



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ODLITKŮ S VYUŽITÍM METOD RAPID PROTOTYPING

PRODUCTION OF CASTINGS USING RAPID PROTOTYPING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Baránek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bořil

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Baránek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Bořil**
Akademický rok: 2021/22

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:

Výroba odlitků s využitím metod Rapid prototyping

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současná doba klade vysoké požadavky na rychlý vývoj nových produktů, ať už jde o design jednotlivých výrobků nebo jejich funkční využití. Využití metod rapid prototypingu je jedna z cest, jak si ověřit, zda se vývoj ubírá správným směrem a v poměrně krátkém čase získat funkční prototyp.

Cíle bakalářské práce:

- provést literární rozbor na dané téma.
- s využitím metod rapid prototyping navrhnout technologii výroby odlitku zvoleného tvaru a velikosti.
- na základě navržené technologie bude následně součást odlita a student provede zhodnocení navržené technologie.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R. Foundry technology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, x, 719 s. : il., čb. fot. ; 25 cm. ISBN 0-7506-4567-9.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.

CHUA, C.K., K.F. LEONG and C.S. LIM. Rapid Prototyping - Principles and Applications. 2nd ed. Singapore: Fulstrand Offset Printing Pte, 2004. 411 p. ISBN 981-238-120-1.

BAO, J.S., Y. JIN, M.Q. GU, J.Q. YAN and D.Z. MA. Immersive virtual product development. Journal of materials processing technology [online]. Elsevier B.V, 2002, 129(1), 592-596 [cit. 2021-10-22]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(02)00655-6

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na výrobu odlitku zdobeného stojanu za využití rapid prototyping metod postupem reverzního inženýrství. V práci je nejprve provedena literární rešerše pojednávající o vybraných aditivních technologiích využitelných pro výrobu slévárenských modelů nebo forem. Následně jsou v práci popsány základy technologie 3D skenování. Experimentální část práce popisuje postup výroby odlitků. Předloha byla nejprve digitalizována pomocí ručního skeneru, získaná data byla dle potřeby upravena a sloužila jako vstup pro 3D tisk trvalých slévárenských modelů. Jejich výroba proběhla na FDM 3D tiskárně PRUSA MK3S z materiálu PLA. Modely byly následně zaformovány do netrvalých pískových forem. Výsledné odlitky byly vyrobeny z litiny s lupínkovým grafitem.

Klíčová slova

odlitek, rapid prototyping, 3D skenování, reverzní inženýrství, 3D tisk

ABSTRACT

The work is focused on the production of a decorated stand casting using rapid prototyping and reverse engineering methods. The thesis first performs a literature search dealing with selected additive technologies usable for the production of foundry patterns or molds. Subsequently, the work describes the basics of 3D scanning technology. The experimental part of the thesis describes the production process of castings. The original was first digitized using a hand-held scanner, the obtained data were modified as needed and served as an input for 3D printing of permanent foundry patterns. Their production took place on a FDM 3D printer PRUSA MK3S and they were made of PLA material. The models were then formed into sand molds. The resulting castings were made of grey cast iron.

Key words

casting, rapid prototyping, 3D scanning, reverse engineering, 3D print

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARÁNEK, Martin. *Výroba odlitků s využitím metod Rapid prototyping* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140233>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Petr Bořil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba odlitků s využitím metod Rapid prototyping vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Martin Baránek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto mému vedoucímu Ing. Petru Bořilovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za jejich podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 VÝROBA MODELŮ A FOREM	11
3 RAPID PROTOTYPING A 3D SKENOVÁNÍ VE SLÉVÁRENSTVÍ	13
3.1 Rapid prototyping.....	13
3.1.1 Fused Deposition Modeling.....	14
3.1.2 Stereolitografie	16
3.1.3 Selective Laser Sintering	18
3.1.4 Binder Jetting.....	19
3.2 3D skenování	20
3.2.1 Laserové 3D skenery	21
3.2.2 Optické 3D skenery	21
4 EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA ODLITKU.....	23
4.1 3D skenování stojanu	23
4.2 Úprava 3D modelu	25
4.3 3D tisk modelů	29
4.4 Příprava forem a lití.....	30
4.5 Dokončovací práce	32
ZÁVĚR.....	33

ÚVOD

Napříč celým strojírenským průmyslem se nabízí řada technologií využívaných k výrobě součástí a polotovarů. Slévárství tvoří však i v dnešní době většinou část výroby pro různá průmyslová odvětví, a to i přes to, že se jedná o jednu z nejstarších technologií. Vzhledem k dnešním trendům, stále se zvyšující snaze o snížení nákladů na výrobu a zefektivnění výroby, a navíc i větší snaze vyhovět individuálním přáním zákazníka hledají slévárny způsoby, jak se udržet na kompetitivním trhu.

Využívání technologie rapid prototyping, nebo reverzního inženýrství je proto ve slévárství stále častější. Jelikož se jedná o relativně nové metody, které se velmi rychle vyvíjejí, nabízí tak zajímavá řešení, jak zefektivnit a urychlit proces výroby odlitku. Samotná výroba modelu pomocí rapid prototyping technologie přináší značnou flexibilitu, probíhá zcela v rámci jednoho stroje a je v podstatě kompletně automatizovaná.



Obr. 1 Příklad 3D tištěných součástí [1].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem práce je přiblížit možnosti využití rapid prototyping (dále v textu RP) metod, 3D skenování a reverzního inženýrství v procesu výroby odlitku. Na základě získaných poznatků a informací bude následně proveden experiment. Podstatou experimentu bude ověřit využití těchto metod při výrobě vlastního odlitku litím do pískové formy v prostorách školní slévárny.

Jako předloha pro reverzní výrobu byl vybrán starý kovový slévárenský model zdobeného stojanu na vánoční stromek (viz obr. 2). Stojan je složený ze dvou částí – podstavce a figurky. Cílem bude upravit velikost stojanu, odstranit nedostatky a opravit opotřebení vzhledem k jeho stáří.



Obr. 2 Stojan (předloha).

Původní výrobky budou nejprve převedeny do digitální podoby pomocí ručního 3D skeneru. Ze získaných skenů budou odstraněny případné nedostatky vzniklé v průběhu skenování. Následně dojde ke konverzi na 3D modely, které budou dále upraveny v CAD softwaru a budou sloužit jako vstup pro výrobu 3D tištěných modelů.

Modely pro zhotovení pískových forem budou vyrobeny na školní 3D tiskárně. Materiál výtisků byla zvolena kyselina polymlečná (PLA), protože vzhledem k jejím mechanickým vlastnostem je vhodná pro výrobu trvalých slévárenských modelů, a navíc při tisku tohoto materiálu není třeba žádných speciálních opatření. Nastavení tisku bude optimalizováno tak, aby modely dosahovaly co nejvyšší kvality povrchu. Pomocí 3D tisku bude zhotoven také jaderník pro výrobu pískového jádra.

Vytištěné modely budou následně opatřeny vhodným nátěrem, zaformovány a bude vytvořena vtoková soustava. Po vytvrzení forem dojde k vyjmutí modelů, vytvoření výfuků a následně k odlití. Výsledné odlitky následně projdou dokončovacím procesem a budou opatřeny nátěrem.

2 VÝROBA MODELŮ A FOREM

Ke zhotovení netrvalých a polotrvalých forem se využívá slévárenských modelů. Ty jsou zhotoveny podle součásti, která bude odlévána a na základě licí metody v modelárnách, které jsou nejčastěji součástí samotné slévárny. Na jejich výrobu je nutno klást důraz, protože hrají zásadní roli v podobě finálního odlitku. Modely jsou vždy vyráběny o několik procent větší, než mají být rozměry výsledné součásti, kvůli smršťování kovu [2; 3; 4 5]. Modely se podle trvanlivosti dělí na dvě základní skupiny [2; 3; 4; 5]:

- Trvalé – jsou určeny k opětovnému zaformování, přičemž jejich životnost se odvíjí od použitého materiálu, tvaru a způsobu formování. Typicky jsou vyráběny konvenčním třískovým obráběním (viz obr. 3) jako je frézování a soustružení pomocí využití víceosých CNC strojů. V posledních letech se čím dál více využívá RP metod, obzvláště pak u tvarově složitých modelů, jejichž výroba obráběním by mohla být složitá a klade nemalé požadavky na kvalifikaci a zručnost modelářů. Podstatné je model vyrobit tak, aby jej bylo možné bezproblémově vyjmout z formy bez jejího poškození, nebo poškození modelu. Materiál modelu by měl být rozměrově stálý a dosahovat dostatečné tvrdosti. Nejčastěji využívané materiály pro jejich zhotovení jsou:
 - dřevo – dub, buk, ořech,
 - kov – šedá litina, slitiny Al, bronzy,
 - pryskyřice – polyuretanové, polyesterové a epoxidové,
 - polymery.



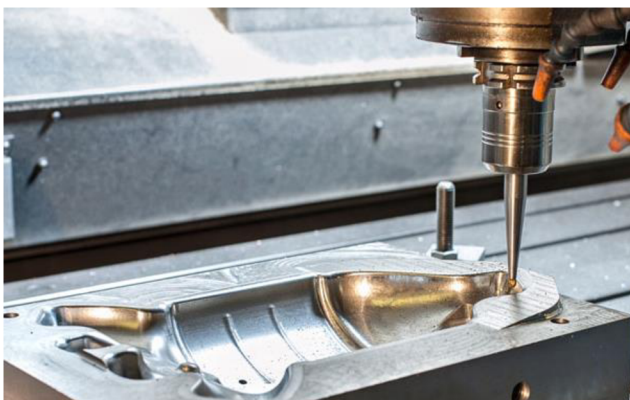
Obr. 3 Výroba dřevěného modelu [6].

- Netrvalé – jsou určeny na jedno použití, při odlévání dochází k jejich zániku za působení tepla. Podle způsobu zániku ve formě se rozlišují modely vytavitelné, vypařitelné a spalitelné. Nevýhoda jejich použití je, že pro každý odlitek je potřeba vyrobit nový model. Protože není nutné z formy vyjmout jako modely trvalé, není třeba žádných technologických úkosů apod. Díky tomu je možno vyrábět tvarově složitější a přesnější odlitky. Typickým materiálem pro výrobu netrvalých modelů je slévárenský vosk, který se vytvaruje do finální podoby odlitím do forem, které jsou při malosériové výrobě nejčastěji zhotoveny z kaučuku nebo sádry, při větších sériích pak z kovových slitin. Netrvalé modely jsou také často vyráběny z polystyrenu (PS)

obráběním, nebo zpěňováním ve speciálních formách. V dnešní době je stále častější tyto modely vyrábět pomocí RP metod z materiálů s vlastnostmi podobným výše uvedeným za účelem snížení nákladů a dosažení vyšší výrobní efektivity.

