. Online. Springer, 2008. Dostupné z: https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/MILITARY%20REFERENCE%20AND%20REVERSE%20ENGINEERING/epdf.pub_reverse-engineering-an-industrial-perspective-spri.pdf. [cit. 2024-10-13].
- [4] TOMAN, Stanislav. *REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ JAKO ZDROJ DAT PRO ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY*. Diplomová, vedoucí Ing. LIBOR BERÁNEK, Ph.D. Praha 6, Technická 1902/4: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní Ústav strojírenské technologie, projektování a metrologie, 2022. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/103585/F2-DP-2022-Toman-Stanislav-DP_Toman.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [5] Číňané už zase kopírují. *Zotye SR9 je "zdařilý" klon Porsche Macan*. Online. TipCars. 2016. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/cinane-uz-zase-kopiruji-zotye-sr9-je-zdarily-klon-porsche-macan-20161017.html>. [cit. 2024-10-15].
- [6] ROTTMAN, Gordon. *Panzerfaust and Panzerschreck*. Online. Osprey publishing, 2014. ISBN 1782007903. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=hMenCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1>

[&dq=panzerschreck&ots=hJ6r-aoZuN&sig=7nNixmgFMcMsHX473geVk-9G_Lk&redir_esc=y#v=onepage&q=panzerschreck&f=false](#). [cit. 2024-10-15].

[7] *Was the Panzerschreck better than a bazooka?* Online. In: Quora. 2009. Dostupné z: <https://www.quora.com/Was-the-Panzerschreck-better-than-a-bazooka>. [cit. 2024-10-15].

[8] *3D tisk ve zdravotnictví: převratná technologie přesahující rozšířenou a virtuální realitu*. Online. Fakultní nemocnice brno. 2023. Dostupné z: <https://www.fnbrno.cz/3d-tisk-ve-zdravotnictvi-prevratna-technologie-presahujici-rozsirenou-a-virtualni-realitu/t7756>. [cit. 2024-10-16].

[9] KADLEC, Adam. *Využití 3D tisku v medicínálních aplikacích*. Bakalářská, vedoucí Ing. Marek Bouška, Ph.D. Univerzita Pardubice: UNIVERZITA PARDUBICE FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ KATEDRA POLYGRAFIE A FOTOFYZIKY, 2019. Dostupné také z: <https://dk.upce.cz/server/api/core/bitstreams/a218923e-710b-44c4-acb4-3c8e51c95516/content>.

[10] BELL, Walter. *Reverse Engineering* [online]. Global Media, 2006 [cit. 2018-07-02]. ISBN 9788189940164. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=3011014>

[11] EBRAHIM, Mostafa Abdel-Bary. 3D Laser Scanners' Techniques Overview. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2015, s. 9. ISSN 2319-7064.

[12] PTÁK, Adam. *ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVA DAT Z 3D SKENOVÁNÍ PRO DOKUMENTACI VOZIDEL*. Bakalářská, vedoucí Ing. Zdeněk Svatý. Praha 6, Technická 1902/4: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE fakulta dopravní, 2019. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85289/F6-BP-2019-Ptak-Adam-PLNY_TEXT.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.

[13] *Types of 3D Scanning Technology: Pros & Cons*. Online. CROW ENGINEERING. Crow engineering. 2024. Dostupné z: <https://crowengineering.com/engineering-design-services/types-of-3d-scanning-technology-pros-cons/>. [cit. 2024-10-25].

