



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH VARIANTNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE OBĚŽNÉHO KOLA VENTILÁTORU

VARIANT PRODUCTION TECHNOLOGY OF A FAN IMPELLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Macháček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Marek Macháček
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 diplomové práce:

Návrh variantní výrobní technologie oběžného kola ventilátoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Theoretický rozbor zvolené problematiky výroby případně montáže součástí oběžného kola ventilátoru. Návrh variantní výrobní technologie oběžného kola ventilátoru. Srovnání se stávajícím stavem výrobní technologie. Technicko ekonomické zhodnocení navrženého řešení Zhodnocení a doporučení autora do budoucna. Práce bude řešena v rámci spolupráce s výrobním podnikem.

Cíle diplomové práce:

- Analýza zvolené problematiky.
- Volba variant řešení výrobní technologie.
- Návrh technologie výroby pro zvolené varianty.
- Srovnání se stávajícím stavem výroby a porovnání variant.
- Technicko–ekonomické zhodnocení
- Doporučení do budoucna.

Seznam doporučené literatury:

ZEMČÍK, Oskar. Technologická příprava výroby. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2003. 193 s. ISBN 80-2147-2336-6.

CHLADIL, Josef. Teorie obrábění. 3. přeprac. vyd. Brno: VUT, 1989. 193 s. ISBN 65-137-2224-0.

ŠTULPA, Miroslav. CNC obráběcí stroje. Praha: BEN, 2006. 128 s. ISBN 80-7300-207-8.

MARINESCU, Ioan D. Handbook of machining with grinding wheels. Boca Raton, Fla.: CRC/Taylor, 2007. 596 p. ISBN 978-157-4446-715.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce zvažuje změnu výrobní technologie oběžného kola ventilátoru ze svařování na 3D tisk. Přáním výrobního podniku bylo zjistit, zda je taková změna možná a finančně výhodná a doporučit, jakým směrem se dále ubírat. S využitím podkladů podniku byly vytvořeny modely, z nichž byly posléze odvozeny podmínky pro výrobu kola v měřítku 1:1. Na základě nového technologického postupu a zkušeností s výtisky byla vytvořena nová cenová kalkulace pro výrobu oběžného kola ventilátoru pomocí technologie 3D tisku.

Klíčová slova

svařování, 3D tisk, FDM, oběžné kolo, ventilátor

ABSTRACT

The thesis considers a change in the manufacturing technology of a fan impeller from welding to 3D printing. The wish of the manufacturer was to investigate if such a change is possible and financially profitable and decide on a further approach to manufacturing. Models were created using information from the manufacturer and using them, conditions for manufacturing the impeller in the 1:1 ratio were derived. Based on the new technological process and the experience from prints a new price calculation for the fan impeller using 3D printing was created.

Key words

welding, 3D printing, FDM, fan impeller, fan

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHÁČEK, Marek. *Návrh variantní výrobní technologie oběžného kola ventilátoru* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-06]. Dostupné

z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131772>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh variantní výrobní technologie oběžného kola ventilátoru** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

13.8.2021

Datum

Bc. Marek Macháček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Oskaru Zemčíkovi, PhD., jakožto vedoucímu diplomové práce a společnosti SOLVITEC-PRO s.r.o. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 ANALÝZA ZVOLENÉ PROBLEMATIKY	10
1.1 Fotopolymerizace	10
1.2 Práškové systémy	12
1.3 Material jetting	13
1.4 FDM – extruze materiálu	14
1.5 Další technologie.....	15
2 PŮVODNÍ POSTUP – SVAŘOVÁNÍ	17
2.1 Stávající technologický postup	17
2.1.1 Dělení materiálu a příprava před svařováním.....	20
2.1.2 Svařování	20
2.1.3 Kontrola a dokončení.....	21
2.2 Detaily o použitých postupech a technologiích	21
2.2.1 Příprava materiálu.....	21
2.2.2 Svařování	23
3 NOVÝ POSTUP – VÝROBA POMOCÍ FDM 3D TISKU	27
3.1 Výroba pomocí 3D tisku, tiskárna Original Prusa i3 MK3	28
3.1.1 Zmenšený model horizontálně.....	32
3.1.2 Zmenšený model vertikálně.....	33
3.1.3 Výseč z kola na tiskárně Original Prusa i3 MK3.....	35
3.2 Výroba pomocí 3D tisku, tiskárna Flash Forge Creator 3	36
3.3 Návrh výroby ze dvou dílů	38
3.3.1 Varianty lepidel.....	38
3.4 Návrh pořízení nové tiskárny pro výrobu kola	40
3.4.1 Tiskárna Modix BIG-60 V3.....	40
3.4.2 Tiskárna CreatBot D600 Pro.....	41
3.5 Navrhovaný technologický postup pro 3D tisk	41
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	47
4.1 Srovnání mechanických vlastností svařovaného a tištěného kola	47
4.2 Cenová kalkulace svařovaného kola.....	48

4.3 Cenová kalkulace tištěného kola.....	48
5 DOPORUČENÍ DO BUDOUCNA	50
ZÁVĚR	51
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
SEZNAM PŘÍLOH.....	57

ÚVOD

Byl jsem firmou SOLVITEC-PRO s.r.o. požádán o návrh alternativního výrobního postupu radiálního oběžného kola ventilátoru SFF 550. Vzhledem k tomu, že se společnost chce udržet na čele technologického vývoje, bylo rozhodnuto o prozkoumání možností FDM 3D tisku jakožto alternativní výrobní technologie vůči svařování technologií MAG.

Společnost SOLVITEC-PRO s.r.o. navrhuje, vyrábí a dodává technologii pro skladování, dopravu a manipulaci se sypkou hmotou. Disponuje potřebným know – how, na kterém může stavět inovace, vývoj a konstrukci dalších strojů a zařízení s přidanou hodnotou pro zákazníka, uživatele technologií sypkých hmot. Vzájemným propojením známých principů manipulace s pevnou hmotou v práškovém nebo hrubozrnném stavu, s využitím nejnovějších prvků měření, regulace a IT chce společnost vyvinout taková zařízení, která budou schopna plnit více než jednu funkci potřebnou v technologickém procesu výroby a zpracování pevných látek. [1]

Během skladování a dopravy pevných látek v práškovém nebo hrubozrnném stavu je nutné, aby materiál, se kterým je manipulováno prošel celou řadou dalších procesů, aby změnil, či naopak aby si zachoval požadované vlastnosti. Společnost navrhla a dodává mnoho prvků pro tyto procesy, z nichž některé modifikovala tak, aby tyto technologické prvky plnily vícero funkcí. Příkladem takových kombinací může být podavač materiálu, který reguluje materiálový tok a zároveň slouží jako vzduchotechnická uzávěra. [1]

Všechny produkty a služby dodává SOLVITEC-PRO s.r.o. výrobním závodům, které ve většině případů spadají do nadnárodních skupin a úspěšná aplikace v jednom ze závodů takovéto skupiny je pak branou k dodávkám po celé nadnárodní skupině [1].

Koncovým uživatelem technologií pro manipulaci se sypkou hmotou jsou ty druhy průmyslu, kde jsou zpracovávány suroviny v pevném stavu, v práškové nebo hrubozrnné podobě. Takovéto látky se objevují v mnoha odvětvích, u těžby surovin, v zemědělství, v potravinářském a chemickém průmyslu, ve stavebnictví, či energetice. Společnost se soustřeďuje především na výrobce stavebních hmot v cementárenském a vápenickém průmyslu, výrobce suchých omítkových směsí, keramický průmysl, chemický průmysl a teplárny a elektrárny. [1]

Ventilátor konstrukce SFF je jednostupňový radiální ventilátor ve svařovaném provedení. Je poháněn přímo hřídelí elektromotoru, na němž je namontován rotor, nebo přes spojku typu BKN nebo VPS. Ventilátor je připojen na navazující zařízení pružným spojením pomocí gumového plátu a upínacích pásků. Dále je vybaven ochranným košem s filtrační vložkou. [2]

Ventilátor SFF 550 (Obr. 0.1) je využíván jako zdroj tlakového vzduchu pro pneumatické dopravní žlaby. Je určen pro umístění ve venkovním i vnitřním prostředí s teplotou okolí -20 °C až +40 °C. Nelze jej použít pro dopravu výbušných vzdušnin ani vzdušnin korozivního charakteru obsahujících vláknitý prach a příměsi, které by mohly způsobit tvorbu nálepků. Ventilátor není plynotěsný a nelze jej použít pro dopravu škodlivých ani zapáchajících vzdušnin. [2]

Radiální ventilátor je poháněný elektromotorem o příslušném výkonu. Oběžné kolo (Obr. 0.2) je upevněno buď na hřídeli elektromotoru, nebo na hřídeli samostatně uložené a spojené s hřídelí elektromotoru čepovou nebo pružinovou spojkou. Spirální skříň a stolička jsou svařeny z plechu, vstup ventilátoru je přizpůsoben pro upevnění vzduchového filtru. Ventilátor je uložen pružně na kotevním rámu s izolátory. [2]



Obr. 0.1 Sestavené ventilátory SFF 550.



Obr. 0.2 Oběžné kolo ventilátoru i s nábojem

Hlavními důvody pro zvažování technologie FDM 3D tisku je možnost vytvoření výrobku v jednom kuse bez dalšího sestavování a spojování a relativní jednoduchost obsluhování 3D tiskárny ve srovnání se svařováním a z toho také vyplývající nižší nároky na kvalifikaci obsluhy. Navíc absence zásahů pracovníka do výrobního procesu snižuje pravděpodobnost chyb způsobených lidským faktorem. Absence vysokých elektrických proudů a velmi vysokých teplot dále snižuje nebezpečí a pravděpodobnost pracovního úrazu.

V případě oběžného kola jde o díl vyráběný po dlouhou dobu stejným způsobem, prověřenou technologií, což zajišťuje dostatek podkladů pro přezkoumání. Dále pak funkčnost kola není ovlivněna kvalitou povrchu, tudíž ani výtisk s drsnějším povrchem není překážkou.

Práce analyzuje možné způsoby 3D tisku, popisuje původní technologii výroby a technologický postup, zabývá se proveditelností výroby pomocí FDM 3D tisku a srovnává obě možnosti z technicko-ekonomického hlediska.

1 ANALÝZA ZVOLENÉ PROBLEMATIKY

Ačkoliv existují mnohé druhy 3D tisku a typy 3D tiskáren, pro účely této práce jsou vhodné jen některé. Tato kapitola se věnuje přehledu tzv. additive manufacturing (aditivní výroby či přírůstkových výrobních technologií [3]).

Přestože jsou všeobecně základní kroky postupu práce s aditivními technologiemi stejné, jednotlivé typy se od sebe do různé míry liší [4].

Nominální tloušťka vrstvy tištěného materiálu je pro většinu strojů okolo 0,1 mm, nicméně jde spíše o zvyk než předepsanou hodnotu. Například u většiny FDM tiskáren to je 0,254 mm, naproti tomu standardní tloušťka vrstvy u SLA je mezi 0,05 a 0,1 mm. Mnohé technologie umožňují tloušťku tištěné vrstvy měnit. Důvodem je, že tlustší vrstvy umožňují vytvoření výtisku rychleji, ale s menší přesností, což však nemusí být na škodu při výrobě, kde je hlavním požadavkem rychlost. [4]

U některých aditivních technologií mohou být problémem modely s jemnými detaily, jako jsou například tenké stěny, zejména tam, kde je nutno je vytvářet vertikálně. Problémem je, že i když stroj může být velmi přesný, existují konečné rozměry kapek, průměry laseru či rozměry tiskových hlav, což v podstatě určuje nejjemnější možný detail nebo minimální tloušťku stěny, jež mohou být vyrobeny. [4]

Existují i další faktory, které mohou ovlivnit výběr výrobního procesu nebo některé jeho kroky. Zejména využití různých materiálů i za použití stejného procesu může ovlivnit potřebný čas, zdroje a potřebné zkušenosti pracovníků k jeho provedení. Například využití vodou rozpustných podpor u FDM tisku vyžaduje extra vybavení, ale zároveň umožňuje dosažení vyšší kvality povrchu takto vyrobených výrobků než při použití podpor ze stejného materiálu a omezení nutnosti ručního opracování. V jiných případech polymery vyžadují speciální zacházení, kupříkladu používání specifických rozpouštědel či příměsí. Pro následné úpravy výtisku pomocí tepla je potřeba znát teploty tání použitých materiálů, aby nedošlo k poškození výrobku. Taktéž při obrábění je nutno znát mechanické vlastnosti výrobku. V případě nutnosti většího opracování po vytištění je vhodné zvážit možnost přidání přísad pro obrábění. [4]

1.1 Fotopolymerizace

Fotopolymerizační procesy využívají kapalně pryskyřice nebo fotopolymery vytvrditelné zářením jako základní materiály. Většina fotopolymerů reaguje na záření v ultrafialovém spektru, ale existují i systémy využívající viditelné světlo. Při ozáření tyto materiály projdou chemickou reakcí (fotopolymerizací), jež způsobí jejich ztuhnutí a je typicky složitou reakcí s mnoha chemickými komponentami. [4; 5]

Pro vytvrzování běžných fotopolymerů je možno využít různé typy záření, jako gama záření, rentgenové záření, elektronové svazky, UV záření i viditelné světlo. Stereolitografické systémy využívají nejčastěji ultrafialové záření a viditelné světlo. V mikroelektronice jsou fotopolymery často využívány jako materiál pro šablony a jsou typicky ozářovány UV zářením a elektronovými svazky. Naproti tomu v zubařině je využíváno hlavně viditelné světlo. [4]

Všechny systémy využívající nádrže s kapalným materiálem musejí využívat stejný materiál pro vytváření výrobku i jako podpurný. Při kapkovém nanášení materiálu je možno upravit materiál při opuštění tiskové hlavy tak, aby bylo odstraňování podpor po vytištění jednodušší. Výhodou systémů využívajících fotopolymery při srovnání s jinými

typy 3D tisku jsou tenké vrstvy a všeobecně vysoká přesnost. Fotopolymery dříve měly při srovnání s mnoha jinými materiály využívanými pro 3D tisk horší vlastnosti. I když byly vynalezeny (a stále jsou vynalézány) novější pryskyřice s lepší tepelnou odolností, pevností a tažností, může nastat rychlá degradace materiálu, pokud na něj není nanесena ochranná vrstva proti UV záření. [4]

