



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA REPLIKY KRYTU PŘEPÍNAČE METODOU PŘESNÉHO LITÍ

PRODUCTION OF A REPLICA OF THE SWITCH COVER USING THE INVESTMENT CASTING METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Klátíl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Jelínek

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Ondřej Klátil**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radim Jelínek**
Akademický rok: 2023/24

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 repliky krytu přepínače metodou přesného lití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metodu přesného lití odlitků do keramických forem lze s výhodou použít pro výrobu replik drobných dílů původně vyrobených jinou technologií. Především lití do kovových forem lze takto relativně snadno a úspěšně suplovat. Výhodou je kvalitní povrch a vysoká přesnost odlitku.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout optimální technologický postup výroby dílu, ke kterému není dostupná výkresová dokumentace, včetně volby vhodného materiálu. Zvolený postup následně prakticky ověřit a vyhodnotit.

Seznam doporučené literatury:

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

ORNST, Jiří. Přesné lití do skořepinových forem. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 71 stran : ilustrace.

HORÁČEK, Milan. Slévárenská technologie I. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1990. ISBN 80-214-0217-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na výrobu repliky krytu přepínače motocyklu ČZ 250/471 z roku 1974. V teoretické části práce je rešerše pojednávající o výrobě trvalých a netrvalých modelů, výrobě forem, různých způsobech odlévání, aditivních technologiích řadících se do metod rapid prototyping a popis způsobů skenování. V experimentální části jsou informace z teoretické části ověřeny na experimentu výroby repliky krytu přepínače. Originální díl byl nejprve naskenován, sken upraven a převeden na objemové těleso, které následně i s vtokovou soustavou bylo vytisknuto na FDM tiskárně metodou spalitelného modelu pro přesné lití do skořepinových forem. Takto zhotovené odlitky se poté vyhodnotily vůči původním dílům. Na závěr experimentu byly zjištěny vady v povrchu. Příčiny těchto vad nelze s určitostí vysvětlit. Následně byly nastíněny různé možnosti způsobu výroby pro určité intervaly podle počtu výrobků.

Klíčová slova

rapid prototyping, přesné lití, aditivní technologie 3D skenování, 3D tisk

ABSTRACT

The work is focused on the production of a replica switch cover for the ČZ 250/471 motorcycle from 1974. The theoretical part of thesis includes a review of the production of permanent and expendable patterns, mold making, various casting methods, additive technologies categorized under rapid prototyping methods, and a description of scanning methods. In the experimental part, the informations from the theoretical part are verified through the experiment of producing the switch cover replica. The original part was first scanned, then the scan was edited and converted into a solid model, which was then printed on an FDM printer as a expendable pattern for the investment casting method using shell molds. These castings were then evaluated against the originals. At the end of the experiment, surface defects were found, the causes of which could not be definitively explained. Subsequently, various production methods were outlined for specific ranges according to the number of products.

Keywords

rapid prototyping, investment casting, additive technology, 3D scanning, 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLÁTIL, Ondřej. *Výroba repliky krytu přepínače metodou přesného lití* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157666>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Radim Jelínek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba repliky krytu přepínače metodou přesného lití vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Ondřej Klátil

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Radimu Jelínkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a blízkým za jejich podporu při vypracovávání této práce a během celého studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 Rozbor zadání	10
2 Teorie odlévání	11
2.1 Výroba modelů pro odlévání	11
2.1.1 Výroba trvalých modelů	11
2.1.2 Výroba netrvalých modelů	12
2.2 Výroba forem pro odlévání	12
2.2.1 Netrvalé formy	13
2.2.2 Polotrvalé formy	13
2.2.3 Trvalé formy	13
2.3 Způsoby odlévání	13
2.3.1 Odlévání do pískové formy	14
2.3.2 Odlévání do kovové formy (kokily)	14
2.3.3 Vysokotlaké lití	14
2.3.4 Nízkotlaké lití	14
2.3.5 Odstředivé lití	15
2.3.6 Lití do skořepinových forem na vytavitelný model	15
3 Rapid prototyping	16
3.1 Postup a rozdělení metod	16
3.2 Fused deposition modeling (FDM)	17
3.3 Stereolitografie (SLA)	19
3.4 Laminated object manufacturing (LOM)	20
3.5 Selective laser sintering (SLS)	21
3.6 Binder Jetting (BJ)	22
4 3D skenování	24
4.1 Popis skenování	24
4.2 Metody skenování	24
5 Experimentální část výroby odlitku	26
5.1 Postup výroby repliky krytu přepínače	26
5.1.1 Geometrie modelu	26
5.1.2 Skenování modelu a úprava jeho geometrie	26
5.1.3 Objemový model	27
5.1.4 3D tisk	28
5.1.5 Sestavení stromečku	28

5.1.6	Výroba skořepiny	29
5.1.7	Vytavování modelů a žíhání skořepiny	30
5.1.8	Apretace odlitků	31
5.2	Zhodnocení výrobního experimentu.....	31
5.3	Porovnání geometrií	33
5.4	Ekonomičnost výroby.....	34
5.4.1	Výroba 1 až 5 kusů	34
5.4.2	Výroba 5 až 20 kusů	34
5.4.3	Výroba 20 až 100 kusů	34
5.4.4	Výroba 100 až 10 000 kusů	34
5.4.5	Výroba 10000 a více kusů	34
ZÁVĚR.....		35

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

ÚVOD

V dnešní době jsme schopni klást důraz jak na kvalitu, tak i kvantitu pomocí výroby aditivní technologií (AT). Máme technologie umožňující vytvářet složité tvary výrobků bez omezení výroby třískovým obráběním a moderní skenery zrychlující kontrolu kvality. Tyto technologie umožňují rychlou výrobu prototypů, což je ve slévárenství klíčové, protože cílem je co nejrychleji získat první odlitek. Tento odlitek pak slouží jako výchozí bod pro jeho další vývoj. Díky těmto technologiím lze tento proces výrazně urychlit.

Všech těchto aspektů se využívá v reverzním inženýrství, zejména když původní výkresová dokumentace již není k dispozici. To je i případem této práce, kde je potřeba vytvořit odlitek repliky krytu přepínače z hliníkové slitiny, ke kterému již nelze dohledat výkresovou dokumentaci.

Jedná se tedy o výrobek z dnes již ve velice omezené míře fungujícím podniku Česká Zbrojovka (ČZ a.s.), která vznikla v roce 1919 a zabývala se primárně výrobou zbraní. V roce 1929 započala s výrobou jízdních kol. Výroba motocyklů na sebe nenechala dlouho čekat, v roce 1930 přišla firma s prvním modelem motocyklu (ČZ 76, tzv. Kaktus). „*Po válce se firma rozdělila na výrobu zbraní (Brno, Uherský Brod) a výrobu motocyklů (Strakonice).*“ [1]

Výše zmíněné kryty přepínačů se používaly na motocykly vyrobené mezi lety 1974 až 1981 na základě vládního požadavku souvisejícího s montáží směrových světel na motocykly. Původní cena krytů přepínače byla 14 Kčs, což v dnešní měně představuje přibližně 80 Kč. Nicméně na dnešním trhu se jejich cena pohybuje mezi šesti až osminásobkem této hodnoty, což naznačuje, že jejich vzácnost a vysoká poptávka výrazně zvýšily jejich tržní hodnotu. [2; 3]

Skutečnost, že kryt přepínače se vyráběl méně než 10 let, spolu s faktem, že nyní uplynulo více než 50 let od ukončení jeho výroby, přispívá k současné vysoké hodnotě tohoto předmětu. Všechny tyto aspekty tudíž přispěly k nápadu, zdali se nelze k tomuto krytu přepínače dostat jinou cestou.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem práce je představit základy odlévání, přiblížit dnešní trendy a nastínit vývoj metod Rapid prototyping (RP), 3D skenování a reverzního inženýrství. Tyto metody budou poté prověřeny na experimentu zhotovením odlitku pomocí metody přesného lití ve školní slévárně. Výchozím nápadem bylo vytvoření repliky krytu přepínače z hliníkové slitiny, na němž bude snaha zrealizovat a přiblížit celkový technologický postup od vyhotovení 3D modelu až po reálný odlitek.

Tato bakalářská práce je poté v experimentální části věnována samotné výrobě odlitku krytu přepínače motocyklu ČZ 250/471 z roku 1974. Tímto přepínačem byly mezi lety 1974 až 1981 vybaveny všechny motocykly ze Strakonického sídla národního podniku ČZ, které měly směřová světla. Přepínač byl původně vyráběn pomocí tlakového lití do kovové trojdílné formy. Této skutečnosti totiž napovídá celkový kvalitní povrch odlitku, stopy po obrábění dvou částí formy na vnějším povrchu a technologické úkosity vnitřního povrchu odlitku pro jednoduché vytahování z formy.



Obr. 1 Uchycení přepínače na protikus

Častou vadou těchto hliníkových krytů přepínačů byl lom jednoho z úchytů způsobený ohybovým napětím přesahujícím únosnost materiálu. Ohybové napětí je způsobené mezerou (v tomto případě 0,3 mm) mezi úchytem a protikusem. Toto napětí vzniká nepřesnostmi v uložení při přišroubování krytu k protikus (viz obr. 1). Tento odlitek je také znám pro svou nekonzistentnost povrchu, kdy každý kus má odlišnou kvalitu zpracování povrchu (viz obr. 2). Z těchto důvodů byla snaha vytvořit repliku přepínače, která bude mít přesnější dosedací plochy, stejně kvalitní vnější povrch a nebude mít tendenci k vytváření lomů při mechanickém namáhání.

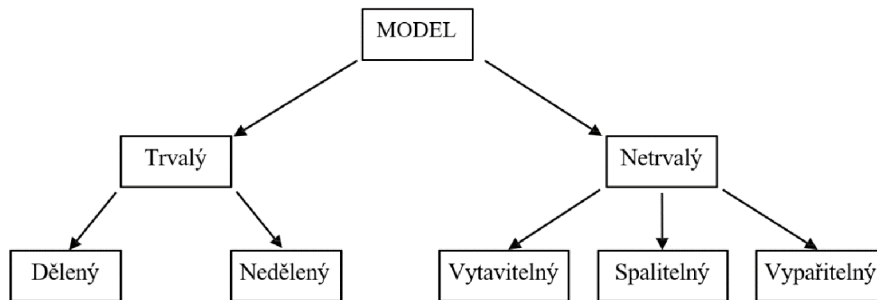


Obr. 2 Typické vady vnějšího povrchu

2 TEORIE ODLÉVÁNÍ

2.1 Výroba modelů pro odlévání

Modely jsou stále nejvíce vyráběné pomocí třískových obráběcích metod, což je např. soustružení, frézování nebo Computer numerical control (CNC) obrábění. Současným trendem je čím dál větší využívání metod RP. Základní dělení modelů je dle trvanlivosti na trvalé a netrvalé. (viz obr. 3) Mezi hlavní aspekty materiálů používaných na výrobu modelů patří rozměrová stálost, odolnost vůči otěru, korozi a chemickému působení, snadná opracovatelnost, levná výroba, nízká váha pro jednoduchou manipulaci, snadná opravitelnost a následná použitelnost. [4; 5]



Obr. 3 Rozčlenění modelů na základě jejich vyjímání z formy [4]

2.1.1 Výroba trvalých modelů

Materiály obráběné konvenčními způsoby se mohou dělit na základní tři skupiny:

- Dřevo – borovice, olše, ořech, hrušeň
- Kovy – šedá litina, ocel, slitiny hliníku, mosaz, bronz
- Umělé hmoty – epoxidové nebo polyuretanové pryskyřice, termoplasty

Dle zadaných požadavků volíme materiál modelu, který primárně určuje jeho požadovanou životnost. Smrštění odlitku je především dáno typem používaného materiálu na odlévání, ale je nutno počítat i se složitostí odlitku, způsobem formování a tloušťce stěn, které také svou mírou přispívají ke konečným rozměrům odlitku. Modely musí být rovněž opatřeny přídávky na obrábění, úkosy a povrchovou úpravou pro delší životnost modelových zařízení. [4; 6]

Volba použitého materiálu záleží na technologickém postupu a cenovém rozpočtu. V případě výroby složitých modelů se vyrábí z více částí, které jsou poté spojeny a jejich přechody zahlazeny. Největší modely mohou dosahovat až několika metrů (viz obr. 4). [7]



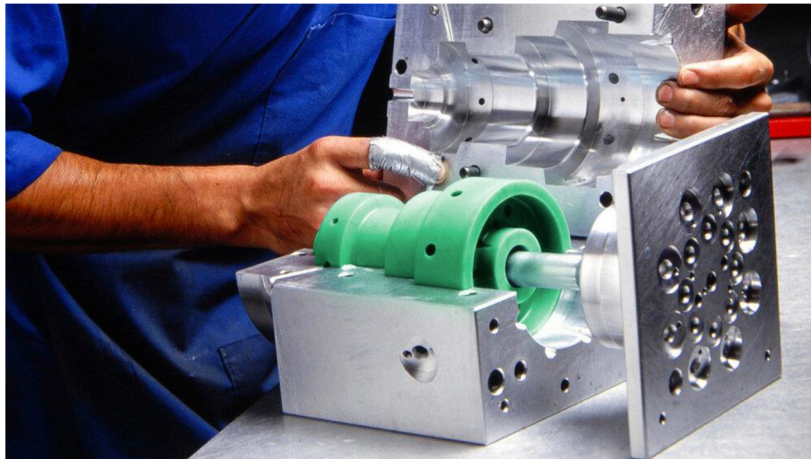
Obr. 4 Dřevěný model spojky ropovodu [7]