Nástrojem pro výrobu odlitku je slévárenská forma, která je vlastně negativem výsledného odlitku (resp. modelu). Tekutý kov po odlití zaujme tvar dutiny formy a následně tuhne. Rozlišujeme tři základní druhy forem podle počtu odlitků vyrobených v jedné formě [3; 4; 5]:

- Trvalé – označovány též jako kokily jsou formy, ve kterých je možno vyrobit velké série odlitků – řádově až statisíce. Zřídka bývají jednodílné. Vyráběny jsou nejčastěji z litiny, nebo nástrojové oceli pomocí třískového obrábění (viz obr. 4) v kombinaci s litím. V posledních letech jsou velmi zřídka k jejich výrobě používány i RP metody. Vyznačují se dobrou tepelnou vodivostí, což vede ke zkrácení doby tuhnutí taveniny a odlitky tak mají lepší strukturu. Další výhodou lití do kokil je vysoká produktivita – až šestinásobná v porovnání s netrvalými formami. Jejich zásadní nevýhodou je především vysoká pořizovací cena, proto se využívají jen pro velkosériovou výrobu. Plněny jsou nejčastěji tlakově a jsou vhodné především pro výrobu odlitků z hliníkových a jiných neželezných slitin.
- Polotrvalé – do této skupiny patří formy, ve kterých je možno zhotovit odlitky do několika kusů (většinou v jednotkách, maximálně 10). Jejich životnost se odvíjí od velikosti odlitku, jeho materiálu a materiálu formy. K jejich výrobě se používá formovací směsi ze žáruvzdorných keramických materiálů. Po odlití každého odlitku se forma musí opravit, protože dochází k jejímu opotřebení a poškození. Používají se pouze pro gravitační lití.
- Netrvalé – jako netrvalé označujeme formy, které jsou po odlití při vyjímání odlitku zničeny a není je tedy možné znovu použít. Jsou vyráběny ze směsi ostřiva (nejčastěji křemenný písek), které tvoří až 98 % hmotnosti formovací směsi, dále pak pojiva organického nebo anorganického původu, které zajišťuje vaznost a pevnost, vody a dalších příměsí. Forma pak vzniká tak, že se do formovacího rámu umístí model, který se zasype formovací směsí, která je následně střešána a pěchována buďto ručně, nebo strojně. Poté se forma nechá vysušit, čímž dojde k jejímu zpevnění. Pokud je využito trvalého modelu, je nutno jej vyjmout tak, aby nedošlo k poškození formy – proto je vždy nutné model ošetřit separátorem (obvykle práškovým), nebo nátěrem pro snazší vyjmutí. Převážnou většinu forem používaných v praxi tvoří právě netrvalé. Jejich plnění je až na výjimky gravitační (viz obr. 5), méně častěji se pak využívají k nízkotlakému nebo odstředivému lití.



Obr. 4 Výroba trvalé formy [7].



Obr. 5 Lití do netrvalé formy [8].

3 RAPID PROTOTYPING A 3D SKENOVÁNÍ VE SLÉVÁRENSTVÍ

Slévárny mají snahu implementovat RP technologie do výrobního procesu od jejich představení. Ačkoliv přímá výroba kovových součástí pomocí RP metod není ekonomicky příliš zajímavá, nepřímá výroba dílů z kovu v kombinaci s konvenčním licími postupy se stává běžnou praxí (viz obr. 6). Výroba odlitků za využití RP se označuje termínem rapid casting. [9]

Výroba slévárenský modelů a jader potřebných pro zhotovení licích forem je častokrát nejvíce časově, ale i ekonomicky náročnou fází výroby především u tvarově složitých a rozměrných odlitků. Nahrazením produkce modelů a jader konvenčními způsoby RP metodami odpadají náklady na nástroje, problémy spojené s technologickým postupem obrábění, upínáním součástí a požadavky na zručnost modelářů. Hotový model je tak možno získat i v rámci hodin. Některé společnosti z oboru 3D tisku nabízí specializované materiály pro výrobu netrvalých modelů. Na trhu je také několik firem, které se specializují právě na tiskárny pískových forem. Výhodou takto vyrobených forem je, že není potřeba fyzického modelu a kratší čas jejich zhotovení. [9]

Při výrobě odlitků, jako jsou náhradní díly starých strojů a historické repliky, ke kterým neexistuje technická dokumentace se využívá reverzního inženýrství. Fyzická předloha je digitalizována pomocí 3D skeneru na 3D model. Ten je následně možno upravit, nebo v případě poškozené předlohy opravit pomocí CAD softwaru. Digitální model pak slouží jako vstup právě pro RP. [10; 11]



Obr. 6 Využití rapid prototyping při výrobě vrtulky. [13]

3.1 Rapid prototyping

RP metody se rozvíjejí od 80. let a reprezentují třetí generaci výroby prototypů. Podstatou je výroba dílců aditivní technologií (dále v textu AT), typicky vrstvením materiálu o konstantní tloušťce na podložce do požadovaného tvaru a rozměrů. Jedná se tedy o přesný opak subtraktivní technologie, kde je výsledná součást zhotovena postupným odebráním materiálu třískovým obráběním z polotovaru o větších rozměrech. [12; 14] Na základě formy vstupního materiálu je možno AT rozdělit následovně [14]:

- Materiál na práškové bázi:
 - Direct Metal Laser (DMLS),
 - Electron-Beam Melting (EBM),
 - Selective Heat Sintering (SHS),
 - Selective Laser Sintering (SLS),
 - Binder Jetting (BJ).
- Materiál na pevné bázi:
 - Fused Deposition Modeling (FDM),
 - Laminated Object Manufacturing (LOM).

- Materiál na bázi fotopolymeru:
 - Stereolithography (SLA),
 - Digital Light Processing (DLP),
 - Multi Jet Printing (MJP).

Následující kapitoly v práci se věnují rozboru vybraných metod RP, které jsou pro výrobu slévárenských modelů nejvíce rozšířené a nejvhodnější.

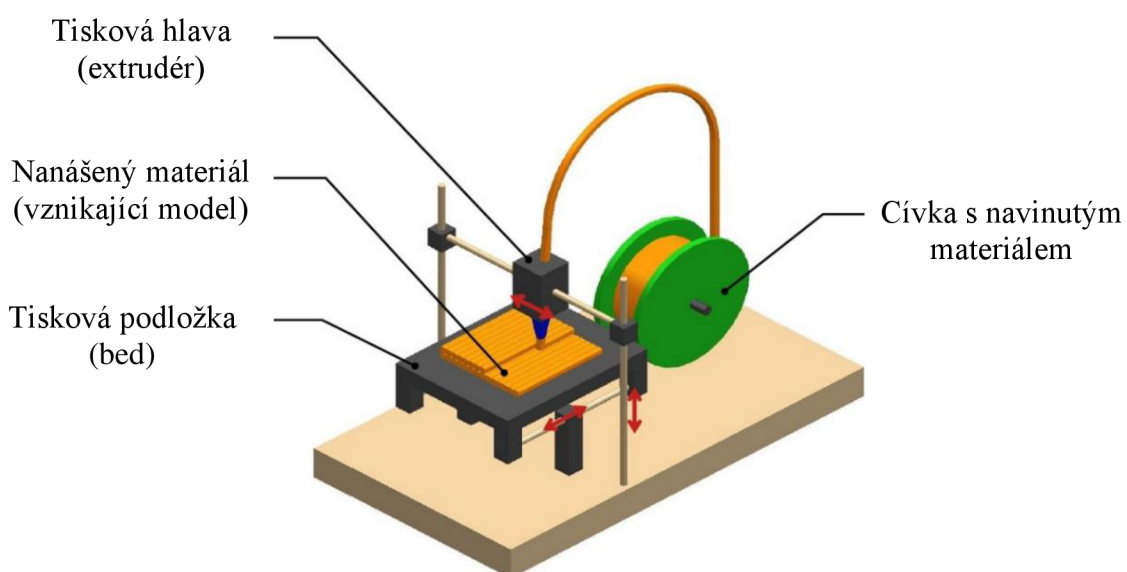
Vstupem pro RP je 3D model vytvořený využitím dostupných CAD softwarů, nebo získaný pomocí 3D skenu. Ten je nadále konvertován do souboru formátu STL, který povrch modelu aproximuje pomocí trojúhelníkové sítě. Exportování modelu do STL dnes umí již každý rozšířený CAD software. [12; 14]

Dalším krokem je převod a rozdělení síťového 3D modelu na jednotlivé vrstvy, z kterých se bude skládat (tzv. „slicing“), pomocí patřičného softwaru. V tomto softwaru je pak možno nadefinovat spoustu parametrů jako je výška vrstvy apod. Výstupem je pak kód nesoucí veškeré informace pro výrobního zařízení včetně souřadnic uložený v souboru. [12; 14]

Proces samotné výroby je po nahrání kódu do zařízení a jeho spuštění pak plně automatický. Ten může trvat dle složitosti modelu, jeho velikosti, nebo parametrů výrobního zařízení od několika minut až hodin, či dnů. Po dokončení následuje často postprocessing součástí a to většinou odstranění přebytečných podpor, broušení povrchů, nebo třeba nástřik. [12; 14]

3.1.1 Fused Deposition Modeling

FDM metoda je světově nejvíce rozšířená AT využívaná jak hobby modeláři, tak slévárnami. Jako vstupní materiál tiskárna využívá termoplast, který je odvíjen většinou z cívky, a to pomocí podavače, který ho vsouvá do tiskové hlavy (tzv. „extrudéru“), která je vyhřívána na danou teplotu. Zde je materiál nataven do polotekutého stavu a přes trysku nanášen na podložku, kde opět ztuhne. Podložka bývá kvůli smršťování materiálu často vyhřívána. Pomocí kombinace pohybů hlavy a podložky v osách X, Y a Z je vždy nanесena vrstva modelu, po jejím dokončení se tisková osa posune ve směru osy Z o nadefinovanou výšku vrstvy a začne pokládat vrstvu další. Takto je celý proces opakován až do vystavění modelu. Schéma této metody je zobrazeno na obr. 7. [12; 14; 16]



Obr. 7 Schéma FDM metody [15].