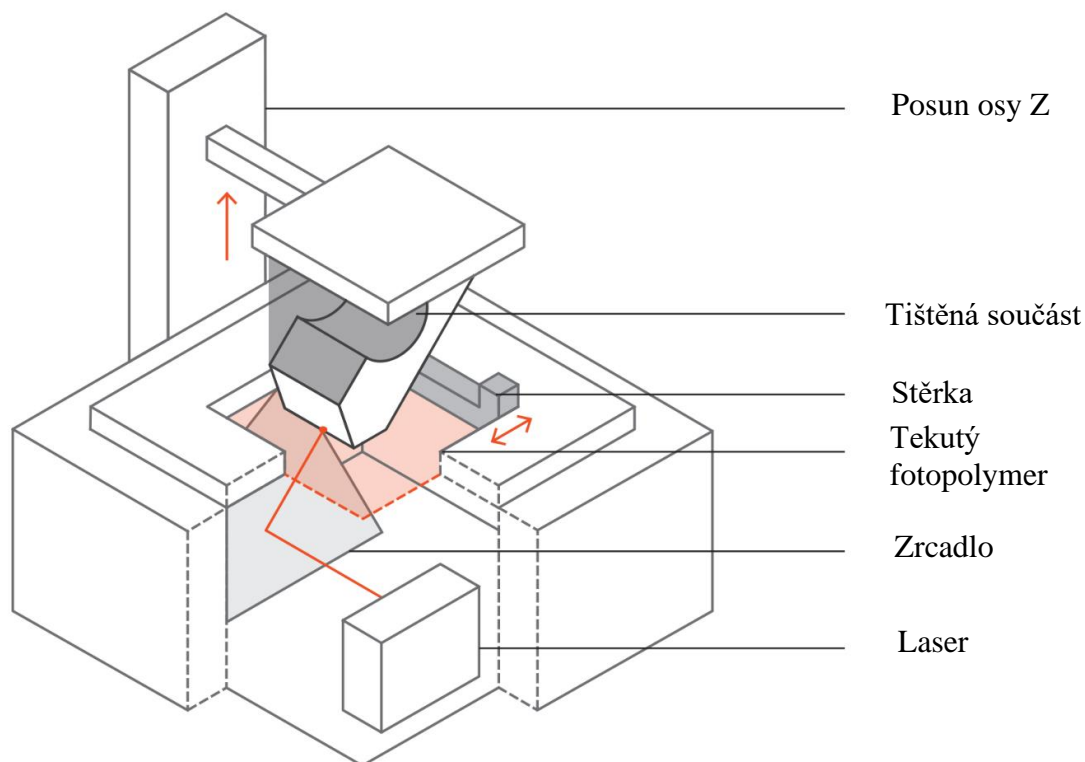
Stereolitografie (SLA)

Nejčastějším představitelem této kategorie je SLA, jež je využíváno již od 80. let minulého století a je stále jedním z nejčastějších způsobů 3D tisku a typickým příkladem fotopolymerizace v nádrži. Tato technologie využívá k polymerizaci nízkenergetického laseru, který způsobuje ztvrdnutí kapalné pryskyřice citlivé na světlo. [6]

Tekutá pryskyřice je při fotopolymerizaci vytvrzována tak, že jednoduché uhlovodíkové řetězce jsou aktivovány laserovým UV zářením, čímž vytvářejí permanentní polymerní vazby. Tento proces je nevratný, tudíž součásti vyrobené pomocí SLA nelze zahříváním převést zpět do tekutého stavu. Použité pryskyřice totiž spadají do kategorie termosetů (na rozdíl od termoplastů používaných například při FDM tisku). [7; 8]

Trojrozměrný model z CAD softwaru je horizontálně rozdělen na vrstvy, jež jsou poté jedna po druhé vytvářeny tiskárnou. Každá vrstva je ozářena laserem v příslušném půdorysu řezu, načež následně ztuhne. Poté se tisková platforma, na níž model spočívá, posune v ose Z a na stávající již vytvrzenou vrstvu je nanесena nová vrstva polymeru, ta je ozářena atd. Po vytištění je nutno ošetřit výtisk ochrannou vrstvou proti UV záření. [6]

Obr. 1.1 znázorňuje schéma SLA tiskárny s tiskovou platformou pohybující se směrem nahoru z nádrže s fotopolymerem a s UV laserem, včetně šipek znázorňujících pohyb tiskové platformy a stěrky.



Obr. 1.1 Schématické znázornění SLA tisku [9].

1.2 Práškové systémy

Všechny práškové systémy mají společné základní charakteristiky. To znamená jeden či více tepelných zdrojů zajišťujících spojování částic prášku, způsob, jak ovládat spékání prášku v předurčených oblastech každé vrstvy, a ústrojí pro přidávání a vyhlazování vrstev prášku. [4]

Systémy využívající práškové materiály nepotřebují podpory, protože prášek je přidáván na celou pracovní plochu a poté zcelován. Tudiž pro jednoduché modely patří mezi systémy s nejjednodušším nastavením. [4]

SLS

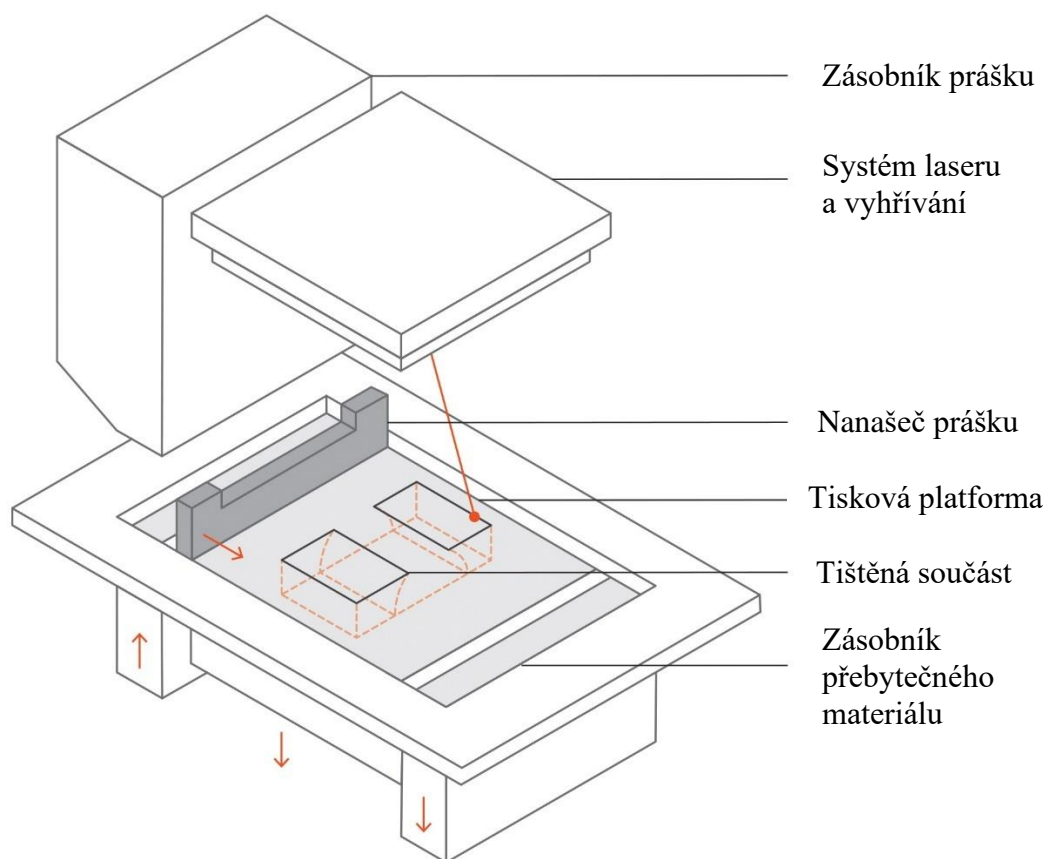
Selective laser sintering (SLS) – spočívá ve slinování prášku laserem a je typickým představitelem práškových systémů.

Ve vrstvách (typicky 0,1 mm tlustých) spékáný prášek je rozprostírán po celé ploše tiskové platformy rotujícím válečkem (či plochým nanašečem, jako je na Obr. 1.2). Tvorba vytvářené součásti probíhá v uzavřené komoře vyplněné dusíkem pro zamezení oxidace a degradace prášku. Prášek na tiskové platformě je udržován na teplotě blízko pod teplotou tání nebo skelného přechodu. Topná tělesa využívající infračervené záření umístěná nad tiskovou platformou udržují zvýšenou teplotu v okolí vytvářené součásti a zároveň i nad zásobníky s práškem, který je tak přehříván před použitím. Někdy bývá za pomoci odporových topných těles ohřívána i tisková platforma. Tento přehřev a udržování konstantní zvýšené teploty jsou potřebné pro minimalizování energetické spotřeby laseru – laser nepotřebuje tolik energie pro spékání přehřátého materiálu, jako u materiálu nepřehřátého. Zároveň je také zabráněno zkroucení součásti kvůli nerovnoměrnému tepelnému zatížení, které způsobuje roztažení na teplejší straně a smrštění na chladnější straně. Obr. 1.2 znázorňuje schéma SLS tiskárny včetně směru pohybu systému podávání prášku, nanašeče, tiskové platformy a zásobníku přebytečného prášku. [4; 10]

Jakmile je na tiskovou platformu nanášena přiměřená vrstva prášku a je přehřívána na vhodnou teplotu, paprsek CO₂ laseru jej speče v požadovaném tvaru průřezu. Nespečený prášek okolo slouží jako podpora následujících vrstev, čímž je odbourána nutnost tvorby podpůrných struktur, tak jako je tomu například u fotopolymerizace. Po dokončení vrstvy se tisková platforma posune o jednu tloušťku vrstvy níže, je nanášen nový prášek a celý proces se opakuje, dokud není vytvářená součást dokončena. Většinou je nutno před vyjmutím počkat, než se vnitřek tiskárny ochladí na pokojovou teplotu, aby bylo zabráněno deformaci výrobku vlivem teplotního šoku a degradaci prášku kvůli kyslíku. Nakonec je výrobek odstraněn z tiskové platformy, očištěn od zbytků prášku a případně dále opracováván. [4; 10]

SLS vyžaduje pozornější kontrolu vlastností materiálu, protože ty se mohou měnit podle toho, kolikrát byl recyklován na tiskové platformě. Tato kontrola zahrnuje opakované pozorování během tisku, aby bylo zajištěno správné chování materiálu. Správně nastavené recyklování materiálu v procesu je důležitou součástí zajištění kvalitních výtisků. Je také potřeba mít na paměti chování prášku v tiskárně. Prášek v horních částech zásobníku má nižší hustotu než prášek na jeho dně, kde je stlačen hmotou prášku nad sebou. Tento rozdíl v hustotě prášku dodávaného postupně na tiskovou platformu může ovlivnit jeho množství dodávané během tisku na platformu, čímž je pak ovlivněna kvalita výsledného výtisku. Toto je problémem hlavně u vysokých výtisků, problému lze předejít

pečlivým upěchováním prášku v zásobníku před tiskem a regulací teploty a množství dodávaného prášku během něj. [4]



Obr. 1.2 Schéma SLS tiskárny [11].

1.3 Material jetting

Česky nanášení tryskáním [12] je podobné klasickému plošnému tisku. Materiál je vylučován na tiskovou platformu buď soustavně, nebo systémem Drop on Demand (čili vylučováním kapek materiálu podle potřeby). Tiskárny běžně umožňují tisknout zároveň z hlavního i podpůrného materiálu. [13]

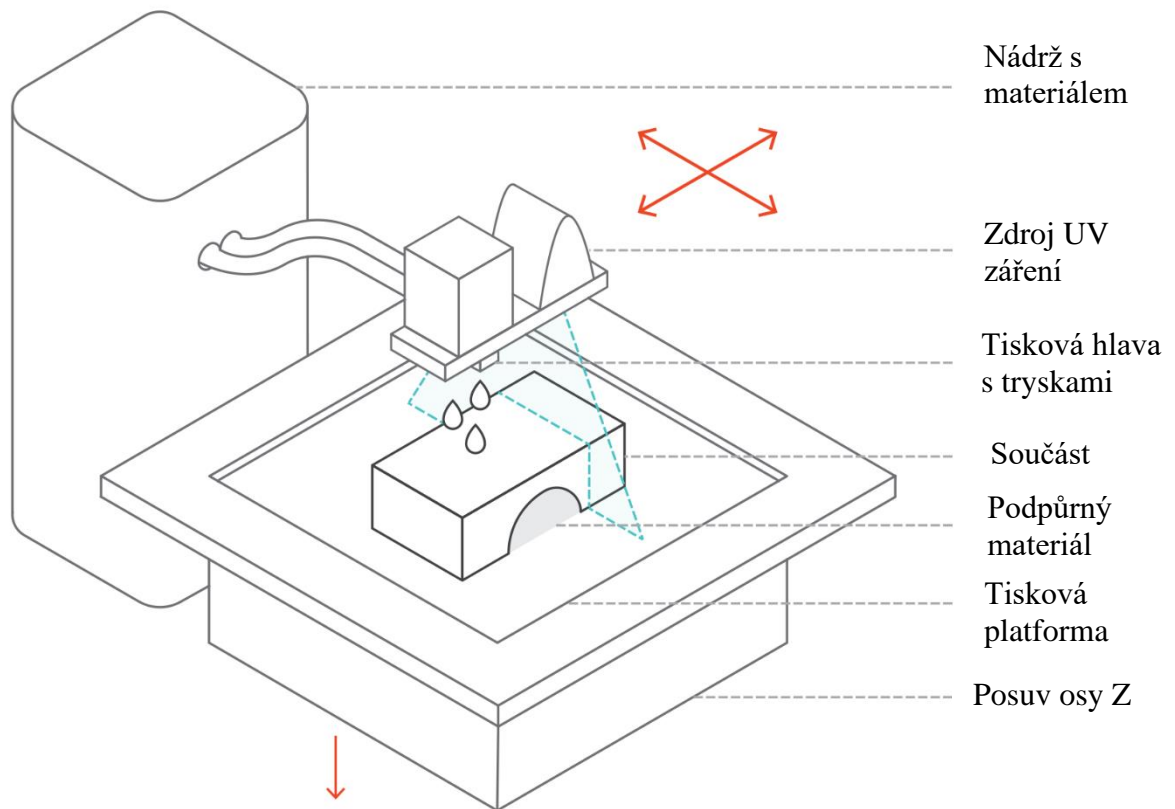
Na rozdíl od jiných typů 3D tisku se materiál nanáší liniově, podobně jako u běžné inkoustové tiskárny [14].

Tisk probíhá tak, že materiál je vrstvu po vrstvě nanášen na tiskovou platformu a okamžitě vytvrzován UV zářením, pro rovnoměrnější vrstvy je nanášený materiál urovnáván stěrkou. Po dokončení tisku je podpůrný materiál odstraněn pomocí vody nebo roztoku hydroxidu sodného. [4; 13] Obr. 1.3 názorně ilustruje princip tohoto tisku (červené šipky představují osy X, Y a Z).

Hlavní výhody tohoto typu tisku zahrnují nízkou cenu, vysokou rychlost, rozšiřitelnost a jednoduchost tisku z více materiálů a více barev. Zejména tiskárny využívající laser jsou levnější než tiskárny využívající jiných typů 3D tisku. Rychlost a rozšiřitelnost spolu souvisejí – využitím tiskových hlav se stovkami až tisíci trysek je možno nanášet velké množství materiálu na velkou plochu. Rozšiřitelnost zde znamená, že

rychlost tisku může být zvýšena relativně jednoduchým přidáním další tiskové hlavy (ve srovnání SLA nebo SLS). [4]

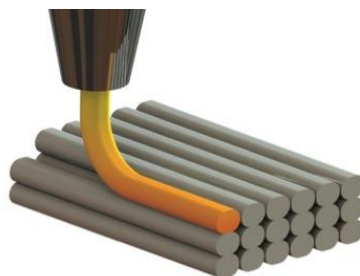
Mezi nevýhody tohoto způsobu 3D tisku patří omezený výběr tiskových materiálů (kvůli faktu, že musí být možné, aby materiál byl schopný tvořit kapky [13]). a vysoká cena této technologie, zvláště vůči SLA či FDM [4].



