

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
POSOUZENÍ ENERGETICKÉ
NÁROČNOSTI ADITIVNÍ
VÝROBY KOVOVÝCH DÍLŮ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

KVĚTEN 2023

**BC. JIŘINA
ŠVAMBERGOVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Švambergová** Jméno: **Jiřina** Osobní číslo: **468043**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Posouzení energetické náročnosti aditivní výroby kovových dílů

Název diplomové práce anglicky:

Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište technologii 3D tisku kovových dílů.
- 2) Vyberte další dvě technologie výroby kovových dílů a porovnejte jejich energetickou náročnost s 3D tiskem.
- 3) Proveďte měření spotřeby energie na jednoduchém výrobku.
- 4) Posudte ekonomiku zvolených technologií.
- 5) Zhodnoťte dopad jednotlivých technologií na životní prostředí.
- 6) Popište nároky, které jsou kladeny na obsluhu.
- 7) Uvažte možnosti automatizace jednotlivých technologií.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Milewski, John O. Additive Manufacturing of Metals. From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Switzerland : © Springer International Publishing AG, 2017.
- [2] Fisher, David J. Additive Manufacturing of Metals. Millersville USA: Materials Research Forum LLC, 2020.
- [3] Li Yang , Keng Hsu , Brian Baughman , Donald Godfrey , Francisco Medina , Mamballykalathil Menon , Soeren Wiener Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Switzerland: © Springer International Publishing AG, 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Hlaváček, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.01.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Jan Hlaváček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Hlaváčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a věcné rady. Společnosti RH-Tech za příležitost práce s novou technologií. A v neposlední řadě bych chtěla poděkovat svým přítelkyním.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 26. května 2023

.....

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na problematiku technologie aditivní výroby kovových dílů. Cílem práce je posouzení energetické náročnosti této moderní technologie v porovnání s jinými postupy výroby kovových dílů. Zároveň je posouzena také ekonomika zvolených technologií a jejich vliv na životní prostředí. Součástí práce je také popis nároků kladených na obsluhu těchto technologických procesů a uvedení možností automatizace jednotlivých technologií.

Klíčová slova: aditivní výroba, energetická náročnost, zpracování, kovové díly

ABSTRACT

The masters thesis is focused on the technology of additive manufacturing of metal parts. The aim of the thesis is to evaluate the energy consumption of this modern technology in comparison with other metal parts production processes. At the same time, the economics of the selected technologies and their impact on the environment is also taken in to consideration. The thesis also includes a description of the requirements placed on the operators of these technological processes and the possibilities of automation of individual technologies.

Keywords: additive manufacturing, energy consumption, metalwork, metal parts

OBSAH

ÚVOD	1
KAPITOLA 1: HISTORIE ZPRACOVÁNÍ KOVOVÝCH DÍLŮ	2
1.1 STRUČNÝ PŘEHLED HISTORIE ZPRACOVÁNÍ KOVŮ	2
1.2 VÝVOJ DALŠÍCH TECHNOLOGIÍ POTŘEBNÝCH K ADITIVNÍ VÝROBĚ	3
KAPITOLA 2: METODY ADITIVNÍ VÝROBY	4
2.1 VAT PHOTOPOLYMERIZATION	4
2.2 MATERIAL JETTING.....	5
2.3 BINDER JETTING.....	6
2.4 MATERIAL EXTRUSION	7
2.5 POWDER BED FUSION	8
2.6 SHEET LAMINATION	9
2.7 DIRECTED ENERGY DEPOSITION.....	10
KAPITOLA 3: APLIKACE ADITIVNÍ VÝROBY KOVŮ	12
3.1 ZDRAVOTNICTVÍ	13
3.2 LETECKÝ A KOSMICKÝ PRŮMYSL.....	13
3.3 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	14
3.4 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE, FORMY A NÁSTROJE.....	15
3.5 ÚDRŽBA A OPRAVY	16
3.6 SKENOVÁNÍ A REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ.....	16
KAPITOLA 4: PŘEDSTAVENÍ DALŠÍCH METOD VÝROBY KOVOVÝCH ČÁSTÍ	18
4.1 FRÉZOVÁNÍ.....	18
4.2 ODLÉVÁNÍ.....	18
KAPITOLA 5: PRACOVIŠTĚ ADITIVNÍ VÝROBY TECHNOLOGIÍ DIRECTED ENERGY DEPOSITION	19
5.1 ŘÍDICÍ PRVKY	20
5.1.1 Řízení robota.....	20
5.1.2 Řízení laserové hlavy Meltio.....	22
KAPITOLA 6: MĚŘENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI VÝROBY KOVOVÉHO DÍLU	24
6.1 ADITIVNÍ VÝROBA PÍSTU	24
6.2 FRÉZOVÁNÍ PÍSTU.....	28
6.3 ODLITÍ PÍSTU.....	32
KAPITOLA 7: SIMULACE PROCESU VÝROBY	34
KAPITOLA 8: ENVIROMENTÁLNÍ DOPADY	36
8.1 POROVNÁNÍ POMOCÍ UHLÍKOVÉ STOPY	36
8.2 POROVNÁNÍ POMOCÍ DALŠÍCH FAKTORŮ A DOPADŮ	39
8.3 VLASTNÍ POROVNÁNÍ Z MĚŘENÍ	39
KAPITOLA 9: NÁROKY NA ÚDRŽBU, KVALIFIKACI OBSLUHY A VYBAVENÍ	41
9.1 NÁROKY NA KVALIFIKACI OBSLUHY A ÚDRŽBU.....	41
9.1.1 Aditivní výroba	41

9.1.2	Frézování	41
9.1.3	Odlévání.....	42
9.2	NÁROKY NA VYBAVENÍ (NÁSTROJE)	42
	KAPITOLA 10: POSOUZENÍ MOŽNOSTI AUTOMATIZACE DANÝCH METOD	43
10.1	PRE-PROCESSING.....	43
10.2	PROCESSING	43
10.3	POST-PROCESSING	44
	KAPITOLA 11: EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	45
	ZÁVĚR.....	48
	LITERATURA.....	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Zpracování kovů v různých obdobích historie (3).....	2
Obr. 2-1 Vat Photopolymerization	5
Obr. 2-2 Material Jetting	6
Obr. 2-3 Binder Jetting.....	7
Obr. 2-4 Material Extrusion.....	8
Obr. 2-5 Powder Bed Fusion.....	9
Obr. 2-6 Sheet Lamination	10
Obr. 2-7 Directed Energy Deposition.....	11
Obr. 3-1 Aplikace aditivní výroby kovových částí (3).....	12
Obr. 3-2 Titanová konstrukce kola ihned po vytištění (nalevo) a po složení (napravo) (3).....	12
Obr. 3-3 Titanový implantát lebky (nalevo) a dentální implantáty (napravo) (3)	13
Obr. 3-4 palivová nádrž z titanu, raketová tryska z mědi, testování měděné trysky vyrobené pomocí aditivní výroby (3).....	14
Obr. 3-5 na krajích jsou kovové součástky přímo vytištěné pomocí aditivní výroby, uprostřed je poloztracená forma vytištěná pomocí aditivní výroby (3).....	15
Obr. 3-6 model vytištěný pomocí DMLS a vnitřní struktura pro chlazení (3)	15
Obr. 3-7 a) Model ojnice v CAD, b) DMD proces, c) ojnice s nanosenou vrstvou kobaltové slitiny, d) hotová ojnice (3).....	16
Obr. 3-8 oprava oběžného kola čerpadla pomocí DMD (3).....	16
Obr. 3-9 příklad naskenované součástky převedené na model v CAD (3)	17
Obr. 5-1 Sestavená jednotka pro aditivní výrobu kovových částí od firmy RH-Tech.....	19
Obr. 5-2 Napravo navařovací hlava Meltio a nalevo robot Fanuc M-710ic70	19
Obr. 5-3 Řízení pro Fanuc M-710ic70: Ovládací panel – Fanuc iPendant (nalevo) a kontrolér R-30iB MATE (napravo).....	20
Obr. 5-4 Tisková buňka (jednotka)	21
Obr. 5-5 Řídící prvky pro tavicí hlavu Meltio	22
Obr. 5-6 Systém pro kalibraci laserové hlavy Meltio Laser Calibration System	22
Obr. 5-7 Senzor měření zatížení pro měření hmotnosti FNV Forsentek (napravo) a Obrazovka kontroly kvality tisku (nalevo)	23
Obr. 6-1 Model v pístu v CAD.....	24
Obr. 6-2 Měřicí přístroje	25
Obr. 6-3 Program Nx od firmy Siemens pro obrábění pomocí různých procesů výroby kovových částí	28
Obr. 6-4 CNC stroj pro obrábění kovových dílů	29
Obr. 6-5 Použité nástroje pro frézování. Napravo nástroje na čisto, nalevo hrubovací nástroje	29
Obr. 6-6 Jednotlivé procesy programu pro frézování pístu	30
Obr. 6-7 Zapojený elektroměr pro měření spotřeby CNC stroje	30
Obr. 6-8 Odlévání z pánví s dolní výpustí	32
Obr. 7-1 Výška a šířka vrstvy v závislosti na počtu perimetrů	34
Obr. 8-1 a. Dopad konvenčních metod výroby v porovnání s aditivní výrobou v kg CO ₂ eq na kg zpracovaného materiálu (log měřítko). b. Dopad výroby plus vliv materiálu samotného (lineární měřítko). SS = stainless	