2.1.2 Výroba netrvalých modelů

Pro výrobu forem se v dnešní době využívá i netrvalých modelů vytvořených např. pomocí metod RP. Takto zhotovené modely jsou v průběhu výroby formy nebo při odlévání kovu do formy odstraněny. Jejich hlavním pozitivem je především rychlost a přesnost výroby. Podle způsobu jejich odstranění se modely dělí na vytavitelné, spalitelné a vypařitelné. [4; 7]

Vytavitelné modely se používají u metody přesného lití, kdy se vytvoří voskový model budoucího odlitku upravený o smrštění vosku a kovu, který se poté vtokovou soustavou připojí na vtokový kůl. Takto vzniklý stromeček se postupně namáčí v břečce a posypává obalovým materiálem. Po vysušení vznikne na povrchu voskového modelu skořepina, která se po vyžhání zpevní a dojde k vytavení voskového modelu. V případě použití plastového materiálu PLA nebo PolyCast dojde v peci k jeho spálení. Metoda vypařitelného modelu pracuje na obdobném principu. Rozdíl je v tom, že při nalití tekutého kovu do formy dojde k jeho vypaření při plnění. U této metody se používají nejčastěji modely z polystyrenových materiálů. [4; 5]

Výroba voskových modelů probíhá převážně do kovových, sádrových nebo silikonových forem. Do připravené formy se nalije (gravitačně nebo pod tlakem) tekutý vosk, ten se nechá zchladnout a poté se z formy vyjme (viz obr. 5). [4]



Obr. 5 Výroba voskových modelů do kovové formy [8]

Mezi méně ekonomicky náročné způsoby patří výroba voskových modelů do sádrových a silikonových forem, čehož se primárně využívá v menších sériích výroby. Tyto levnější varianty jsou ale vykoupeny menší životností formy, která se pohybuje v řádu desítek výrobků. Ekonomicky náročnější variantou je výroba voskových modelů do kovových forem. Cena těchto forem je sice vyšší, ale vyrovnává se díky jejich větší životnosti a schopnosti vyrábět velké množství modelů. V praxi to znamená, že tyto formy jsou schopny vyprodukovat desetitisíce kusů voskových modelů. [9; 10]

2.2 Výroba forem pro odlévání

Budoucí tvar odlitku je dán tvarem formy, která je jeho negativem rozměrově upraveným o smrštění odlévaného materiálu pohybující se v řádu jednotek procent. Na výrobu forem je nutno klást velký důraz, jelikož každá vada se poté objeví také na odlitku. Proto základem kvalitního odlitku je kvalitní forma. [5; 7]

Podle počtu výrobků zhotovených z jedné formy se dělí na netrvalé formy, polotrvalé formy a trvalé formy. Výběr materiálu formy se odvíjí od plánovaného počtu výrobků. Formy s vyšší životností jsou spojené s vyšší cenou, proto je nutné s touto skutečností počítat při volbě materiálu. [4; 7]

2.2.1 Netrvalé formy

Netrvalé formy slouží pouze pro výrobu jednoho odlitku. Po ztuhnutí kovu dojde k destrukci formy, která je nejčastěji tvořena ze směsi ostřiva, pojiva a pomocných formovacích látek (viz obr. 6). Ostřivo je např. křemičitý písek, chromit nebo šamot. Formovací směs se dělí na modelový a výplňový písek. Modelový písek je kvalitnější formovací směs, která se pěchuje přímo na model. Výplňový písek je již použitá formovací směs na formu, která prošla úpravou a vyplňuje se s ní zbytek formy. Pojivo je materiál sloužící ke svázání jednotlivých zrn ostřiva, které se dělí na dvě skupiny – anorganického původu (např. cement nebo jíly) a organického původu (např. pryskyřice nebo oleje). Na úpravu vlastností forem se používají pomocné formovací látky, které slouží k úpravě povrchu forem nebo jako dělicí látky. Takto použitá netrvalá forma se po vychladnutí kovu rozbije a materiál formy se může regenerovat pro další použití. [5; 7]



Obr. 6 Odlévání do netrvalé pískové formy [11]

2.2.2 Polotrvalé formy

Polotrvalé formy slouží k odlití více než jednoho odlitku. Jejich trvanlivost je závislá na velikosti odlitku, materiálu odlitku a typu použitého materiálu formy. Nejčastěji se vyrábějí ze žáruvzdorných keramických formovacích směsí. Po každém odlití je nutno formu lehce opravit a připravit na další odlitek. Přesnost výroby s každým odlitkem klesá, protože se forma musí neustále opravovat, což do procesu vnáší nepřesnosti. Tato forma se využívá pro odlévání jednoduchých tvarů např. kotlových nádob, desek nebo žlebů. [4]

2.2.3 Trvalé formy

Trvalými formami jsme schopni vyrobit až statisíce odlitků. Z největší části se jedná o formy vícedílné (dělené). Nejčastěji používanými materiály jsou litina nebo nástrojová ocel. Formy z těchto materiálů jsou zhotoveny pomocí třískového nebo elektroerozivního obrábění. Jejich hlavní výhodou oproti netrvalým nebo polotrvalým formám je dobrá tepelná vodivost, čehož se využívá pro zkrácení času chladnutí taveniny. Tento jev může být podpořen i chladícími kanálky, které ještě více zvyšují odvod tepla. Všechny tyto aspekty poté zaručují až šestinásobnou produktivitu oproti netrvalým formám. Hlavní nevýhodou těchto forem je vysoká pořizovací cena, což určuje jejich použití převážně ve velkosériové výrobě. Používají se zejména pro tlakové lití. [4; 5]

2.3 Způsoby odlévání

Odlévání kovů je způsob produkce výrobků, při němž dochází k nalévání tekutého kovu do předem připravené formy. Touto metodou se vyrábějí především předměty, které by jinou technologií (např. obráběním) byly na výrobu velice nákladné. Odlévání se dělí na gravitační lití, lití za zvýšených sil a na zvláštní způsoby výroby odlitků. [4; 5]

2.3.1 Odlévání do pískové formy

Nejběžnějším způsobem odlévání je gravitační lití do pískové formy, jelikož je tato technologie nejstarší, jedna z nejjednodušších a zároveň ekonomicky nejpřívětivějších (viz obr. 6). Na druhou stranu kvalitou povrchu ani přesností nevyčníká. [4; 11]

2.3.2 Odlévání do kovové formy (kokily)

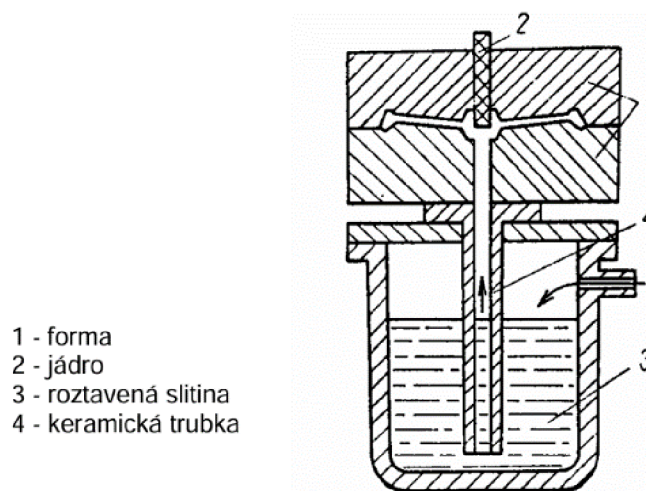
Přesnější a rychlejší variantou gravitačního lití je lití do kokil. Kokila je kovová forma nejčastěji z litiny, někdy také z oceli, vhodná na velkosériovou výrobu až v řádech statisíců kusů výrobků. Její životnost se dá zvýšit použitím ochranných nátěrů. Je možno odlévat i duté výrobky za použití kovových nebo pískových jader. Při odlévání je forma předehřátá na teplotu v rozsahu 150–350 °C, podle použitého materiálu formy. Kovové materiály velice dobře odvádí teplo, tudíž forma umožňuje rychlejší tuhnutí taveniny. Z této vlastnosti plyne i skutečnost, že v této formě má tavenina při výrobě tenkostěnných odlitků horší zabíhavost. Další hlavní nevýhodou této metody je vysoká počáteční investice na pořízení formy. [4; 12]

2.3.3 Vysokotlaké lití

Vysokotlaké lití je jedním ze způsobů odlévání za zvýšených sil, kdy se jako u gravitačního lití primárně odlévá do kovových kokil jen za rozdílu, že v tomhle případě je to za zvýšeného tlaku (2–500 MPa). Z toho plyne lepší zabíhavost taveniny při výrobě tenkostěnných odlitků. Tyto formy jsou často opatřeny chladicími kanálky, které drží formu ve vhodném teplotním rozmezí. Tímto dosahuje vysokotlaké lití jednu z nejvyšších hodnot produkce odlitků. Výroba touto metodou se dělí na stroje s teplou tlakovou komorou, kdy se kov taví přímo ve stroji a vhání se do formy pístem nebo vzduchem, a na stroje se studenou tlakovou komorou, kdy se kov taví mimo stroj, potřebné množství kovu se nalévá do tlakové komory a pístem se vtlačuje do formy. [4; 5; 12]

2.3.4 Nízkotlaké lití

Nízkotlaké lití je další způsob odlévání za zvýšených sil. Tato metoda má nižší nároky na materiál kovové formy, jelikož je zde mnohem menší tlak (do 0,5 MPa) a také zde odpadá nutnost použití vtokové soustavy a náliček (viz obr. 7). Princip metody je takový, že se forma usadí těsně nad roztavený kov. Keramickou tryskou je poté za lehce zvýšeného tlaku forma naplněna tekutým kovem a poté je tlak zvýšen, dokud kov neztuhne. Výhodou této metody je vysoké využití kovu (až 95 %). Kov se během tuhnutí nedostane do styku s vnější atmosférou a tuhnutí kovu je ukončeno v keramickém nátrubku. [4; 12]



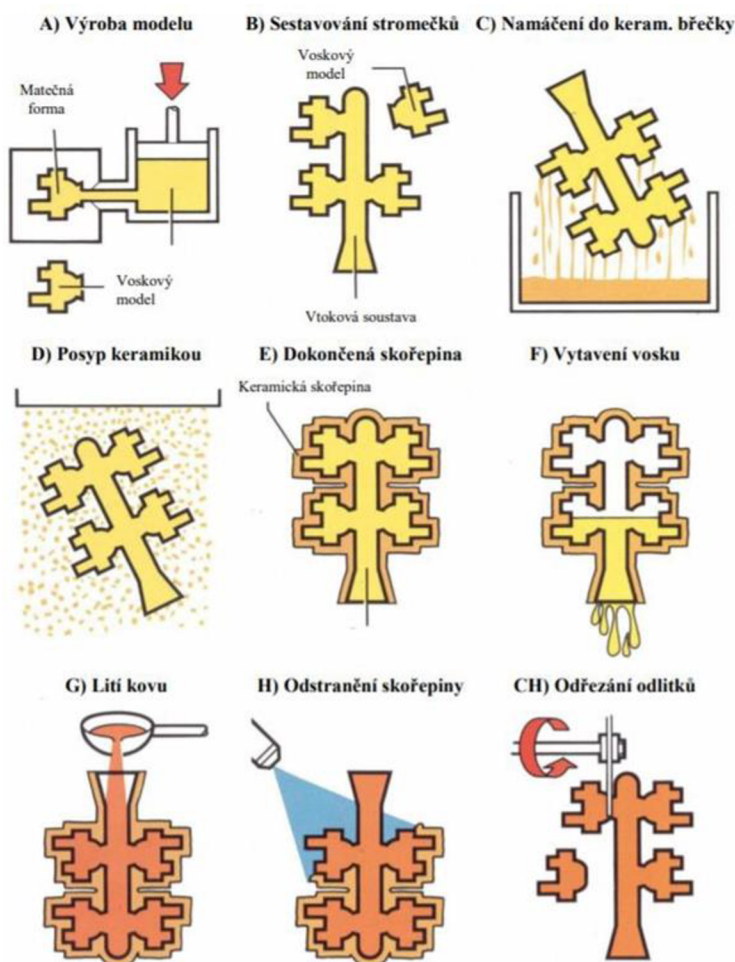
Obr. 7 Schéma nízkotlakého lití [12]