Aby nedošlo ke zborcení převislých částí modelu, vystaví tiskárna tzv. podpory. Jejich použití a umístění dokáže automaticky vyhodnotit software, který je využíván k převodu modelu na kód s instrukcemi pro tiskárnu. Tyto podpory je poté třeba odstranit mechanicky, nebo rozpuštěním v chemikálii. [12; 16]

Významnou roli ve finální podobě modelu, jeho mechanických vlastnostech a časové náročnosti samotného tisku, hraje nejen tvar a velikost stavěného výtisku, nebo vybraný materiál, ale i spousta proměnných a parametrů, které je třeba v programu odladit. Mezi ně patří výška vrstvy, výplň a její tvar, tloušťka a šířka rastru, průměr a teplota trysky, teplota podložky a další. Nastavení a hodnoty zmíněných parametrů se liší dle materiálu vybraného pro tisk. [12; 14; 16] Typicky využívané materiály pro FDM metodu jsou [16]:

- ABS (Akrilonitrilbutadienstyren),
- PLA – bioplast, obohacován uhlíkovými vlákny, nebo bronzem,
- PETG (Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem),
- PC (Polykarbonáty).

Z vybraných běžně dostupných materiálů jsou ABS, PLA i PETG vhodné pro výrobu trvalých slévárenských modelů, jelikož vykazují dostatečnou oteřuvzdornost, ale i značnou pevnost. Zajímavější je však využití této metody k výrobě netrvalých modelů, které jsou alternativou ke klasickým voskovým. ABS se ukázal jako jedna z vhodných variant z typických zástupců, díky stálosti rozměrů, robustnosti, ale především díky tomu, že po vypálení nezanechává velké množství nežádoucího popela ve formě. Jeho zásadní nevýhodou je velmi drsná struktura povrchu výtisku, zapříčiněna i samotným vrstvením materiálu při tisku, proto je vždy nutno provést úpravu povrchu k dosažení lepších výsledků. [9]

Speciálně pro výrobu vytavitelných slévárenských modelů byli vyvinuty nové materiály. Materiál PolyCast™ (viz obr. 8) od firmy Polymaker se vyznačuje svou snadnou úpravou povrchu. Výtisk se ponoří do izopropylalkoholu, ten po pár vteřinách absorbuje do svého povrchu. Jeho vlivem dojde k vyhlazení povrchu odstranění vrstev typických pro 3D výtisk. Zároveň po vypálení modelu z tohoto materiálu nezůstává ve formě téměř žádný popel, který by mohl způsobit defekty výrobku. Nevýhodou tohoto materiálu je poněkud vysoká prodejní cena, která je násobně větší, než u výše zmíněného ABS. [17]



Obr. 8 Modely vytištěné z PolyCast™ materiálu [5].

Dalším zajímavým filamentem je MoldLay od firmy LAY-FILAMENTS. Jedná se o plastový materiál, který díky obsahu speciálně vybraných parafinových olejů disponuje podobnými vlastnostmi jako má vosk, který se běžně používá na modely pro výrobu skořepinových forem. Jeho přednostmi jsou vysoká tuhost, pevnost a rozměrová stálost. Nevýhodou je vyšší cena. [18]

Výhody metody FDM [12]:

- možnost tisknout velké množství různých materiálů,
- cenová dostupnost jak samotných tiskáren, tak i filamentů,
- vznik minima odpadu při tisku – pouze ve formě podpor,
- jednoduché ovládání i údržba,
- výrobní proces je čistý.

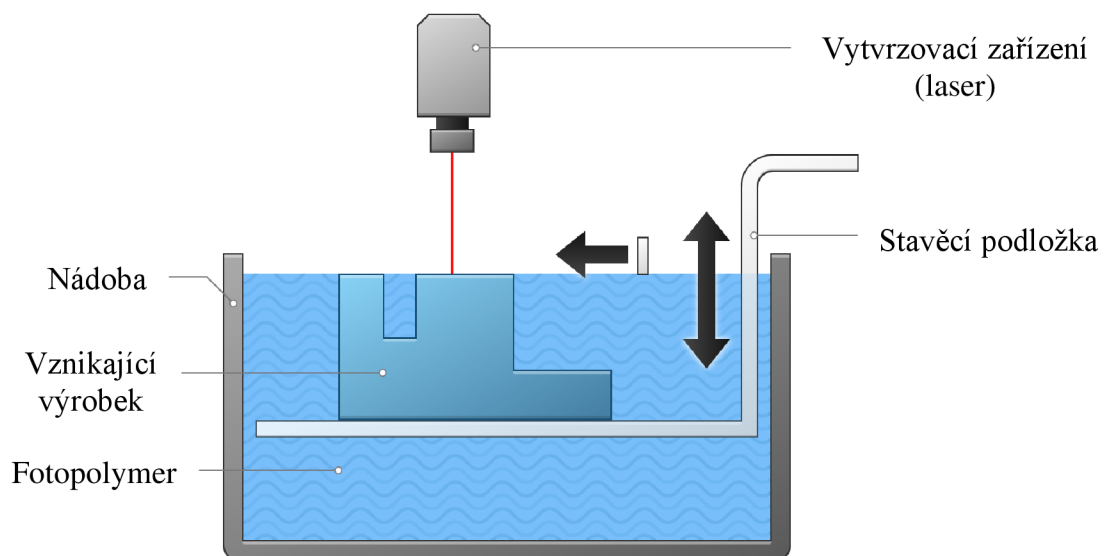
Nevýhody FDM metody [12]:

- ve většině případů nutná úprava povrchu tištěné součásti,
- nižší kvalita výtisku než u jiných metod,
- nutnost podpor pro převislé části modelu.

3.1.2 Stereolitografie

SLA je AT, která využívá jako vstupní materiál tekutý fotopolymer, který je následně lokálně vytvrzován v místech, kde má vzniknout část modelu UV zářením. Stavba modelu probíhá po vrstvách, jejichž tloušťka je typicky od 0,025 do 0,5 mm. Stavěcí podložka se posune ve směru osy Z tak, že se ponoří o výšku jedné vrstvy do nádoby s fotopolymerem. Laserový paprsek následně vytvrdí polymer v rovině XY v místech budoucích kontur modelu. Takto se celý proces opakuje až do úplného vystavění výrobku. Schéma metody je zobrazeno na obr. 9. Pod převislými částmi součásti tiskárna automaticky vystaví podpory, aby nedošlo k jejich zborcení. [12; 19] Využívané materiály pro SLA jsou [19]:

- plněné pryskyřice - plněny organickými materiály, kovy, nebo keramikou,
- akryláty,
- epoxidy.



Obr. 9 Schéma SLA metody [6].

Předností SLA metody je možnost tvorby výrobků o malých rozměrech s velmi vysokou přesností. Díky tomu tato technologie nachází hojně využití pro výrobu netrvalých modelů pro přesné lití v uměleckém slévárenství, jako je výroba šperků. Firmy zabývající se 3D tiskem uvádí na trh i speciální materiály přímo určené k tomuto využití. Společnost Formlabs nabízí pryskyřici Castable Wax 40 (viz obr. 10) se 40% podílem tekutého vosku. Dosahuje tak požadovaných mechanických vlastností, nízké rozpínavosti a model po vytavení nezanechává téměř žádný odpad ve formě. Hotový model není ani třeba nijak speciálně čistit. Balení o objemu 1 L prodejce nabízí za 249 USD. [20]

V roce 2018 byl firmou Tethon 3D uveden na trh materiál Castalite. Jedná se o pryskyřici plněnou keramikou nadesignovanou přímo k výrobě slévárenských keramických forem (viz obr. 11). Vytisknutá forma musí projít vytvrzovacím procesem v peci, stejně jako klasické keramické formy. Během vytvrzení dochází ke smrštění mezi 13 % až 17 % a to v závislosti na geometrii, tloušťky vrstev a vytvrzovací teplotě. Litrové balení materiálu Castalite vychází 300 USD. [21]

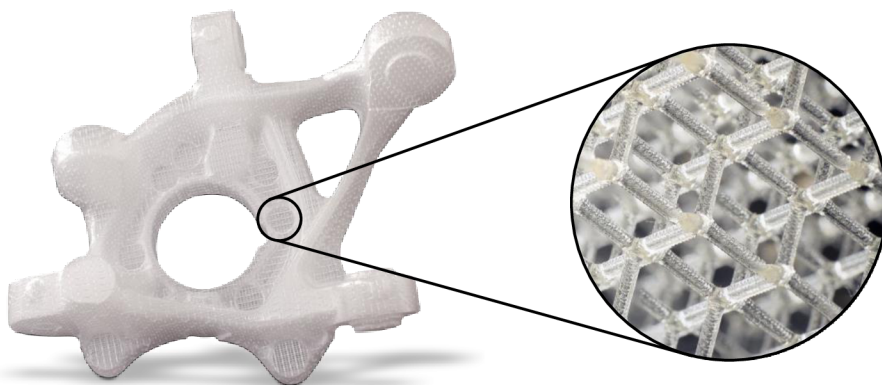


Obr. 10 Modely z Castable Wax 40 [20].



Obr. 11 Forma z Castalite materiálu [21].

Uvedení technologie QuickCast společností 3D Systems přinesl zajímavá řešení výroby skořepinových forem. Výrobky zhotovené touto metodou plně nahrazují standartně využívaný voskový model, přičemž takto vyrobený model se na rozdíl od voskového nevytahuje, ale přímo vypaluje. QuickCast je matematický algoritmus, který je zakomponovaný do přípravného softwaru, ve kterém se převádí CAD model na data pro tiskárnu. Tento algoritmus převede původně plnou součást na dutou a dutinu vyplní speciální strukturou (viz obr. 12). Díky tomu dojde ke snížení hmotnosti výtisku až o 90 %, samotný tisk i proces vypálení modelu je tedy mnohem rychlejší a zároveň dochází ke snížení výrobních nákladů na model. Vnitřní struktura zajistí potřebnou strukturální integritu, zároveň se však díky ní model při vypalování zborší směrem dovnitř od jeho povrchu a nedojde tak k poškození formy. [22]



Obr. 12 Model vyrobený QuickCast technologií [22; 23].