steel (nerez), Al = aluminium (hliník), Ti = titanium (titan). Čísla v závorkách odkazují na citace ve zdrojovém textu. (6)	36
Obr. 8-2 Znázorňuje vliv v kg CO ₂ eq. na kg pro primární výrobu a pro výrobu kovového prášku. Nejistoty obou hodnot jsou vyjádřeny černou chybovou křivkou. (6)	38
Obr. 10-1 Zcela automatizovaná buňka pro odlévání lehkých slitin (10)	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Maximální rozměry výrobku a tiskové buňky	21
Tabulka 2 Příklad možných nastavení pro uhlíkatou ocel	23
Tabulka 3 Rozsahy a přesnost pro měřené veličiny pro přístroj PU 294	24
Tabulka 4 Technické parametry pro elektroměr KWZ-3PHD-D63	25
Tabulka 5 Vstupní parametry pro aditivní výrobu	26
Tabulka 6 Zatížení jednotlivých fází pro aditivní výroby	26
Tabulka 7 Celková spotřeba jednotky pro 3D tisk	27
Tabulka 8 Výstupní hodnoty aditivní výroby	27
Tabulka 9 Celková spotřeba pro aditivní výrobu	27
Tabulka 10 Spotřeba energie při frézování pístu v závislosti na čase	31
Tabulka 11 Celková spotřeba materiálu, energie a časová náročnost výroby při frézování	32
Tabulka 12 Celková spotřeba pro odlití pístu o hmotnosti 80 kg	33
Tabulka 13 Celková spotřeba pro odlití pístu o hmotnosti 0,8 kg	33
Tabulka 14 Dané parametry v závislosti na počtu perimetrů	34
Tabulka 15 Spotřebované emise pro jednotlivé procesy na 1 kg materiálu	39
Tabulka 16 Spotřeba argonu při aditivní výrobě	46
Tabulka 17 Vstupní parametry pro ekonomické posouzení pro aditivní výrobu	46
Tabulka 18 Vstupní parametry pro ekonomické posouzení pro frézování	46
Tabulka 19 Vstupní parametry pro ekonomické posouzení pro odlévání	47

ÚVOD

Hlavním cílem autorky diplomové práce bylo seznámit se s technologií aditivní výroby kovových dílů a posoudit její energetickou náročnost v porovnání s vybranými konvenčními technologiemi výroby.

Na základě takto stanoveného cíle byla v teoretické části práce provedena krátká rešerše dostupné literatury zaměřené na výrobu kovových částí. Následně byly představeny jednotlivé metody technologie aditivní výroby a některé příklady jejich praktických aplikací. Dále byly stručně představeny dvě konvenční technologie výroby kovových částí, které byly využity pro porovnání s energetickou náročností výroby pomocí vybrané technologie aditivní výroby.

V rámci praktické části práce byla provedena volba a praktický návrh výrobku takového tvaru, který bude možné vyrobit jak pomocí zvolených dvou konvenčních metod, tak pomocí vybrané technologie aditivní výroby s tím, že se budou moci uplatnit její výhody snadné realizace složitého tvaru vyráběného dílu. Pro možnost posouzení energetické náročnosti zvolených technologií výroby byla realizována měření spotřeby elektrické energie, materiálu a časové náročnosti. Součástí řešení práce bylo také posouzení ekonomiky těchto technologií, zhotovené prostřednictvím získaných dat a podkladů od firem. Pomocí naměřených hodnot a studií dané problematiky bylo zároveň provedeno posouzení dopadu jednotlivých technologií na životní prostředí. Rovněž byly popsány nároky kladené na obsluhu posuzovaných technologií výroby a rovněž byly zváženy možnosti jejich automatizace. V závěrečné části práce bylo uvedeno zhodnocení využití těchto metod na základě výše uvedených posouzení.

KAPITOLA 1: HISTORIE ZPRACOVÁNÍ KOVOVÝCH DÍLŮ

Moderním technologiím aditivní výroby kovových dělů, které se začaly postupně vyvíjet na konci minulého století, předcházelo poměrně dlouhé období zpracování kovových dělů začínající již v mladší době kamenné. Cílem této kapitoly je poskytnutí velmi stručného přehledu historického vývoje zpracování kovů, které mělo zásadní vliv na vývoj lidské civilizace. Počínaje výrobou jednoduchých kovových předmětů v době kamenné až po složité výrobky v současnosti, které nelze vyrobit v jednom dílu jinak, než technologií aditivní výroby.

1.1 Stručný přehled historie zpracování kovů

Zpracování kovů hrálo velkou roli ve vývoji lidské civilizace.

V mladší době kamenné Neolitu docházelo ke zpracování přirozeně se vyskytujících kovů, například zlato do ornamentů, talismanů apod. Zlato má tu výhodu, že díky své ohebnosti bylo k jeho opracování možné použít jednoduché nástroje jako je kámen, kosti nebo dřevo.

Poté nastává doba bronzová, kde se již ke zpracování kovů používá tavení, odlévání a kování. Nejvíce používaná metoda odlévání byla metoda ztraceného vosku. V Číně již používali metodu odlévání do pevných forem z jílu. Nejpoužívanější slitinou této doby je slitina mědi a cínu případně arzenu, tedy bronz. Dochází k nahrazení kamenných nástrojů za nástroje bronzové. Z této doby také pochází faraonovy železné dýky. (1)

V době železné začali lidé využívat k výrobě zbraní a nástrojů železo a ocel. Již v době bronzové uměli lidé tavit železo, ale nástroje a zbraně z něj nebyly tak odolné jako z bronzu. V této době došlo poprvé k vytvoření oceli jako slitiny železa a uhlíku. Ocel má lepší vlastnosti než bronz a začala být rozšířeně používána k výrobě zbraní. Mezi nové metody zpracování kovů patří kalení železa a železné licí formy. (2)



Obr. 1-1 Zpracování kovů v různých období historie (3)

Dalším důležitým milníkem je období od poloviny 18. století až do pozdního 19. století. Došlo k objevení velmi důležitých kovů jako je titan, wolfram, kobalt a hliník. V roce 1855 byl vynalezen Bessemerův konvertor, který umožnil velkovýrobu oceli ze surového železa. Na konci 19. století došlo k vývoji obloukového svařování pomocí uhlíkové elektrody. Svařování při této metodě probíhá mezi uhlíkovou elektrodou a svařovaným objektem.

V první polovině 20. století došlo k dalším průlomům v oblasti svařování. Další vývoj umožnil svařování oceli, hliníku a titanových folií. Dále byly vynalezeny nové metody obloukového svařování: TIG, MIG a MAG. Na konci roku 1950 bylo vynalezeno a v roce 1960 poprvé demonstrováno svařování elektronovým svazkem. Pomocí této metody lze svařovat kovy jako tantal, niob a zirkonium.

1.2 Vývoj dalších technologií potřebných k aditivní výrobě

Právě v 50. letech 20. století došlo také k vývoji prvních počítačů pro ovládání strojů a přístrojů. V 70. letech byly vyvinuty počítače s mikroprocesory jak je známe dnes. V 70. letech byl také vytvořen software pro projektování a navrhování CAD a dále se vyvíjel po boku počítačů. V 80. letech se pak začaly vyvíjet modely pomocí softwaru a začalo se uvažovat a vymýšlet jak by bylo možné takto vytvořené modely převést do reálu.

V roce 1984 vynalezl Chuck Hull stereolitografii, což je metoda vytváření 3D modelů pomocí postupného vytvrzování polymerů za pomoci laseru s UV zářením. Tato technologie umožňovala tisk celých objektů z polymerů po jednotlivých vrstvách.

Aditivní výroba kovových částí byla vynalezena až v 80. a 90. letech minulého století při výzkumu na vysokých školách a v mezinárodních laboratořích.