2.3.5 Odstředivé lití

Metoda odstředivého lití také patří do skupiny odlévání za zvýšených sil. Tato technika využívá odstředivých sil, kdy je tekutý kov vléván do otáčející se formy. Vlivem odstředivých sil je kov tlačěn na stěnu formy, což zvyšuje hutnost odlitku. Veškeré odpadní materiály jako struska nebo vměstky mají nižší hustotu než samotný kov, proto jsou vlivem rotace vytlačovány k vnitřnímu průměru vzniklého odlitku. Hlavní výhodou této metody je úspora na vytváření jádra, vtokové soustavy a výfuku, ale za cenu toho, že nelze odlévat výrobky s neválcovou dutinou. [4; 5; 12]

2.3.6 Lití do skořepinových forem na vytavitelný model

Metoda lití do skořepinových forem patří do skupiny gravitačního lití, která je založena na principu vytavitelného nebo spalitelného modelu. Voskové modely jsou zpravidla zhotovené z formy, do které se odlévají nebo vstříkují. Plastové modely jsou zpravidla tištěné na 3D tiskárnách. Tyto modely se následně usadí na voskový vtokový kůl, který je poté namáčen v suspenzi pojiva, plniva a posypán ostřivem až do vytvoření 6 až 10 takových vrstev. Takto obalený stromeček jde do pece, kde dojde k vytavení vosku nebo spálení plastu. Vzniklá forma se vyžihá a do ní se může odlévat tekutý kov. Vzniklé odlitky se potom oddělí od kůlu, odstraní se od vtokové soustavy a obrobí se zpravidla už jen na funkčních plochách (viz obr. 8). Jedná se o velice přesnou metodu. Při výrobě touto metodou se vyžaduje minimální obrobení odlitků, čehož se využívá např. v sériové výrobě lopatek turbín. Nevýhodou této metody je zdlouhavý proces sušení jednotlivých vrstev. [4; 13]



Obr. 8 Postup při výrobě metodou přesného lití na vytavitelný model [13]

3 RAPID PROTOTYPING















RP je doslovně přeloženo jako “rychlé zhotovení prototypu“, kdy jeho hlavním cílem je co nejrychlejší zavedení výrobku na trh, ověření různých variant výrobku nebo ověření funkčnosti výrobku. Od zadání požadavku může být výrobek hotov i v řádu hodin. Takto rychlá výroba je hlavním pozitivem metod RP. Na druhou stranu metody RP jsou zatím tou ekonomicky náročnější variantou výroby jak modelů, tak i forem. [14]

Výroba modelů, forem nebo i jader touto metodou, jak již bylo zmíněno, primárně šetří čas, umožňuje výrobu tvarově nebo velikostně složitých forem nebo modelů, šetří náklady na nástroje použité při konvenčním obrábění nebo také šetří požadavky na zručnost modelářů. Takto vytvořené formy ani nevyžadují mít fyzický díl, čehož se využívá především v reverzním inženýrství. Při výrobě replik dílů na veterány, ke kterým již není možno dohledat výrobní výkres, se s výhodou využívá RP metod. [15]

3.1 Postup a rozdělení metod

Obecný postup u metod RP je takový, že se nejprve na počítači vytvoří prostorový model výrobku buď pomocí CAD modelu, nebo převedením reálného objektu do elektronické podoby pomocí 3D skeneru. Po 3D skenování je díl při velkém opotřebením předlohy nebo při nedostatečích vytvořených 3D skenováních možno upravit. Takto vytvořený model se dle zařízení převede na model tvořený souvisle rozloženými rovnoběžnými řezy vzdálenými od sebe 0,05 až 2 mm. Při konvenčním třískovém obrábění dochází k úběru materiálu, naopak u AT dochází k postupnému nanášení materiálu vrstvou po vrstvě. Jejich dělení je kategorizováno na základních 7 skupin dle tab. 1 [16]:

Tab. 1 Rozdělení AT

Název technologie	Princip		
Vat photopolymerization	 SLA	 DLP	 CDLP
Material extrusion	 FDM		
Material jetting	 MJ	 NPJ	 DOD
Binder jetting	 BJ		
Powder bed fusion	 MJF	 SLS	 DMLS
Direct energy deposition	 LENS	 EBAM	
Sheet lamination	 LOM		

Výběr AT je volen podle toho, jaké vlastnosti jsou od finálního produktu očekávány s ohledem na ekonomickou náročnost výroby. Dle různých principů technologií se AT dělí takto:

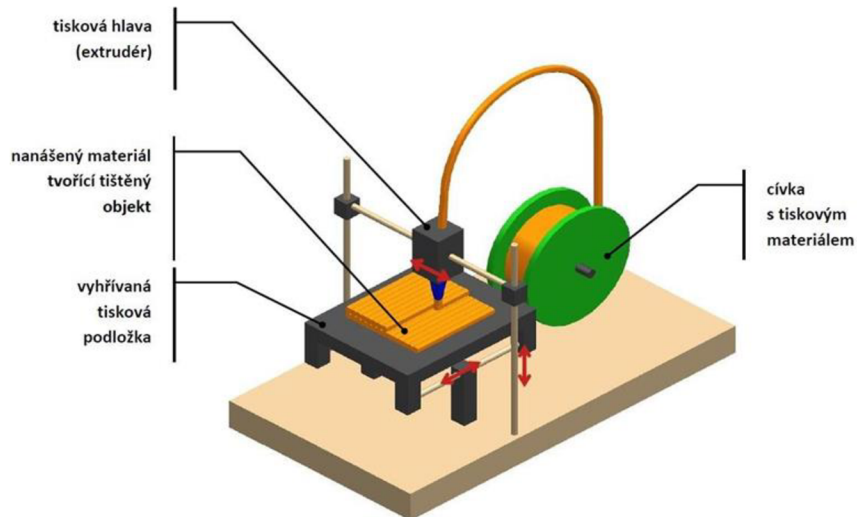
- Vat photopolymerization – kategorie procesů AT, které vytvářejí 3D objekty selektivním vytvrzením tekuté pryskyřice prostřednictvím cílené světlem aktivované polymerace. Do této kategorie také patří metoda Stereolitografie, která vznikla v roce 1986, což ji řadí mezi nejstarší typ AT. [16; 17]
- Material extrusion – je AT, ve které je plastová struna nepřetržitě dodávána na pracovní platformu skrz vytlačovací trysku. V této trysce je materiál zahříván na teplotu mezi 150–250°C a poté ukládán vrstvu po vrstvě na vytvářený výrobek. [18]
- Material jetting – materiál je tisknut na platformu, kde tuhne a je stavěn vrstvu po vrstvě. Materiál je také nanášen z trysky, která se pohybuje horizontálně nad tisknutou plochou. Stroje se liší svou složitostí a způsobem tisknutí materiálu. Vrstvy materiálu jsou buď následně vytvrzeny, nebo polymerizovány UV světlem. [19; 20]
- Binder jetting – je výrobní proces AT, při kterém tisková hlava nanáší selektivně kapalně pojivo na tenký povlak částic prášku, což může být písek, keramika, kov nebo kompozit. Takto vrstvu po vrstvě vytvoří celistvý díl. Jakmile je celý díl vytvořen, musí projít tepelným vytvrzením. [21]
- Powder bed fusion – je AT fungující na principu energetického zdroje, který spojuje práškový materiál. Podavač nanese na plochu tenkou vrstvu materiálu a zdroj energie poté selektivně materiál spojí. Následně pracovní deska klesne, nanese se další vrstva materiálu, která se slinuje a postup se opakuje až do vytvoření výrobku. [22]
- Direct energy deposition – je metoda, která využívá soustředěný zdroj energie, jako je plazmový oblouk, laser nebo elektronový paprsek k roztavení materiálu, který je současně nanášen tryskou. AT umožňuje přidávat materiál na již existující výrobky, což je výhodné zejména při opravě poškozených součástí. [23]
- Sheet lamination – tato metoda spočívá ve vyřezávání vrstev materiálu laserem a jeho postupném nalepování na sebe vrstvu po vrstvě. Každá nová vrstva se přitlačí vyhřívaným válcem a dojde ke slepení vrstev. Nosná deska se poté sníží a proces se opakuje až do finální podoby výrobku. Vlastnosti výrobku jsou podobné dřevu a jeho pevnost je závislá na směru namáhání vláken, podobně jako u dřeva. [24]

Ještě můžeme AT rozdělit podle materiálu na vstupu na materiál na práškové bázi (Direct Metal Laser Sintering nebo Selective Laser Sintering), materiál na pevné bázi (Fused Deposition Modeling nebo Laminated Object Modeling) a na materiál na bázi fotopolymery (Stereolitografie nebo Multi Jet Printing). [15; 16]

3.2 Fused deposition modeling (FDM)

FDM patří do skupiny AT, jehož hlavní charakteristikou je vytlačování materiálu z trysky. Vstupní materiál, označovaný nejčastěji jako struna, je na začátku postupu v pevném stavu navinut v zásobníku v podobě cívky. Tento materiál je poté pomocí podavače přes kladky odvíjen do tiskové hlavy, ve které je zahříván na teplotu tisku. Každý materiál má svou specifickou teplotu pro tisk, ale všechny mají jedno společné a to, že materiál musí být zahřátý nad teplotu skelného přechodu. [18]

To je malé rozmezí teplot, v níž je vytlačovaný materiál měkký, ohebný a kaučukovitý oproti jeho tuhé, tvrdé a sklovité povaze za pokojové teploty. Při této teplotě je tedy materiál nanášen na pracovní plochu. Nejčastěji se nejdříve vytisknou okraje plochy jednotlivé vrstvy výrobku, která je teprve následně vyplněna. Toho je dosaženo pomocí kombinací pohybů v osách X a Y tiskové hlavy s tryskou. Po vytisknutí každé vrstvy dochází k posunutí trysky v ose Z o tloušťku vrstvy. Celý proces se opakuje až do vytvoření finální podoby výrobku. [18; 25]



Obr. 9 Schématický obrázek metody FDM [26]

Při tisku výrobků, které mají určité části převísle, je nutno použít tzv. podpor. Podpory obecně u 3D tisku jsou vyplňující materiály, které se tisknou souběžně s výrobkem a mají za úkol podírat převísle části výrobku. Podle konstrukce tiskárny jsou podpory tištěny buď ze stejného materiálu lišící se svou strukturou, kdy po dokončení procesu tisku je potřeba je mechanicky odstranit, nebo z jiného materiálu, který je možno rozpustit v chemikálii. [18]

Vlastnosti výrobku nezávisí pouze na použitém materiálu. Jeho konečné vlastnosti a doba tisku jsou rovněž ovlivněny různými parametry tisku, které je třeba pečlivě nastavit. Mezi hlavní parametry tisku se řadí výška vrstvy, průměr a teplota trysky a také tvar výplně. [15]

Materiály vhodné pro výrobu trvalých modelů musí mít dostatečnou pevnost a ořezavost, což z nejběžněji používaných materiálů vykazují právě ABS, PLA a PET. Právě tyto vlastnosti pak také zajišťují vyšší trvanlivost modelu. Pro ještě lepší vlastnosti materiálu se využívá různých modifikací. Do PET se přidává glykolem (PET-G) pro zvýšení pevnosti. Do PLA se přidávají příměsi bronzu nebo uhlíkových vláken. [15; 16; 18]

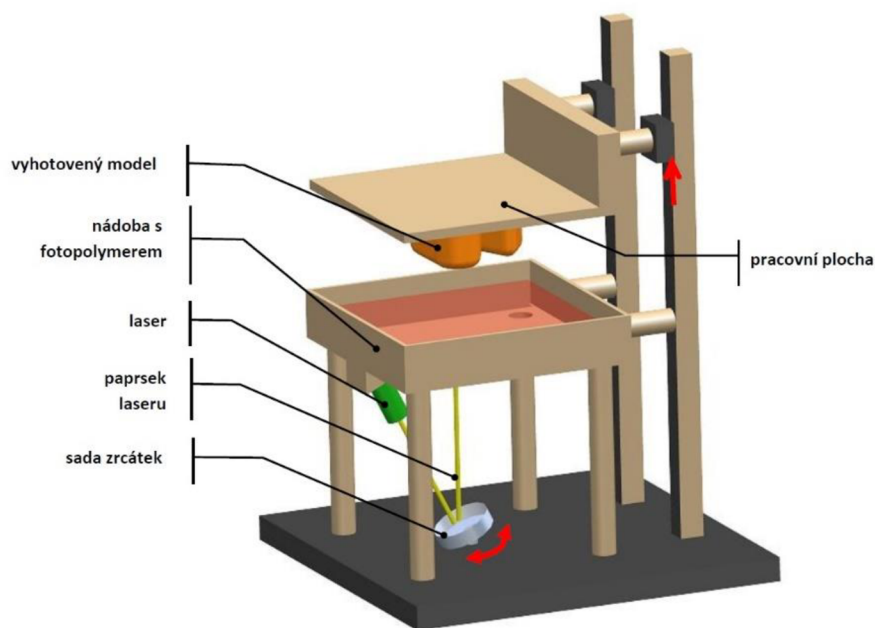
PLA se využívá také jako materiál pro výrobu spalitelných modelů, které nezpůsobují po spálení velké vady v odlitcích, jelikož zanechávají minimální množství popelu ve formě. Ještě vhodnější variantou materiálu je ale PolyCast od společnosti Polymaker. Tento materiál byl vyvinut speciálně pro lití do skořepinových forem, jelikož po spálení zanechává méně jak 0,003% popelu ze své původní váhy a lze ho tisknout skoro na všech tiskárnách typu FDM. Jeho další výhodou je také jednoduché vyhlazení povrchu pomocí běžně dostupných alkoholů (Izoprophylalkohol (IPA) nebo ethanol). Výrobek stačí na pár sekund ponořit do alkoholu a ten vyhladí typické vrstvy po tisku. Jeho hlavní nevýhodou je zhruba 3x větší cena v porovnání s filamentem ABS. [16; 27; 28; 29]