Obr. 1.3 Znázornění tisku typu material jetting [15].

1.4 FDM – extruze materiálu

Při FDM (fused deposition modelling) je na sebe postupně ve vrstvách z vláken materiálu (pro představu uspořádání vláken na Obr. 1.4) nanášen roztavený plast vytlačovaný skrze nahřátou trysku, jež se pohybuje po přednastavené trajektorii [16; 17].



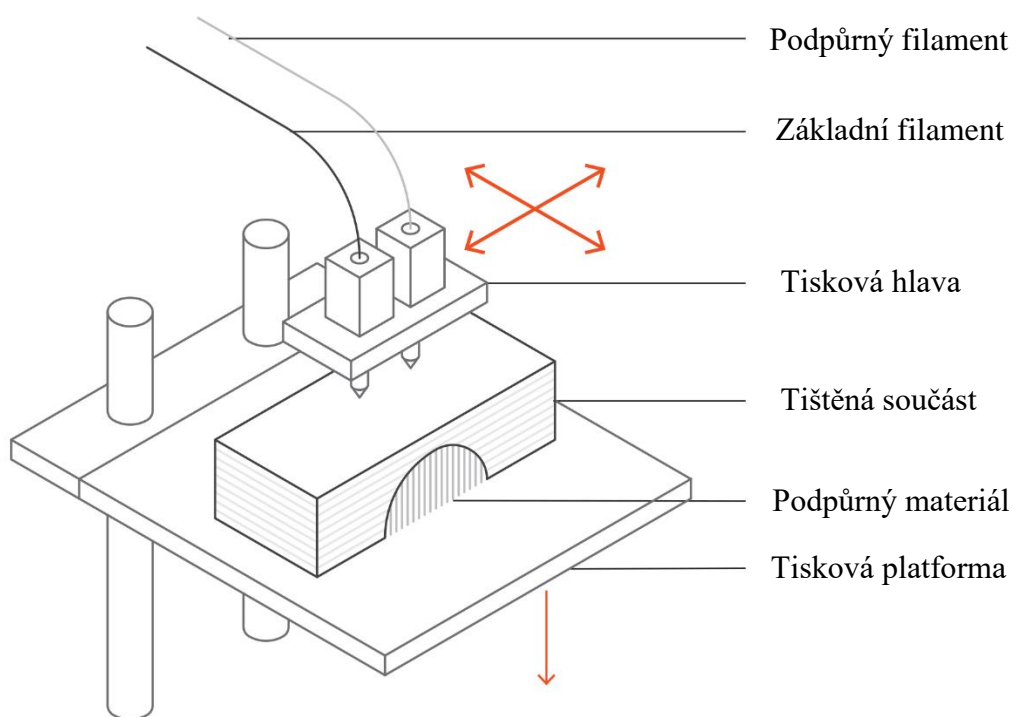
Obr. 1.4 Ilustrace kladení vrstev při FDM tisku [18].

Výrobní proces probíhá následovně:

1. Do tiskárny je vložen materiál (filament) na cívce a po dosažení požadované teploty je zaveden do tiskové hlavy s tryskou, kde je taven [17].

2. Tisková hlava, popř. v kombinaci s tiskovou podložkou [16], se pohybuje v osách X, Y a Z (na Obr. 1.5 zdůrazněny červenou barvou). Rozpuštěný materiál je vytlačován skrze trysku ve formě tenkých vláken, jež jsou vrstvu po vrstvě nanášena po předem určené trajektorii [17]. Někdy je ochlazování vytištěného materiálu urychlováno přidavným ventilátorem připevněným k tiskové hlavě [17].
3. Pro vyplnění plochy je potřeba více průjezdů tiskové hlavy. Když je vrstva dokončena, posune se tisková podložka dolů o tloušťku jedné vrstvy (případně tisková hlava nahoru) a započne tisk další vrstvy. Proces se následně opakuje, dokud není výtisk dokončen. [17]

Pro lepší představu o tomto procesu je na Obr. 1.5 schéma FDM tiskárny ve verzi schopné pracovat se dvěma materiály najednou.



Obr. 1.5 Všeobecné schéma FDM tiskárny [19].

Více k metodě FDM v kapitole 3.

1.5 Další technologie

Existují i další způsoby 3D tisku v již zmíněných kategoriích, jako například DLP – Digital Light Processing v oblasti fotopolymerizace, NPJ – Nano Particle Jetting u Material Jetting, či MJF – Multi Jet Fusion u práškových systémů [5; 20], avšak ty s touto prací nesouvisejí.

Kromě již zmíněných kategorií existují další tři hlavní typy 3D tisku (Binder Jetting, kde je výrobek vytvářen pomocí slepování prášku adhezivem, Direct Energy Deposition, kde je kovový materiál scelován pomocí laseru, elektronového svazku či plazmy, a Sheet

Lamination, jež vytváří výrobky pomocí vyřezávání vrstev z plátů materiálu kladených na sebe [5; 20]). Tyto technologie však nevyužívají pro tvorbu výrobků plasty a nejsou pro tuto práci významné. Po konzultaci možných variant 3D tisku se zástupci společnosti bylo rozhodnuto o využití metody FDM, díky její relativní jednoduchosti a dobré dostupnosti. Tato práce se proto dále ostatními metodami nebude zabývat.

2 PŮVODNÍ POSTUP – SVAŘOVÁNÍ

2.1 Stávající technologický postup

Stávající technologický postup poskytnutý společností SOLVITEC-PRO s.r.o. dobře znázorňuje, o jak relativně náročný a komplexní proces se při výrobě z plechu jedná. Pro vytvoření představy o něm pro srovnání s navrhovanou technologií 3D tisku je uveden jako Tab. 2.1 se všemi prováděnými operacemi.

Tab. 2.1 Stávající technologický postup.

TECHNOLOGICKÝ POSTUP					
Číslo výkresu		Položka	Název součástí	Zakázkové číslo	
3-150278-1-1			Oběžné kolo	0138	
Provádějí středisko		Kusů do výr. 1	Kusů na 1 pr.		
Operace	Třída a sazba	Poznámka		tAC (min)	tBC (min)
		Kontrolu provádět v souladu s plánem jakosti. QIP/SFF550/3-150278-1-1			
10		Dělení materiálu laserovým řezem poz. 1,4 spolu		15	1,5
20		Dělení materiálu laserovým řezem poz. 2,3,5			1,5
30		Odstranění otřepů po řezu		60	420
40		Kontrola dělení materiálu + rozměrová kontrola			
50		Značení naděleného materiálu: zak. č. / č. výkresu			
60		Kontrola značení			
70		Příprava svarových ploch			
80		Kontrola svarových ploch			
90		Zakružení poz.4			
100		Kontrola zakružení			
110		Sestavení poz.4			
120		Stehování			
130		Kontrola sestavení před svařením			
140		Kontrola během svařování			
150		Svařování poz.4 dle WPS			
160		Očištění svaru po svaření			
170		Sestavení poz.2 s poz.4			
180		Stehování			
190		Kontrola sestavení před svařením			
200		Kontrola během svařování			
210		Svařování poz.2 s poz.4 dle WPS			
220		Očištění svarů po svaření			
230		Sestavení poz.1 s poz. 5 dle WPS			

240		Stehování											
250		Kontrola sestavení před svažením											
260		Kontrola během svařování											
270		Svařování poz.1 s poz.5 dle WPS											
280		Očištění svarů po svažení											
290		Sestavení poz.1,5 s poz. 3 dle WPS											
300		Stehování											
Vystavil	Schválil postu pář	Normoval materiál	Normoval práci	Schválil normovač	Změny	Index	Počet	Doklad	Datum	Zapsal			
												Číslo listu	1
Datum	25.3.2019	Podpis									Počet listů	2	

Pozn.: Tento postup pokračuje na následující straně, rozdělení je způsobeno formátem formuláře poskytnutým společností a zachovává jeho čitelnost.

Jak je uvedeno v tabulce rozebírající práci dílny v Příloze 3 poskytnuté společností SOLVITEC-PRO s.r.o., příprava dělení materiálu trvá 15 minut a při hodinové sazbě 280 Kč je cena na jeden kus 70 Kč. Řez laserem, jakožto druhá část dělení materiálu zabírá 3 minuty a při hodinové sazbě 937 Kč cena na jeden kus činí 46,85 Kč. Přípravné zámečnické práce trvají 35 minut a při hodinové sazbě 320 Kč je cena na jeden kus 185 Kč. Samotné zámečnické práce pak trvají 10 minut a při hodinové sazbě 320 Kč cena na jeden kus činí 54,4 Kč. Kontrola zabírá 15 minut a při hodinové sazbě 320 Kč stojí 80 Kč na jeden kus. Povrchová úprava trvá 420 minut a při hodinové sazbě 320 Kč cena na jeden kus činí 2 240 Kč.

V technologickém postupu příprava dělení materiálu zabírá 15 minut jednotkového času, samotný řez laserem pak dohromady 3 minuty (dvakrát 1,5 minuty) času dávkového, obě tyto položky se vztahují k operacím 10 a 20. Přípravné zámečnické práce trvající 35 minut, zámečnické práce samotné trvající 10 minut a práce kontrolní trvající 15 minut dohromady dávají 60 minut jednotkového času v technologickém postupu, jimž odpovídají operace 30 až 440 a 460 a 470. Povrchová úprava zabírající 420 minut je zahrnuta v dávkovém čase 420 minut v technologickém postupu, což se vztahuje k operaci 450.

2.1.1 Dělení materiálu a příprava před svařováním

Všechny pozice z výkresu (Příloha 1) jsou vyřezávány laserem z plechových plátů o rozměrech 1500×2000 mm z oceli S355J0 příslušných tloušťek (3 mm pozice 2, 3 a 5; 4 mm pozice 1 a 4).

Následně je provedeno manuální odstranění otřepů (jichž je při dělení laserem naprosté minimum), poté jsou všechny díly zkontrolovány a označeny podle výkresové dokumentace.

Po kontrole označení jednotlivých dílů jsou jejich plochy pro svařování připraveny (povrch očištěn ruční bruskou) a zkontrolovány.

Před začátkem svařování pozice 4 je třeba nejprve zakružít polotovaru do patřičného tvaru z obdélníkového polotovaru o rozměrech 12×723 mm, po následné kontrole již dochází k zahájení svařování.

2.1.2 Svařování

Nejprve jsou k sobě stehovány konce pozice 4. Při stehování je nutno přihlížet k faktu, že „*Minimální délka stehového svaru musí být menší z hodnot, buď čtyřnásobek tloušťky tlustší spojované části, nebo 50 mm, pokud kratší délka nemůže být ověřena zkouškou jako postačující*“ [21]. V případě tohoto kola se jedná o první možnost, neboť tloušťky všech plechových dílů jsou 3, popř. 4 mm. Dále také „*Musí být odstraněny veškeré stehové svary nezabudované do konečných svarů. Stehové svary, které se mají zabudovat do konečného svaru, musí mít požadovaný rozměr a musí být provedeny kvalifikovanými svářeči. Stehové svary nesmí vykazovat vady a musí být důkladně očištěny před konečným svařováním. Stehové svary s nepřipustnými vadami, jako jsou trhliny, musí být odstraněny*“ [21]. Když je vše v pořádku, je proveden svar, díky čemuž je dosaženo kruhového tvaru pozice 4.

Po svaření je svar očištěn a jsou sestaveny a sestehovány pozice 2 a 4. Sestavení je zkontrolováno a pozice 2 a 4 jsou svařeny dohromady. Dále jsou postupně s příslušnými úkony stehování, čištění a kontroly sestavovány a svařovány pozice 1 a 5. K pozici 1 jsou

posléze přivařeny pozice 3, na něž je nakonec nasazena a přivařena pozice 2. Svařené kolo je zobrazeno na Obr. 2.1 a Obr. 2.2.



Obr. 2.1 Svařené kolo i s nábojem, pohled shora.



Obr. 2.2 Svařené kolo i s nábojem, pohled zdola.

2.1.3 Kontrola a dokončení

Jakmile je provedena poslední rozměrová kontrola, následuje nedestruktivní testování svarů formou vizuální kontroly prováděné podle normy ČSN EN ISO 17637. Ta také uvádí, že „Vizuální kontrolu svarů a vyhodnocování výsledků pro konečnou přejímku musí provádět kvalifikovaný a způsobilý personál. Doporučuje se, aby personál vykonávající nepřímou vizuální kontrolu, byl kvalifikován podle ISO 9712 nebo na přiměřené úrovni v příslušném průmyslovém sektoru.“ [22].

K finálním úkonům patří odmaštění a otryskání povrchu kola před nátěrem a jeho natření, nejprve základním syntetickým nátěrem ROKO ve vrstvě 30 μm , poté vrchní vrstvou polyuretanového nátěru ROKO RAL 9006, taktéž o tloušťce vrstvy 30 μm .

2.2 Detaily o použitých postupech a technologiích

2.2.1 Příprava materiálu

S355J0 je nízkouhlíková konstrukční ocel vhodná ke svařování. Díky nízkému obsahu uhlíku je vhodná i pro tváření za studena. Plechové pláty jsou z ní vyráběny válcováním za tepla. [23]

Materiál je nejprve rozdělen pomocí laserového řezacího stroje na kovy Nukon NF PRO 315, který je využíván k přesnému dělení materiálu laserovým paprskem. Tento stroj využívá optického vlákna, které přenáší laserový paprsek do řezací hlavy (na rozdíl od CO₂ laseru, kde toto není možné kvůli větší vlnové délce záření) [24]. Jeho základní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 2.2. Stroj je zobrazen na Obr. 2.3.

Tab. 2.2 Technické parametry laserového řezacího stroje [24].

Parametr	Hodnota
Typ laseru	Vláknový
Vlnová délka záření	1070 nm
Výstupní výkon	2 kW
Požadovaný výkon UPS	30 kW
Max. rozměry plechu	1530×3000 mm
Max. tloušťka plechu	20 mm



Obr. 2.3 Laserový řezací stroj Nukon NF PRO 315 [24].

Před svařováním je potřeba zakružít polotovary pozice 4, k čemuž slouží zakružovačka Akyapak AHS 15/06, jež je hydraulickou ohýbačkou určenou ke tvarování materiálu. Může ohýbat uzavřené a polouzavřené trubky a kužele [25]. Díky čtyřem válcům je na ní možno vytvářet předohyb na obou okrajích plechu bez jeho otáčení [26]. Její základní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 2.3, následuje Obr. 2.4 zobrazující stroj i s ukázkou ohybu plechu.

Tab. 2.3 Technické parametry zakružovačky [25; 27].

Parametr	Hodnota
Pracovní délka	1600 mm
Maximální tloušťka ohýbaného plechu	8 mm
Maximální tloušťka plechu při předohýbání	6 mm
Minimální ohýbaný průměr	200 mm



Obr. 2.4 Ohyb plechu na zakružovače AHS 15/06 [27].