KAPITOLA 2: METODY ADITIVNÍ VÝROBY

V průběhu vývoje metod aditivní výroby od 80. let minulého století došlo k zavedení následujících sedmi základních metod do běžné praxe:

- Vat Photopolymerization
- Material Jetting
- Binder Jetting
- Material Extrusion
- Powder Bed Fusion
- Sheet Lamination
- Directed Energy Deposition

Pro posouzení energetické náročnosti aditivní výroby kovových dílů byla v této diplomové práci zvolena metoda DED, kde je nanášený kovový materiál taven pomocí laserového paprsku.

2.1 Vat Photopolymerization

Proces, při kterém máme nádobu s tekutou fotopolymerní pryskyřicí, která je vytvrzována po vrstvách pomocí laseru (UV záření) do požadovaného tvaru. Laser vytvrdí danou vrstvu do požadovaného tvaru a plošina se ponoří hlouběji do tekuté pryskyřice. Některé tiskárny mají nože, které vrstvu poté očistí, aby byl povrch co nejhladší pro nanášení další vrstvy. Na konci procesu se musí tekutá pryskyřice vypustit a případně z hotového výrobku odstranit. (4)

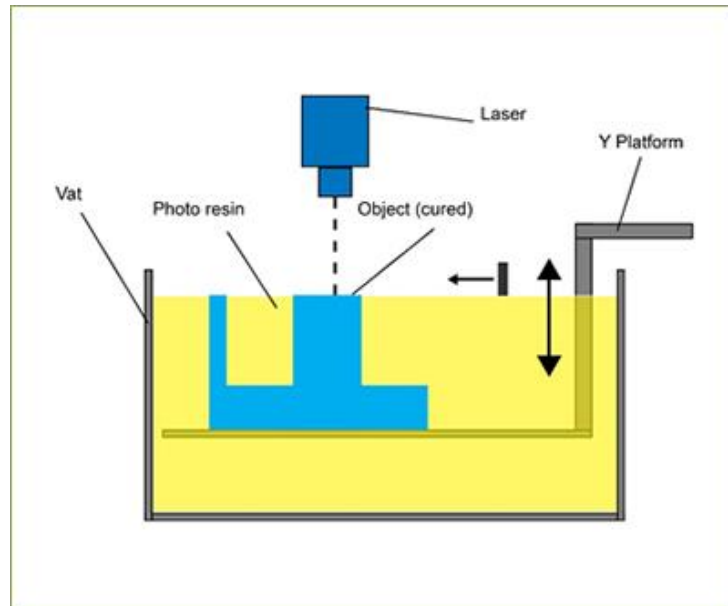
Jedná se o první metodu 3D tisku, která byla využívána mimo laboratoře. Výhody jsou vysoká přesnost, relativně krátký čas tisku a možnost tisknout velké objekty.

Výhody:

- Velká přesnost a dobrá konečná úprava
- Relativně rychlý proces
- Vhodné pro velké plochy – maximální hmotnost modelu je 200 kg

Nevýhody:

- Relativně drahé
- Následné opracování je časově náročné
- Nutné vyjmutí z pryskyřice
- Omezené množství materiálů
- Nutnost podpůrné konstrukce a následného vytvrzování daných částí, aby byly dost pevné pro využití ve stavebnictví



Obr. 2-1 Vat Photopolymerization (4)

2.2 Material Jetting

Pomocí této metody je materiál vstřikován na platformu podobně jako u klasické inkoustové tiskárny. Předmět je vytvářen pomocí vodorovného pohybu hlavice, na které je umístěna tryska. Vstřikování probíhá ve formě kapek přímo na povrch nějakého předmětu nebo na platformu. Poté co je takto nanese jedna vrstva, dojde k jejímu vytvrzení pomocí UV záření a celý proces se opakuje.

Nevýhodou jsou omezené možnosti použitých vstřikovaných materiálů, jelikož musí být ve formě kapek, proto musí mít schopnost kapky vytvářet. Nejčastěji se tedy používají polymery a vosky.

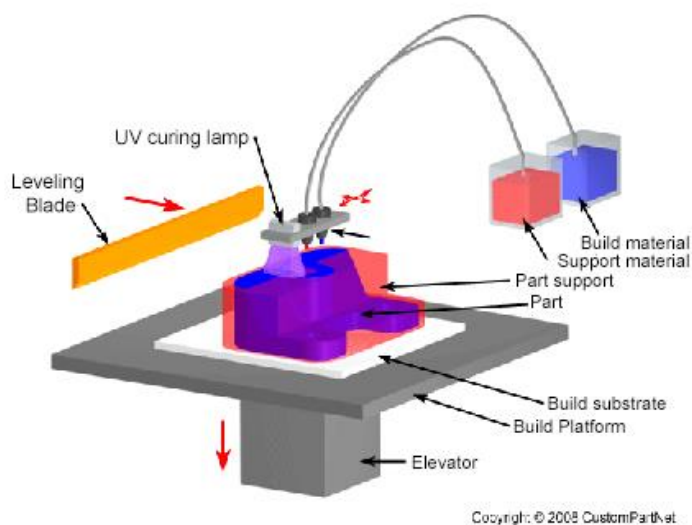
Výhodou jsou malé ztráty materiálu a možnost použití dvou různých materiálů případně možnost výměny použitého materiálu při procesu tisknutí.

Výhody:

- Díky tomu, že je vstřikování ve formě kapek, tak má metoda velkou přesnost a malý zbytkový materiál
- Může být použito více materiálů a barev pro jeden proces

Nevýhody:

- Často je potřeba podpůrný materiál
- Omezené množství použitelných materiálů (jen polymery a vosky)



Obr. 2-2 Material Jetting

(4)

2.3 Binder Jetting

Tato metoda používá dva materiály, stavební materiál a pojivo, které drží práškové vrstvy pohromadě. Stavební materiál je v práškové formě a pojivo je většinou v tekuté formě. Hlavice se opět pohybuje vodorovně na podložce podle zadaných xy souřadnic. Nejprve je na podložku pomocí válce nanesen materiál ve formě prášku. Poté je nanesena vrstva pojiva. Po nanesení obou materiálů je platforma snížena a dohází k nanesení další vrstvy.

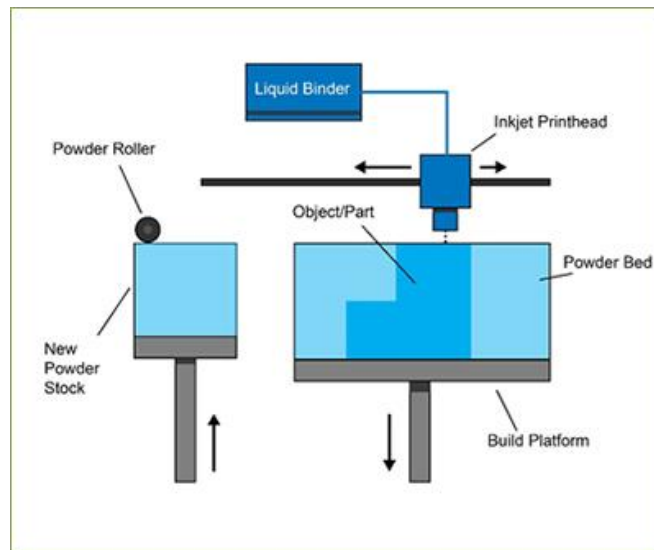
Tato metoda umožňuje barevný tisk a použití materiálů jako jsou kovy, polymery a keramika. Jedná se o jednu z nejrychlejších metod 3D tisku. Proces vytvrzení může být ještě urychlen pomocí přidaného tepla.

Výhody:

- Možnost použití velkého množství barev
- Možnost použití velkého množství materiálů jako jsou kovy, polymery a keramika
- Proces je rychlejší, než u ostatních metod
- Díky použití dvou materiálů můžeme použít různé kombinace stavebního materiálu a pojiva a tím získat různé mechanické vlastnosti

Nevýhody:

- Kvůli některým pojivům nevhodný pro využití ve stavebnictví
- Následné opracování může přidat čas k celkovému procesu



Obr. 2-3 Binder Jetting

(4)

2.4 Material Extrusion

FDM (fuse deposition modelling) je metoda, při které také dochází k vytváření objektu vrstvou po vrstvě, ale jednotlivé vrstvy jsou vytvářeny pomocí tepla. Materiál je nanášen pomocí trysky za požadovaného tlaku a teploty.