Vytavitelnou variantou modelů je materiál MoldLay od společnosti LAY-Filaments. Tento plastový materiál speciálně vytvořený za účelem výroby modelů ve slévárenství má vlastnosti podobné vosku, jelikož obsahuje speciální parafinové oleje. Má vysokou rozměrovou stabilitu, což je jedna z nejžádanějších vlastností při výrobě skořepinových forem. Jeho hlavní nevýhodou je cca 4x větší cena oproti filamentu ABS stejných parametrů. [29; 30]

Hlavními výhodami FDM je široké množství různých typů materiálů pro tisk, čistý výrobní proces s možností tisku i v kancelářských prostorách, vznik minima odpadu při tisku tvořeného největší částí z podpor a v dnešní době i cenová dostupnost tiskáren. Naopak nevýhodou FDM je nižší kvalita výtisku limitována přesností detailů daných výškou pokládané vrstvy a ve většině případů i nutnost úpravy povrchu pro dosažení určité kvality povrchu. [18]

3.3 Stereolitografie (SLA)

Vytváření objektů pomocí SLA funguje na principu, že deska pracovní plochy je ponořena v náplni tekutého fotopolymeru, který je citlivý na UV záření. Laserovým paprskem zde dochází k vytvrzování vrstvy fotopolymeru, který je dán plochou jedné vrstvy řezu. Tento paprsek se pohybuje v osách X a Y. Po vytvrzení dojde k posunu (v ose Z) pracovní plochy o tloušťku jedné vrstvy a proces se opakuje až do vytvoření celého výrobku. Tloušťka vrstvy se běžně pohybuje kolem hodnoty 0,01 mm. Pokud je na výrobku převislá část, tiskárna automaticky pod ni postaví podpory. Rozlišujeme dva typy strojů. Ten první pracuje na principu, kdy je pracovní plocha osvětlována zespodu. Po osvětlení se pracovní plocha postupně pohybuje po jednotlivých vrstvách směrem vzhůru (viz obr. 10). Druhý funguje přesně opačným způsobem. Po osvětlení vrstvy shora se pracovní deska posune o tloušťku jedné vrstvy níže. Součásti vytvořené pomocí SLA mají velice kvalitní povrch. [15; 26]



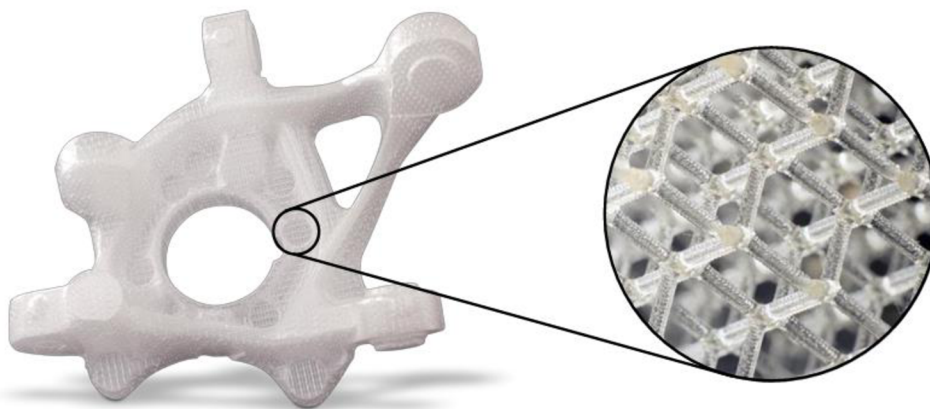
Obr. 10 Schématický obrázek metody SLA [26]

Hlavními materiály používanými pro SLA jsou akryláty, epoxidy a plněné pryskyřice. Akryláty jsou materiály staršího typu, které byly používány na počátcích vzniku této technologie. Tyto materiály mají velké hodnoty smrštění a menší přesnost než dnešní více používané epoxidy, které oproti akrylátům disponují naopak větší přesností a menším smrštěním. Mezi další používané materiály se také řadí plněné pryskyřice, které jsou vhodnější na více namáhané součásti. Tyto pryskyřice mohou být plněny organickými materiály, keramikou nebo kovy a také se snadněji spékají. [15; 16]

Jelikož SLA disponuje nejmenší tloušťkou vrstvy až 0,01 mm, jedná se o velice přesnou metodu výroby, čehož se využívá v uměleckém odvětví slévárenství. Výroba šperků je toho dobrým příkladem. Tyto tiskárny využívají materiály přímo určené na toto použití. Společnost Formlabs vyvinula pryskyřici Castable Wax 40 s obsahem 40 % vosku, čehož se využívá pro vytvoření vytavitelného modelu s minimálním množstvím zbylého odpadu ve formě. [31]

Podobné vlastností jako skořepinové formy má materiál Castalite od společnosti Tethon 3D. Tento materiál je pryskyřice plněná keramickými částicemi. Takto vytvořená forma se vytvrzuje v peci, přičemž na konci vytvrzovacího procesu se smrštění formy pohybuje mezi 13 % až 17 %, podle nastavení pece nebo geometrie formy. [32]

Mezi technologie spalitelného modelu se řadí QuickCast od společnosti 3D Systems. Ta vytvořila proces, který plně nahrazuje formy využívající voskový model. Zde se jedná o pryskyřicový model, který díky algoritmu dodávanému k softwaru převádí CAD model na model pro tiskárnu. Tento model má skořepinovou strukturu s vnitřními podporami, které drží vnější plochy pohromadě (viz obr. 11). Tímto způsobem tisku se snižují náklady jak na tištěný materiál, tak i na výrobní časy. Menším objemem spotřebovaného materiálu je i rychlejší proces vypalování při vytvrzování formy. Díky vnitřní struktuře výplně dochází při spalování k borcení ploch modelu směrem do svého objemu, nikoliv do plochy formy (viz obr. 11). [33; 34]

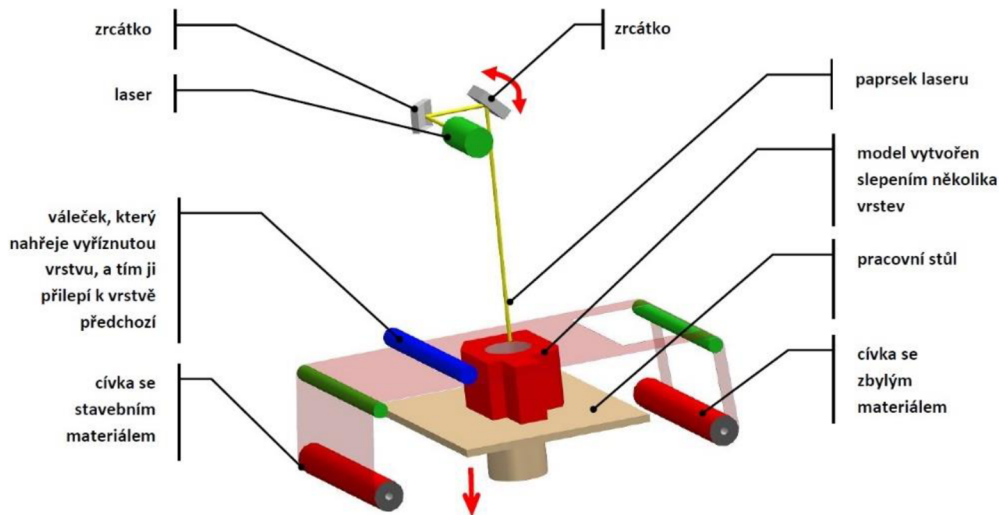


Obr. 11 Vnitřní struktura technologie Quickcast [15]

Hlavními výhodami SLA jsou tedy vysoké detaily a přesnosti výrobků, které jsou dány vlastnostmi vrstvy, vysoká pevnost výrobků po vytvrzení a nízké hodnoty drsnosti povrchu. Nevýhodou SLA je vyšší cena tiskárny a její náplně, nutné doladění povrchu výrobků pomocí nátěrů nebo vytvrzení a použití pouze fotocitlivých materiálů. [15; 16]

3.4 Laminated object manufacturing (LOM)

Technologie LOM funguje na principu lepení vrstev materiálu, který je navíjen z podávací cívky a je z obou stran pokryt lepidlem. Laser poté vyřeže požadovaný tvar, vyhřívaný válec přejede plochu, tepelně aktivuje lepidlo a dojde ke slepení vrstev. Výroba pomocí této metody nejprve začíná také rozdělením celkového objektu na vodorovné vrstvy. Vrstvy jsou jednotlivě nanášeny na nosnou desku, kde CO_2 laser řízený počítačem vyřeže kontury výrobku. Tento laser také rozdělí přebytečný materiál, který nebude součástí výrobku, na menší kusy ve šrafovacím vzoru pro jeho následné jednodušší odstranění po dokončení. Na takto vyřezané vrstvě je poté vyhřívaným válcem tepelně aktivovaná vrstva lepidla, která spojí nově vyřezanou vrstvu s tou předchozí do celistvého objektu. Po procesu tepelné aktivace lepidla dojde ke klesnutí nosné desky o tloušťku vrstvy, navine se nový list materiálu, laser opět vyřeže požadovanou konturu, vyhřívaný válec spojí vrstvy a proces se opakuje až do vytvoření celkového objektu (viz obr. 12). Výrobky z papírových listů jsou běžně natírány barvami nebo laky pro zabránění vniknutí vlhkosti ze vzduchu do výrobku. [5; 24]



Obr. 12 Schématický obrázek metody LOM [26]

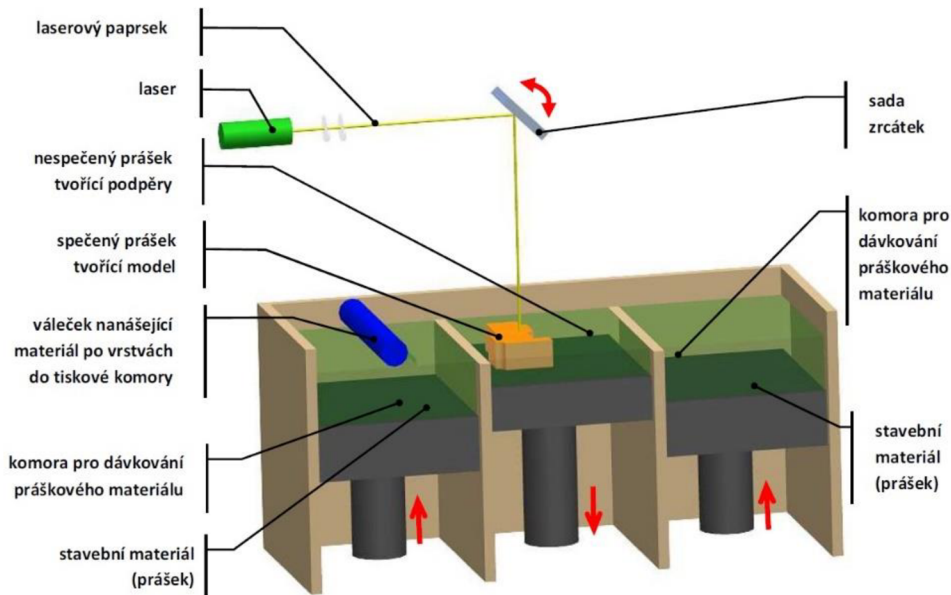
Modelová zařízení vytvořená pomocí metody LOM jsou další alternativou výroby dřevěných modelů a jaderníků v modelárnách. Hotové výrobky díky lepeným vrstvám materiálu mají podobné vlastnosti jako tradičněji používané dřevo. Ty jsou jako u dřeva dány orientací vláken, protože i zde záleží, jestli namáháním působíme po směru vláken nebo kolmo na ně. [35]

U metody přesného lití můžeme využívat papírových výrobků pro výrobu skořepinových forem s vypalitelným modelem, čehož je dosaženo díky malé roztažnosti papíru. Na druhou stranu je tato metoda horší v následném čištění skořepiny, kdy v ní zůstává oproti více konvenčním metodám vyšší procento zbylého popela, což je primárně zapříčiněno oboustrannou vrstvou lepidla na jednotlivých vrstvách materiálu. [16]

Pomocí metody lepení vrstev jsme schopni výroby i větších objektů (podle velikost zařízení) a zároveň není při výrobě potřeba uzavřené komory. Na druhou stranu při výrobě vzniká spousta odpadu ze zbylých částí plátu, nelze vytvářet objekty s částečnou výplní a také tato metoda produkuje kouř a škodlivé výpary. [16; 26]