2.2.2 Svařování

V současnosti je zřejmě nejrozšířenější formou ručního svařování metoda MIG/MAG. Obloukové svařování je označováno jako MIG, pokud je ochranný plyn inertní – například argon, nebo MAG, pokud ochranný plyn obsahuje aktivní plyn – například CO₂. [28]

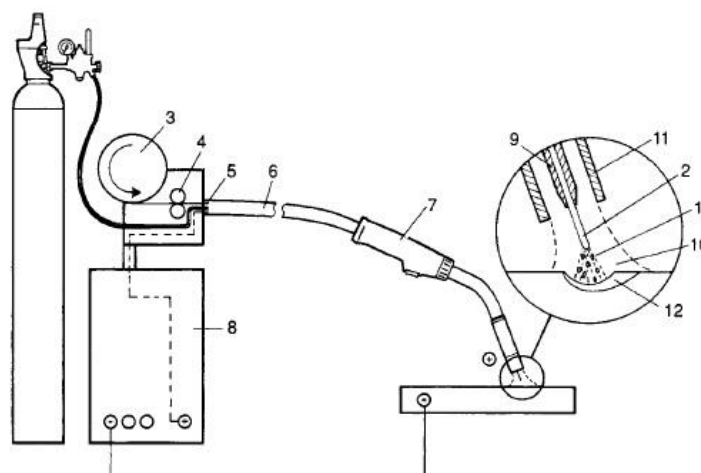
„Hlavními důvody rozšíření metody MIG/MAG jsou: široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení a především významné výhody a charakteristiky této metody svařování“ [29].

Princip svařování metodou MIG/MAG spočívá v hoření oblouku mezi materiálem výrobku a drátovou elektrodou, během čehož jsou oblouk a tavná lázeň chráněny atmosférou inertního, popř. aktivního plynu. Drát je soustavně přisouván do ústí hořáku, kde je napájen elektrickým proudem pomocí třetího kontaktu, čímž je dosaženo jeho co nejkratší zatížené délky. Drát je odmotáván z cívky (běžně o hmotnosti 15 kg) a přisouván do svařovacího hořáku. [28; 29]

Ze všech metod svařování obloukem má MAG nejvyšší proudovou hustotu dosahující až 600 A.mm⁻². Rozsah svařovacích proudů jde od 30 A pro tenké plechy až po 800 A, jichž je dosahováno u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Způsob, jakým je kov přenášen obloukem, je závislý na parametrech svařování a ochranném plynu. [29]

Kov při svařování MAG dosahuje teplot 1 700 až 2 500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1 600 až 2 100 °C. Vysoké svařovací proudy umožňují dosažení svařovacích rychlostí až 150 cm.min⁻¹ a rychlosti kapek přenášených obloukem přesahující 130 m.s⁻¹ [29].

V závislosti na druhu svařovaného materiálu je volena ochranná atmosféra, která má zároveň vliv na přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku [29]. Proudění plynu je nutno uzpůsobit oblouku, při nízkých hodnotách elektrického proudu může stačit 10 l.min⁻¹, při vyšších hodnotách může být potřeba až 20 l.min⁻¹ [28].



Obr. 2.5 Princip metody MIG/MAG [28].

Obr. 2.5 ukazuje princip svařování metodou MIG/MAG. Jednotlivé části znázorňují následující: Elektrický oblouk mezi drátovou elektrodou a výrobkem (1), drátová elektroda (2), cívka s drátem (3), podávací kladky (4) posouvající drát přes rychloupínací spojku (5) směrem k hořáku, hořákový kabel (6), hořák (7), svařovací zdroj (8), kontaktní průvlek (9) zajišťující přívod proudu do elektrody, ochranný plyn (10), plynová tryska (11), svarová lázeň (12) [28; 30].

Při svařování kola svářečkou Sigma² 400 (vlastnosti v Tab. 2.4) dochází k impulsnímu zkratovému přenosu kovu v oblouku.

Zkratové svařování:

Vnášené teplo je při zkratovém svařování nízké, díky čemuž je tento proces vhodný pro svařování tenkých materiálů. Kapky z tavicí se elektrody se přenášejí do svarové lázně a oblouk je tudíž pravidelně přerušován zkratujícím přemostěním z roztaveného kovu. [28]

To se opakuje až dvěstěkrát za sekundu. Pokud je zkratový proud příliš vysoký, značně zvyšuje síly potřebné pro odtržení kapek, což způsobuje rozstřík svarového materiálu. Je tudíž potřeba, aby bylo možné omezit velikost zkratového proudu, např. použitím indukční cívky pro změnu indukčnosti. [28] Na svářečce Sigma² 400 je možno indukčnost společně se svařovacím napětím plynule ladit [31].

Je důležité dosahovat vysoké zkratové frekvence, která zajišťuje přenos malých kapek do svaru a zároveň to, že kapky rozstříku jsou tak jemné, že se nepřichytí k materiálu svařované součásti. Kromě správných parametrů svařovacího zdroje je také důležitá rychlost podávání drátu, přenos proudu ve špičce svařovacího drátu i schopnosti svářeče. [28]

Použitým ochranným plynem je CO₂ [32] jenž má výrazný nauhličující účinek a zároveň i účinek oxidační [33]. Jeho hlavním účelem je zamezení přístupu vzduchu do svařované oblasti a ochrana před vzdušným kyslíkem, jenž způsobuje nežádoucí oxidaci, naplynění, pórovitost a propal [29]. Všechny svary jsou vytvářeny dle příslušného WPS (welding procedure specification = postup svařování) – u tohoto ventilátorového kola popsáno v Příloze 2.

Tab. 2.4 Technické parametry svářečky Sigma² 400 [31; 32].

Parametr	Hodnota
Proudový rozsah	15 – 400 A
Napájecí napětí	3×400 V
Napětí naprázdno	69 – 76 V
Pojistky	20 A
Proud činný	17,3 A
Proud max.	28 A
Příkon naprázdno	40 W
Účinník	0,90
Účinnost	0,85
Zatěžovatel 20 °C	330 A/100 %
Zatěžovatel 20 °C	400 A/70 %
Zatěžovatel 40 °C	290 A/100 %
Zatěžovatel 40 °C	350 A/60 %
Zatěžovatel 40 °C	400 A/40 %
Třída ochrany	IP23
Norma	IEC 60974-1, -2, -5, -10
Rozměry (V×Š×D)	1050×545×1090 mm
Hmotnost	69 kg

Obr. 2.6 Pracovník svařující se svářečkou Sigma² 400.

Během výrobního procesu se při práci na výrobku vystřídá pět až šest zaměstnanců (Obr. 2.6) s různými kvalifikacemi a certifikáty nutnými pro dané operace. Pro běžné přípravné práce stačí nekvalifikovaný pracovník, avšak pro všechny zbylé úkony je nutné alespoň školení obsluhy – tak jako je tomu při práci s laserovým řezacím strojem a zakružovačkou. I když například stěhování zvládne běžný zámečnický, na samotné svařování je již potřeba kvalifikace dle normy ČSN EN ISO 9606-1, jak je specifikováno v příslušném WPS (Příloha 2), jež také zahrnuje specifikaci kvalifikace kontrolora (podle

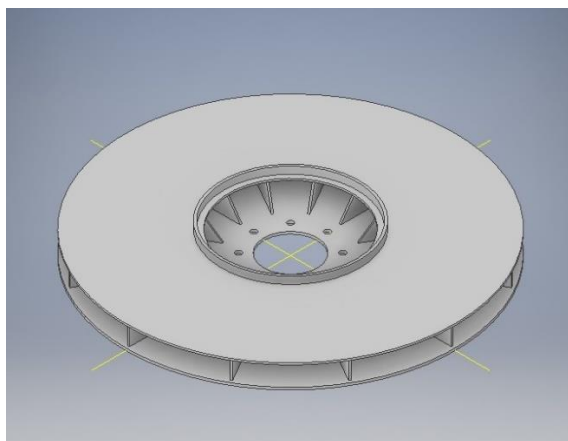
ČSN EN ISO 9712) provádějícího vizuální kontrolu svarů. Pro zajištění správného nanesení barvy a dodržení všech bezpečnostních předpisů musí být dalším specialistou lakýrník.

3 NOVÝ POSTUP – VÝROBA POMOCÍ FDM 3D TISKU

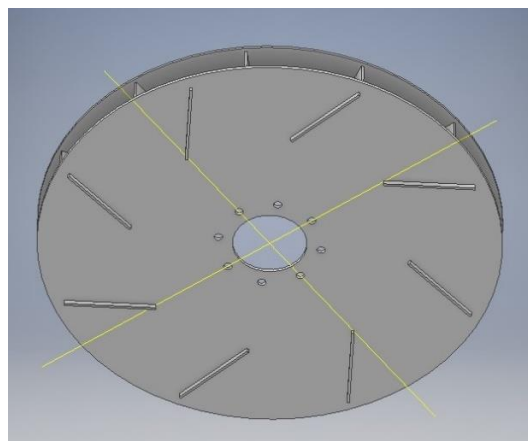
Bylo výslovným přáním společnosti zaměřit se na možnost využití 3D tisku, jakožto modernější technologie. Ostatní běžné technologie, jako například odlévání nebo vstřikování, byly společností SOLVITEC-PRO s.r.o. vyhodnoceny jako nevhodné vzhledem k malým objemům výroby (kusová výroba). Svařování vyžaduje kvalifikované zaměstnance a mnoho lidské práce, což výrobu komplikuje.

Protože je ventilátor určen do těžkých provozů, vnější části musí zůstat ocelové, avšak u vnitřních je možno uvažovat o změně konstrukčního materiálu. Na samotné kolo působí teploty od -20 °C do $+40\text{ °C}$, dopravovaným médiem je čistý vzduch a kolo rotuje rychlostí 3 000 otáček za minutu. Bylo proto rozhodnuto o použití plastu místo oceli.

Pro výrobu fyzického modelu byl zvolen průměr kola 200 mm v měřítku z důvodu snazší dostupnosti tiskáren s odpovídajícími rozměry tiskového prostoru. Zároveň společnost plánuje i zavedení výroby ventilátorů menších rozměrů, tudíž poznatky této práce mohou být využity dále.



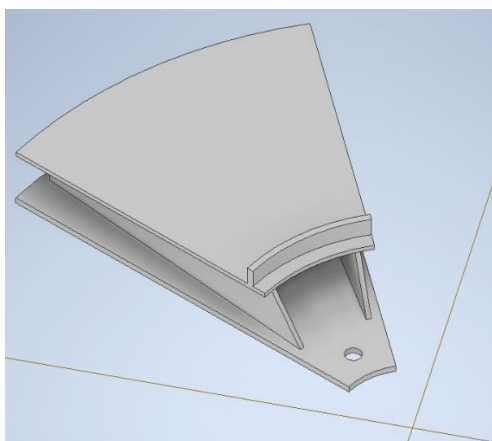
Obr. 3.1 Nezmenšený model kola pro tisk v programu Inventor, pohled shora.



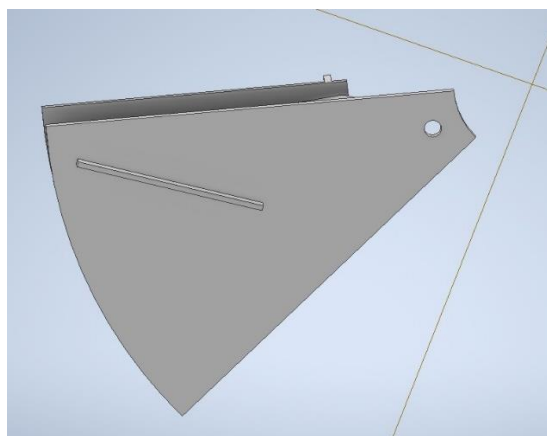
Obr. 3.2 Nezmenšený model kola pro tisk v programu Inventor, pohled zdola.

Pro splnění požadavku na oběžné kolo z jednoho kusu, tedy bez nutnosti spojování jednotlivých dílů, bylo nutno vytvořit podle výkresové dokumentace nový 3D model použitelný pro 3D tisk. Tento je zobrazen na Obr. 3.1 a Obr. 3.2. Protože jde o jeden kus, nebylo nutné vytvářet u jednotlivých pozic drážky a výstupky, kterými do sebe v případě svařovaného kola zapadají v místech svarů.

Jako druhý model byla vybrána reprezentativní výseč z kola v poměru 1:1 (Obr. 3.3 a Obr. 3.4) obsahující všechny pozice zobrazené na výkrese (Příloha 1).



Obr. 3.3 Výseč z kola v programu Inventor, pohled shora.



Obr. 3.4 Výseč z kola v programu Inventor, pohled zdola.

Pro všechny výtisky byl zvolen tiskový filament z materiálu PETG (polyethylentereftalát glykol) [34]. PET patří do skupiny polokrystalických termoplastů. Termoplasty se stávají poddajnými a tvárnými při překročení určité teploty a po ochlazení se vrací do pevného skupenství [35]. Polokrystalické termoplasty se vyznačují také dobrou chemickou odolností [35]. Glykol (konkrétně ethylenglykol) je přidáván do materiálu pro snížení křehkosti a zlepšení optických vlastností [34].

Tento materiál je vhodný pro výrobky určené jak pro vnitřní, tak venkovní použití do +80 °C (teplota jeho skelného přechodu) [34], což odpovídá i využití ventilátoru SFF 550 při maximální teplotě +40 °C [2]. Konkrétním použitým filamentem byl PETG od výrobce Devil Design o průměru struny 1,75 mm.

Jako materiál pro vyplavitelné podpory u posledního zkoušeného výtisku byl použit BVOH (butenediol vinylalkoholový kopolymer [36]). Podpory z tohoto materiálu jsou jednoduše odstranitelné ponořením modelu do teplé vody, v níž se rozpustí a zůstane tak jen samotný model. Pro PETG je přímo doporučován pro svou dobrou vzájemnou přilnavost, zároveň také není škodlivý vůči životnímu prostředí [37].

3.1 Výroba pomocí 3D tisku, tiskárna Original Prusa i3 MK3

První volbou pro výrobu vzorků pomocí 3D tisku byla tiskárna Original Prusa i3 MK3 dostupná ve strojLABu (konkrétní použitý stroj na Obr. 3.5, jehož parametry jsou uvedeny v Tab 3.1). Tato laboratoř na strojní fakultě VUT umožňuje studentům využití 3D tiskáren pro vlastní projekty.

Tab. 3.1 Základní technické specifikace tiskárny Original Prusa i3 MK3 [38].

Parametr	Hodnota
Velikost tiskového prostoru	250×210×210 mm
Výška vrstvy	0,05 - 0,35 mm
Průměr filamentu	1,75 mm
Průměr trysky	0,4 mm
Maximální rychlost posunu	200 mm.s ⁻¹
Maximální teplota trysky	300 °C
Maximální teplota podložky	120 °C

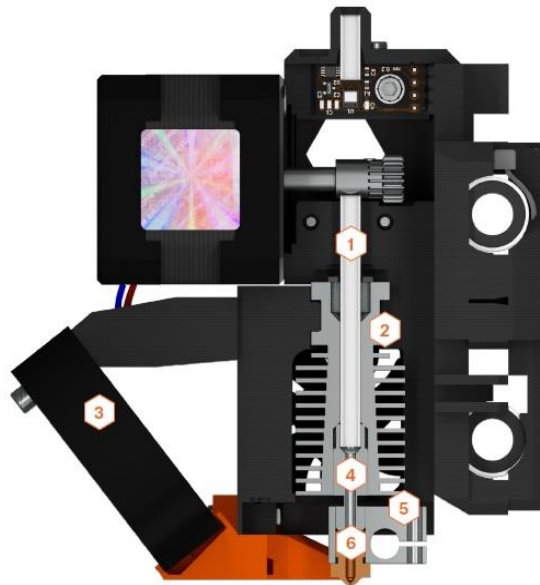


Obr. 3.5 Tiskárna Original Prusa i3 MK3 ve strojLABu.