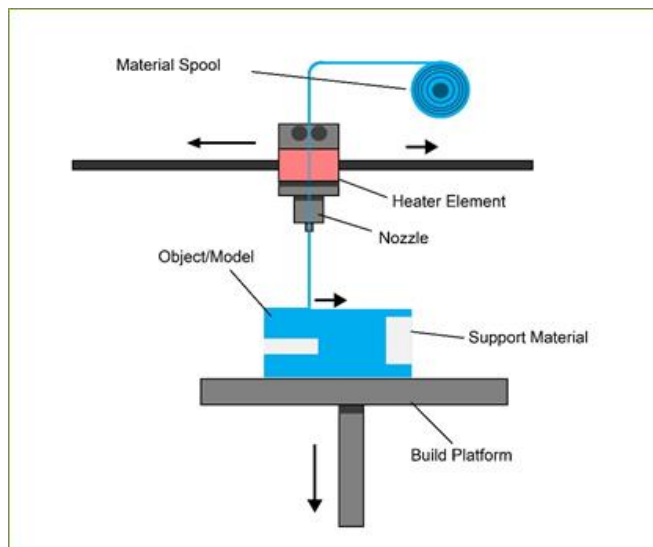
Tato metoda se používá hlavně pro domácí 3D tiskárny a je vhodná pro tisk plastů.

Výhody:

- Rozšířená a levná metoda
- Možnost využití ABS plastů, které mají dobrou dostupnost a dobré konstrukční vlastnosti

Nevýhody:

- Malý rozsah trysky, způsobuje nepřesnosti konečného produktu
- Malá přesnost a pomalý proces v porovnání s ostatními metodami
- Pro dosažení dané přesnosti konečného produktu je nutný neustálý tlak na materiál



Obr. 2-4 Material Extrusion

(4)

2.5 Powder Bed Fusion

Tuto metodu lze provést pomocí těchto technologií:

- DMLS (Direct metal laser sintering),
- EBM (Electron beam melting),
- SHS (Selective heat sintering),
- SML (Selective laser melting) a
- SLS (Selective laser sintering).

Všechny tyto technologie tisknou součástku vrstvu po vrstvě a dané vrstvy k sobě spékají za pomoci laseru nebo elektronového svazku. Pokud je použit elektronový svazek, tak musí tisk probíhat ve vakuu.

Pomocí této metody je nejprve nanášena první vrstva prášku na platformu a ta se vytvrdí laserem. Na tuto vrstvu je nanášena další vrstva prášku pomocí válečku a laser ji zapeče do té předchozí, takto se proces opakuje, dokud nemáme celý objekt. Nakonec se očistí model od části prášku, která nebyla vytvrzena.

Tato technologie se používá klasicky pro tisk polymerů a pro tisk kovů jako je nerezová ocel, titan, hliník, ocel a slitina kobaltu a chromu.

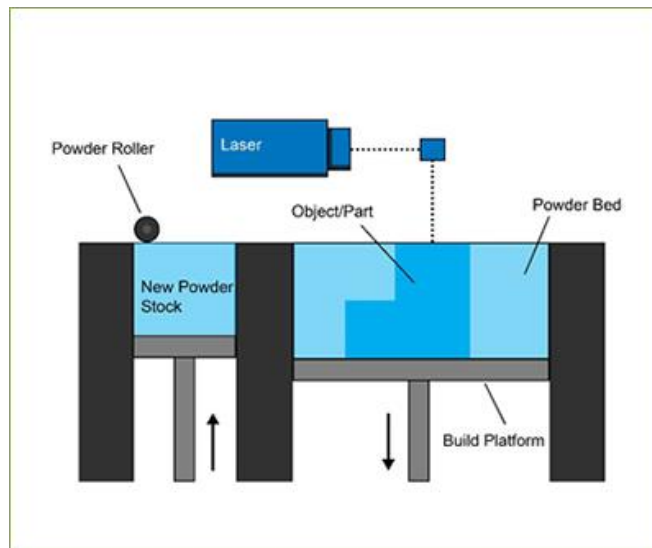
Výhody:

- Relativně levná
- Široké spektrum použitelných materiálů
- Vhodné pro modely a prototypy
- Možnost provedení této technologie i v malém měřítku, to znamená do zařízení, které má vhodnou velikost do kanceláře

- Prášek funguje jako podpůrná struktura

Nevýhody:

- Velká energetická náročnost
- Omezená velikost výrobku
- Relativně pomalá
- Vzhled konečného produktu závisí na velikosti zrn prášku



Obr. 2-5 Powder Bed Fusion (4)

2.6 Sheet Lamination

Tato metoda může být provedena pomocí dvou technologií:

- UAM (ultrasonic additive manufacturing)
- LOM (laminated object manufacturing)

UAM používá kovové plechy nebo pásy, které jsou k sobě svářeny pomocí ultrazvuku. Nevýhodou je, že během sváření musí být odstraněn přebytečný materiál.

Jedná se složitější proces a pro jeho provedení musí být použity CNC stroje (Computerized Numerical Control). Jedná se o proces tisku přímo z CAD souboru, aby byla zajištěna vysoká přesnost tisku musí mít CNC stroje větší počet os, obvykle 3-5.

Kovy, které lze použít pro tuto metodu jsou hliník, měď, nerezová ocel a titan. Jedná se o proces s nižší teplotou a tudíž je možné vytvářet složitější vnitřní geometrii objektů. Další výhodou je, že tímto procesem lze spojit různé materiály. A tím, že není potřeba kov roztavit, je tento proces také energeticky nenáročný.

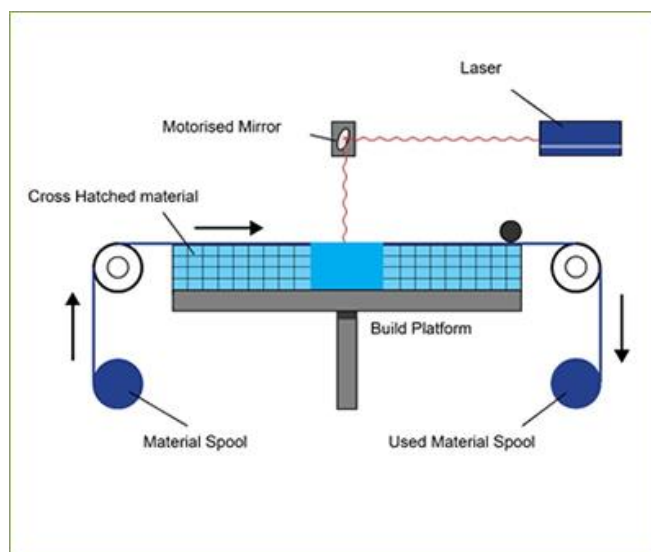
LOM je na podobném principu, ale jako materiál používá papír a místo sváření používá pojivo. Tato metoda se využívá pro vytváření vizuálních modelů nebo pro výrobu designových předmětů. Není určena pro vytváření funkčních součástí do průmyslu.

Výhody:

- Rychlost, nízká cena, snadná manipulace s materiálem

Nevýhody:

- Vzhled finálního produktu se může lišit podle použitého materiálu a může vyžadovat následné opracování
- Omezené množství použitelných materiálů
- Síla a integrita modelů závisí na použitém pojivu
- Potřebný další výzkum, než bude připravená pro běžné použití



Obr. 2-6 Sheet Lamination

(4)

2.7 Directed Energy Deposition

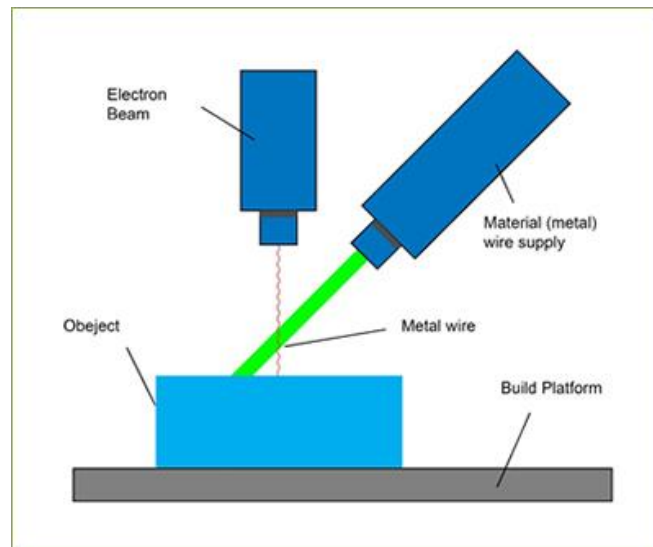
DED probíhá nanášením materiálu pomocí trysky připojené na několika-osé rameno, typicky čtyř až pětiosé. Materiál je ve formě drátu nebo prášku. Při nanášení je materiál roztavován pomocí laseru nebo elektronového svazku. Objekt je postupně vytvářen vrstvou po vrstvě na pevné nehybné podložce.

Tuto metodu lze použít i s polymery a keramikou, ale nejčastěji se využívá pro kovy. Vhodnými materiály jsou slitina kobaltu a chromu, titan, nerezová ocel, měkká ocel, uhlíková ocel, nikl, měď a inconel (slitina niklu a chromu). Díky přesnosti této metody je vhodná pro opravy a pro výrobu funkčních součástí do průmyslu.