3.5 Selective laser sintering (SLS)

Objekty vyrobené pomocí SLS jsou na principu řízeného CO_2 laseru, který slinuje (spéká) prášek materiálu po tence kladených vrstvách až do vzniku celkové podoby objektu. To probíhá atmosféře inertního plynu. Slinování materiálu je proces, který spojuje práškové materiály dohromady za účelem vytvoření jednoho homogenního celku. Výroba tedy začíná tak, že válec nanese souvislou vrstvu materiálu na pracovní plochu. Nanášený materiál je uložen v zásobníku vedle pracovní plochy. Poté počítačem řízený CO_2 laser nataví požadovanou plochu právě vyráběné vrstvy a tím dojde ke spojení materiálu (viz obr. 13). Důležitým parametrem při slinování je intenzita laseru, který musí spojit pouze materiál uvnitř vyráběné plochy, ne mimo ni, jelikož okolní materiál je po celou dobu výroby stále přítomen v okolí spékávané plochy a plní funkci podpor jednotlivých vrstev. Po vyhotovení jednotlivé vrstvy pracovní plocha klesne o tloušťku jedné vrstvy, válec pro dopravu prášku nanese novou vrstvu materiálu a laser opět slinuje požadovanou plochu právě vyráběné vrstvy (viz obr. 13). Tento průběh se opakuje až do vytvoření celkového objektu. [36]



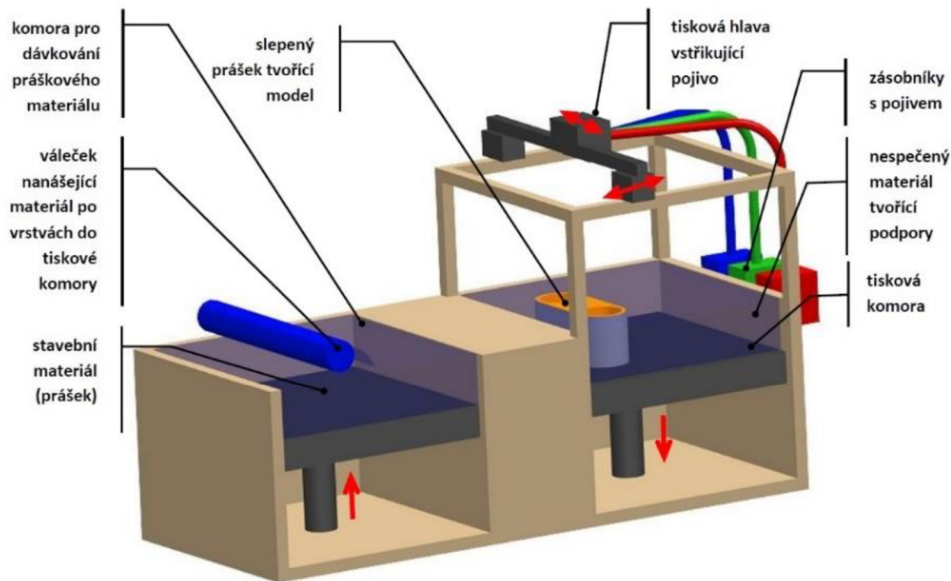
Obr. 13 Schématický obrázek metody SLS [26]

Tímto procesem lze vyrábět netrvalé modely pro metodu přesného lití. Pro tyto účely se používá materiál polystyren (PS) nebo High Impact polystyrene (HIPS). HIPS je v podstatě PS s přidaným kaučukem. Tento materiál má oproti ABS lepší mechanické vlastnosti, lepší rozměrovou stálost a nižší hustotu a z toho plynoucí nižší váhu. Již výše zmíněná firma 3D Systems vyvinula také materiál CastForm založený na PS, navržený speciálně pro tvorbu vytavitelných modelů. Po celkové výrobě modelů z CastForm je nutná aplikace vosku, který zacelí dutiny, čímž se zvýší pevnost a kvalita povrchu modelu. [37; 38; 39]

Hlavní výhodou SLS jsou podpory, které se vytvářejí automaticky. Tento okolní materiál použitý jako podpora se poté použije na opětovnou výrobu. U tohoto typu AT lze použít jakýchkoliv práškových materiálů, které lze roztavit, kdy je výroba omezena pouze výkonem laseru. Na druhou stranu nevýhodou této metody je horší kvalita povrchu, kdy i přes sebestřednější nastavení laseru dochází k natavení okolního materiálu a je nutno ho očistit. Také se nejedná o nejlevnější metodu výroby, jelikož laser spotřebuje velké množství energie a cena takového zařízení je také vyšší. [15; 36]

3.6 Binder Jetting (BJ)

BJ pracuje na velice podobném principu jako SLS jen s tím rozdílem, že u BJ je namísto CO_2 laseru tisková hlava, která jednotlivé vrstvy spojuje kapkami aktivátoru. Na začátku procesu je opět CAD model, který se rozdělí na jednotlivé vrstvy v systému stroje. Na pracovní plochu je pomocí válce pro dopravu prášku nanášena tenká vrstva materiálu (ostřiva a pojiva). Tisková hlava poté na plochu právě vyráběné vrstvy začne nanášet kapky aktivátoru, který v reakci s materiálem vrstvy vytvrdí v požadovanou plochu. Průměr jednotlivých kapek se pohybuje okolo 80 mikrometrů. Přebytečný materiál okolo vytvrzené plochy opět slouží jako přirozená podpora. Takto vytvořená jedna vrstva poté na konci procesu s pracovní plochou klesne o tloušťku jedné vrstvy, válec pro dopravu prášku znova nanese tenkou vrstvu materiálu, který je opět vytvrzen aktivátorem z tiskové hlavy až do vzniku finální podoby výrobku (viz obr. 14). Přebytečný materiál je na konci procesu odstraněn a v některých případech může být znovu použit. [21]



Obr. 14 Schématický obrázek metody BJ [26]

Mezi hlavní výhody této metody se řadí rozmanité možnosti při volbě použitých materiálů směsí ostřiv a pojiv. Materiály ostřiv se dělí na písky, kovy, keramiky a polymery, kdy jedny z nejpoužívanějších jsou převážně křemenné písky nebo synteticky spěkaný Cerabeads. Tento materiál na bázi mulitu (porcelanitu) má nízkou tepelnou roztažnost a vysokou tepelnou absorpci, což ho řadí mezi materiály vhodné pro výrobu jader s vysokou pevností a žáruvzdorností. [21; 40]

Organická pojiva využívaná při míchání směsi jsou tekuté furanové nebo fenolové pryskyřice. Nevýhodou těchto pojiv je ale složitá následná regenerace směsi, která se používá převážně pro výrobu forem pro odlévání slitin železa, slitin hliníku nebo slitin mědi. Anorganická pojiva jsou na bázi prášku vodního skla, které je aktivováno tekutinou skládající se převážně z vody, což má za výhodu jednodušší regeneraci směsi a nulový obsah toxických látek. Nevýhodou těchto pojiv je nutnost skladování v suchém prostředí, protože směs může vstřebat vlhkost z okolního vzduchu. [16]

Tato metoda AT se uplatňuje při výrobě modelů, jader a zejména pískových forem. Mezi významné společnosti patří německá firma VoxelJet, která se svou největší tiskárnou Voxeljet VX 4000 disponuje tiskovým prostorem 4000 x 2000 x 1000 mm. Tyto tiskárny používají buď běžný křemenný písek nebo Polymethylmethakrylát (PMMA), který je dalším příkladem materiálu na výrobu spalitelných modelů pro odlévání metodou přesného lití. U takto vytvořených modelů je vhodná úprava povrchu namočením do roztaveného vosku pro dokonale hladký povrch. [41]

Hlavními výhodami BJ, jak bylo výše zmíněno, jsou tedy široká škála materiálů a pojiv bez nutnosti stavění podpor a možnost recyklace některých druhů směsí. Nevýhodou je vyšší cena zařízení a nutnost tepelného vytvrzení forem pro jejich vyšší pevnost. [26]

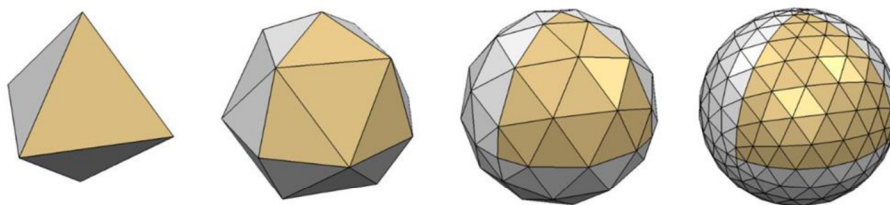
4 3D SKENOVÁNÍ

Informace v kapitole 4 a jejich podkapitolách jsou převzaty z [42], pokud není uvedeno jinak.

V posledních letech dochází k rapidnímu rozvoji v oblasti 3D skenerů. Tato zařízení dosahují stále vyšších úrovní přesnosti a využívaný software je stále sofistikovanější. Tento pokrok vede k běžnému využívání 3D skenování nejen pro kontrolu rozměrů výrobků, ale také se stal nedílnou součástí procesu reverzního inženýrství. Tímto způsobem se otevírají nové možnosti umožňující provádět práce, které byly dříve náročné a zdlouhavé. 3D skenování přináší konstruktérům značnou časovou úsporu při tvorbě technické dokumentace získáním digitálního modelu s reálnými rozměry, zejména při složitějších tvarech součástí, které mohou sloužit jako vstup pro 3D tisk.

4.1 Popis skenování

Výsledkem 3D skenování je mračno bodů, kde každý bod má v sobě informaci o své poloze v prostoru. Toto mračno bodů tedy zachycuje podobu skenovaného objektu. Data je poté nutné konvertovat do CAD formátu pro další zpracování, nejčastěji pomocí aproximace na polygonovou síť tvořenou trojúhelníky, která umožňuje vytvoření povrchového tělesa (viz obr. 15). Kvalita povrchu součásti je přímo úměrná počtu trojúhelníků použitých pro popis povrchu, kdy s rostoucím počtem trojúhelníků stoupá i velikost výsledného datového souboru. [15]



Obr. 15 Počet trojúhelníků dle složitosti aproximace [16]

4.2 Metody skenování

Zařízení na principu dotykového snímání informace pracují tak, že měřicí sonda na konci ramene se dotýká povrchu výrobku a tím zároveň zaznamenává polohu těchto bodů. Tyto sondy mohou být ovládané pomocí joysticku nebo automatickým režimem oměření výrobku. Na konci sondy je umístěna kulička vyrobená z tvrdého materiálu. Tvrdost zajišťuje zachování tvaru kuličky a její vysokou trvanlivost. Nejčastěji je konec sondy vyroben z diamantu nebo rubínu (viz obr. 16). Touto metodou je možnost přesného měření sklonu mezi jednotlivými plochami např. u ohýbaných výrobků. [16]

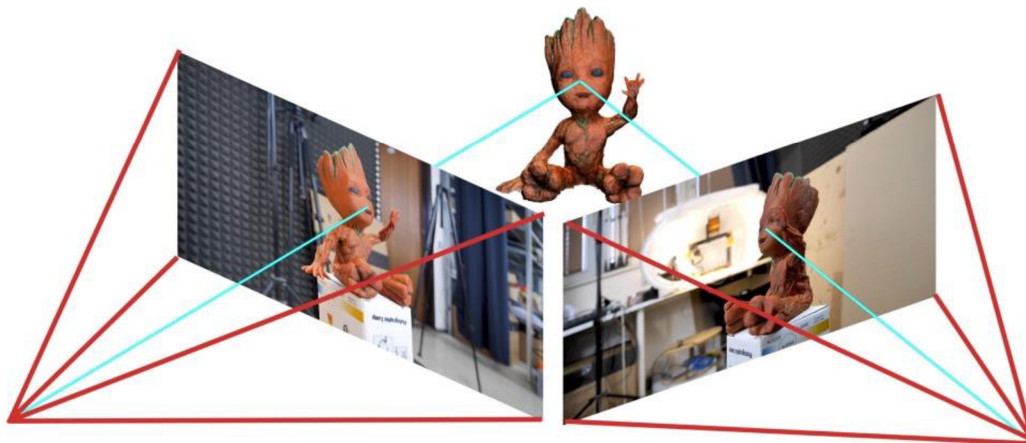


Obr. 16 Dotyková měřicí sonda [43]

Princip bezdotykových 3D skenerů se strukturovaným světlem a laserovou triangulací je velmi podobný tomu, kdy skener promítá světlo na povrch snímaného objektu a kamera skeneru zaznamenává, jak je paprsek promítaného světla deformován, když se odráží od snímaného povrchu. Rozdíl je v tom, že skenery se strukturovaným světlem vysílají paprsky bílého nebo modrého světla, které tvoří mřížku, a laserové triangulační skenery vyzařují jednoduché čáry. Použití těchto technologií se osvědčuje zejména při skenování relativně malých objektů v řádu několika milimetrů až jednotek metrů, přičemž vzniklý model bude vysoce přesný a věrný originálu.