Základní součásti FDM 3D tiskárny (zde jako příklad výše uvedená Original Prusa i3 MK3):

Extrudér

Jde o tiskovou hlavu složenou z několika součástí plnících různé funkce [16], zde zobrazenou na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Řez extrudérem FDM tiskárny [16].

Filament se dostává do extrudéru skrze teflonovou trubičku (1), zatím ještě v pevném skupenství při teplotě okolí. Poté se pohybuje skrze chladič (2), jenž odváděním tepla pomáhá zmenšit oblast mezi pevným a roztaveným materiálem. Účinnost chlazení je zvyšována ventilátorem (3). Dále filament prochází přes izolátor (4), jímž je trubička se zúžením, které omezuje průchod tepla do neroztaveného materiálu před ním. Následuje vyhřívací blok (5) (z materiálu s vysokou tepelnou vodivostí), který taví filament. Nakonec je roztavený materiál vytlačován skrze trysku (6). [16]

Vyhřívaná podložka



Obr. 3.7 Vyhřívaná podložka [16].

V závislosti na konstrukci tiskárny se může pohybovat v jedné, dvou, či třech osách společně s extrudérem. Zahřívání brání pokroucení tištěných dílů z materiálů s velkou tepelnou roztažností [16]. Na tuto podložku (zde na Obr. 3.7) bývá kladena odnímatelná tisková podložka, která je snadno vyměnitelná a zabraňuje poškození vyhřívané podložky.

Rám



Obr. 3.8 Rám tiskárny [16].

Nosná konstrukce tiskárny (tak jak je na Obr. 3.8), jež díky své tuhosti a pevnosti omezuje vibrace, čímž je umožněn rychlejší tisk a zvýšena jeho kvalita [16].

Krokové motory



Obr. 3.9 Krokový motor [16].

Krokové motory, jako ten z Obr. 3.9 pohybují tiskovou podložkou a extrudérem v tiskovém prostoru a také zajišťují přísun materiálu do extrudéru [16].

Řídicí jednotka



Obr. 3.10 Řídicí jednotka [16].

Ovládá funkci tiskárny – čte a zpracovává vstupní textový soubor, pomocí něhož ovládá pohyby krokových motorů a vyhřívání tiskové podložky a trysky [16]. Příkladem je řídicí jednotka z Obr. 3.10.

Pro tisk všech modelů byly nastaveny vybrané důležité parametry uvedené v Tab. 3.2 v programu PrusaSlicer verze 2.2.0 následovně:

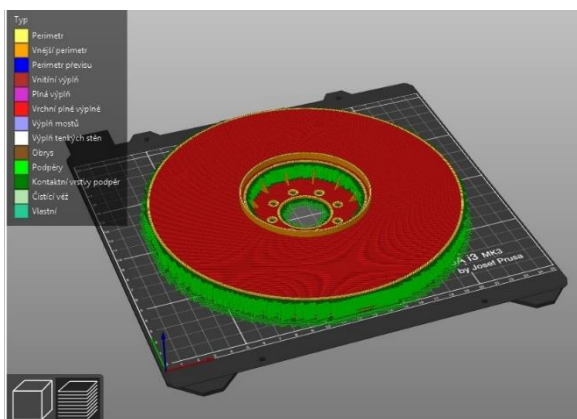
Tab. 3.2 Vybrané důležité parametry tisku.

Parametr	Hodnota
Teplota trysky	230 °C
Teplota podložky	80 °C
Výška vrstvy	0,1 mm
Hustota výplně	30 %
Počet perimetrů	4
Úhel výplně	-45°/+45°
Průměr trysky	0,4 mm
Okolní teplota	21 °C

Tyto parametry jsou častými proměnnými ovlivňujícími kvalitu výtisku, jejich hodnoty byly po konzultaci se společností zvoleny jako základní. Před případnou výrobou by je bylo možné upravit podle výstupů experimentů a potřeb firmy a možností konkrétní zvolené tiskárny.

3.1.1 Zmenšený model horizontálně

Jako první byla zvolena orientace výtisku naležato, u níž bylo nutné nastavit podpory i mezi oběma disky kola (jak je patrné z Obr. 3.11, kde zelená barva znázorňuje podpurný materiál), což zvýšilo drsnost povrchu na plochách v kontaktu s podporami. Rozdíl je patrný při srovnání s vertikálně tištěným výtiskem. Obr. 3.12, Obr. 3.13 a Obr. 3.14 ukazují výtisk přímo po odebrání z tiskárny.



Obr. 3.11 Model kola v programu PrusaSlicer.



Obr. 3.12 Horizontálně vtištěné kolo.



Obr. 3.13 Pohled na kolo s podporami shora.



Obr. 3.14 Horizontálně vtištěné kolo s podporami zdola.



Obr. 3.15 Očištěné kolo.



Obr. 3.16 Očištěné kolo zdola.

I když je povrch na plochách v kontaktu s podporami hrubší než těch bez kontaktu – což je patrné při srovnání Obr. 3.15 a Obr. 3.16, nedošlo na výtisku k žádným viditelným defektům, při porovnání se druhým výtiskem je zřejmé, že tato orientace je pro výrobu vhodnější.

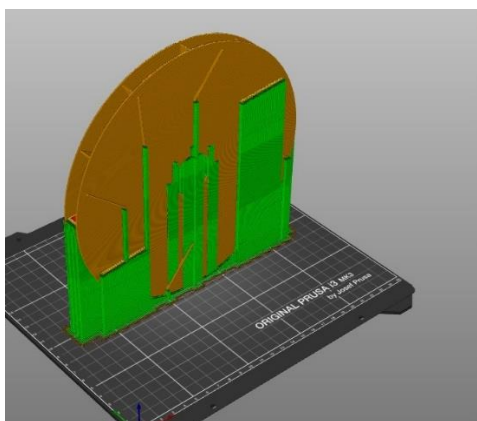
Tento model dokazuje, že je možné pomocí technologie FDM 3D tisku vyrobit v jednom kuse bez nutnosti úprav modelu součásti v přijatelné kvalitě.

3.1.2 Zmenšený model vertikálně

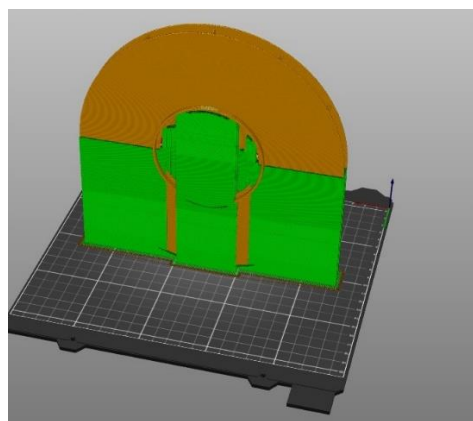
Druhou možností orientace výtisku byla orientace nastojato, při níž bylo využito menšího objemu podpor, avšak výsledný tiskový čas kvůli vyššímu počtu vrstev při zachování všech parametrů vzrostl. Ačkoliv je většina povrchu hladká, protože na rozdíl od prvního modelu je v kontaktu s podporami mnohem menší plocha, kvůli způsobu kladení vrstev na sebe a většímu celkovému počtu vrstev došlo k defektům, jež se na prvním výtisku neobjevily. Odstraňování podpurného materiálu bylo jednodušší než v prvním případě, opět díky menší kontaktní ploše s podporami.

Tvar kruhových otvorů je viditelně mírně zdeformovaný. Prvním důvodem je postupné nanášení vrstev na sebe, kdy každá následující vrstva vytváří mírný přesah vůči vrstvě předchozí (oproti vytvoření kruhového profilu při horizontální orientaci) a tím vytváření nerovnoměrného „hrbolatého povrchu“. Navíc jsou na straně orientované při tisku nahoru otvory zploštělé vlivem gravitace.

Jak je uvedeno ve [39], toto nastavení směru kladení vrstev snižuje pevnost a houževnatost výrobku ve směru kolmém na rovinu jejich nanášení. Pevnost a houževnatost jsou nejnižší, pokud jsou vlákna zatěžována kolmo na směr svého uložení a jak pevnost, tak houževnatost roste při šikmém zatížení vláken. Tudíž orientace kola při tištění horizontálně má nejnižší pevnost a houževnatost ve směru kolmém na rovinu kola, zatímco orientace vertikálně ji má nejnižší v rovině kola ve směru tisku. Zjednodušeně řečeno, na tiskárně Original Prusa i3 MK3 jsou výtisky pevnější ve směrech os X a Y, než ve směru osy Z [17].



Obr. 3.17 Model kola s podporami v programu PrusaSlicer.



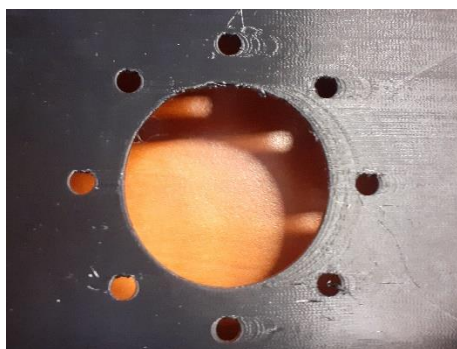
Obr. 3.18 Model kola s podporami v programu PrusaSlicer.



Obr. 3.19 Kolo vertikálně zdola.



Obr. 3.20 Kolo vertikálně shora.



Obr. 3.21 Vady tisku děr na spodní straně kola.



Obr. 3.22 Praskliny na horní straně kola.



Obr. 3.23 Hrubě vytištěná lamela a shluk materiálu na spodní straně kola.

Pro zjednodušení srovnání s horizontálně orientovaným výtiskem jsou i na vertikálně vytištěném kole korespondující strany označovány jako „horní“ a „spodní“.

Na Obr. 3.17 a Obr. 3.18 je znázorněno rozložení podpor při tisku, jejichž objem je menší než u předchozího výtisku. Obr. 3.19 a Obr. 3.20 ukazují výtisk po odebrání podpůrného materiálu, povrch je v místech kontaktu s ním drsnější než na zbytku výtisku. Deformace kruhových děr na středu kola je patrná z Obr. 3.21. Horní disk při chladnutí po vytištění na hranicích dvou vrstev praskl, což je patrné z Obr. 3.22. Na pomezí podpůrného materiálu, lamely na spodní straně kola a disku kola vznikl shluk materiálu, jenž narušuje strukturu výtisku, jak je vidět na Obr. 3.23.

3.1.3 Výseč z kola na tiskárně Original Prusa i3 MK3

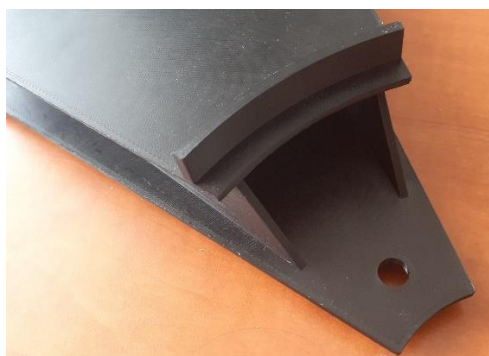
Posledním tištěným modelem na tiskárně Original Prusa i3 MK3 byla kruhová výseč z kola v měřítku 1:1 pro lepší představu o rozměrech a vlastnostech ventilátorového kola v reálné velikosti. Jeho výroba v jednom kuse na ní však není možná kvůli malému tiskovému prostoru. Tato kruhová výseč o úhlu 40° obsahuje všechny pozice vyskytující se na výkrese (Příloha 1).



Obr. 3.24 Výseč, celkový pohled shora.



Obr. 3.25 Výseč, celkový pohled zdola.



Obr. 3.26 Detail prvků u středu kola.



Obr. 3.27 Zkroucení horního okraje.

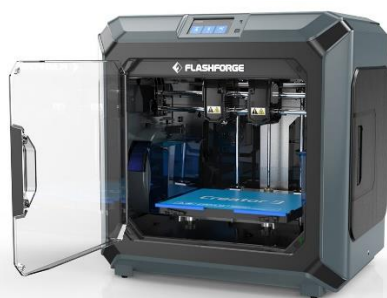
Jak je patrné z Obr. 3.24 a Obr. 3.27, část vnějšího okraje disku je zdeformovaná zřejmě kvůli přílišnému smrštění materiálu kvůli otevřenému tiskovému prostoru, přičemž při pokojové teplotě dochází k razantnímu ochlazení, které způsobuje teplotní deformace [16]. Povrch na plochách v kontaktu s podporami je hrubší než na stranách bez kontaktu. Zbytek výtisku odpovídá tvarově i rozměrově výrobní dokumentaci, jak je patrné z Obr. 3.25 a Obr. 3.26. Při porovnání s výtiskem na tiskárně Flash Forge Creator 3 se zakrytovaným tiskovým prostorem je evidentní, že pro vyištění celého kola z PETG je zakrytování vhodné.

3.2 Výroba pomocí 3D tisku, tiskárna Flash Forge Creator 3

Společnost má přístup k tiskárně Flash Forge Creator 3 (Obr. 3.28), jejíž hlavní výhodou je možnost tisku ze dvou materiálů najednou, a tudíž i s vyplavitelnými podporami. Čili bylo možné srovnat vlastnosti výtisků s podporami z jednotryskové a dvoutryskové tiskárny (navíc s uzavřenou komorou). Pro srovnání byl vybrán model ve tvaru výseče z kola v měřítku 1:1. Z logistických důvodů byl pracovníky společnosti použit filament bílé barvy. Vlastnosti této tiskárny jsou uvedeny v následující Tab. 3.3.

Tab. 3.3 Základní technické specifikace tiskárny Flash Forge Creator 3 [40].

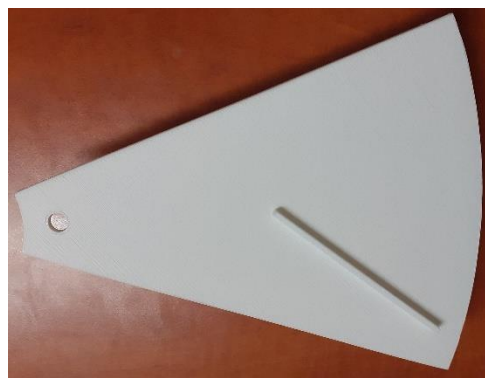
Parametr	Hodnota
Velikost tiskového prostoru	300×250×200 mm
Výška vrstvy	0,05 – 0,4 mm
Průměr filamentu	1,75 mm
Průměr trysky	0,4 mm
Maximální teplota trysky	300 °C
Maximální teplota podložky	120 °C
Zakrytovaný tiskový prostor	ANO



Obr. 3.28 Tiskárna Flash Forge Creator 3 [40].