Výhody metody SLA [12]:

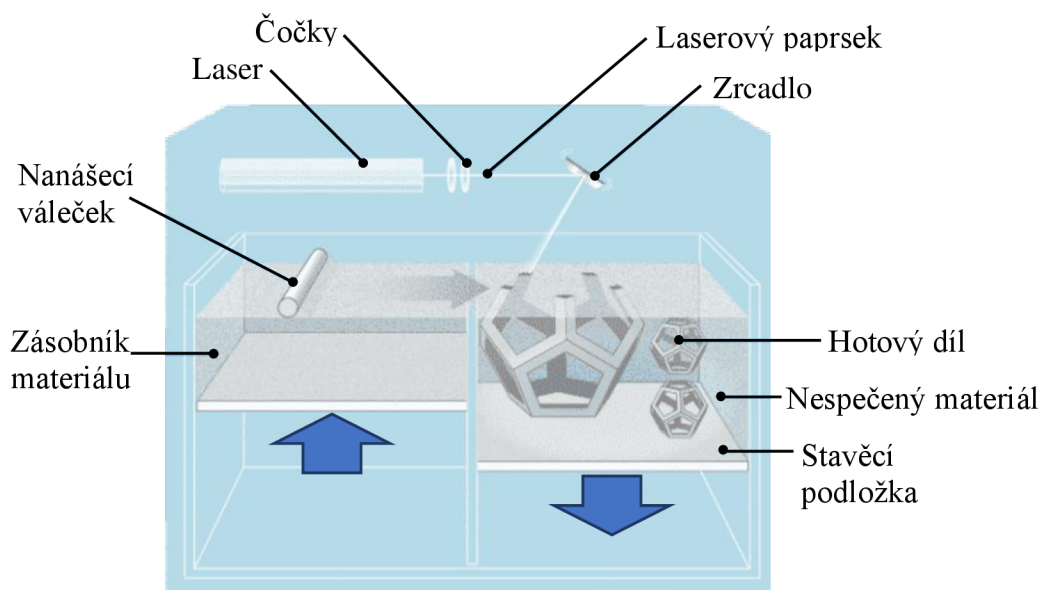
- vhodné pro výrobu detailních dílů – díky výšce vrstvy, která může být až 25 μm ,
- vysoká pevnost výrobků (po vytvrzení).

Nevýhody SLA metody [12]:

- pořizovací cena tiskárny i materiálů je vyšší než u FDM,
- využívá pouze fotopolymerní materiály,
- pro dosažení požadovaných vlastností dílu nutný post-processing – vytvrzení, nátěr.

3.1.3 Selective Laser Sintering

SLS je AT založena na spékání materiálu ve formě prášku pomocí tepla vyvinutého soustředěným paprskem CO₂ laseru v atmosféře inertního plynu. Proces výroby součásti pak vypadá tak, že váleček nanese tenkou vrstvu práškového materiálu ze zásobníku na stavěcí podložku, v místě kontur budoucí součásti je laserovým paprskem materiál ohřát na teplotu skelného přechodu a dojde k jeho spečení. Parametry laseru, jako je např. intenzita, musí být nastaveny tak, aby byl prášek spékán jen v oblasti definované geometrií modelu, a ne mimo ni. Přebytečný okolní materiál se v průběhu stavění neodstraňuje, protože slouží jako přirozená podpora pro položení další vrstvy. Následně se podložka posune o výšku vrstvy směrem dolů, je nanesen prášek a proces se opakuje až do úplného vystavění. Schéma metody ukazuje obr. 13. [12; 19]



Obr. 13 Schéma SLS metody [26].

Pro tuto metodu je možno využít jakýkoliv materiál ve formě prášku, který je možno spéct zahřátím. Při použití prášků, které mají špatné slinovací vlastnosti, se pak využívá polymerů jako pojiva. [12; 19] Nejčastěji využívané materiály pro SLS jsou [19]:

- polymery,
 - nylon,
 - PC,
 - HIPS (High Impact Polystyrene),
- kovy.

Ve slévárenství nachází SLS využití ve tvorbě netrvalých modelů pro přesné lití. Ty mohou být vyrobeny z PS nebo HIPS přičemž HIPS je vhodnější pro tenkostěnné modely a dosahuje lepších mechanických vlastností. Avšak firma 3D Systems nabízí materiál CastForm™ na bázi PS, který je přímo určený pro výrobu vytavitelných modelů. Modely z CastForm™ je následně nutné infiltrovat voskem, jenž pronikne do dutin, pro zlepšení pevnosti a kvality povrchu. [9; 24; 25]

Výhody SLS metody [12]:

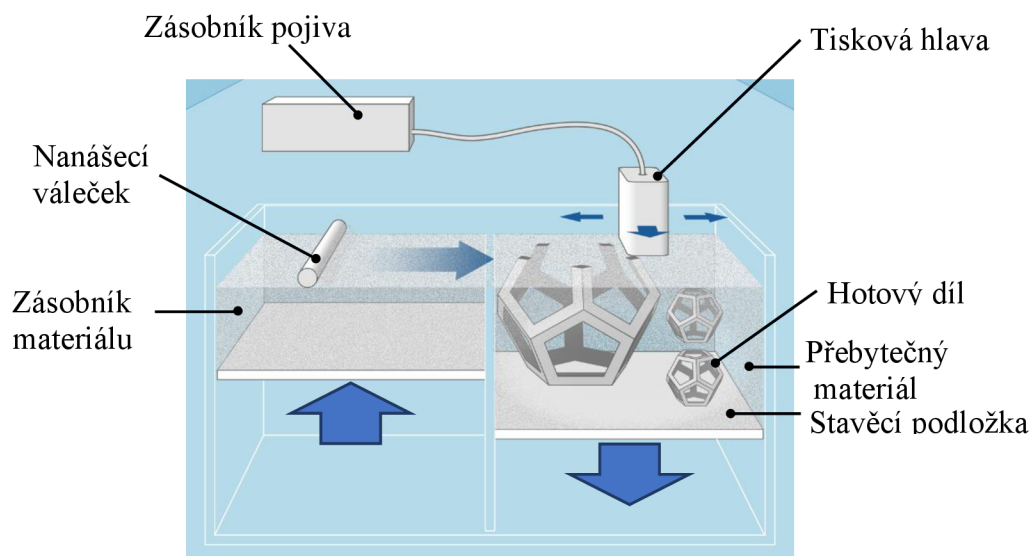
- dobrá stabilita tištěných součástí,
- není třeba vystavět podpory – úspora času při výrobě a při postprocessingu,
- široká škála použitelných materiálů.

Nevýhody metody SLS [12]:

- horší kvalita povrchu – zapříčiněná velkými částicemi samotného prášku,
- vyšší pořizovací cena.

3.1.4 Binder Jetting

BJ, původně nazývána 3DP (three-dimensional printing) je AT využívající vstupní materiál ve formě prášku stejně jako metoda SLS. Ten je ale selektivně spojován (slepen) za použití pojiva – obvykle tekutého. Na pracovní podložku je nanášena vrstva materiálu ze zásobníku válečkem. Následně tisková hlava tryská pojivo na nadefinovaná místa dle 3D modelu. Přebytečný prášek zůstává na místě a slouží jako přirozená podpora pro další vrstvu. Takto se celý proces opakuje až je součást zcela hotová. Schéma metody ukazuje obr. 14. [27; 28]



Obr. 14 Schéma BJ metody [29].

Velkou výhodou BJ je široká škála použitelných vstupních materiálů od písku přes kovy a keramiku až po polymery. Společně s libovolnou úpravou vzniká téměř neomezené množství kombinací materiál/pojivo a značný prostor pro odladění ideální skladby obou složek pro jednotlivé výrobky. Od toho se pak odvíjí výsledné mechanické vlastnosti výrobku, na které má vliv i výška vrstvy materiálu. [27; 28; 30]

Metoda nachází využití ve výrobě modelů, jader, ale především pískových forem. Ty dosahují srovnatelných vlastností, jako formy vyrobené konvenčními postupy a jsou vhodné jak pro malé, tak velké výrobní série. V 3D tisku pískových forem touto metodou jsou světovými lídry firmy VoxelJet a ExOne. Obě používají podobnou technologii 3D tisku. Zařízení firmy

Voxeljet podporují pouze klasický křemenný písek, zatímco ExOne nabízí širší škálu použitelných písků. Ve velikosti pracovního prostoru vede VoxelJet s modelem VX4000, což je největší tiskárna na pískové formy na světě se stavěcím prostorem 4000 x 2000 x 1000 mm. [28; 31; 32; 33]

Výhody BJ [27; 28]:

- značné množství použitelných materiálů a poživ,
- nevyžaduje stavění podpor,
- nespojený materiál možno recyklovat.

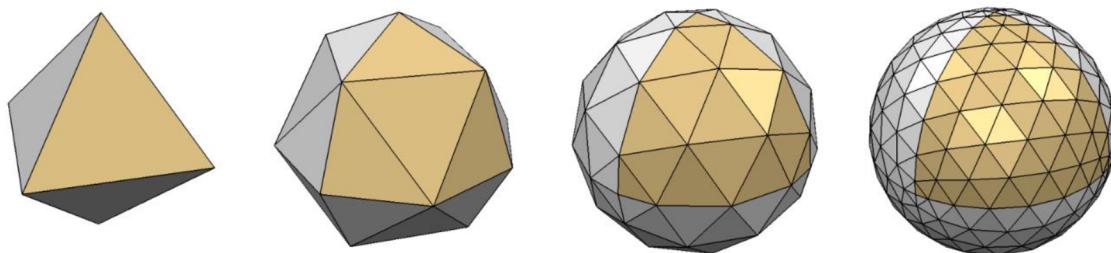
Nevýhody BJ metody [27; 28]:

- vysoká cena zařízení.

3.2 3D skenování

Rychlý vývoj v oboru metrologie v posledních letech, kdy zařízení dosahují stále vyšších přesností a využívané softwary jsou stále sofistikovanější, zapříčinil to, že je 3D skenování v dnešní době běžně využívané nejen pro kontrolu rozměrů výrobků, ale je především také neodmyslitelnou součástí procesu reverzního inženýrství. Právě v procesu reverzní výroby otevírá využití 3D skenování konstruktérům nové možnosti a nabízí značnou časovou úsporu při tvorbě technické dokumentace získáním digitálního modelu s reálnými parametry především tvarově složitých součástí, který následně může sloužit jako vstup pro 3D tisk. [11]

Základním výstupem 3D skenování je mračno bodů, které reprezentuje podobu skenovaného předmětu. Jedná se o soubor bodů, kde každý bod je definován souřadnicemi jeho pozice a vektorem. Mračno bodů jako takové je pro většinu typických inženýrských aplikací nepoužitelné, proto je nutné jej konvertovat do CAD formátu, s kterým je možno nadále pracovat. Možnost konverze je běžně implementována v softwaru dodávaném výrobcem pro obsluhu skeneru. Nejčastější způsob přeměny těchto dat je aproximace na síť mnohostěnnů tvořenou trojúhelníky, která vytváří povrchové těleso. Kvalita reprezentace součásti (resp. její rozlišení) je přímo úměrná počtu trojúhelníků použitých pro její aproximaci (viz obr. 15). Se zvyšujícím se počtem trojúhelníků zároveň roste také velikost výsledného datového souboru, který je obvykle ve formátu STL. [34; 35; 36]



Obr. 15 Aproximace koule podle počtu trojúhelníků [35].