Při největším rozměru objektu přesahující několik desítek metrů, je vhodnější zvolit 3D skener založený na měření doby letu paprsku, nazývané také pulzní laserová technologie 3D skenování. Takto fungující skenery lze použít pro skenování objektů ve vzdálenosti od skeneru až v řádech stovek metrů.

Poslední skupinou jsou 3D skenery využívající principu fotogrammetrie, což je metoda založená na principu podobném lidskému zraku. Tato technologie umožňuje rekonstrukci reálných objektů ve 3D prostoru a měření jejich rozměrů ze série snímků, které jsou pořizovány pod různými úhly. (viz obr. 17) Na tyto snímky není potřeba speciálního skeneru, ale běžného digitálního fotoaparátu nebo mobilního zařízení s kvalitnějším fotočipem. Software následně zpracuje tyto snímky a provede rekonstrukci objektu. Každá fotografie se musí částečně překrývat s tou předchozí, aby byl software schopen se zorientovat, spojit informace dohromady a vytvořit 3D objekt.



Obr. 17 Princip fotogrammetrie [44]

Hlavními výhodami 3D skenerů je vysoká přesnost a rychlost získání dat, které jsou použitelné v různých odvětvích. Mezi další výhodou patří jednoduchá obsluha některých skenerů. Nevýhodami mohou být finanční náročnost na pořízení skeneru, citlivost na okolní světlo a prostředí při snímání, při složitějších rekonstrukcích objektů velikost datových souborů a případná úprava dat.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST VÝROBY ODLITKU

5.1 Postup výroby repliky krytu přepínače

5.1.1 Geometrie modelu

Prvním krokem bylo zhotovení podkladu, podle kterého by se vytvořil 3D model vhodný pro tisk 3D tiskárnou. Jelikož se jedná o odlitek, který je v dnešní době padesát a více let starý, tak získání původní výkresové dokumentace je věc nemožná, protože ČZ Strakonice v dnešní době pracuje v motocyklovém odvětví pouze ve velice omezené míře. Proto tedy zde byla prvotní idea vytvořit vlastní výkresovou dokumentaci prostým odměřením za využití posuvného měřidla a rádiusových měrek, skrze které by se poté vytvořil 3D model v programu Inventor. Takto vytvořený model by se poté porovnal s 3D skenem původního krytu přepínače a upravily by se případné odchylky.

Získání rozměrů pomocí posuvného měřidla nebylo obtížné. Problém nastal až při měření rádiusovými měrkami. Při měření s nimi bylo zjištěno, že není k dispozici dostatečné spektrum měrek pro měření některých zaoblení, protože některé tvary jsou kombinací až tří různých rádiusů. Proto od této metody bylo upuštěno, jelikož získání přesných hodnot rádiusů bylo problematické. Byly využity pouze rozměrové hodnoty uložení mechanismu přepínače směrových světél, který se vkládá do krytu přepínače.

5.1.2 Skenování modelu a úprava jeho geometrie

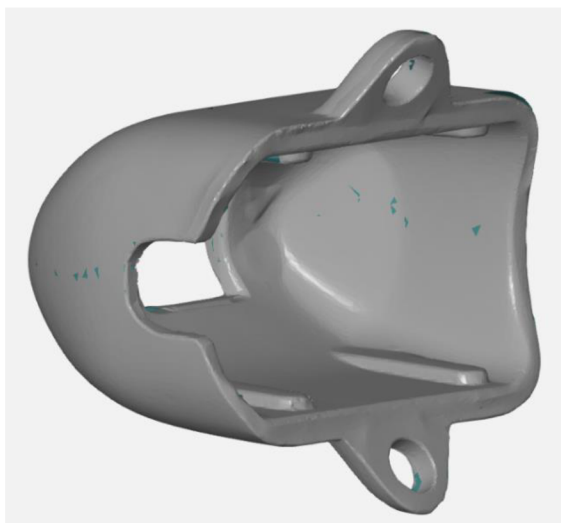
Proto dalším krokem bylo získání 3D skenu fyzického krytu přepínače. Ten se vytvářel ve školních prostorách. Bylo použito skeneru od společnosti Atos, který je na vysoké úrovni přesnosti a pro toto použití vytvořil dostatečně přesné výsledky. Protože se skenoval objekt velmi malých rozměrů (největší rozměr krytu je 43 mm), nebylo nutno použití referenčních bodů, které by v tomto použití byly spíše na škodu. Na kryt se pouze nanasla tenká vrstva křídý ze spreje znemožňující nechtěné odrazení světla od povrchu.

Při skenování bylo zaznamenáno mračno bodů spojených následně pomocí softwaru dodávaného ke skeneru na 3D model s definovaným povrchem. Kvůli malým rozměrům krytu nebylo možno naskenovat vnitřní a vnější povrch dohromady, proto vznikly dva skeny, kdy jeden nasnímal převážně vnitřní povrch a druhý převážně ten vnější. Oba skeny měly i část nasnímaného opačného povrchu. Této skutečnosti bylo využito při následném spojení obou skenů do jednoho za účelem vytvoření jednotného skenu s jasně definovanými povrchy a rozměry v programu Meshmixer. Takto vytvořený sken byl uložen ve formátu *.STL*, který je nutný pro umožnění dalších operací se skenem.

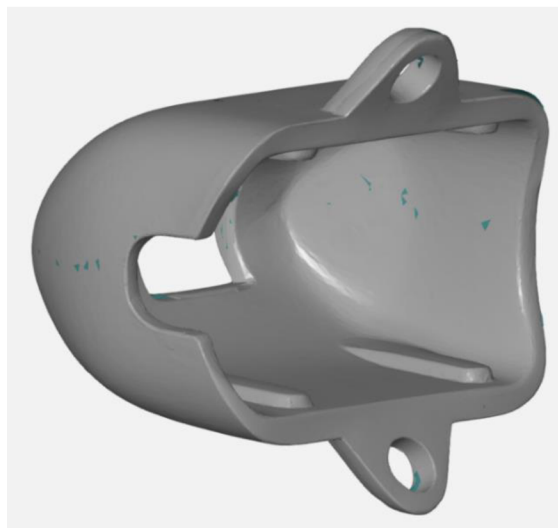
Dalším procesem byla úprava povrchu skenu, kdy bylo nutné odstranit nedostatky vzniklé při skenování (viz. Obr. 19). Tyto vady v povrchové síti se upravovaly v programu GOM-Inspect 2018, což je program určený k prohlížení 3D skenů a jejich různým úpravám a srovnávání. V tomto případě bylo nutné opravit otvory v módu úprava sítě, které vznikly při skenování, pomocí příkazu *Close holes interactively*, jež je schopen zacelit otvory při určitém nastavení jemnosti výsledku výplně a počtu přilehlých ploch. V tomto kroku byl kladen důraz na vytvoření co nejpřesnější geometrie podobající se originálnímu dílu. Bylo zde nutné počítat se skutečností, že takto definovaný povrch spojený ze dvou skenů nedovoloval kompletní zacelení všech otvorů (viz obr. 18 a 19). V tomto případě to ale nebylo překážkou.

Následujícím krokem bylo odstranění výstupků a zjemnění celkového povrchu skenu. Toho bylo dosaženo pomocí příkazu *Smooth mesh*, ve kterém se nastavovaly parametry filtrovaných rádiusů a detailů ostrosti vyhlazení. Tento postup byl proveden vícekrát pro dokonalé zjemnění povrchu, tak aby se blížil originálu (viz obr. 19).

Původně nebyl sken vyrovnán do souřadného systému, což by mohlo ztížit modelování objemového tělesa. Přepnutím do režimu *inspection* byl tento sken vyrovnán do souřadného systému vhodnějšího pro následné zpracování v Inventoru. Po vyrovnání a ustavení do nulového bodu byl tento sken opět vyexportován ve formátu *.STL*.



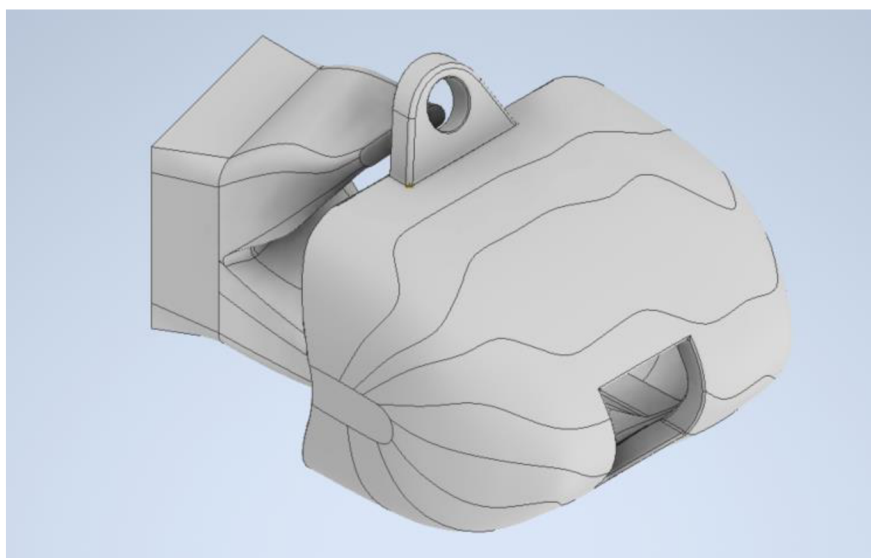
Obr. 18 Geometrie před úpravou povrchu



Obr. 19 Geometrie po úpravě povrchu

5.1.3 Objemový model

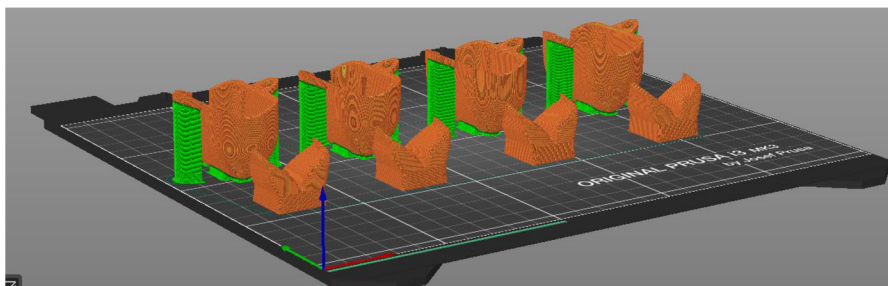
Takto vhodně upravený sken byl vložen do programu Inventor Professional 2024 a obkreslen pomocí deseti na sebe rovnoběžných řezů. Jednotlivými řezy byl zhotoven celý vnější povrch, který byl následně spojen pomocí příkazu *šablonování*, čímž bylo vytvořeno první objemové těleso. To bylo zopakováno pro vnitřní povrch, čímž se vytvořilo první geometrické zobrazení přepínače. Výřez pro kabely, ouška a uložení vnitřního mechanismu přepínače byly z předtím změřených údajů vytvořeny pomocí příkazu *vysunutí*. Všechny hrany byly zaobleny pomocí příkazu *zaoblení hran*. Pomocí stejných příkazů se domodeloval vtok, kterým se model bude připojovat na vtokový kůl. Vtok se připojuje k modelu pod úhlem, pro následné lepší vytékání břečky z vnitřku přepínače. Tímto byl model připraven pro tisk na tiskárně (viz obr. 20).



Obr. 20 Objemový model soustavy přepínače a vtoku v programu Inventor

5.1.4 3D tisk

Tisk modelu přepínače byl realizován v prostorách školy technologií FDM tisku. Tento typ tiskárny je jedním z nejběžnějších, jelikož je cenově dostupný a je schopen tisku mnoha různých materiálů. Pro tisk byl zvolen materiál PolyCast, který je přímo určený na výrobu spalitelných modelů pro metodu přesného lití. Orientace geometrie přepínače byla zvolena tak, aby podpory byly tisknuty z vnější části přepínače. (viz obr. 21) To usnadní následné odstranění podpor a retušování vnějšího povrchu. Kdyby se modely tiskly obráceně, podpory by se dostávaly z vnitřních částí složitým způsobem a vnitřní povrch by měl horší kvalitu. Tyto nepřesnosti by mohly způsobit vadné rozměry v uložení mechanismu přepínače.



Obr. 21 Modely s podporami v programu PrusaSlicer

Tloušťka vrstvy byla nastavena na 0,2 mm. Tryska měla průměr 1,75 mm a její teplota byla 210 °C. Doba tisku všech 4 variant i s vtokem trvala 7 hodin a 7 minut při použití 46,11 g materiálu, který celkově stál 90 Kč. [28]

Po jeho vytištění byly z modelu ručně odstraněny podpory. Zde byly také nalezeny chyby, které vznikly při modelování objemového tělesa v Inventoru. Ty vznikly při *šablonování* vnějšího povrchu tělesa. V následném kroku byl povrch materiálu upraven smirkovým papírem a pomocí modelářského vosku byly vyhlazeny nedostatky vzniklé při tisku.