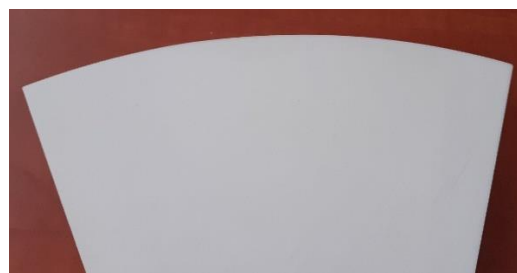
Obr. 3.29 Celkový pohled shora.



Obr. 3.30 Celkový pohled zdola.



Obr. 3.31 Pohled na prvky u středu kola.



Obr. 3.32 Vnější okraj.

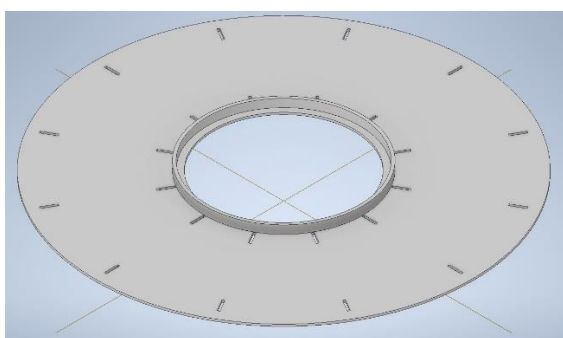
Z Obr. 3.29 a 3.32 je patrné, že v zakrytované komoře nedošlo ke zkroucení výtisku vlivem příliš rychlého ochlazení tak jako u otevřené tiskárny. Při srovnání s předchozím výtiskem je také patrný hladší povrch v místech kontaktu modelu s podporami. Vyplavitelné podpory, jejichž užití bylo umožněno dvěma tiskovými hlavami, se tudíž v tomto ohledu ukázaly jako výhodnější. Tento výtisk je bez vad a deformací a odpovídá počítačovému modelu, což je vidět na všech čtyřech uvedených fotografiích Obr. 3.29 – Obr. 3.32.

Po srovnání vzorových výtisků bylo rozhodnuto, že tiskárna zvažovaná pro zakoupení a výrobu oběžného kola by měla kromě dostatečně velkého tiskového prostoru mít i uzavřenou tiskovou komoru a možnost použití vyplavitelných podpor (ačkoliv nejsou zvažovány v ekonomickém hodnocení této práce, je vhodné o nich uvažovat jako o prvku,

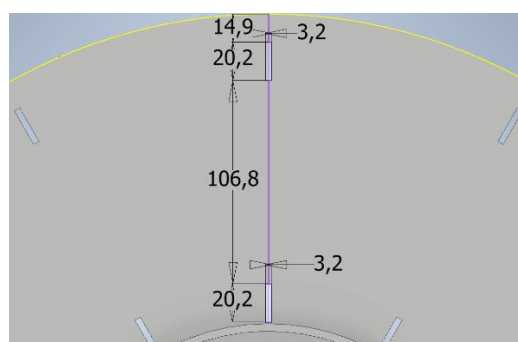
jenž by sice zvýšil náklady na materiál, avšak usnadnil a potenciálně i zkrátil fázi odstraňování podpurného materiálu po dokončení tisku).

3.3 Návrh výroby ze dvou dílů

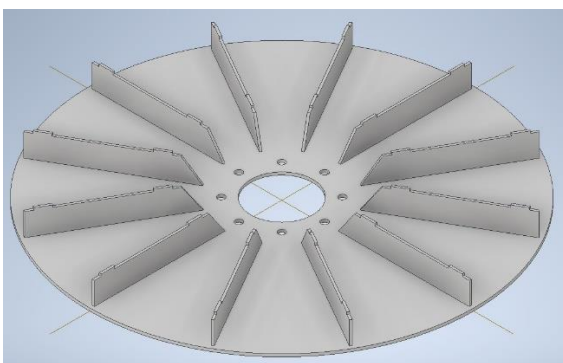
Další možnou variantou při výrobě v měřítku 1:1 by bylo rozdělit kolo na dvě části (Obr. 3.33 a Obr. 3.35). Na lamelách počítačového modelu byly vytvořeny výstupky podobné těm na původním výkrese (Obr. 3.36), které zapadají do odpovídajících otvorů vytvořených v horním disku kola (Obr. 3.34). Následně je možno takto vyrobené díly slepit, čímž je eliminována nutnost využití podpor mezi disky kola a dochází k úspoře materiálu – na kolo ze dvou dílů je celkem potřeba 2 702 gramů a zkrácení celkového tiskového času – na 49,73 hodin, oproti případu tištění v jednom kuse – 4 134 gramů a 73,37 hodin (pro dále vybranou tiskárnu).



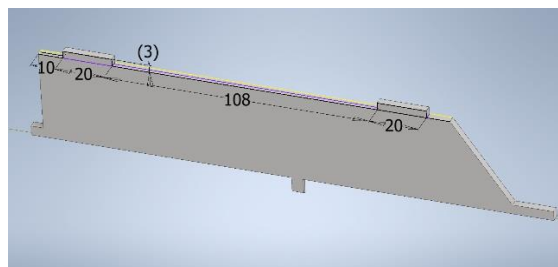
Obr. 3.33 Celkový pohled na horní část kola.



Obr. 3.34 Rozměry přidaných prvků na horní části.



Obr. 3.35 Celkový pohled na spodní část kola.



Obr. 3.36 Rozměry přidaných prvků na spodní části.

3.3.1 Varianty lepidel

Existuje několik možných typů lepidel vhodných pro spojování dílů vyrobených z PETG. V případě zvolení varianty kola z více dílů by bylo nutno otestovat, zda a který typ by byl pro ventilátorové kolo nejvhodnější. Vhodnými se jeví zejména epoxidy.

1. Polyuretan

Polyuretanová lepidla jsou všestranná a schopná spojovat téměř jakékoliv materiály. Mnohá z nich jsou také voděodolná, což zvyšuje jejich potenciál pro venkovní použití. Další výhodou je průměrná doba schnutí, jež v případě potřeby umožňuje upravit polohu slepovaných dílů před zatuhnutím lepidla. Nevýhodou může být relativně vyšší vrstva potřebná pro slepení. [41]

2. Kyanoakrylát

Kyanoakrylátová lepidla mají krátkou dobu tuhnutí, s použitím urychlovače v řádu sekund, tudíž sestavování lepených dílů musí být rychlé a přesné. Jsou dostupná v kapalně formě a ve formě gelu. Kapalná forma je vhodná pro použití tam, kde je potřebná vysoká přesnost, nicméně je nutno spojit oba slepované kusy rychle, kvůli krátké době tuhnutí. Kyanoakrylátová lepidla v gelové podobě jsou výhodnější pro vyplňování prasklin. [41]

Tento typ lepidel však není tak odolný vůči mechanickému poškození kvůli své křehkosti a je tudíž vhodnější pro estetické použití [41], což není kompatibilní s funkční částí jako je ta rozebíraná v této práci.

3. Silikonová pojiva

Silikonová lepidla tvoří pevné spoje a jejich použití je jednoduché, mnohá z nich tvrdnou několik hodin. Tak jako u polyuretanů je však nutno použít relativně tlustou vrstvu lepidla pro správné spojené dílů. [41]

Stejně jako u polyuretanů ani u silikonů není kvůli potřebě dodržování přesnosti rozměrů vhodná vyšší vrstva lepidla nutná ke správnému spojení dílů.

4. Epoxidová lepidla

Epoxidová lepidla dobře drží ve spojení s mnohými materiály a jejich vlastnosti záleží na konkrétním chemickém složení dané směsi. Důležitými požadovanými vlastnostmi, které umožňují rozmanité použití těchto směsí jsou chemická, teplotní a mechanická odolnost, výborná adheze, voděodolnost a elektroizolační vlastnosti. [41; 42]

Epoxidové pryskyřice jsou vytvářeny pomocí polymerizace směsi dvou složek – pryskyřice a tvrdidla. Vytvrzování je zahájeno smísením pryskyřice s katalyzátorem. Probíhá tak, že molekulární řetězce reagují na chemicky aktivních místech, čímž vzniká exotermická reakce. Kovalentní vazby mezi epoxidovými skupinami pryskyřice a aminoskupinami tvrdidla (katalyzátoru), které vznikají jejich kombinací, umožňují síťování polymeru, a tudíž určují tuhost a pevnost epoxidu. [42]

Sledování podmínek vytvrzování skrze teplotu a výběr pryskyřice a tvrdidla umožňuje měnit mechanické vlastnosti a teplotní, elektrickou a chemickou odolnost. Epoxidová lepidla mají tudíž širokou škálu využití v různých provozních podmínkách. [42]

Nejčastěji jsou epoxidová lepidla k dispozici v jednosložkové nebo dvousložkové formě. Jednosložková lepidla jsou většinou vytvrzována při teplotách okolo 120 – 150 °C, které zajišťují vysokou pevnost, skvělou přilnavost ke kovům a chemickou odolnost i odolnost při použití ve venkovních podmínkách. [42]

Jednosložková lepidla jsou předkatalyzována a k vytvrzení jim stačí pouze dodání tepla, což zlepšuje účinnost a snižuje šanci na nežádoucí uvěznění vzduchových bublin v lepidle. Celkově je jejich rychlost vytvrzování vyšší než u dvousložkových lepidel. [42]

Dvousložková epoxidová lepidla se liší tím, že katalyzační reakce probíhá za běžné teploty okolí a může být urychlována teplem. Dodávání tepla také

umocňuje dodatečné síťování polymeru a tím vylepšení vlastností spoje. Dvousložková lepidla jsou vhodná pro spojování většiny povrchů. Jsou vysoce stabilní, protože vydrží dlouhodobé konstantní zatížení i chemické vlivy prostředí. [42]

3.4 Návrh pořízení nové tiskárny pro výrobu kola

Vytištění vzorků ukázalo, že oběžné kolo pomocí stávající technologie FDM 3D tisku vyrobit lze. Protože však jeho velikost neumožňuje výrobu v jednom kuse na tiskárnách dostupných studentům, bylo navrženo pro účely srovnání zvážit jednu z velkých průmyslových tiskáren. Životnost tiskárny byla odhadnuta na 1 rok.

3.4.1 Tiskárna Modix BIG-60 V3

První z cenově dostupnějších (v tisících USD namísto běžně o řád vyšších cen [43]) zvažovaných FDM tiskáren, na nichž je možné vyrábět kolo v měřítku 1:1 v jednom kuse, tedy celý průměr 560 mm, je tiskárna Modix BIG-60 V3 od stejnojmenného izraelského výrobce Modix vydaná v roce 2020 (zde na Obr. 3.37).



Obr. 3.37 Zakrytovaná tiskárna Modix BIG-60 V3 [44].

Hlavní vlastnosti [45]:

- tiskový prostor o rozměrech 600×600×600 mm s možností zakrytování,
- možnost tisku dvěma tiskovými hlavami,
- tisková podložka vyhřívána až na 120 °C s možností uzpůsobení vyhřívání podle velikosti tištěného objektu a její povrch potažený PEI (Polyeterimidem, vysoce tepelně odolným amorfním polymerem [46]) pro zajištění přilnavosti výtisku a jeho snazší odebrání,
- automatické 100 bodové vyrovnávání tiskové podložky,
- senzor pro detekci docházejícího filamentu upozorňující uživatele na docházející materiál na cívce,
- počáteční cena 3 700 USD.

3.4.2 Tiskárna CreatBot D600 Pro

Druhou zvažovanou možností ve srovnatelné cenové kategorii je tiskárna CreatBot D600 Pro (Obr. 3.38), čínského výrobce CreatBot vydaná v roce 2018, taktéž umožňující výrobu kola v jednom kuse.



Obr. 3.38 Tiskárna CreatBot D600 Pro [47].

Hlavní vlastnosti [48]:

- zakrytý tiskový prostor o rozměrech 600×600×600 mm,
- dvojitý extrudér s tryskami, jež je možno zahřát až na 420 °C,
- vyhřev tiskového prostoru na 70 °C,
- vyhřívání zásobník filamentu na 45 až 65 °C,
- počáteční cena 9 500 USD.

3.5 Navrhovaný technologický postup pro 3D tisk

Pro výrobu pomocí 3D tisku byl navržen nový technologický postup uvedený jako Tab. 3.4. Při srovnání s původním postupem je patrné, že pro získání výrobku je potřeba udělat méně kroků a celkově zahrnuje méně lidské práce. Dále je také pro jeho uskutečnění potřeba, aby zaměstnanec prošel pouze běžným školením a nemusí být certifikovaným odborníkem, tak jako je tomu v prvním případě. Časy uvedené v Tab. 3.4 byly odhadnuty na základě zkušeností s jinými výtisky, konzultací se zástupci společnosti SOLVITEC-PRO s.r.o., popř. extrapolovány z časů změřených při opracování zkušebních výtisků z kapitoly 3, tiskový čas a hmotnosti materiálu byly získány ze sliceru Simplify3D, jenž je doporučeným programem pro práci se společností zvolenou tiskárnou Modix BIG-60 V3.

Tak jako je uvedeno v Příloze 4, operace 10 – Kontrola stavu a funkčnosti tiskárny před tiskem, kontrola a zavedení materiálu zabere 0,357 hodiny, což při společnosti zvolené hodinové sazbě (jednotné pro všechny operace kromě operace 30) 260 Kč činí 92,82 Kč. Operace 20 – Kontrola správného nanesení první vrstvy trvá 3 hodiny a její cena je 780 Kč. Operace 30 – Tisk, má hodinovou sazbu 23,10 Kč získanou při konzultaci se společností z údajů uvedených v Příloze 4 – cena 3 700 USD při kurzu 22,5, 300 dní tisku za rok, 12 hodin denně a odpisech na jeden rok, trvá 73,37 hodiny a její cena tudíž je 1 694,85 Kč. Operace 40 – Pravidelná kontrola během tisku 1× za hodinu v délce 1 minuta činí 317,20 Kč. Operace 50 – Odebrání výtisku trvá 0,17 hodiny a její cena činí 44,20 Kč. Operace 60 – Očištění tiskové podložky zabírá 0,25 hodiny a stojí 65 Kč. Operace 70 – Odstranění podpůrného materiálu trvá 3,34 hodiny a její cena činí 868,4 Kč. Operace 80 – Kontrola rozměrů výtisku – 3D skenování trvá 0,5 hodiny a její cena je 130 Kč. Operace 90 – Kontrola rozměrů výtisku – porovnání v softwaru zabere 0,25 hodiny a její cena je 65 Kč.

Pracovník nejprve zkontroluje, zda je tiskárna funkční a bez závad, popř. zajistí nápravu jakýchkoliv problémů bránících správné funkci. Často je také potřeba odmastit tiskovou podložku pro lepší přilnavost tištěného materiálu [16].

Použití jiného materiálu, než pro jaký je tiskárna aktuálně nastavená, může vést k závažným poruchám, proto je třeba vizuálně srovnat typ materiálu, jenž bývá obvykle vyznačen na cívce s filamentem, a materiál uvedený v tiskovém souboru.

Po zavedení filamentu do tiskové hlavy je nutno dbát na správné nanesení první vrstvy materiálu. Selhání při tištění první vrstvy bylo hlavní příčinou neúspěšného tisku při výrobě zkušebních modelů.