- [14] JINDRA, Jan. *Zpracování STL dat pro potřeby reverzního inženýrství*. Diplomová práce, vedoucí Ing. Lukáš Pelikán. Praha 6, Technická 1902/4: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní, 2021. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97213/F2-DP-2021-Jindra-Jan-Diplomova%20prace_Jan%20Jindra.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
- [15] KRŮTA, Vojtěch. *Výběr materiálu pro 3D tisk součástí*. Diplomová, vedoucí Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D. Praha 6, Technická 1902/4: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní, 2023. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/111353/F2-DP-2023-Kruta-Vojtech-Vojtech%20Kruta%20-%20Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
- [16] STRÍTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef a BACH, Martin. *Základy 3D tisku: s Josefem Průšou*. Prusa reaserch s.r.o, Partyzánská 188/7a, 2019. ISBN 9788090779808.
- [17] DMLS vs. SLM: Differences and Comparison. Online. Xometry. 2022, 15.10. 2024. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/dmls-vs-slm-3d-printing/>. [cit. 2024-11-02].
- [18] PRUSA REASERCH S.R.O. *Prusa Reaserch s.r.o*. Online. 2012. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/>. [cit. 2024-11-03].
- [19] FLSUN3D. *FLSUN3D*. Online. 2015. Dostupné z: <https://flsun3d.com/>. [cit. 2024-11-03].
- [20] Gebhardt, Andreas Hötter, Jan-Steffen. (2016). *Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing - 1.2 Systematics of Layer Technology*. Hanser Publishers. [online]. [cit. 2018-07-10] Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010ZI2ED/additivemanufacturing/systematics-layer-technology>
- [21] PRŮŠA, Josef. *Příručka 3D tiskáře*. 20. 9. 2019. Prusa reaserch s.r.o, Partyzánská 188/7a, 2019. Kniha je příručkou ke stavbě 3D tiskárny Prusa i3 MK3S.
- [22] SCHMIDT, Manfred; AMADO, Antonio a WEGENER, Konrad. *Polymer powders for selective laser sintering (SLS)*. Online. *AIP publishing*. 2015, s. 6. ISSN 1551-7616. Dostupné z: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/1664/1/160009/822390/Polymer-powders-for-selective-laser-sintering-SLS>. [cit. 2024-11-19].

- [23] BEELEY, Philip a SMART, Robert. *Investment casting*. Online. Maney publishing, 2008. ISBN 9781906540579. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=C4-4EAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=investment+casting&ots=RscXChJexS&sig=xRpQ3uy6i3FgS5Imi-BbUEmX3Yc&redir_esc=y#v=onepage&q=investment%20casting&f=false. [cit. 2024-11-23].
- [24] BLAŽÍK, Petr. *LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL – PROGRESIVNÍ SLÉVÁRENSKÁ TECHNOLOGIE*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Vít Mikulka. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2013. Dostupné také z: https://theses.cz/id/evg5y9/2013_BP_Blak_Petr_Lit_na_vytavitel_model_-_progresivn_slv.pdf.
- [25] HORÁČEK, Milan. ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU. Online. 2009, s. 92. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>. [cit. 2024-11-24].
- [26] ELBL, Tomáš. Základy slévárenské technologie: od historie po současnost. Online. In: . 2006, s. 37. Dostupné z: https://www.strojar.com/upload/zaklady_slevarenske_technologie_201.pdf. [cit. 2024-12-25].
- [27] MATOUŠEK, Roman. *TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V SOUČASNOSTI*. Bakalářská. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2014. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86229.
- [28] Slévání. Online. In: *SPŠ Zengrova*. 2020, s. 11. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/ZAV3-Slevani1_GEI.pdf. [cit. 2025-01-10].
- [29] What makes Investment Casting one of the BEST way to cast metal? Online. In: . Niagara Investment Casting, s. 5. Dostupné z: <https://old.foundrygate.com/upload/artigos/What%20makes%20Investment%20Casti>

[ng%20one%20of%20the%20BEST%20way%20to%20cast%20metal.pdf](#). [cit. 2025-01-11].

[30] LOSERTOVÁ, Monika. TECHNOLOGIE SPECIÁLNÍCH SLITIN.

Online. *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*. 2013, roč. -, č. -, s. 156. ISSN 978-80-248-3379-8. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/07_Technologie_specialnich_slitin/Losertova_Technologie_specialnich_slitin.pdf. [cit. 2025-01-11].