Byly vytištěny 4 varianty modelů lišící se ve velikosti smrštění a to bylo zvoleno 0.5 %, 1 %, 1.5 % a 2 %. Každá varianta smrštění byla označena unikátním poznávacím znakem na vtok pro jednoznačné rozlišení po odlití (viz obr. 22). Tyto varianty smrštění byly zvoleny pro ověření skutečného smrštění odlitku. Slitiny hliníku mají běžně hodnoty smrštění až 2 %. Keramická forma je ale velmi pevná a neumožňuje obvykle tak velké hodnoty smrštění. Proto byly zvoleny i varianty s menším smrštěním.



Obr. 22 Modely lišící se o hodnotu smrštění

5.1.5 Sestavení stromečku

Následně se přešlo k samotnému sestavení stromečku. Nejdříve se tedy modely s opraveným povrchem spojily kyanoakrylátovým (sekundovým) lepidlem k vytištěným vtokům, kde bylo nutno přechody zaretušovat modelářským voskem. Při vynechání tohoto kroku by mohlo dojít k proniknutí materiálu při výrobě skořepiny do případné dutiny, což by znamenalo špatné plnění formy a následné nechtěné vady.

Takto spojená soustava modelu a vtoku byla připojena ke vtokovému kůlu natavením voskového kůlu ruční traťopájkou a přimáčknutím soustavy na roztavený materiál kůlu. Přechody byly opět zaretušovány modelářským voskem. Na takto vytvořenou soustavu modelu, vtoku a vtokového kůlu bylo ještě nutno dodělat odvodušňovací soustavu, která při plnění formy bude odvádět vzduch z formy (viz obr. 23). Ta byla vytvořena pomocí zahnuté tyčinky modelářského vosku připojenou na nejvyšší bod modelu krytu přepínače a vtokový kůl. Zahnutí zabraňuje tekutému kovu plnění přes tuto odvodušňovací soustavu a pouze jím odvádí vzduch při počáteční fázi plnění tekutým kovem.



Obr. 23 Sestavený stromeček

5.1.6 Výroba skořepiny

Následným krokem byla samotná výroba skořepiny, která probíhala na zařízení Cyclone v prostorách školní slévárny. Celá vytvořená soustava se přišroubovala na ruční manipulátor a namočila se do suspenze skládající se z plniva SiO_2 (křemenné sklo) a pojiva PrimeCote, která je pro tvorbu první vrstvy hustší. Namáčení probíhalo tak, že se celá soustava ponořila pod hladinu břechky na 10 sekund. Potom se stromeček vytáhnul nad hladinu a nechal se z něj vytéct všechen přebytečný materiál. Dalším krokem byla stálá rotace pod zhruba 45° vzhledem k hladině za účelem zrovnoměrnění vrstvy suspenze na stromečku (viz obr. 24).



Obr. 24 Namáčení stromečku v suspenzi

Takto namočený stromeček se posypával ručně zirkonovým ostřivem. Jelikož je tento materiál nejjemnější, vytváří přesnější tvary a zaručuje vysokou kvalitu povrchu skořepinové formy (viz obr. 25). Takto zhotovená vrstva se poté nechala minimálně 8 hodin sušit na vzduchu o teplotě 20 °C za použití ventilátorů pro urychlení procesu sušení. Druhá vrstva byla vytvořena obdobně, ovšem břečka měla tekutější konzistenci a na druhou vrstvu ostřiva byl použit Mullit o zrnitosti 50/80. Na stromečku bylo poté ještě zhotoveno 6 dalších vrstev ovšem za použití Molochitu o zrnitosti 16/30 (viz obr. 26). Tyto další vrstvy mohou být tvořeny tímto hrubším materiálem, jelikož už nevyžadují přesné kopírování tvaru modelu, který se primárně tvoří při první vrstvě. Hrubší materiál má také lepší prodyšnost.



Obr. 25 První vrstva skořepiny



Obr. 26 Kompletně hotová skořepina

5.1.7 Vytavování modelů a žihání skořepiny

Tavba modelu také probíhala v prostorách školní slévárny v peci od firmy LAC. V této peci byla nastavena teplota na 650 °C, při níž došlo k vytavení voskového stromečku a spálení modelu z PolyCastu. Tekutý vosk se zachycoval do připravené nádoby pod pecí. Tento vosk je možno poté znovu používat na výrobu dalších stromečků. V té samé peci probíhalo také samotné žihání skořepiny po dobu cca 30 minut při teplotě 800 °C pro co nejdokonalější spálení popelovin. Poté se skořepina vyjmula a nechala zchladnout (viz obr. 27).



Obr. 27 Skořepina po procesu žihání

Před samotným odléváním se forma opět musela předeřhát na 550 °C pro lepší zabíhavost taveniny a snížení tepelného šoku. Zvolený materiál AlSi10CuMn se roztavil v odporové peci na lící teplotu 730 °C a následně se nalil do předeřháté formy, která byla usazená na pískovém loži, a pouze se přidržovala tak, aby se nepřevrhla při lití. Po lití se nechala tavenina ve formě ztuhnout a zchladnout.

5.1.8 Apretace odlitků

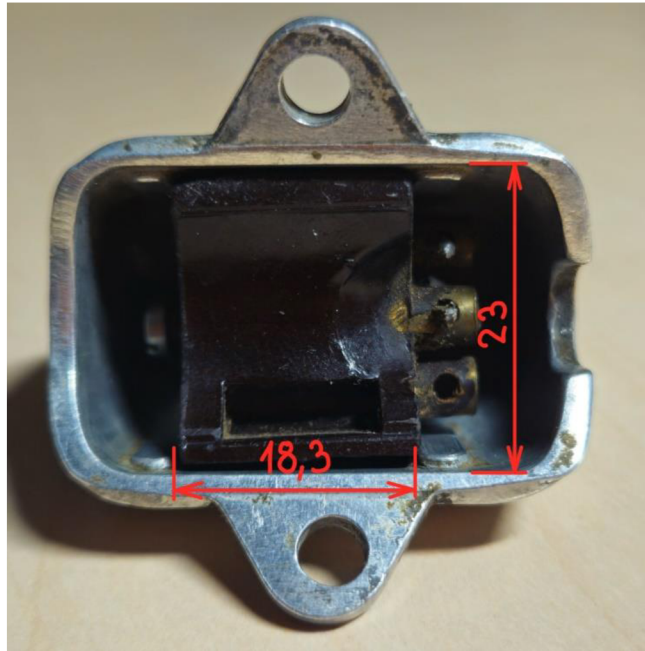
Navazujícím krokem byla apretace odlitků. Forma se musela po malých částech v přístupných místech rozbít (viz obr. 28) a odlitky odřezat od vtokové a odvzdušňovací soustavy ruční pilou na kov. Vnitřní plochy se očistily od zbytků formy v pískovacím boxu. Následným krokem bylo začistění odlitků od odvzdušňovací a vtokové soustavy a jejich vyhodnocení.



Obr. 28 Částečně očištěný stromeček s odlitky

5.2 Zhodnocení výrobního experimentu

Po opískování a obroušení odlitků se do nich vsunul mechanismus přepínače a bylo zjištěno, že nejvhodnějším odlitkem je ten o hodnotě smrštění 0.5 %. Tento odlitek krytu přepínače měl dostatečnou vůli pro vsazení přepínače a při přiložení k protikusu bylo zjištěno, že mechanismus nevyčnívá z krytu přepínače. Ostatní přepínače byly také použitelné, ale mechanismus v nich měl až příliš velkou vůli. Měřením rozměrů uložení mechanismu ze tří vzorků původních přepínačů byla změřena průměrná šířka 18,3 mm a průměrná výška 23 mm (viz obr. 29).



Obr. 29 Přepínač s rozměry uložení mechanismu

Změřením přepínače s nejmenším procentem smrštění (0,5 %) byla zjištěna hodnota šířky 18,45 mm a výšky 23,3 mm. Měření ostatních přepínačů vykazovalo průměrný nárůst rozměrů šířky o 0,15 mm a výšky o 0,1 mm s každým zvětšením rozměrů daných podle procenta smrštění. Z těchto naměřených dat plyne, že při zachování rozměrů uložení lze tisknout přepínače o nulové hodnotě smrštění při zachování podmínky vsunutí mechanismu přepínače do jeho krytu.

Technologie přesného lití je známá svou vynikající přesností a vytvářením odlitků „téměř na hotovo“ („near-net-shape“). V tomto případě z hlediska kvality vnějšího povrchu se experiment nezdařil kvůli odloupení skořepiny, která poté vytvořila na povrchu prohlubně. Tyto přepínače mají vysoké nároky na vnější kvalitu povrchu a vyrobené odlitky popsané v této práci těchto kvalit nedosahovaly (viz obr. 30). Jsou zde určité náznaky, co mohlo způsobit odloupení materiálu, ale jejich opravdový důvod se nepodařilo zjistit.

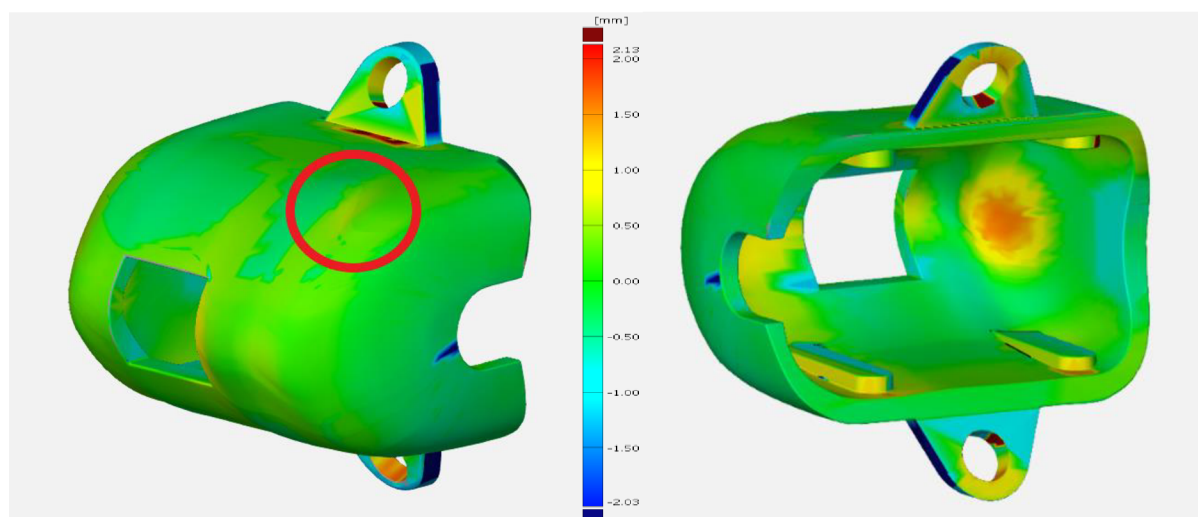


Obr. 30 Odlitky s vadným povrchem

První hypotézou je odloupení skořepiny z důvodu nezahlázení jednotlivých vrstev po tisku modelů z Polycastu, kdy tyto přechody mohly tvořit určité pnutí a tím poškodit skořepinu. Druhou možností je špatně namíchaná směs břčky, která se nemusela dokonale přichytit na povrch a poté se odloupnout. Další variantou je nedokonalé vysušení počátečních vrstev skořepiny, kdy tato voda uzavřená ve vrstvě skořepiny mohla určitým způsobem začít reagovat v průběhu vytavování vosku a odloupnout část první vrstvy skořepiny. Tento úlomek poté zůstal ve formě, rozbil se na menší kusy a způsobil vady v odlitku.

Upravením technologického postupu můžeme napomoci dosažení kvalitnějšího povrchu. Prvním krokem by mohlo být ponoření vytisknutého modelu do IPA nebo ethanolu pro dokonalé zahlázení stop vrstev po tisku na FDM tiskárně. Druhým krokem by mohlo být cílené vytvoření přídavného materiálu na vnější ploše přepínače se záměrem po odlití tento materiál lehce obrobít. Toho by mohlo být dosaženo pomocí ruční přímé brusky s následným vyleštěním nebo omíláním a vytvořit cíleně takto kvalitní povrch.

5.3 Porovnání geometrií



Obr. 31 Srovnání vnějšího a vnitřního povrchu původního skenu s objemovým modelem

Při retušování vytištěných modelů byla zjištěna vada na povrchu, která vznikla modelováním v programu Inventor. Proto zde bylo dodatečně přistoupeno ke srovnání skenu původního dílu a objemového tělesa z programu Inventor. Kryt přepínače je tvořen vnějším a vnitřním povrchem, kdy kvalitnějším povrchem musí být ten vnější, protože je zároveň pohledovým. Vnitřní povrch neplní pohledovou funkci, tudíž nezáleží na jeho kvalitě tolik jako na vnějším. Bylo zjištěno několik dalších nepřesností v geometrii, které ovšem na funkci nemají vliv (viz obr. 31). Vnitřní povrch pouze plní funkci uložení mechanismu přepínače, ve kterém je vsunut s minimální vůlí, čehož bylo dosaženo. Vnější povrch lze tedy srovnávat se skenem původního přepínače, kdy lze vidět průměrná odchylna pohybující se v rozsahu $-0,5$ až $+0,5$ mm (viz obr. 31). Tuto odchylnu nelze na replice rozeznat, tudíž je kvalita přesnosti vnějšího povrchu dostatečná.