Materiál ve formě drátu má menší přesnost a menší spotřebu materiálu oproti prášku.

Výhody:

- Velká míra řízení velikosti zrn, díky tomu je tato metoda vhodná na opravy a praktické výrobky vysoké kvality

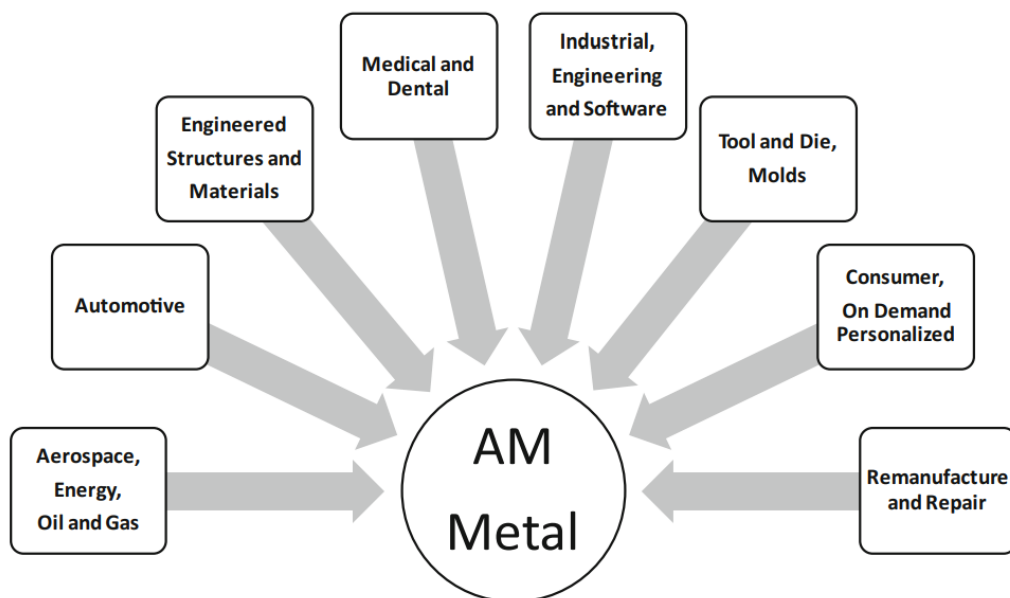


Obr. 2-7 Directed Energy Deposition

(4)

KAPITOLA 3: APLIKACE ADITIVNÍ VÝROBY KOVŮ

Aplikace aditivní výroby zahrnují letecký, kosmický průmysl a zdravotnictví. Dále umělecké modely na zakázku. Využití aditivní výroby přináší úspory a snížení energetické náročnosti. Aditivní výroba kovů je nejvíc propagovaná pomocí výrobků pro automobilový průmysl.



Obr. 3-1 Aplikace Aditivní výroby kovových částí (3)

Zajímavým použitím této metody je titanová konstrukce na kolo. Toto využití ukazuje, jak aditivní výroba dokáže realizovat výrobek přímo na míru zákazníkovi. Zároveň je zde patrné použití lehkého materiálu s pevnou vnitřní strukturou. Aditivní výroba také není omezená co se týče různých tvarů, záhybů, dutin a podobně.



Obr. 3-2 Titanová konstrukce kola ihned po vytištění (nalevo) a po složení (napravo) (3)

Dalším příkladem tisku na míru jsou naslouchadla. V současnosti se vyrábějí ve velkém pouze ve standardizovaných velikostech. Díky 3D tisku mohou být vyráběny přesně na míru danému zákazníkovi. Velkovýroba nyní převládá díky své nízké ceně, ale pro nějaké produkty přináší jejich personalizace takové benefity, že se to zákazníkovi vyplatí. Ať už se jedná o šperky s iniciály nebo golfové hole na míru.

3.1 Zdravotnictví

Dalším velkým odvětvím je zdravotnictví, kde hlavně ve stomatologii, je využívána k aditivní výrobě korunek, můstků a dalších zubních implantátů na míru. Aditivní výroba může pomoci také lidem trpícím problémy s meziobratlovými ploténkami (degenerative disk disease). Tritanium je patentovaná technologie, při které se vysoce porézní titan umístí dovnitř kosti a zajistí biologickou fixaci. Z toho vidíme, že pro zdravotnictví jsou potřeba materiály mající dostatečnou sílu a biokompatibilitu. Mezi tyto materiály využívané nyní ve zdravotnictví patří chrom-kobalt a slitiny titanu, což jsou materiály, které lze snadno použít v aditivní výrobě. Výrobky do zdravotnictví vyžadují vysokou kvalitu a většinou nejsou tak rozměrné, tudíž jsou ideální pro Powder Bed Fusion metodu.



Obr. 3-3 Titanový implantát lebky (nalevo) a dentální implantáty (napravo) (3)

3.2 Letecký a kosmický průmysl

Využívá aditivní výrobu pro palivové nádrže. Vytiskne se přibližný dutý tvar nádrže, který se pak obrobí do požadovaného tvaru. Tento proces je mnohem jednodušší, než klasická výroba nádrže z titanových plechů, které jsou následně lisované pomocí velkých hydraulických lisů. Výroba nádrží různých velikostí vyžaduje adekvátní formy a to znamená další výrobní náklady.

Další využití je turbovrtulový motor pro letadlo s jedním pohonem. Tento pohon je z 35 % vyroben aditivní výrobou. Došlo tím k snížení hmotnosti o 5 % a k 1% zlepšení SFC (specific fuel consumption). V dalším případě byla testována aditivní výroba na motoru CT7-2E1, kde bylo nahrazeno více jak 900 klasicky vyrobených součástek za 16 součástek vyrobených aditivní výrobou.

V kosmickém průmyslu použila NASA aditivní výrobu pro výrobu raketového motoru z mědi. Vytisknuté součástky jsou vyvinuty tak, aby vydržely extrémní teploty a tlaky. Díky těmto vlastnostem by se touto metodou měly připravovat i součástky pro misi na Mars. Aerojet

Rocketdyne pomocí aditivní metody vyrobila tlakovou komoru motoru ze slitiny mědi. A úspěšně na něm provedla zážehový test. Kosmický průmysl zvažuje využití aditivní výroby, díky její ceně a možnému zrychlení výrobního procesu. Vesmírný průmysl vyžaduje přesné postupy a certifikaci daných metod a součástek. Výrazně by se tak mohlo ušetřit tím, že díky aditivní výrobě bude potřeba menší množství součástek a také méně procesů. Nebude například potřeba spojovat dané součástky k sobě, ale již se budou tisknout v celku. Tím že budou součástky lehčí, dojde k ušetření paliva při vzletu rakety nebo při komerčních letech letadla. Dalším důležitým faktorem pro využití aditivní metody v kosmickém průmyslu je snížení spotřeby materiálu, jelikož využívá drahé a speciální materiály jako slitiny niklu nebo titan. Také umožňuje výrobu tvarů, které by klasickými metodami nebyly možné. A nakonec je nutné uvážit zvýšení účinnosti procesu a snížení enviromentálního vlivu jako jsou emise a hluk.



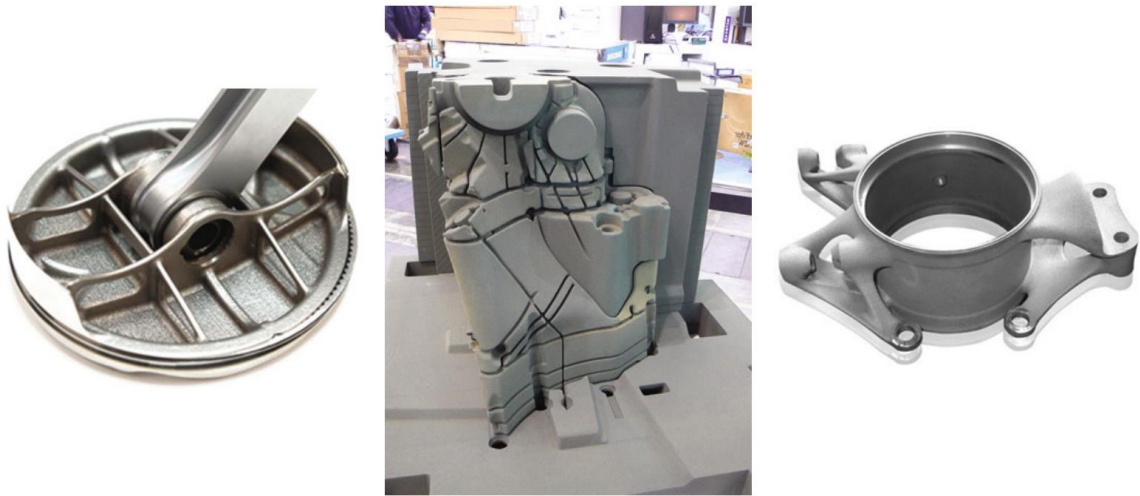
Obr. 3-4 palivová nádrž z titanu, raketová tryska z mědi, testování měděné trysky vyrobené pomocí aditivní výroby (3)

3.3 Automobilový průmysl

Zde je příkladem využití u formule 1, kde nezáleží na ceně, ale hlavně na rychlosti a větší volnosti v designu, tak aby získali výhodu oproti soupeři. Velkou výhodou je snížení hmotnosti, urychlení testování prototypů díky zrychlení výrobního procesu a větší svoboda v designu. Na komponentech jsou prováděny přísnější testy, než pro komerční využití. Z toho vyplývá, že když uspějí pro Formuli jedna, tak budou vhodné i do komerčního využití. Bohužel výsledky testů a detailní popisy metody jsou důvěrné informace firmy. Příklady jsou píst, čepy řízení a odlehčené dvouplášťové hnací hřídele. Dále brzdové kotouče, které jsou pomocí aditivní výroby o 25% lehčí s lepším chlazením. Jako další potenciální trh se jeví veteráni, tudíž součástky, které jsou speciální nebo už se těžko shání.