3D skenery jsou zařízení fungující na principu bezkontaktního způsobu snímání objektu. Reálná součást je nasnímána ve 2D, 3D podoba je získána měřením třetí souřadnice za použití optické metody triangulace a interference světla. Tyto metody využívají několik kamer, laser a jiná pomocná zařízení. [34; 35] Na základě konstrukčního provedení se skenery dělí na [34]:

- stacionární (pevné) – vázány na dané místo, snímáný objekt nutno přepravit k nim,
- mobilní – skenery malých rozměrů, jednoduché na přepravu.

3.2.1 Laserové 3D skenery

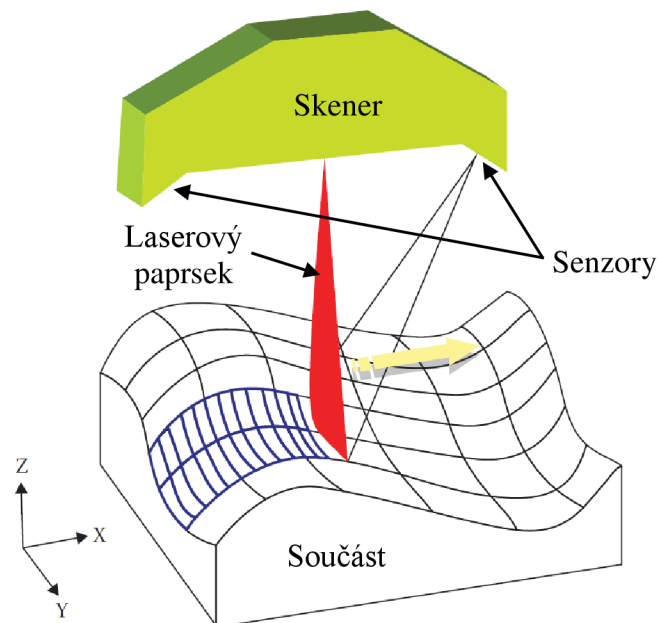
Laserové skenery sestávají ze dvou základních komponent – laserového zdroje a optického snímače. Na skenovanou součást je vysílán laser v podobě přímého paprsku, nebo složitějšího vzoru a následně optický senzor (CCD kamera) zachytí a vyhodnotí 2D obraz objektu podle jeho deformovaného odrazu (viz obr. 16). Třetí rozměr je pak získán pomocí optické metody aktivní triangulace. Velikost skenovaného předmětu je získána měřením doby letu laserového paprsku od jeho vyslání po zachycení jeho odrazu. Podle úhlu, pod jakým se paprsek vrací zpět do skeneru, je dopočítávána informace o zakřivení povrchu objektu. Kvalita digitálního výstupu se odvíjí od několika faktorů jako je pozorovací úhel, zorné pole a hustota pokrytí povrchu snímaného tělesa laserovým paprskem. Laserové skenery jsou schopné zachytit pouze geometrii povrchu součásti, její texturu neumí však rozpoznat. Pro její získání se využívá kombinace laserové technologie s optickou. [34; 35]

Výhody laserových skenerů [34; 35]:

- měření geometrie s vysokou přesností,
- možnost skenovat neprůchozí otvory,
- vhodné pro skenování objektů velkých rozměrů.

Nevýhody laserových skenerů [34; 35]:

- obtížné snímání průhledných a lesklých ploch (problém řešen nástřikem povrchu),
- vyšší pořizovací cena než u jiných typů.

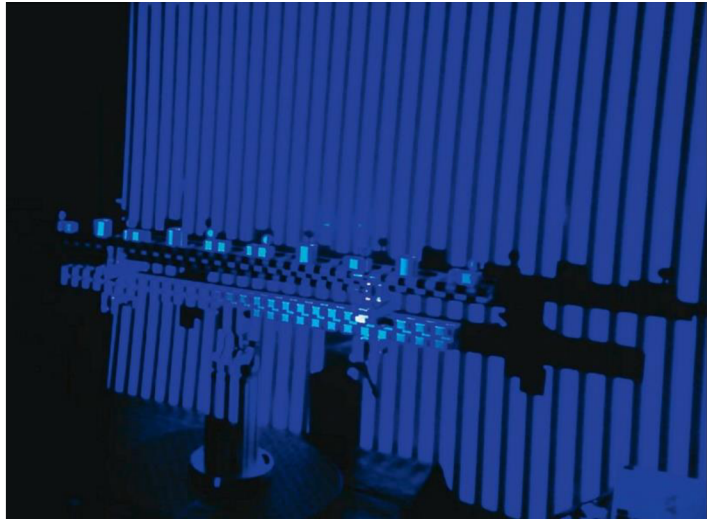


Obr. 16 Princip laserového skeneru [35].

3.2.2 Optické 3D skenery

První skupinou optických 3D skenerů jsou zařízení pracující na bázi strukturovaného světla. Princip jejich fungování spočívá v tom, že na snímaný objekt je pomocí LCD projektoru promítán jednorozměrný (přímka), nebo dvourozměrný pruhový obrazec (viz obr. 17), který se na povrchu tělesa deformuje a skener následně tuto deformaci pomocí kamery zaznamenává. Využitím optické metody podobné triangulaci jsou pak určeny vzdálenosti jednotlivých bodů promítaných obrazců. Skenery promítající 2D obrazce dosahují

mnohonásobně vyšší rychlosti, za kterou jsou schopny předmět nasnímat než při promítání jednorozměrného, protože světelná projekce pokrývá větší část povrchu a kamera zaznamenává všechny body současně. Skenování optickými skenery je značně rychlejší než laserovými. [34; 37]



Obr. 17 Pružová projekce modrého světla [38].

Druhou skupinou jsou pasivní optické 3D skenery využívající fotogrametrii. Jedná se o měřicí metodu založenou na principu, který je podobný fungování lidského zraku. Rekonstrukce reálné součástí ve 3D, určení její polohy a změření rozměrů je možné ze série fotografických snímků (jejich počet závisí na velikosti součásti) za použití softwaru. Snímky jsou pořizovány pod různými úhly tak, aby šly po sobě a každá fotografie se z nějaké části (většinou alespoň z 50 %) překrývala s tou předchozí. [34; 37]

Mimo profesionální zařízení je možno k pořízení snímků využít klasický digitální fotoaparát nebo chytrý telefon. Pro rekonstrukci modelu z fotografií je na trhu velké množství programů dostupných jak zdarma (např. Meshroom), tak placených (např. Autodesk ReCap). Při využití chytrého telefonu je možné sken provést pomocí některé z mnoha aplikací dostupných jak pro Android, tak iOS. Výhodou je, že celý proces od nafocení objektu až po jeho rekonstrukci pak probíhá v rámci dané aplikace. [34; 37]

4 EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA ODLITKU

Myšlenkou bylo zvolit tvarově složitý výrobek, na kterém by byla možnost demonstrovat 3D skenování a následně 3D tisk modelu bez značných obtíží. Zároveň se mělo jednat o předmět, u kterého je odlévání nejvhodnějším způsobem výroby. Pro experimentální výrobu odlitku byl proto jako předloha vybrán kovový slévárenský model zdobeného stojanu vánočního stromku ze školní slévárny.

Stojan sestává z podstavce a figurky. Model stojanu byl původně vyroben v několika velikostech a nalezené modely do sebe vzájemně nepasují. Model figurky je navíc dělený na dvě části, přičemž jedna chybí (viz obr. 18). Chybějící polovina bude tedy domodelována a oba modely upraveny tak, aby si velikostně odpovídaly.

Výhodou je, že zvolený stojan nemá žádné vnitřní dutiny, protože ty by byly skenerem nepřístupné. Zároveň se nejedná o žádnou funkční součást mechanismu, není tedy potřeba klást velké nároky na přesnost použitého skenovacího zařízení. Na stojanu se nevyskytují ani žádné části, u kterých by mohly vznikat problémy při tisku modelu.



Obr. 18 Původní stav stojanu.

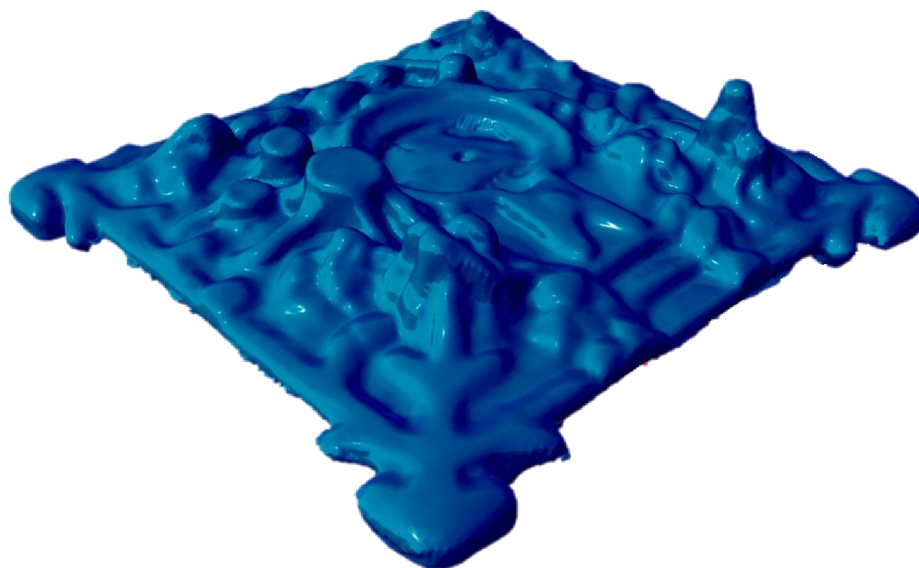
4.1 3D skenování stojanu

Prvním krokem celého procesu výroby bylo získání digitální podoby stojanu naskenováním. Ke skenování byl využit ruční skener „Sense“ od firmy 3D Systems, který byl zapůjčen odborem slévárenství. Jedná se o skener fungující na bázi strukturovaného světla, který dokáže snímat i texturu povrchu objektu. Skener je sice určený spíše pro hobby použití než pro profesionální skenování, ale v tomto případě byl víc než dostačující. Vybrané technické parametry jsou uvedeny v tabulce 1. Skener je nutno propojit s počítačem, na kterém se spustí software dodávaný výrobcem. V něm je možno sledovat průběh snímání objektu v reálném čase a provádět jednodušší úpravy výsledného skenu jako odstranění nežádoucích částí apod.