Na vnějším povrchu vznikla při modelování v programu Inventor vada, která nebyla na první pohled v tomto programu znatelná a byla zjištěna až po vytištění modelů z 3D tiskárny (viz obr. 31). Je označena červeným kruhem a bylo ji nutno opravit modelářským voskem. Při vynechání tohoto kroku by výsledné odlitky měly na svém vnějším povrchu neopravitelnou vadu a byly by nepoužitelné. Dále byl zjištěn špatný úhel úchytných přepínače. Vyrobené repliky popsané v experimentu nedosedají správně na protikus. Pro další použití je tedy nutné opravit tyto chyby v programu Inventor.

5.4 Ekonomičnost výroby

Pro výrobu tohoto dílu lze zvolit několik různých přístupů, které se liší v závislosti na požadovaném množství a v nákladech na pořízení přípravků potřebných k výrobě.

5.4.1 Výroba 1 až 5 kusů

Zhotovení jednoho kusu je jeden z nejčastějších požadavků na výrobu pomocí RP. Pro tento postup je nutné získat elektronickou informaci o rozměrech součásti pomocí např. CAD modelu nebo 3D skenu převedeného na objemové těleso, a tento objekt posléze nechat zhotovit pomocí některé z popsaných metod RP. Nejvhodnějším kandidátem je technologie ze skupiny Powder bed fusion a v dnešní době i ze skupiny Binder jetting. Obě technologie jsou ekonomicky náročnější variantou, ale pro vytvoření malého množství výrobků jsou akceptovatelné. Výrobek po zhotovení těmito technologiemi je nutné ještě tepelně zpracovat pro jeho dokonalou soudržnost. Nevyhnutelností je také opracování vnějšího povrchu, jelikož obě technologie nevynikají vysokou kvalitou povrchu.

5.4.2 Výroba 5 až 20 kusů

Pro produkci 5 a více kusů se jeví jako nejvhodnější metoda přesného lití na spalitelný model, jehož postup je popsán v experimentální části práce. Výhodou je možnost tisku modelů na FDM tiskárně bez nutnosti výroby formy pro voskové modely. Z této skutečnosti plyne nevýhoda v časové náročnosti v podobě tisku modelů.

5.4.3 Výroba 20 až 100 kusů

Pro výrobu přesahující více jak 20 kusů je vhodné zaměnit tisk modelů na FDM tiskárně za investici do silikonové formy na voskové modely, která se pohybuje v řádu tisíců korun. V tomto případě je ještě nutné přičíst do celkových rozměrů výrobku i hodnotu dvojího smrštění matečného modelu pro výrobu silikonové formy. Technologie výroby odlitků je zde také pomocí metody přesného lití.

5.4.4 Výroba 100 až 10 000 kusů

Pro výrobu v tomto rozmezí je nejvhodnější vyrábět voskové modely vstřikováním do kovové formy, protože tato metoda dosahuje vyšší rychlosti produkce voskových modelů. Odlitky se zde také vyrábí pomocí metody přesného lití.

5.4.5 Výroba 10000 a více kusů

V tomto případě je nejvhodnější výroba kovové formy pro tlakové lití. Tento způsob výroby dosahuje nejlepší kvality povrchu a vyšší plnicí tlak odstraňuje problém se zatékáním tenkostěnných odlitků. Přepínače zhotovené pomocí této metody se začíšťují jen od vtokové soustavy, ostatní plochy se apretují jen minimálně. Při vyšší cílové hodnotě produkce je vhodné opatření kovové formy s chlazením pro ještě větší rychlost produkce.

ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na výrobu repliky krytu přepínače, který je nedostatkovým artiklem při renovacích motocyklů. Byla zde snaha o nalezení alternativní varianty získání tohoto přepínače, a to vyrobením jeho repliky pomocí reverzního inženýrství. Počátečním krokem bylo zajištění rozměrů původního přepínače jeho změřením a skenováním. Jelikož prostým měřením nebylo možno rozměry zachytit na výkres, přešlo se pouze na elektronickou formu modelu pomocí 3D skenování. Data získaná ze skenu byla upravena, poté následovalo překreslení do objemového tělesa v programu Inventor. Objemové těleso i s vtokovou soustavou bylo vytisknuto na FDM tiskárně ze spalitelného materiálu PolyCast, kdy tyto objekty sloužily jako spalitelné modely při výrobě pomocí technologie přesného lití do skořepinové formy.

Na závěr experimentu došlo k zjištění vad v odlitcích způsobené odloupením formy, což mělo za následek výstupky a prohlubně v povrchu odlitku. Z toho poté vyplynula nižší kvalita povrchu, než byla požadována. Přesný důvod odloupení formy nelze stanovit, jsou zde pouze určité scénáře, co mohlo být příčinou této vady. Odlévání kovů je složitý proces, do kterého vstupuje mnoho vlivů, a bezchybný výsledek není nikdy zaručen. Horší kvalitu povrchu způsobilo také nepoužití prostředků pro vyhlazení povrchu a pískování příliš hrubým materiálem.

Bylo zjištěno, že v tomto konkrétním případě lze vyrábět modely s nulovou hodnotou smrštění pomocí tisku na FDM tiskárně pro zachování celkových rozměrů věrných originálu, protože forma zde vykazovala dostatečnou tuhost a nedovolovala délkové změny odlitku. Pro další případné kroky experimentu je nutná oprava geometrie modelu (prohlubeň v povrchu a korekce úhlu úchytů) a úprava technologického postupu výroby modelů a formy. Tím je myšleno vyhlazení povrchu vytištěného modelu pomocí IPA, kontrola kvality primární břečky a úprava postupu sušení jednotlivých vrstev skořepiny. Rovněž použití jemnějšího materiálu při tryskání povrchu. Uvedeným postupem ověřit dosažení požadované kvality povrchu a správnost navrženého technologického postupu.

Technologie přesného lití na vytavitelný model je v tomto případě tou nejvhodnější metodou, jakou je možno vytvořit repliku přepínače v požadované kvalitě s přijatelnými náklady. Pro ověření rozměru bylo nejvhodnější použití výroby netrvalých modelů na FDM tiskárně ze spalitelného materiálu Polycast. Pro případnou výrobu většího množství dílů je nejvhodnější možností výroba silikonové formy. Ta výrazně sníží časovou náročnost spojenou s tiskem modelů na tiskárně a retušováním povrchů. Vzhledem k vysokým cenám řešeného dílu by toto řešení bylo vhodné a ekonomicky rentabilní. Již při sérii o 50 kusech by byla zaručena návratnost investice do výroby formy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KLÁTIL, Ondřej. *Motor ČZ 175/487* [pdf]. Zlín, 2022, 6s.
 2. VOŠALÍK, Jan. *Modely* [online]. 2011, 2011 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.cezetmania.info/modely/index.html>
 3. PENÍZE.CZ. *Inflační Kalkulačka* [online]. [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.penize.cz/kalkulacky/znehodnoceni-koruny-inflace#inflace-vypocet>
 4. HORÁČEK, Milan. *Slévárenská technologie I*. Druhé. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0217-2.
 5. STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA ZLÍN. *Strojírenská technologie: Pracovní sešit pro technické lyceum*. Zlín, 2018.
 6. BENDA, Tomáš. *Současné trendy ve výrobě trvalých modelů*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
 7. ZÁDĚRA, Antonín. *Výrobní technologie (2VT) Přednáška č. 1*. Přednáška. Brno: Vysoké učení technické v Brně, [online]. [cit. 2024-05-17]
 8. WESTECH WAX PRODUCTS. *Investment Casting Wax* [online]. 2020 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.westechwax.com/investment-casting-waxes>
 9. XEOMETRY. *Plaster Casting: What It Is, How It Works, Uses, Process, and Advantages* [online]. 2023, 13.10.2023 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/casting/plaster-casting/>
 10. AERO METALS. *What is Investment Casting?* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.aerometals.com/metal-casting-101/casting-process>
 11. WELD2CAST. *Sand Casting* [online]. 2021 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.weld2cast.com/sand-casting/>
 12. BARTOŠ, Filip. *Technologie zhotovení odlitků "na hotovo"*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
 13. ZÁDĚRA, Antonín. *Výrobní technologie (2VT) Přednáška č. 2*. Přednáška. Brno: Vysoké učení technické v Brně, [online]. [cit. 2024-05-17]
 14. ZAPLATÍLEK, Dominik. *Rapid prototyping: vysvětlení, využití* [online]. 3 Jan 2021 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://medium.com/design-kisk/rapid-prototyping-vysv%C4%9Btlen%C3%AD-vyu%C5%BEit%C3%AD-8505bf920c28>
 15. BERÁNEK, Martin. *Výroba odlitků s využitím metod rapid prototyping*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
 16. STRAKA, Pavel. *Využití 3D technologií ve slévárenství*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
 17. *What is Vat Photopolymerization?* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.rahn-group.com/en/energycuring/3d-printing/what-is-vat-photopolymerization/>
 18. *Material Extrusion* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/material-extrusion>
 19. *Material Jetting* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
 20. AM 101. *Multi Jet Fusion (MJF)* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/am-101-multi-jet-fusion-mjf>
-

21. *WHAT IS BINDER JETTING? (DEFINITION, PROS, CONS AND USES)* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-binder-jetting>
22. HENDRIXSON, Stephanie. *What is Powder Bed Fusion 3D Printing?* [online]. 2022, 18/6/2022, 26/7/2023 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/am-101-powder-bed-fusion-pbf>
23. TWI. *WHAT IS DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)?* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition>
24. TWI. *WHAT IS LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)?* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laminated-object-manufacturing-lom#HowdoesitWork>
25. Teplota skelného přechodu [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplota_skeln%C3%A9ho_p%C5%99echodu#Reference
26. DK METAL PROMIMENT. *Přehled technologií 3D tisku* [online]. 2018, 09.01.2018 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
27. *PolyCast™* [online]. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://polymaker.com/product/polycast/>
28. *PolyCast filament natural 1,75mm Polymaker 750g* [online]. [cit. 2024-04-13]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/polycast-filament-natural-1-75mm-polymaker-750g/>
29. *ABS filament natural 1,75 mm Smartfil 0,75 kg* [online]. [cit. 2024-04-13]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/abs-1-75/abs-filament-natural-1-75-mm-smartfil-1-kg/>
30. *MoldLay voskový (Wax-Alike) filament 1,75mm 750g* [online]. [cit. 2024-04-13]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/moldlay-voskovy-filament-1-75mm-750g/>
31. FORMLABS. *Castable Wax 40 Resin* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://formlabs.com/store/materials/castable-wax-40-resin/>
32. *Castalite Guideline* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://tethon3d.com/wp-content/uploads/Castalite-Guideline-1.pdf>
33. PROTOCAM. *SLA QuickCast* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.protocam.com/additive-manufacturing-services/stereolithography-sla/quickcast/>
34. *QuickCast (SLA)* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <http://www.techok.com/quick-cast.html>
35. PROCHÁZKA, Michal. *Současné trendy ve výrobě trvalých modelů*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
36. FORMLABS. *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
37. *HIPS vs. PS* [online]. 2020-05-30 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/compare/High-Impact-Polystyrene-HIPS/Polystyrene-PS>
38. PRUSA RESEARCH. *HIPS* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/hips_167118
39. 3D SYSTEMS. *CASTFORM™ PS* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.3axis.us/matetials/sls/CASTFORMHigh.pdf>
40. SAND TEAM. *CERABEADS* [online]. 2015, 1.6.2015 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.sandteam.cz/new/wp-content/uploads/2015/05/CERABEADS.pdf>

41. VOXELJET. *PMMA 3D printing for investment casting* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/3d-printing-solution/investment-casting/>
42. MCMILLION, Matthew a Paul HANAPHY. *ARTEC 3D. Photogrammetry vs 3D scanning for creating a 3D model* [online]. 2023, June 02, 2023 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/learning-center/photogrammetry-vs-3d-scanning>
43. HEIDENHAIN. *TS 760 Vysoce přesná dotyková sonda na obrobky* [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.cz/produkty/snimaci-a-kamerove-systemy/dotykove-sondy-na-obrobky/ts-760>
44. *Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu* [online]. 2018, 13. března 2018 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu_7811/

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky

Označení	Legenda
3D	Trojrozměrný
ABS	Acrylonitril Butadien Styren
AT	Aditivní Technologie
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer Aided Design
CDLP	Continuous Digital Light Processing
CNC	Computer numerical control
CO ₂	Oxid uhličitý
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop On Demand
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
FDM	Fused Depositon Modeling
HIPS	High Impact Polystyren
IPA	Izoprophylalkohol
Kč	Koruna česká
Kčs	Koruna československá
LENS	Laser Engineering Net Shape
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJ	Material Jetting
MJF	Multi Jet Fusion
NPJ	Nanoparticle Jetting
PET	Polyethylentereftalát
PET-G	Polyethylentereftalát – glygol
PLA	Polylactic acid (kyselina polymléčná)
PMMA	Polymethylmethakrylát
PS	Polystyren
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
SiO ₂	Křemenné sklo
UV	Ultraviolet (ultrafialový)