[31] HERMAN, A.; JARKOVSKÝ, M.; VRÁTNÝ, O. a CHYTKA, P. et al. Research of Fluidity for new LPIC Technology. Online. *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING*. 2024, roč. 2024, č. 4, s. 7. ISSN 2299-2944. Dostupné z: https://journals.pan.pl/Content/133778/AFE%204_2024_15.pdf. [cit. 2025-01-12].

[32] HERMAN, A.; VRÁTNÝ, O. a KOPANICA, Z. et al., Improved Mechanical Properties of Casting Made by New LPIC Technology. Online. *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING*. Roč. 2024, č. 3, article 3, s. 6. ISSN 2299-2944. Dostupné z: https://journals.pan.pl/Content/132887/AFE%203_2024_13-Final.pdf. [cit. 2025-02-07]. [33] KRÁLÍK, Jan. *Škoda 1203: historie, vývoj, technika, jiná provedení*. Grada publishing, 2010. ISBN 978-80-247-3383-8.

[34] ZÁVISKÝ, Matěj. *Výroba prototypového odlitku hliníkového rotoru se zálitkem pomocí technologie přesného odlévání*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Vladimír Krutiš. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2024. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/11012/247114>. [cit. 2025-03-18].

Seznam obrázků

Obr. 1 Předloha pro výrobu náhradního dílu	2
Obr. 2 Porovnání Porsche Macan s jeho čínskou kopií [5]	4
Obr. 3 Porovnání původní americké zbraně a její německé kopie [7]	5
Obr. 4 Nekontaktní 3D skener – 3DMakerPro Mole	7
Obr. 5 Seskupené mračno bodů	8
Obr. 6 Polygonizovaný objekt.....	9
Obr. 7 STL soubor v programu pro jeho částečnou úpravu (Fusion 360)	10
Obr. 8 3D tiskárny (řazený zleva) - kartézská, delta, MSLA [18, 19, 18]	13
Obr. 9 Schéma SLS [18]	14
Obr. 10 Filament PETG Prusa Orange [18]	16
Obr. 11 Model vytištěný na resinové 3D tiskárně.....	17
Obr. 12 Princip technologie přesného lití [25].....	18
Obr. 13 Hotové keramické formy v sušící místnosti [24]	21
Obr. 14 Škoda 1203 minibus De Luxe.....	23
Obr. 15 Porovnání využívaných 3D skenerů	25
Obr. 16 Skenování.....	27
Obr. 17 Mračno před a po odstranění přebytečných bodů	27
Obr. 18 Propojení mračen pomocí charakteristických bodů	28
Obr. 19 Hotový stromeček v programu Meshmixer	29
Obr. 20 Nastavení parametrů tisku kliky a vytištěný model kliky.....	30
Obr. 21 Nastavení parametrů tisku stromečku s vytištěným stromečkem	30
Obr. 22 Příprava stromečků	31
Obr. 23 Stromeček zavěšený ve formovacím rámu a odlévání sádky	32
Obr. 24 Hotové formy	32
Obr. 25 Použité pece	33
Obr. 26 Forma na začátku vypalování a před vyjmutím z pece 1	34
Obr. 27 Proces odlévání 1	34
Obr. 28 Rozbíjení formy	35
Obr. 29 Výsledek 1. odlévání.....	35
Obr. 30 Porovnání popraskání formy pro odlitek 1 vlevo a odlitek 2 vpravo	36
Obr. 31 Proces odlévání 2	37
Obr. 32 Výsledek 2. odlévání.....	37

Obr. 33 Vypalitelný model s odvzdušňovacími kanálky pro odlitek 3	38
Obr. 34 Výsledek 3. odlévání.....	39
Obr. 35 Oddělení klik od vtokové soustavy	40
Obr. 36 Odlitek 1 zavěšený v brokovém tryskači a použitý brokový tryskač	41
Obr. 37 Finální podoba kliky vyrobené metodou reverzního inženýrství	42