Tab. 1 Vybrané technické parametry 3D skeneru „Sense“. [39]

Rozlišení X/Y (0,5 m)	0,9 mm
Rozlišení Z (0,5 m)	1 mm
Max. velikost skenovaného objektu	2 m x 2 m x 2 m
Max. operační vzdálenost	3 m

Před samotným skenováním nebylo potřeba provést žádné speciální opatření. Skener nevyžaduje nalepení orientačních bodů, ani nebylo třeba zmatňovat povrch kvůli odleskům. Jelikož nebylo třeba využít žádné speciální podložky ani otočného stolu, figurka byla při skenování volně položena na stůl a podstavec umístěn na kovovou tyčku, aby jej bylo možné nasnímat i zespodu. Bylo provedeno několik skenů každého dílu a následně vybrán ten nejlepší každé z nich (viz obr. 19 a obr. 20).



Obr. 19 Vybraný sken podstavce.



Obr. 20 Vybraný sken figurky.

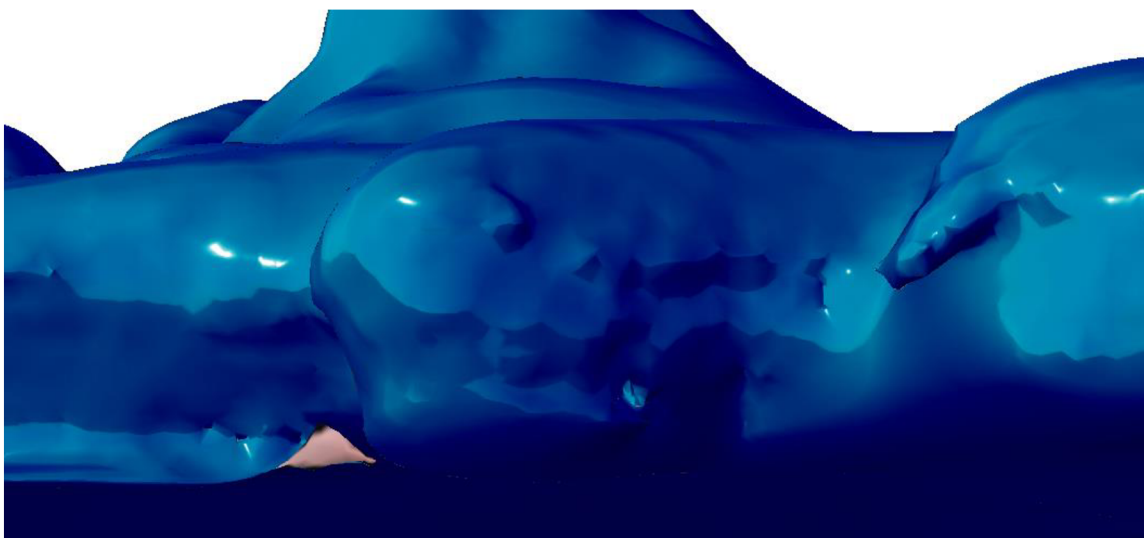
Pro porovnání byla figurka naskenována ještě pomocí chytrého telefonu iPhone 7. Využita byla aplikace „Trnio“ dostupná pro telefony s operačním systémem iOS. Aplikace funguje na principu fotogrammetrie. Model se nejdříve nasnímal z mnoha úhlů a následně aplikace odeslala data na externí server, kde proběhla rekonstrukce 3D modelu. Ten je v rámci minut doručen do emailové schránky. Výsledný sken po drobných úpravách vypadal překvapivě dobře (viz obr. 21), avšak předchozí výsledky z ručního 3D skeneru byly kvalitnější, proto se dál bude pracovat s nimi.



Obr. 21 Sken získaný chytrým telefonem.

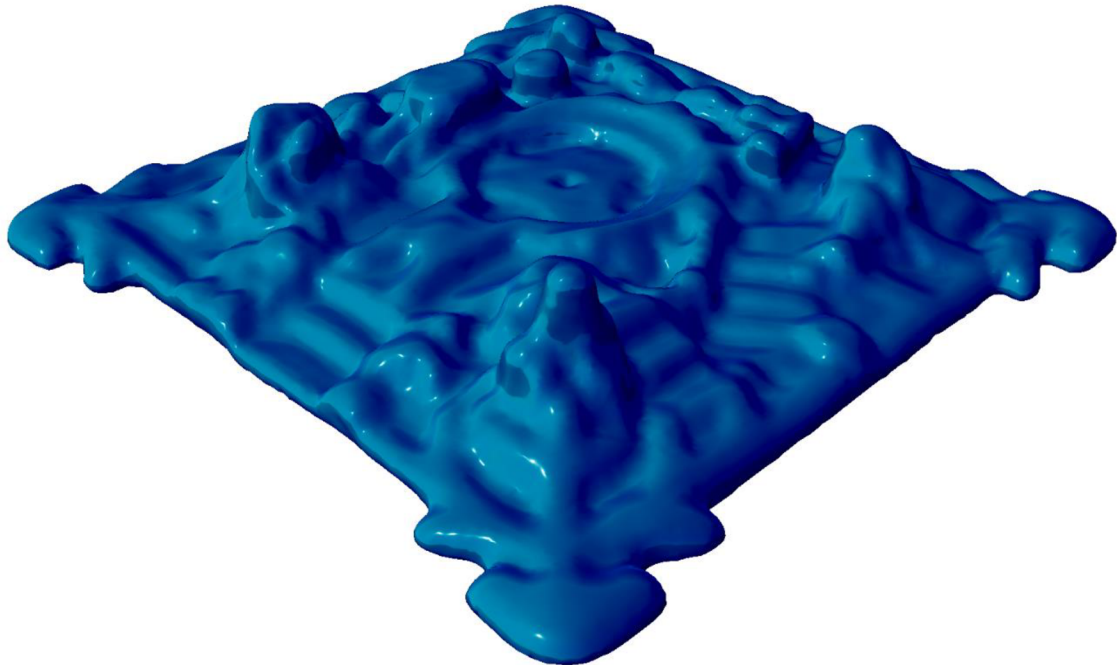
4.2 Úprava 3D modelu

Nejprve byl upraven sken podstavce. Ani přes opakované pokusy se nedařilo naskenovat podstavec zesponu v dostatečné kvalitě. Celý sken byl proto před exportem pomocí automatického příkazu „solidify“ převeden na uzavřenou plochu. Výsledek nebyl uspokojivý a bylo třeba udělat další úpravy. Mimo jiné sken obsahoval typické chyby jako jsou díry nebo lokální výstupky (viz obr 22). Úpravy byly provedeny pomocí programu Autodesk Meshmixer.

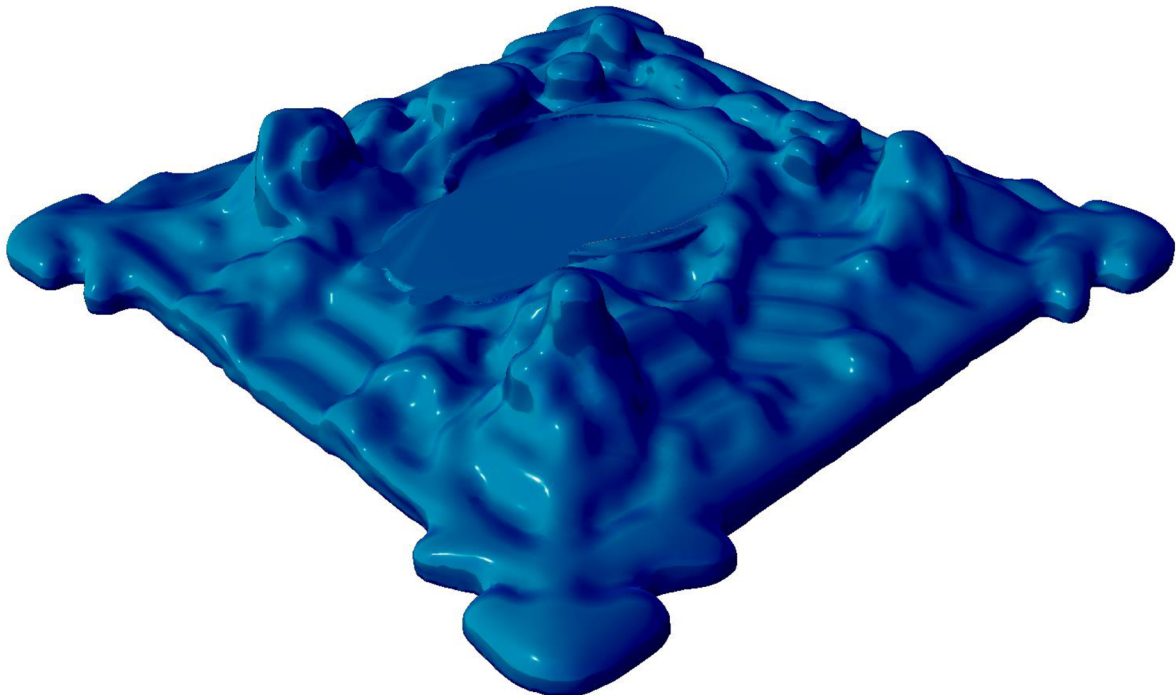


Obr. 22 Detailní pohled na chyby skenu.

Z podstavce byly odstraněny díry, ručně vyhlazeny lokální výstupky a provedeno mnoho drobných kosmetických úprav (viz obr. 23). Následně byl podstavec ve formátu .stl otevřen v programu Autodesk Inventor a pomocí doplňku „Mesh Enabler“ převeden ze sítě na pevné editovatelné těleso. Využitím jednoduché operace vysunutí byla vytvořena dosedací plocha pro figurku a vysunuta celá spodní plocha podstavce (viz obr. 24).