Samotný průběh tisku musí být kontrolován, aby v případě poruchy tiskárny či defektu výtisku nedošlo k jejímu dalšímu poškození. Typickým příkladem může být vznik tzv. „špaget“, kdy dojde k oddělení výtisku od podložky, následnému vzniku klubka vláken materiálu a poškození výtisku [49].

Jakmile je tisk dokončen, pracovník vyčká, až teplota výtisku a podložky klesne na přijatelnou úroveň, a vyjme jej z tiskového prostoru. Očištění tiskové podložky bezprostředně poté umožní další případnou práci tiskárny již během provádění zbylých položek technologického postupu.

Protože je výrobek z jediného materiálu, jsou podpory odstraněny pomocí ručních nástrojů. Po odstranění podpůrného materiálu je dosaženo konečné hmotnosti výrobku – 2,275 kg (hodnota získaná ze sliceru).

První fází kontroly rozměrů je naskenování výrobku do počítače pomocí 3D skeneru, společnost plánuje toto v kooperaci, při níž má být využit skener Leica RTC360 (Obr. 3.39). Nicméně, jak uvádí výrobce, tento skener je primárně určen pro skenování prostředí a lokalit – např. celého staveniště, jeskyní či místa dopravní nehody, čemuž odpovídají i jeho vlastnosti, uvedené v Tab. 3.5 [50].



Obr. 3.39 3D skener Leica RTC360 [51].

Tab. 3.5 Technické parametry 3D skeneru [52].

Parametr	Hodnota
Technologie	Laser
Max. rozlišení	3 mm na 10 m
Hmotnost	5,35 kg
Rychlost snímání	2.10 ⁶ bodů za sekundu
Rozměry	120×240×230 mm
Úhlová přesnost	18"
Přesnost	1,9 mm na vzdálenost 10 m
Pracovní vzdálenost	0,5 m – 130 m

Skenery využívající laser nebo strukturované světlo (laserový skener promítá na výrobek světelné čáry, skener se strukturovaným světlem světelnou mřížku) s přesností 0,1 mm či lepší jsou vhodné pro měření výtisků 3D tiskáren. Kromě přesnosti, týkající se rozdílu mezi pozicemi naměřených bodů a jejich skutečnou polohou, se skenery liší také v rozlišení, které určuje vzdálenost mezi zachycovanými body. Všeobecně má nejlepší přesnost a rozlišení strukturované světlo, v obou případech mírně překonávající laserové systémy. Pro některé umělecké aplikace, kde není důležitá celková přesnost, může být vhodná i technologie fotogrammetrie spočívající ve využití fotografií, ale to není případ pro tuto práci. [53]

Skenery se také liší v objemu, jenž je možné daným přístrojem zachytit, cena roste s možností zachycení vyššího objemu, je proto potřeba zvažovat, jak velké objemy je nutno skenovat. Ruční skenery jsou oproti stolním/fixním schopné naskenovat i obtížně dostupná místa a objekty, jež se do stolního skeneru nevejdou, nicméně jejich nevýhodou může být závislost na přesných pohybech pracovníka. Mnohé stolní skenery využívají otočné stoly, což v kombinaci s možností otáčení skenovaného předmětu ve více osách umožňuje zachytit i hluboké dutiny či části mezi žebry, které by při pohledu z jednoho úhlu nebylo možné zachytit. [53]

Kromě již zmíněné přesnosti, rozlišení a toho, zda je skener přenosný, je při výběru nutno zvážit i rychlost skenování, složitost daného skeneru, velikost součástí, prostředí, v němž je zařízení používáno, pořizovací cenu a také software použitý ke zpracování naměřených dat. [54]

Podle rozhodovacích kritérií pro výběr 3D skeneru uvedených v [54] a [53] bych tudíž doporučil zvážit využití skeneru s následujícími vlastnostmi: strukturované světlo jakožto základní technologie kvůli jeho vysoké přesnosti, provedení vhodné pro ruční použití, aby bylo možno skenovat ze všech potřebných úhlů, přesnost alespoň 0,1 mm, rozlišení alespoň 0,2 mm. Orientačními příklady mohou být skenery jako Artec Eva (na Obr. 3.40 s výčtem vlastností v Tab. 3.6), či Shining 3D EinScan HX (na Obr. 3.41 s výčtem vlastností v Tab. 3.7).



Obr. 3.40 3D skener Artec Eva [55].

Tab. 3.6 Vybrané vlastnosti skeneru Artec Eva [55].

Parametr	Hodnota
Technologie	strukturované světlo
Max. rozlišení	0,2 mm
Hmotnost	0,85 kg
Rychlost snímání	18.10 ⁶ bodů za sekundu
Rozměry	262×158×63 mm
Přesnost	0,1 mm
Pracovní vzdálenost	0,4 m – 1 m



Obr. 3.41 3D skener Shining 3D EinScan HX [56].

Tab. 3.7 Vybrané vlastnosti skeneru Shining 3D EinScan HX [56].

Parametr	Hodnota
Technologie	LED + laser
Max. rozlišení	0,05 mm
Hmotnost	0,71 kg
Rychlost snímání	$1,2 \cdot 10^6$ nebo $0,48 \cdot 10^6$ bodů za sekundu
Rozměry	108×110×237 mm
Přesnost	0,04 mm
Pracovní vzdálenost	0,47 m

Následně je kontrola rozměrů získaných skenováním vyhodnocena v příslušném programu porovnávajícím naskenovaný výrobek s původním modelem z CAD softwaru. Pokud by měření skenerem nebylo dostupné, či uznáno jako nevhodné, je možno výrobek změřit klasickými ručními metodami.

Na rozdíl od svařování v celém procesu výroby pomocí navrhované technologie 3D tisku jsou potřeba jeden až dva pracovníci příslušně proškolení na práci s tiskárnou a skenerem.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

4.1 Srovnání mechanických vlastností svařovaného a tištěného kola

Vlastnostmi výrobků vytvořených pomocí obou technologií se dopodrobna zabývají kapitoly 2 a 3, nicméně zde je jejich shrnutí v Tab. 4.1 a následném komentáři.

Tab. 4.1 Shrnutí již popsaných vlastností.

Vlastnost	Svařované	Tištěné
Funkce	stejná	
Rozměry	stejně	
Technologie výroby	MIG/MAG	FDM
Hmotnost	15 kg	2,275 kg
Antikorozní ochrana	ano	ne
Počet dílčích částí	23	1
Materiál	S355J0	PETG
Úhly mezi pozicemi	zaoblené	ostré
Struktura povrchu	hladká	hrubá
Potřeba výkresové dokumentace	ano	ne
Zařízení potřebná pro výrobu	3	1
Potřeba certifikovaných pracovníků	ano	ne
Potřeba pracovníků	5 až 6	1 až 2
Výroba regulována normami	ano	ne

Celou podstatou této práce je změna výrobní technologie ze svařování plechových dílů na FDM 3D tisk, z čehož vyplývají i hlavní rozdíly a podobnosti takto vytvořených výrobků.

V případě vytvoření kola tak, jak je navrženo v předchozích kapitolách, by jeho funkce měla zůstat nezměněna, tj. oběžné kolo ventilátoru, jež je zdrojem čistého tlakového vzduchu, v teplotách od -20 °C do +40 °C při 3 000 otáčkách za minutu. Taktéž jeho celkové rozměry zůstávají stejné.

Rozdíly přesto existují:

Svařované kolo

Svařované kolo je tvořeno ze 23 dílčích částí z plechu (s příslušnými výstupky a otvory) z oceli S355J0, z čehož vyplývá i jeho hmotnost 15 kg, nutnost nanesení antikorozního nátěru a tvar hran tam, kde se jednotlivé díly stýkají. Oproti tištěnému kolu je struktura povrchu hladká. Kromě svářečky je pro vytvoření kola tímto způsobem nutno materiál zpracovat na dvou dalších strojích – laserovém dělicím stroji a ohýbačce plechu, což od pracovníků vyžaduje zručnost a znalosti práce s nimi. Samotné svařování též vyžaduje certifikovaného zaměstnance. Dohromady se tedy na procesu výroby jednoho

kola podílí 5 až 6 zaměstnanců společnosti. Svařování je regulováno normami a pro výrobu je nutná výkresová dokumentace.

Tištěné kolo

Pokud vycházíme z původních požadavků společnosti, kolo vytvořené pomocí FDM 3D tisku je jedním kusem, jenž po vytištění váží 4 134 gramů a po odstranění podpůrného materiálu 2 275 gramů. PETG nepodléhá rzi, tudíž protikorozní nátěr není potřeba. Úhly všech hran jsou ostré, protože materiál je nanášen přesně podle 3D modelu bez dalšího natahování a následného tuhnutí po prvotním vytištění. Jelikož je výrobek tvořen z vláken, jeho povrch je hrubší než u ocelového protějšku. Pro vytvoření kola tímto způsobem stačí 3D model bez další výkresové dokumentace, celý výrobek je vytvořen jednou tiskárnou, jejíž obsluhu zvládne jeden či dva proškolení zaměstnanci (bez nutnosti speciální certifikace). 3D tisk u nás zatím není regulován normami.

4.2 Cenová kalkulace svařovaného kola

Cenová kalkulace původního kola (Příloha 3) stanovuje ceny za materiál, kooperaci, práci dílny a projekční práce.

Nejprve jsou uvedeny náklady na materiál – celkem 15 kg plechu při ceně 29 Kč za kilogram, cena použitého materiálu je tedy 435 Kč. K ní je přičtena cena barvy – 280 Kč a odpadu, jehož jsou celkem 3 kg v ceně celkem 63 Kč. Cena materiálu tedy v součtu činí 778 Kč. Režie správní při sazbě 1,2 % odpovídá částce 9,34 Kč a režie obchodní při 4,0 % částce 31,12 Kč.

Kooperace zahrnuje samotné vyvažování ve společnosti Z&Z Dřevohostice s.r.o. v ceně 900 Kč za kus a dopravu na místo a zpět za 500 Kč. Cena tedy činí 1 400 Kč a přidává se k ní 10% správní režie ve výši 140 Kč a 4% obchodní režie ve výši 56 Kč.

Třetí část specifikuje práci dílny. Příprava k dělení materiálu při hodinové sazbě 280 Kč vychází na 70 Kč. Samotný řez laserem při hodinové sazbě 937 Kč pak vychází na 46,85 Kč. Následují položky s hodinovou sazbou 320 Kč – příprava na zámečnické práce v ceně 185,60 Kč, zámečnické práce samotné vycházející na 54,4 Kč, kontrola v ceně 80 Kč a povrchová úprava za 2 240 Kč. Celkem tudíž práce dílny vychází na 2 676,85 Kč. Režie počítané mimo tuto cenu pak zahrnují 10% správní režii ve výši 267,69 Kč, 4% obchodní režii 107,07 Kč a 110% režii střediskovou v ceně 2 944,54 Kč.

I když je uvedena sazba za projekční práce za vypracování výkresové dokumentace ve výši 110 Kč za hodinu, tato je nulová, protože veškerá výkresová dokumentace již existuje po řadu let v nezměněné podobě.

Celkové náklady tvoří 4 854,85 Kč a režie celkem 2 944,54 Kč, při nulovém zisku je tedy celková cena výroby oběžného kola původní technologií 8 410,60 Kč.

4.3 Cenová kalkulace tištěného kola

Po konzultaci se společností byla zvolena tiskárna Modix BIG-60 V3 jakožto model odpovídající potřebám výroby. Všechny náklady byly vypočítány pro výrobu jednoho kola, tak jako je tomu v kalkulaci pro kovové kolo.

V první části cenové kalkulace (Příloha 4) byly opět zvažovány náklady na materiál. Při hmotnosti spotřebovaného materiálu (včetně podpůrného) 4 143 gramů a ceně 650 Kč za kilogram [57] je celková cena za materiál 2 692,95 Kč. Zásobovací režie 1,2 % je zde 32,32 Kč, obchodní režie 4 % pak 107,72 Kč.

Další položkou jsou náklady na kooperaci při kontrole rozměrů se společností CEMEL, s.r.o. poskytující měření pomocí 3D skeneru a následného srovnání výrobku se 3D modelem, čímž je eliminována nutnost klasického srovnávání ručně naměřených hodnot s výkresy. Cena kontroly je 800 Kč za kus. K té se dále přidává 10% správní režie ve výši 80 Kč a 4% obchodní režie ve výši 32 Kč.

Ve třetí části je hodnocena práce dílny. Samotný 3D tisk zabere, podle výstupů ze sliceru Simplify3D, doporučeného výrobcem tiskáren Modix [58], 73,37 hodin, což při hodinové sazbě 23,10 Kč odpovídá ceně 1 694,85 Kč. Další operace jako kontrola a stavu a funkčnosti tiskárny před tiskem, kontrola typu materiálu, zavedení filamentu, kontrola správného nanesení první vrstvy, pravidelná kontrola během tisku 1× za hodinu v délce 1 minuta, odebrání výtisku, očištění tiskové podložky, odstranění podpůrného materiálu a kontrola rozměrů výtisku při jednotné hodinové sazbě 260 Kč a celkovém počtu 9,087 hodin, dávají dohromady cenu 2 362,62 Kč. Celkem je tedy cena dílenských operací 4 057,47 Kč. Režie v této části sestávají z 10% správní režie 405,75 Kč, 4% obchodní režie 162,30 Kč a 110% střediskové režie 4 463,21 Kč.

Sazba 23,10 Kč za hodinu tisku vychází z následujících předpokladů:

- odpisy jsou počítány na jeden rok,
- pořizovací cena je 3 700 USD při kurzu Kč/USD k 5.4.2021 22,5 Kč/USD, čili 83 250 Kč,
- průměrná uvažovaná denní doba tisku je 12 hodin po 300 dní v roce.

Středisková režie zahrnuje elektrickou energii, pronájem místnosti, vytápění místnosti, spotřební materiál a opravy.

Čtvrtá část běžně obsahuje ceny projekční práce, nicméně je uvažován tisk na základě již existující výrobní dokumentace – 3D modelu v programu Inventor. Protože není nutné vytvářet novou, jsou náklady na dokumentaci nulové.

Celkové náklady na výrobu kola jsou po sečtení všech dílčích nákladových položek 7 550,42 Kč při nulovém zisku. Režie správní celkem činí 485,75 Kč, zásobovací 32,32 Kč, obchodní 302,02 Kč a středisková 4 463,21 Kč. Celková cena tištěného kola tedy vychází na 12 833,71 Kč.

5 DOPORUČENÍ DO BUDOUCNA

Technologie 3D tisku prochází rychlým vývojem, doporučuji tedy sledovat trh a počkat na dobu, kdy bude pořizovací cena výhodná pro zakoupení 3D tiskárny a její zavedení do výroby. Protože se však cena výroby neliší řádově, je možné uvažovat o pořízení tiskárny menších rozměrů, jež je levnější než tiskárny velkoformátové, a o tisku menších součástí, u nichž by byl cenový poměr příznivější. Ze sortimentu společnosti SOLVITEC-PRO s.r.o. jsou to například nahlížecí kontrolní otvory, kryty rotačních částí strojů či clony a regulační členy rozvodů vzduchu.