Přímé tisknutí kovových částí se zatím nevyplácí pro komerční velkovýrobu. Začínají se ale využívat pro aditivní výrobu polo-ztracené (pískové) formy nebo plastové šablony modelu vytvořeného v programu CAD. Poté se daná kovová součástka odlíje do vytištěné formy. Díky tomu, že je možné tisknout velké komplexní součástky, tak se i tímto způsobem urychlí vývoj, což dovoluje testování více prototypů současně. Příkladem této kombinace tisku a odlévání je skříň převodovky pro Formuli jedna. Forma byla vytištěna z oxidu křemičitého (SiO_2) a poté byl vytvořen odlitek ze slitiny hliníku A356. Společnost ExOne provedla studii, kde porovnála soubor pěti odlitků vytvořených pomocí aditivní metody s konvenčními šablonami, nástroji a odléváním do ztracené pěny. Cena za jednu součástku pomocí aditivní metody byla € 1500 a pomocí

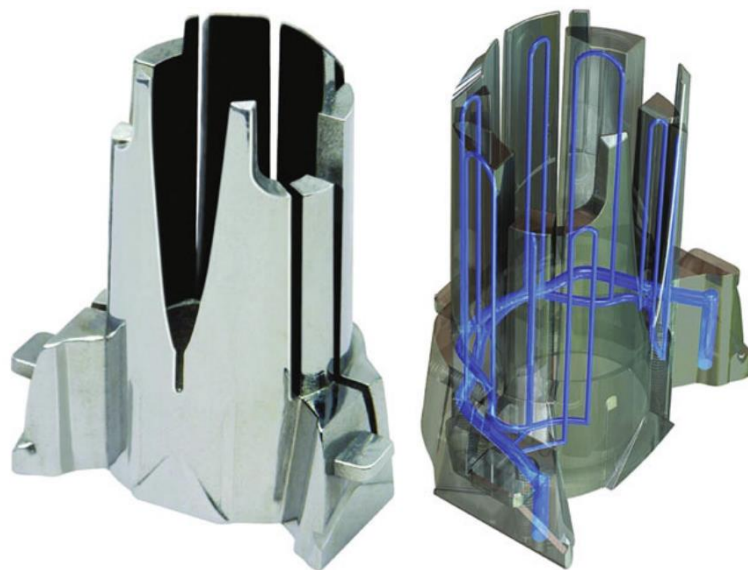
konvenčních metod byla cena za součástku € 15 000 až € 20 000. To ukazuje, že tento způsob tisku forem a následné odlití se vyplatí pro malé výrobní série.



Obr. 3-5 na krajích jsou kovové součástky přímo vytištěné pomocí aditivní výroby, uprostřed je polo-ztracená forma vytištěná pomocí aditivní výroby (3)

3.4 Průmyslové aplikace, formy a nástroje

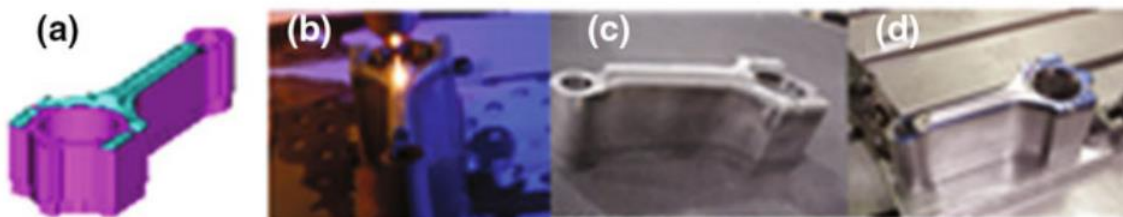
Další využití jsou vložky forem do kterých může být umístěno konformní chlazení (viz obr. 3-6). Chlazení urychlí proces vstřikování a zajistí vyšší kvalitu dílů. Této vnitřní struktury bylo dosaženo pomocí metody DMLS. Servis ukázal, že takto vytvořená vložka do formy vydrží 190 000 procesů. Došlo tedy ke zvýšení produktivity o 48 %.



Obr. 3-6 model vytištěný pomocí DMLS a vnitřní struktura pro chlazení (3)

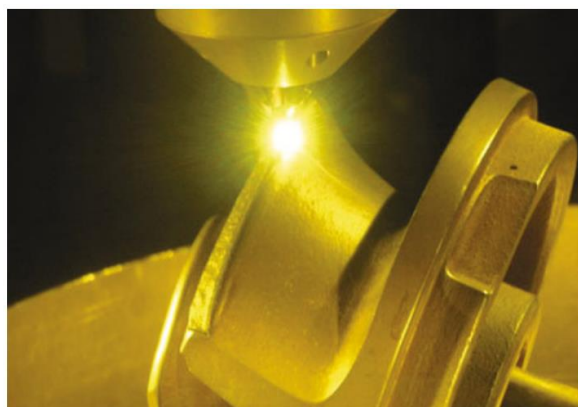
3.5 Údržba a opravy

Aditivní výroba nachází využití v údržbě, repasování a opravách. Na součástku je možné natisknout další vrstvu pomocí aditivní výroby, a tím zlepšit její vlastnosti, zvýšit výdrž apod. Další možnost je využít aditivní výrobu na opravu poškozených dílů. Tato vrstva by měla sloužit na prodloužení životnosti součástky.



Obr. 3-7 a) Model ojnice v CAD, b) DMD proces, c) ojnice s nanesenou vrstvou kobaltové slitiny, d) hotová ojnice (3)

Příklad takové vrstvy na Obr. 3-7 a) znázorněn na modelu v CAD tyrkysovou barvou, fialovou je současná součástka. Použitá metoda se nazývá DMD, tedy direct metal deposition. Ojnice je z levné oceli a na zatěžovanou část je nanášena vrstva kobaltové slitiny. Na rozdíl od termických nástřiků, chemické depozice z plynné fáze (CVD), fyzikální depozice z plynné fáze (PVD) jako je například napařování a napařování, je aditivní výroba schopna vytvořit vrstvu, která odolá únavě a vysoké teplotě tak, že nedochází k odštěpování. Díky této vrstvě mají nástroje čtyřikrát delší životnost, což vede ke snížení nákladů a není nutné takové množství odstávek. Další příklad na Obr. 3-8 je oprava lopatek oběžného kola čerpadla pomocí DMD.



Obr. 3-8 oprava oběžného kola čerpadla pomocí DMD (3)

3.6 Skenování a reverzní inženýrství

V současnosti je možné naskenovat objekt pomocí laseru, nebo získat tvar daného objektu z fotografie a následně vytvořit jeho model pomocí reverzního inženýrství. Tento model může být použit pro aditivní výrobu forem z plastu nebo křemičitého písku, případně přímo pro tisk

kovových součástek. Vhodný software pro reverzní aplikace je Geomagic vlastněný společností 3D Systems. Příkladem aplikace je model motoru motocyklu na Obr. 3-9, složený z naskenovaných částí, který může být z daného modelu následně vytištěn. Software může být propojený s programem pro navrhování CAD, což zvyšuje jeho kompatibilitu nebo případný přechod z klasických technologií výroby.



Obr. 3-9 příklad naskenované součástky převedené na model v CAD (3)

KAPITOLA 4: PŘEDSTAVENÍ DALŠÍCH METOD VÝROBY KOVOVÝCH ČÁSTÍ

Za účelem porovnání energetické náročnosti aditivní výroby kovových dílů se staršími klasickými metodami výroby byly vybrány další dvě konvenční technologie a sice obrábění metoda frézováním a metoda odléváním.