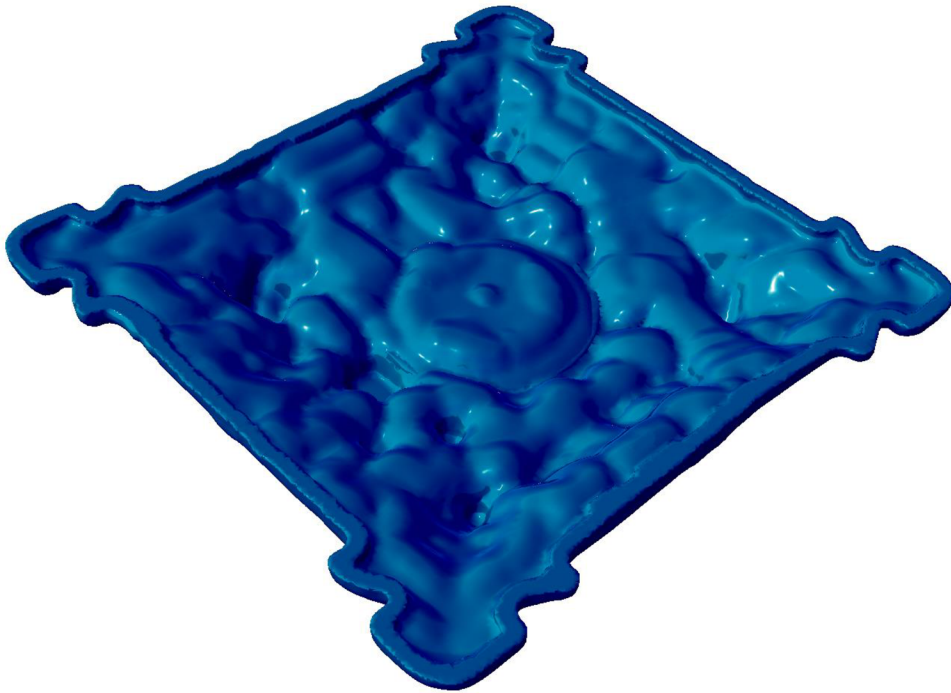


Obr. 23 Opravený sken podstavce.



Obr. 24 Podstavec s dosedací plochou.

Poslední úpravou bylo vytvořit ze stojanu skořepinu, aby výsledný odlitek měl konstantní tloušťku stěny (viz obr. 25). Skořepina byla vytvořena opět pomocí programu Autodesk Meshmixer. Výsledná tloušťka stěny je 5 mm.



Obr. 25 Skořepina podstavce.

Následovala úprava skenu figurky, který obsahoval podstatně méně chyb než sken podstavce. Pomocí softwaru Autodesk Meshmixer byly opět provedeny kosmetické úpravy a opraveny díry. Následně byla vytvořena chybějící polovina figurky pomocí příkazu „zrcadlit“ podle dělící roviny (viz obr. 26).



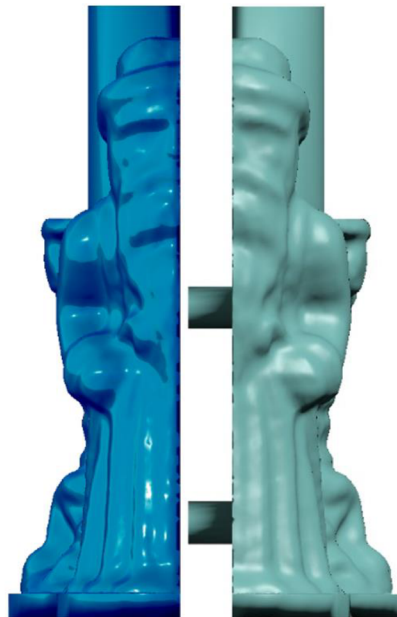
Obr. 26 Opravený sken figurky.

Figurka byla dále otevřena v programu Autodesk Inventor a převedena na pevné těleso, stejně jako bylo provedeno u podstavce. Nejprve bylo potřeba nahradit známku pro jádro na koši figurky hladkým válcem. Následně byla figurce dodělána podstava odpovídající dosedací ploše na podstavci (viz obr. 27). Podstava byla udělaná tak, aby byla ve výsledku mezi podstavcem a figurkou zaručena dostatečná vůle. Obě úpravy byly provedeny vysunutím.



Obr. 27 Figurka s podstavou.

Aby model figurky bylo možno zaformovat, musí být dvojdílný. V posledním kroku byl tedy model rozdělen na dvě poloviny. Vzhledem k tomu, že obě části musí být snadno spojitelné a rozebratelné, bylo spojení řešeno přes dva kolíky (viz. obr 28) umístěny diagonálně. Díry v protikusu, do kterých kolíky budou zapadat, byly záměrně navrženy větší pro zaručení vůle v uložení.



Obr. 28 Spojení polovin figurky.

4.3 3D tisk modelů

Pro výrobu modelů byla zvolena FDM metoda 3D tisku. Hlavními důvody byla dostupnost FDM tiskárny, kterou jsem měl k dispozici jak doma, tak ve škole, a předchozí zkušenosti s těmito tiskárnami. Modely figurky a podstavce byly tištěny na školní tiskárně i3 MK3S a jaderník na domácí i3 MK3S+, jež jsou vyvíjeny a prodávány českou společností Prusa Research.

Na výrobu všech výtisků byl použit materiál PLA, který je levný, snadno se tiskne, dosahuje dobrých mechanických vlastností a při tisku nedochází k jeho kroucení. Nízké kroucení byla klíčová výhoda, protože podstavec stojanu se rozléhal přes celou tiskovou plochu. Konkrétní fyzikální vlastnosti PLA jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti PLA. [40]

Hustota ρ	1,23 g/cm ³
Mez pevnosti v tahu σ	21 – 60 MPa
Modul pružnosti v tahu E	0,35 – 3,5 GPa
Teplota skelného přechodu T_g	45 – 60 °C
Teplota tání T_m	150 – 162 °C

Nastavení tiskových parametrů a tzv. „slicing“ byl proveden v softwaru PrusaSlicer. Modely podstavce i figurky byly tištěny s výškou vrstvy 0,1 mm, 20% výplní a s podporami všude, kde je program vyhodnotil jako potřebné. Teplota trysky byla nastavena na 215 °C pro první vrstvu a pro zbylé vrstvy 210 °C. Pracovní podložka byla nastavena na teplotu 60 °C. Tiskové parametry jaderníku byly stejné až na výšku vrstvy, která byla 0,3 mm.

Tisk všech modelů se obešel bez jakýchkoliv problémů. Figurka byla vytištěna v řádu jednotek hodin, podstavec pak necelých 44 hodin. Po dokončení tisku byly mechanicky odstraněny podpory. Výsledné výrobky jsou na obr. 29 a obr. 30.



Obr. 29 Vytištěný podstavec.



Obr. 30 Vytištěná figurka.

4.4 Příprava forem a lití

Modely byly opatřeny separačním nátěrem a po jejich uschnutí následovala výroba pískové formy. Nejprve byly modely umístěny do rámu formy společně s dřevěnými zářezy (viz obr. 31 a obr. 32) a byly zasypávány formovací směsí. Formovací směs byla tvořena ostřivem ve formě křemenného písku a pojivovým systémem GEOPOL. Výhodou této směsi je, že oproti bentonitové ji není nutno tolik pečovat. Při formování byla tedy důkladně upěchována pouze první vrstva, aby nedošlo k posunutí modelu a zářezu, a další vrstvy byly pěchovány jen mírně.



Obr. 31 Formování podstavce.



Obr. 32 Formování figurky.

Po vytvrdnutí formovací směsi (cca 30 minut) byly rámy obráceny a na oba byl nasazen přes zaváděcí kolíky další rám formy (viz obr. 33 a obr. 34). Modelu figurky byla přidána jeho druhá polovina a následně došlo k zaformování vtokové soustavy. Na zářezy byly nejprve umístěny dřevěné modely struskováku, na ně dřevěné kužely pro samotný vtok a rám byl opět vyplněn formovací směsí.



Obr. 33 Polovina formy podstavce.



Obr. 34 Polovina formy figurky.

Po vytvrdnutí druhých polovin forem došlo k jejich rozdělení. Nejprve došlo k opatrnému vyjmutí vtokových kuželů, následně dřevěných struskováků a zářezů. Jako poslední byly z forem vytaženy modely. U obou forem došlo k posunutí zářezu od modelu (viz obr. 33 a obr. 34), což bylo opraveno vyškrábáním zářezu až do dutiny odlitku.

Formu podstavce bylo poté možno opět složit. Do rohů podstavce byly následně pomocí vrtačky vyvrtány výfuky, aby bylo zajištěno, že tavenina zateče (tzv. zaběhne) do všech rohů. Posledním krokem bylo nalepení předpřipravené licí jamky na vrch formy.

Formu figurky bylo před složením potřeba opatřit ještě jádrem. Jádro bylo vyráběno dodatečně za použití plastového jaderníku vyrobeného na 3D tiskárně. Následovala příprava směsi jádra (viz obr. 35). Směs jádra byla tvořena ostřivem v podobě křemenného písku a jako pojivo bylo použito vodní sklo, které tvořilo cca 5 % směsi. Směs byla postupně napěchována do jaderníku a drátkem byla vytvořena díra přes celou výšku jádra, aby bylo možné napustit celé jádro technickým lihem. Jádro bylo následně opatrně vyjmuto z jaderníku a bylo vytvrzeno vypálením (viz obr. 36). Vytvrzené jádro bylo po drobných kosmetických úpravách založeno do známky ve formě a samotná forma složena. Na připravenou formu byla poté jen opět přilepena předpřipravená licí jamka. Licí jamky jsou také vidět na obr. 35.



Obr. 35 Příprava směsi jádra.



Obr. 36 Vypalování jádra.

Hotové formy byly následně umístěny na pískové podloží. Jako licí materiál byla zvolena litina s lupínkovým grafitem, která byla v peci natavena na teplotu 1490 °C. Odlévání forem proběhlo formou gravitačního lití (viz obr. 37).



Obr. 37 Odlévání forem.

4.5 Dokončovací práce

Po vychladnutí byly formy rozbity pomocí kladiva a odlitky vytaženy. Po vytažení byly odlitky na hrubo očištěny a okartáčovány kovovým kartáčem (viz obr. 38 a obr. 39). Vtok podstavce se podařilo odstranit při vytloukání odlitku z formy, výfuky pak byly odřezány stejně jako vtok figurky. U podstavce došlo ke špatnému odlití jednoho z rohů z důvodu ucpaného výfuku. Tato vada nemá žádný vliv na funkci byla následně opravena opravárenským tmelem.



Obr. 38 Podstavec před očištěním.