Pokud by bylo cílem zmenšit podíl lidské práce a počtu strojů ve výrobě, z hlediska lidských zdrojů a úspory místa vychází výhodněji 3D tisk. S přihlédnutím k tomuto faktu by tedy bylo možné uvažovat o přechodu na novou technologii.

Před finálním rozhodnutím o přechodu na 3D tisk by bylo vhodné si nechat vyrobit funkční prototyp u některé ze společností zabývajících se zakázkovou výrobou velkoformátových výtisků a vyzkoušet, zda kolo vydrží provozní podmínky jako součást sestavy ventilátoru. Při případné výrobě menších modelů by bylo potřeba jejich mechanické testování a práce s těmito poznatky by poté mohla posloužit i pro optimalizaci tisku ventilátorového kola o průměru 560 mm.

Co se týče kontroly rozměrů výrobku, dokud nebude k dispozici 3D skener patřičných vlastností, jak je popsáno na konci kapitoly 3, doporučuji provádět měření klasickými ručními metodami a momentálně vlastněný skener nevyužívat kvůli jeho nevhodným vlastnostem a primárnímu určení pro skenování větších objektů či budov. I pokročilé skenery mohou mít problémy při skenování hlubokých děr podobných těm mezi disky kola, tudíž by bylo vhodné statisícovou investici do nového skeneru pečlivě zvážit nezávisle na této práci.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout novou technologii výroby pro oběžné kolo ventilátoru SFF 550 ve spolupráci s výrobním podnikem SOLVITEC-PRO s.r.o.

V práci byl zohledněn zájem výrobního podniku o technologii 3D tisku jako možnosti pro nahrazení původní výrobní technologie svařování. Jakožto nejdostupnější byl zvolen typ FDM. Byla revidována původní technologie svařování používaná při výrobě.

Dále byly vytištěny vzorové výtisky – celého zmenšeného oběžného kola v měřítku a výseče z kola skutečné velikosti obsahující všechny pozice zobrazené na výkrese, z důvodu zjištění proveditelnosti výroby touto technologií. Poté, co bylo zjištěno, že výroba je možná, byly společnosti navrženy možné varianty cenově nejdostupnějších tiskáren schopných vytvořit oběžné kolo v jednom kuse, tak jak bylo stanoveno dříve. Z následné cenové kalkulace případné výroby oběžného kola pomocí FDM 3D tisku vybranou tiskárnou bylo zjištěno, že výroba původní technologií je levnější.

Po srovnání operací původního technologického postupu a postupu navrženého pro technologii FDM 3D tisku je patrné, že původní výrobní proces je, co se týče množství operací a jejich náročnosti na lidskou práci, složitější než postup využívající FDM 3D tisk. Nicméně z cenových kalkulací vyplývá, že zavedení nové výroby i při koupi relativně levné tiskárny stále vychází jako výhodnější původní technologie svařování. Hlavním faktorem zvyšujícím cenu je velikost oběžného kola, bylo by proto cenově výhodnější věnovat se menším výrobkům.

Technologie 3D tisku není regulována normami tak, jako je tomu u svařování, protože v této oblasti stále dochází k velmi rychlému vývoji, což znamená nevýhodu v oblasti dokazování dodržení parametrů požadovaných zákazníkem a standardizace výroby.

Tato práce je podle požadavku společnosti zaměřená na zjištění, zda je vůbec možné danou součást vyrobit pomocí FDM 3D tisku a pokud ano, v jaká by byla cena. Obě tyto otázky byly zodpovězeny. Zjišťování konkrétních mechanických vlastností výrobku a testování prototypu je další fází výzkumu, který je možno na tuto práci navázat v případě, že se společnost rozhodne postupovat dále k převádění některých výrobků na tištěné.

Protože již ve společnosti probíhá postupné převádění starší 2D výkresové dokumentace do 3D, bylo by vhodnější zaměřit se na zkoušení výroby pomocí 3D tisku nejprve u menších výrobků a až poté se věnovat potenciálnímu přechodu na kusy velkoformátové.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Marketingová studie. Přerov, 2021, 9 s.*
- [2] TED-VENT-2014-Z0301-navod-cz: Jednostupňový radiální ventilátor. Přerov, 2014.
- [3] 3D tisk. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk
- [4] GIBSON, I., D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* [online]. New York: Springer, 2010 [cit. 2021-06-05]. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [5] The 7 Categories of Additive Manufacturing. Loughborough University [online]. Loughborough: Loughborough University, 2021 [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [6] KUMAR, L., P. PANDEY a D. WIMPENNY, ed. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies* [online]. Singapore: Springer, 2019 [cit. 2021-07-01]. ISBN 978-981-13-0304-3.
- [7] Introduction to SLA 3D printing. In: HUBS [online]. 3D HUBS, 2021 [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
- [8] Thermosets. Polymers International Australia [online]. Braeside: Polymers International Australia, 2014 [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: <https://polymers.com.au/thermosets/>
- [9] Schematic of an SLA 3D printer. In: HUBS [online]. 3D HUBS, 2021 [cit. 2021-07-20]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
- [10] How to design parts for SLS 3D printing. In: HUBS [online]. 3D HUBS, 2021 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sls-3d-printing/>
- [11] A schematic showing the general layout of an SLS machine. In: HUBS [online]. 3D HUBS, 2021 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sls-3d-printing/>
- [12] PETRENEC, J. Možnosti replikace rozstříkovacích trysek metodou 3D tisku. Brno, 2018, 56 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [13] About Additive Manufacturing: Material Jetting. Loughborough University [online]. Loughborough: *Loughborough University*, 2021 [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
- [14] Introduction to material jetting 3D printing: What is Material Jetting?. HUBS [online]. HUBS, 2021 [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [15] Schematic of a Material Jetting 3D printer. In: HUBS [online]. 3D HUBS, 2021 [cit. 2021-07-20]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [16] PRŮŠA, Josef. *Základy 3D tisku* [online]. 1. Praha: Prusa Research a.s., 2019 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

- [17] Introduction to FDM 3D printing. 3D HUBS [online]. 3D HUBS B.V., 2021 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#work>
- [18] Extrusion deposition: Fused Deposition Modeling (FDM). In: Additive3d.com [online]. additive3d.com, 2016 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://additive3d.com/wp-content/uploads/2016/08/Fused-Deposition-Modeling.jpg>
- [19] Schematic of a typical FDM printer. In: HUBS [online]. 3D HUBS, 2021 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [20] 3 Additive Manufacturing technologies to watch out for in 2017. In: XTREME ENGINEERING [online]. 3D Hubs, 2016 [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://medium.com/extreme-engineering/3-additive-manufacturing-technologies-to-watch-out-for-in-2017-7226d310ca56>
- [21] ČSN EN 1090-2. Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce. 1. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [22] ČSN EN ISO 17637. Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [23] EN 10025-2 S355J0 high strength structural steel plate. Steelspecs [online]. 2013 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: http://www.steelspecs.com/EN10025-2/EN10025-2S355J0STEELPLATE.html?fbclid=IwAR2Iwtyj7IBmuwm7uNjLuOs7B5YbdHTjE16pSVBJyNX2lcB7S4i_Ult5Icc
- [24] NUKON. Uživatelský manuál: Laserový řezací stroj NUKON NF PRO 315 2kW. 2014, 39 s.
- [25] AKYPAK MAK. SAN. VE TIC. LTD. STI. 4VÁLCOVÁ ZAKRUŽOVAČKA AHS. Bursa. Dostupné také z: www.akypak.com.tr
- [26] BUDÍK, Tomáš. Zakružovačka na Hardox. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86518. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Jiří Omes, Ph.D.
- [27] Čtyřválnová zakružovačka plechu Akyapak AHS 15/06. In: EXAPRO [online]. Exapro s.a.r.l, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/akyapak-ahs-1506-p10202072/>
- [28] WEMAN, Klas. Welding processes handbook. 1st ed. Cambridge: Woodhead, 2003. ISBN 18-557-3689-6.
- [29] KUBÍČEK, J. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ. Brno. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/ctv_technologie_vyroby_I_svarovani_kubicek.pdf
- [30] KUBÍČEK, J. Technologie svařování: Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K ÚST, odbor svařování a PÚ [online]. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf
- [31] Sigma2 300 | 400 | 500. In: MIGATRONIC [online]. Teplice: Migatronik CZ a.s. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: http://shop.migatronik.cz/inshop/files/79541461/Sigma2_300-400-500_CZ.pdf

- [32] MIGATRONIC. SIGMA2 300/400/500 Compact. Wettenberg, 2013, 150 s. Dostupné také z: www.migatron.com
- [33] KUBÍČEK, J. TECHNOLOGIE II: ČÁST SVAŘOVÁNÍ: Díl 1: Základní metody tavného svařování. Brno, 2006. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf
- [34] PETG. Prusa Knowledge Base [online]. Prusa Research a.s., 2021 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- [35] Polymers: Thermoplastics. Polymers International Australia [online]. Braeside: Polymers International Australia, 2014 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://polymers.com.au/thermoplastics/>
- [36] MATERIÁLOVÝ SLOVNÍK: BVOH. MATERIALPRO 3D [online]. Materialpro3d.cz, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [37] BVOH: Water soluble supports. Fiberlogy [online]. 1000ideas, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://fiberlogy.com/en/fiberlogy-filaments/bvoh/>
- [38] Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S+. Prusa Research [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2021 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s.html?gclid=Cj0KCQiAyoeCBhCTARIsAOfpKxjinJHoaYLasouKAsMnQaKm9b-797w7sqgGUV-Sm9Ccd413K_diHqIaAkZXEALw_wcB
- [39] KIENDL, Josef a Chao GAO. Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layup. *Composites Part B: Engineering*. 2020, **180**, 6. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107562
- [40] FLASHFORGE - CREATOR 3. FLASHFORGE 3D PRINTER [online]. FLASHFORGE EU [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.flashforge-eu.com/flashforge-3d-printers/flashforge-creator-3>
- [41] RAHMATI, Reza. What Glue Works best on PETG and How to Make a Perfect Bond?. 3D print'em [online]. 3dprintem, 2021 [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: <https://www.3dprintem.com/what-glue-works-on-petg/>
- [42] What Is an Epoxy Adhesive?. MASTERBOND [online]. Master Bond [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: <https://www.masterbond.com/techtips/what-epoxy-adhesive>
- [43] Large format 3D printers for professionals: Large format 3D printers (XL): 2021 selection. ANIWAA [online]. Aniwaa Pte. Ltd., 2021 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/large-format-3d-printer-professional/>
- [44] Modix BIG-60 V3. In: ANIWAA [online]. Aniwaa Pte. Ltd., 2021 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: https://www.modix3d.com/wp-content/uploads/2020/08/IMG_20200803_130235.jpg
- [45] BIG-60 V3 MODIX. ANIWAA [online]. Aniwaa Pte. Ltd., 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/modix-big-60/>
- [46] PEI (Polyéterimid). FTP Plastics [online]. FTP PLASTICS s.r.o., 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: [https://www.ftplastics.cz/prehled-sortimentu/-pei-\(polyeterimid\)-.html](https://www.ftplastics.cz/prehled-sortimentu/-pei-(polyeterimid)-.html)
- [47] Fully enclosed chamber. In: CreatBot [online]. Zhengzhou City: Henan Suwei

- Electronic Technology Co., LTD., 2020 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: https://www.creatbot.com/images/creatbot-d600/d600_feature_06.jpg
- [48] D600 PRO CREATBOT. ANIWAA [online]. Aniwaa Pte. Ltd., 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/creatbot-d600/>
- [49] BACH, Martin. Jak vyřešit nejčastější problémy při 3D tisku. Blog Josefa Průši [online]. Josef Průša, 2018 [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-vyresit-nejcastejsi-problemy-pri-3d-tisku/>
- [50] Leica RTC360 3D Laser Scanner. In: Leica Geosystems [online]. Leica Geosystems, 2021 [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>
- [51] Skener Leica RTC360. In: 3D SCAN s.r.o. [online]. Mladá Boleslav: 3DScan s.r.o. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <http://sken3d.cz/skener-Leica%20RTC360.jpg>
- [52] Leica RTC360. In: 3D SCAN s.r.o. [online]. Mladá Boleslav: 3DScan s.r.o. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <http://sken3d.cz/pdf/datasheet%20Leica%20RTC360.pdf>
- [53] How to Choose the Best 3D Scanner to Use With Your 3D Printer. In: Formlabs [online]. Formlabs, 2021 [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/how-to-choose-a-3d-scanner-for-3d-printing/>
- [54] KIVOLYA, Natalia. How to choose a 3D scanner. In: Artec3D [online]. Luxembourg: Artec, 2019 [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/learning-center/how-choose-3d-scanner>
- [55] Artec Eva. In: Artec3D [online]. Luxembourg: Artec, 2021 [cit. 2021-08-03]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva-v2>
- [56] Shining 3D EinScan HX. In: 3Dwiser [online]. Praha: 3Dwiser, 2021 [cit. 2021-08-03]. Dostupné z: https://eshop.3dwiser.com/3d-skenery/shining-3d-einscan-hx/?gclid=CjwKCAjw0qOIBhBhEiwAyvVcf4zJLMDCnXlbnpzZhvbEsz8R1Omx1TugIDVsVz6wxPaliULrSxynKRoC4V4QAvD_BwE
- [57] PETG Black. 3DJake [online]. 3DJake, 2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://www.3djake.cz/3djake/petg-black-2?sai=9376&gclid=CjwKCAjw9MuCBhBUEiwAbDZ-7kGyXlrhj0ca5M3H9fNjM7WmwxfwYOqJoLoVSVVLyfIMD7hRWdRuTxoCvq8QAvD_BwE
- [58] Technical Specification (all models):: Software. Modix [online]. MODIX MODULAR TECHNOLOGIES LTD, 2020 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.modix3d.com/tech-spec/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
3D	trojrozměrný
Ar	argon, netečný plyn
BKN	axiální čepová spojka
BVOH	butenediol vinylalkoholový kopolymer
CE	certifikát o shodě
CO2	oxid uhličitý
č.	číslo
ČSN	česká technická norma
DLP	digital light processing
EN	evropská norma
FDM	fused deposition modeling,
FeO	oxid železnatý
IEC	norma mezinárodní elektrotechnické komise
IP23	třída krytí elektrického stroje
ISO	norma mezinárodní organizace pro normalizaci
Kč	Koruna česká
koop	kooperace
MAG	svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu
MIG	svařování tavící se elektrodou v inertním ochranném plynu
MJF	multi jet fusion
NDT	nedestruktivní testování
Obr	obrázek
PEI	polyéterimid
PET	polyetylenetereftalát
PETG	polyetylenetereftalát glykol
popř.	popřípadě
poz.	pozice
SA	stupeň tryskání
SLA	stereolitografie
SLS	selective laser sintering - slinování prášku laserem
tj.	to jest
Tab	tabulka
USD	americký dolar
UV	ultrafialové
VPS	pružná spojka s vinutou pružinou
VT	vizuální kontrola
WPS	welding procedure specification, postup svařování

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres kola
Příloha 2	Plán jakosti 0138 – QIP – SFF550
Příloha 3	Cenová kalkulace oběžné kolo SFF550
Příloha 4	Cenová kalkulace tištěného kola