4.1 Frézování

První technologie se kterou byla aditivní výroba porovnávána je obrábění. To je specifické tím, že na rozdíl od odlévání a aditivní výroby probíhá výroba požadovaného tvaru dané přesnosti odebíráním z celistvého pevného kusu materiálu. Materiál se odděluje pomocí břitu nástroje ve formě třísek, proto také název třískové obrábění. Rozlišujeme několik podkategorií obrábění podle pohybu obrobku a nástroje. Pro porovnání energetické náročnosti vybraných technologií výroby jsem zvolila frézování. To se vyznačuje tím, že nástroj rotuje a objekt se k němu přibližuje. Nástroj se v tomto případě nazývá fréza a objekt je obrobek.

Frézování může být sousledné a nesousledné. U sousledného frézování se nástroj otáčí ve směru pohybu stolu s obrobkem a u nesousledného frézování se nástroj otáčí proti směru pohybu stolu. Nejčastěji se dnes pro frézování využívá CNC strojů (Computer Numeric Control) tedy číslicově řízených obráběcích strojů. CNC stroje využívají frézování sousledné, protože zaručuje delší životnost stroje.

4.2 Odlévání

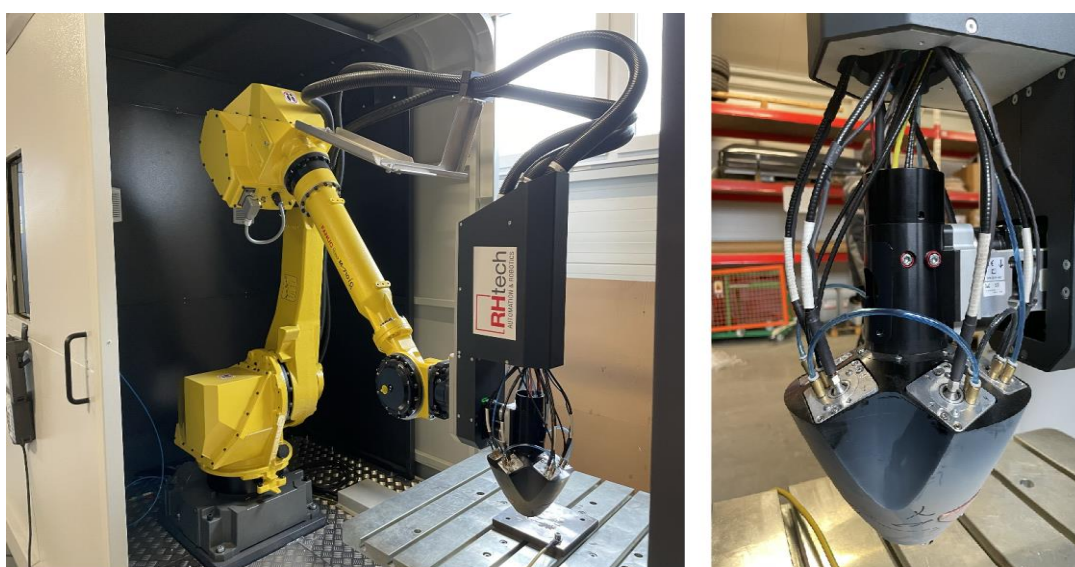
Druhá technologie se kterou byla aditivní výroba porovnána je odlévání. Pro odlévání je nutné nejprve vytvořit formu podle modelu z CAD. Tato forma může být buď jednorázová z vosku, křemičitého písku, sádry nebo keramiky. Pro opakované použití se vyrábějí kovové formy. Každá z těchto metod je přizpůsobena pro určité druhy kovu a úroveň přesnosti a komplexity výrobku. Poté je potřeba roztavit materiál, ze kterého chceme výrobek odlít. Proces roztavení se liší podle teploty tání. Další fází je nalití roztaveného kovu do formy. V této fázi jsou vážná bezpečnostní rizika, a tak je potřeba používat bezpečnostní pomůcky, jako ochranné oblečení z přírodních materiálů, dlouhé kalhoty a rukávy, ochranné rukavice a brýle. Po zchlazení a zatuhnutí kovu, dochází k odstranění kovu z formy. Pokud se jedná o jednorázovou formu, tak tu můžeme rozbít. Z formy pro více použití je nutné odlitek vyjmout. Nakonec je potřeba udělat finální úpravy povrchu odlitku. Tedy odlitek obrousit a vyleštit. Tyto úpravy zahrnují odstranění zbytků formy z odlitku, nebo mytí v případě kovové formy. (5)

KAPITOLA 5: PRACOVIŠTĚ ADITIVNÍ VÝROBY TECHNOLOGIÍ DIRECTED ENERGY DEPOSITION

Na pracovišti aditivní výroby, kde bylo realizováno posouzení energetické náročnosti této technologie, je hlavním zařízením 3D tiskárna Meltio s robotickým ramenem Fanuc M-710ic70. Meltio používá technologii LMD, tedy laser metal deposition. Jedná se o podružnou technologii metody DED. Tiskárna obsahuje kompaktní hlavici s tryskami pro nános materiálu a šest zdrojů laserového záření vlnové délky 976 nm, každý o trvalém výkonu 200 W. Hlavice je tedy schopna zpracovávat přídatný materiál ve formě drátu i prášek současně. Je zde také možnost tisknout dvoudrátově a vytvořit tak součástku složenou ze dvou různých materiálů. Pro komerční využití je po vytištění nutné výrobek ještě dodatečně dopracovat frézou.



Obr. 5-1 Sestavená jednotka pro aditivní výrobu kovových částí od firmy RH-Tech



Obr. 5-2 Napravo navařovací hlava Meltio a nalevo robot Fanuc M-710ic70

Laserová hlava má příkon 1,2 kW a robotické rameno 2,2 kW, využívá však pouze 10 % svého výkonu, jelikož se pohybuje velmi pomalu. Díky použití robotického ramene není omezena velikost tištěného výrobku. Dále je zde možnost použití polohovadla, díky kterému by bylo možné tisknout při jakémkoliv úhlu. Dalším důležitým prvkem je chladicí jednotka CW - 6000. Jsou zde dva okruhy, primární jehož součástí je kompresor a stejně jako v klimatizaci zajišťuje ochlazení výměníku. Druhý je sekundární přes který protéká chladicí kapalina, kterou je deionizovaná voda. Tato kapalina proudí chladicími kanálky a zajišťuje chlazení všech šesti laserů.

5.1 Řídicí prvky

Sestava má oddělené řízení pro laserovou hlavu Meltio a pro robotické rameno Fanuc M-710ic70. Pomocí programu na převod modelu v CAD do trajektorií robota bude možné nastavit laserovou hlavu i robotické rameno pouze navolením základních parametrů. Řízení tedy bude automatizováno. Zadáním modelu kovové součástky, materiálu a počtu perimetrů program vyhodnotí zbylé parametry a po zadání pokynu pro tisk provede nastavení laserové hlavy a robotického ramene.

5.1.1 Řízení robota

Řízení robota se skládá z kontroléru R-30iB MATE a ovládacího panelu Fanuc iPendant, jak vidíme na Obr. 5-3. Hlavní části kontroléru jsou CPU jednotka s RISC procesorem, oddělený komunikační procesor a externí transformátor pro připojení do sítě 3x 380 V-415 V. Ovládat robotické rameno je možné buď ručně, nebo nahráním programu trajektorie robota. Ovládací panel má barevný touch LED display, možnost zobrazení vlastního HMI, USB rozhraní, programovatelná uživatelská tlačítka a motion tlačítka pro externí osy. V programu je zadáno, kdy se spouští laser, jak bude vypadat jeho trajektorie a kdy se zastaví.

Pomocí dalších nastavení je možné odečítat například dobu, po kterou se objekt tiskl a po jakou dobu byl spotřebováván ochranný inertní plyn (Argon) tím, že při každém zapnutí laseru sepne časovač.



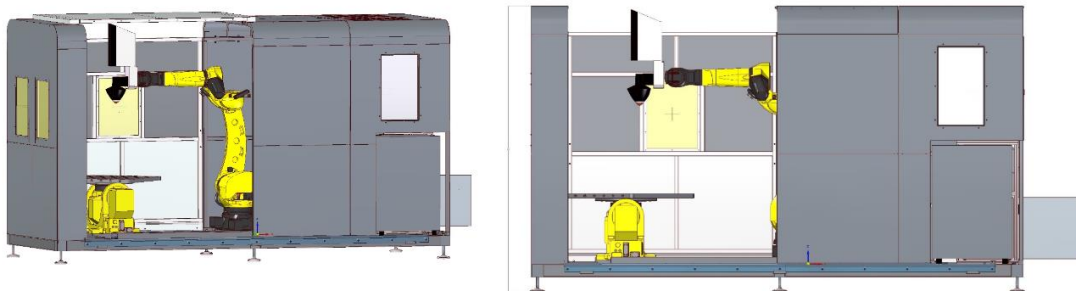
Obr. 5-3 Řízení pro Fanuc M-710ic70: Ovládací panel – Fanuc iPendant (nalevo) a kontrolér R-30iB MATE (napravo)

Robot je spolu s laserovou hlavou umístěn v uzavřené buňce, viz Obr. 5-4. Rozměry výrobku jsou tedy závislé na rozměrech tiskové jednotky, viz Tabulka 1. Pokud bychom přidali do buňky polohovadlo, tak bychom mohli tisknout i větší rozměry.