Obr. 39 Podstavec po očištění.

Pro dosažení vyšší kvality povrchu byly odlitky otryskány pískem, došlo k obroušení otřepů a drobným kosmetickým úpravám. Posledním krokem bylo opatření odlitků nástřikem stříbrné barvy. Výsledná podoba stojanu je na obr. 40.



Obr. 40 Finální podoba stojanu.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo ověřit použití RP metod při výrobě odlitků na základě literární rešerše a především pomocí experimentu. Náplní experimentu byla výroba odlitku zdobeného stojanu vánočního stromku metodou reverzního inženýrství. Původní předloha byla digitalizována pomocí 3D skeneru a na základě získaných digitálních dat byly pomocí 3D tisku zhotoveny modely pro výrobu netrvalých slévárenských forem.

Skenování původního stojanu bylo pro srovnání provedeno 3D skenerem a chytrým telefonem. Použit byl ruční 3D skener „Sense“ vyrobený firmou 3D Systems, který pracuje na bázi strukturovaného světla. Ačkoliv se jedná o levnější hobby zařízení, ukázalo se, že pro účely této práce byla kvalita výsledků velmi uspokojivá. Výstupy skenování stojanu mobilním telefonem měly ve srovnání s předchozí metodou o poznání nižší rozlišení, nicméně výsledek byl překvapivě dobré kvality. Výsledná kvalita skenu by byla rozhodně vyšší, kdyby bylo použito novějšího chytrého telefonu. Pro skenování funkční součástí by tyto metody však nebyly dostatečně přesné a bylo by vhodné využít profesionálních skenerů.

Pro výrobu modelů byla zvolena FDM metoda 3D tisku. Výhody této metody spočívají v dostupnosti samotných tiskáren, nízkých nákladech na materiál a široké škále použitelných materiálů pro výrobu trvalých i netrvalých slévárenských modelů. Nevýhodou této metody je nutnost vystavění podpor u převyšlých částí modelu. To značně prodlužuje dobu tisku a povrch modelu je po jejich odstranění často nekvalitní a je potřeba jej dále opracovat.

Modely byly tištěny z materiálu PLA, který se pro tuto aplikaci ukázal jako vhodný především díky tomu, že se v průběhu tisku model při ochlazování nekroučí. Pro dosažení co nejlepší kvality povrchu modelů byla výška vrstvy výtisku nastavena na 0,1 mm, což značně prodloužilo dobu tisku. Za předpokladu výroby více modelů (např. netrvalých) by se tento způsob jejich zhotovení nejevil jako efektivní, protože doba tisku podstavce se blížila 44 hodinám a bylo by vhodné zvážit jiný způsob výroby.

Zaformování modelů i samotné lití proběhlo bez výrazných problémů. Jeden z rohů podstavce nebyl zcela vyplněn kovem, což bylo způsobeno pravděpodobně ucpaným výfukem. Tato vada neměla vliv na funkci odlitku a byla opravena opravárenským tmelem. Odlitky byly dokončeny opískováním a opatřeny stříbrným nástřikem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Benefits of 3D Printing for Investment Casting* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/benefits-of-3d-printing-for-investment-casting>
2. BEELEY, Peter R. *Foundry technology*. 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001, x, 719 s. : il., čb. fot. ; 25 cm. ISBN 0-7506-4567-9.
3. CAMPBELL, John. *Castings: the new metallurgy of cast metals*. Second edition. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 stran : ilustrace, grafy. ISBN 0-7506-4790-6.
4. HORÁČEK, Milan. *Slévárenská technologie I*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 166 s. ISBN 80-214-0217-2.
5. NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 217 stran : ilustrace (některé barevné). ISBN 978-80-01-06026-1.
6. *Patterns* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.clinchrivercasting.com/patterns/>
7. *What is aluminium die casting?* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.phbcorp.com/what-is-aluminum-die-casting/>
8. *Sand casting* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.weld2cast.com/sand-casting/>
9. CHHABRA, Munish a Rupinder SINGH. *Rapid casting solutions: a review*. Rapid prototyping journal [online]. BINGLEY: Emerald Group Publishing Limited, 2011, 17(5), 328-350 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552541111156469
10. BAO, Jinsong, Ye JIN, M.Q GU, J.Q YAN a D.Z MA. *Immersive virtual product development*. Journal of materials processing technology [online]. Elsevier B.V, 2002, 129(1), 592-596 [cit. 2022-04-18]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(02)00655-6
11. WANG, Wego. *Reverse Engineering*. Baton Rouge: CRC Press, 2010. ISBN 9781439806302. Dostupné z: doi:10.1201/EBK1439806302
12. KAH FAI, Leong, Lim CHU SING a Chua CHEE KAI. *Rapid Prototyping: Principles And Applications*. 2nd. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003. ISBN 9812381171. Dostupné z: doi:10.1142/5064#t=oc
13. *Precision castings* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.tamau.it/en/precision-castings/>
14. ADEKANYE, Sheriff Adefemi, Rasheedat Modupe MAHAMOOD, Esther Titilayo AKINLABI a Moses Gbadebo OWOLABI. *ADDITIVE MANUFACTURING: THE FUTURE OF MANUFACTURING*. Materiali in tehnologije [online]. LJUBJANA: INST ZA KOVINSKE MATERIALE I IN TEHNOLOGIE, 2017, 51(5), 709-715 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1580-2949. Dostupné z: doi:10.17222/mit.2016.261
15. *Přehled technologií 3D tisku* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku>

-
16. LALEGANI DEZAKI, Mohammadreza, Mohd Khairol Anuar MOHD ARIFFIN a Saggi HATAMI. *An overview of fused deposition modelling (FDM): research, development and process optimisation*. Rapid prototyping journal [online]. Bradford: Emerald Publishing Limited, 2021, 27(3), 562-582 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-08-2019-0230
 17. *Investment casting with PolyCast™* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://polymaker.com/Downloads/Application_Note/PolyCast_Application_Note_V1.pdf
 18. GRIFFEY, Jason. *Types of Filaments for FDM Printing.(fused deposition modeling)*. Library technology reports [online]. American Library Association, 2017, 53(15), 12 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0024-2586.
 19. GIBSON, Ian, David W ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies*. Boston: Springer-Verlag, 2010. ISBN 9781441911193. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-1120-9
 20. *Introduction to Casting for 3D Printed Jewelry Patterns* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://media.formlabs.com/m/5df7ee4477cb6ea8/original/-ENUS-Introduction-to-Casting-for-3D-Printed-Jewelry-Patterns.pdf>
 21. *Castalite Guideline* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://tethon3d.com/wp-content/uploads/Castalite-Guideline-1.pdf>
 22. *Introduction to the QuickCast Patterns* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://infocenter.3dsystems.com/bestpractices/sla-best-practices/quickcast-pattern-design-guide/introduction-quickcast-patterns>
 23. *QuickCast processing guide introduction* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://infocenter.3dsystems.com/bestpractices/sla-best-practices/quickcast-post-processing-guide/introduction>
 24. SOE, Shwe Pyi a Daniel Roy EYERS. *FEA support structure generation for the additive manufacture of CastForm™ polystyrene patterns*. Polymer testing [online]. OXFORD: Elsevier, 2014, 33(1), 187-197 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0142-9418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2013.08.009
 25. YANG, Jinsong, Yusheng SHI, Qiwen SHEN a Chunze YAN. *Selective laser sintering of HIPS and investment casting technology*. Journal of materials processing technology [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2009, 209(4), 1901-1908 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.04.056
 26. *Selective Laser Sintering(SLS)* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.3m3drobotics.com/selective-laser-sinteringsls/>
 27. GOKULDOSS, Prashanth Konda, Sri KOLLA a Jürgen ECKERT. *Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines*. Materials [online]. Switzerland: MDPI, 2017, 10(6), 672 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10060672
 28. LE NÉEL, Tugdual Amaury, Pascal MOGNOL a Jean-yves HASCOËT. *A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering*. Rapid prototyping journal [online]. BINGLEY: Emerald Publishing Limited, 2018, 24(8), 1325-1336 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-10-2016-0161
-

-
29. *Sand printing equipment* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://en.easy3dmade.com/view/114.html>
 30. *What is Binder Jetting?* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/resources/case-studies/what-is-binder-jetting>
 31. ALMAGHARIZ, Eyad S. *Determining When to Use 3D Sand Printing: Quantifying the Role of Complexity*. Youngstown: Youngstown State University / OhioLINK, 2015. Diplomová práce. YOUNGSTOWN STATE UNIVERSITY.
 32. *Sand 3D printers* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/sand-3d-printers>
 33. *3D sand printing for casting molds & cores* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/3d-printing-solution/sand-casting/>
 34. ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4
 35. NOORANI, Rafiq. *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*. 1. Milton: CRC Press, 2018. ISBN 9781498783750. Dostupné z: doi:10.1201/9781315155494
 36. BOTSCH, Mario a Mark PAULY. *Geometric Modeling Based on Polygonal Meshes*. In: Cgl.ethz [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://cgl.ethz.ch/Downloads/Publications/Tutorials/2008/Bot08a/eg08-tutorial.pdf>
 37. BĚHŮNEK, David. *Návrh a výroba optického 3D scanneru*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
 38. MARTÍNEZ-PELLITERO, Susana, Eduardo CUESTA, Sara GIGANTO a Joaquín BARREIRO. *New procedure for qualification of structured light 3D scanners using an optical feature-based gauge*. Optics and lasers in engineering [online]. OXFORD: Elsevier, 2018, 110, 193-206 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2018.06.002
 39. *Sense 3D Scanner - ruční 3D skener* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.pekro.cz/sense-3d-scanner-rucni-3d-skener-P/#product-description>
 40. FARAH, Shady, Daniel G ANDERSON a Robert LANGER. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. Advanced drug delivery reviews [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2016, 107, 367-392 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0169-409X. Dostupné z: doi:10.1016/j.addr.2016.06.012
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**Symboly**

Označení	Legenda	Jednotka
ρ	hustota	[g/cm ³]
σ	mez pevnost v tahu	[MPa]
E	modul pružnosti v tahu	[GPa]
T _g	teplota skelného přechodu	[°C]
T _m	teplota tání	[°C]

Zkratky

Označení	Legenda
RP	rapid prototyping
AT	aditivní technologie
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
BJ	Binder Jetting
PLA	kyselina polymlečná
PC	polykarbonát
PS	Polystyren
HIPS	High Impact Polystyren
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PETG	Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem
CAD	computer aided design