Tabulka 1 Maximální rozměry výrobku a tiskové buňky

Rozměry	Parametry tisku v uzavřené buňce (mm)	Rozměry 3D buňky (mm)
Šířka	1 000	1 900
Délka	1 000	4 000
Výška	700	2 300

Robotické rameno je poháněno digitálními AC servo motory. Maximální zatížení ramene je 35 kg. Horizontální rozsah ramene je 1 831 mm. Teoreticky by tedy bylo možné vytisknout výrobek větších rozměrů, ale kvůli bezpečnosti to není možné. Jak už jsem zmiňovala v předchozí podkapitole, tak celý proces musí probíhat v uzavřené tiskové jednotce, která limituje rozměry výrobku na hodnotu maximální šířku 1000 mm, maximální délku 1000 mm a maximální výšku 700 mm.



Obr. 5-4 Tisková buňka (jednotka)

5.1.2 Řízení laserové hlavy Meltio

Řízení se skládá z displeje a jednotky obsahující řídicí modul pro hlídání teploty jednotlivých laserových hlav, rychlost podávání drátu a chlazení. Dále je v jednotce umístěn drát spolu s jeho podavačem a průtokoměr. Další součástí řídicího systému je sestava pro kalibraci Meltio Laser Calibration System, která umožňuje kalibrovat 6-laserovou depoziční hlavu. Systém se skládá z přenosného ovladače a seřizovací kamery, která se umísťuje pod tiskovou hlavu a umožňuje jasný pohled na bod zaměření laseru, viz Obr. 5-6. Ovladačem je tablet se softwarem pro filtrování obrazu z kamery pro zaměření laserů na optimální bod.



Obr. 5-5 Řídicí prvky pro tavicí hlavu Meltio



Obr. 5-6 Systém pro kalibraci laserové hlavy Meltio Laser Calibration System

Na Obr. 5-5 vidíme řídicí prvky pro tavicí hlavu Meltio. Na Obr. 5-5 nalevo je pohled na řídicí jednotku zvenku a Obr. 5-5 uprostřed je řídicí jednotka zevnitř. Uvnitř řídicí jednotky můžeme vidět tři spínané zdroje o výstupním napětí 36 V DC a proudu 13,3 A, kde každý zdroj napájí vždy dva ze šesti převodníků pro laserové hlavy. Napravo na Obr. 5-5 je displej, na kterém vidíme zvolený výkon laseru, rychlost podávání drátu a průtok inertního plynu na základě hodnot otestovaných při předchozích měřeních pro podobné modely tisknuté stejným materiálem, viz Tabulka 2. Kde máme jako materiál zvolenou uhlíkatou ocel a dále podle počtu perimetrů zjistíme, jaké parametry jsou vhodné pro tisk. Později by měl program pro převod modelu v CAD do trajektorií tiskárny vyhodnotit na základě typu materiálu a počtu perimetrů další parametry.

Například rychlost podávání drátu je závislá na typu materiálu a to už bude umět program vyhodnotit sám.

Tabulka 2 Příklad možných nastavení pro uhlíkatou ocel

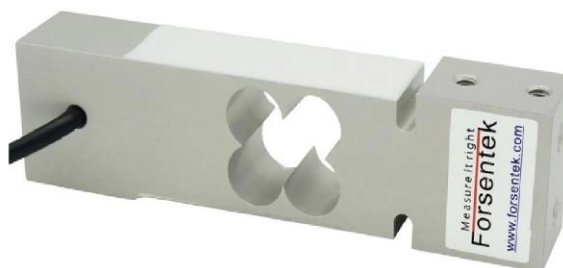
	Print type	density g/m3	Print speed (mm/s)	Feeder Speed (mm/s)	Laser Power (W)	Argon Flow (ml/min)
Mild Steel ER70S-6	Hollow/1 Perimeter	7,8			800	800
	Hollow/2 Perimeters		7,5	12,2	860	1000
	Solid – Infill		10	15,28	950	1200
	HQ SOLID		5	6,37	1000	1200

Pro kontrolu tisku a rovnoměrného roztavení materiálu slouží univerzální čidlo měření zatížení, se kterým je propojen software Meltio. Čidlo je umístěné v horní části laserové hlavy a můžeme ho vidět napravo na Obr. 5-7. Kalibrace čidla probíhá zavěšením závaží na laserovou hlavu. Snímač kontroluje, jestli je proces plynulý, jak je vidět v dolní části obrazovky v grafu na Obr. 5-7. Pokud se drát špatně odtavuje, tak se bude laserová hlava víc nadzdvíhat. Naopak pokud bude drát při odtavování odtékat vznikne propad. Pro čidlo je možné nastavit tolerance a přesnost plynulosti tisku. Vizuální kontrola je možná přes průzory v buňce, které bezpečně ochrání zrak obsluhy. Zajištění bezpečnosti laserového pracoviště je dána normou ČSN EN 60825-1 ed. 3, která musí být výrobcem takového zařízení dodržena. To znamená, že celé zařízení je uzavřené v buňce a spuštění tisku je možné jen při jejím úplném uzavření. Další funkcí laserové hlavy je programovatelný zdroj pro předehřev drátu, který napomáhá k zrychlení procesu tisku.

Printing screen



- | | |
|--|---|
| 1. Printer status - Standby, Laser Armed, Printing | 7. Tare load cell |
| 2. Security signals status | 8. Activate/deactivate load cell scroll |
| 3. Activated signals | 9. Save onto log load cell values |
| 4. Argon information | 10. Show load cell values |
| 5. Laser information | 11. Change chart zoom |
| 6. Load cell value | |



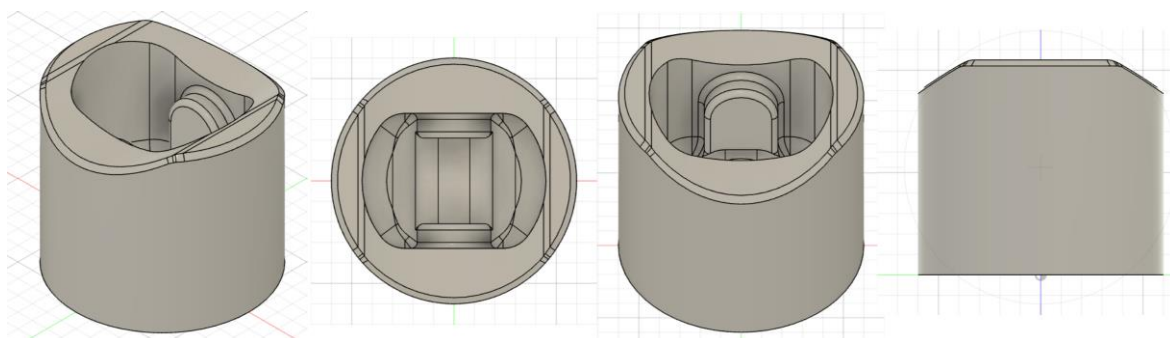
Obr. 5-7 Senzor měření zatížení pro měření hmotnosti FNV Forsentek (napravo) a Obrazovka kontroly kvality tisku (nalevo)

KAPITOLA 6: MĚŘENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI VÝROBY KOVOVÉHO DÍLU

Pro posouzení energetické náročnosti aditivní výroby kovových dílů v porovnání s dalšími dvěma konvenčními způsoby výroby jsem provedla měření elektrického příkonu a spotřebované energie. Kromě elektrické energie potřebné k realizaci technologického procesu výroby byla zhodnocena také spotřeba materiálů potřebných pro výrobu kovového dílu a časová náročnost výroby.

6.1 Aditivní výroba pístu

Proces tisku začíná vytvořením modelu v programu CAD a poté převodem modelu na trajektorie robota. Jako testovací objekt pro tisk byl vybrán píst, viz Obr. 6-1. Bylo potřeba zvolit takový objekt, který lze vytisknout, vyfrézovat i odlít, aby bylo možné porovnání energetické náročnosti jeho výroby. Materiál pro výrobu kovového dílu byla vybrána uhlíková ocel o průměru 1 mm a inertní plyn byl použit stlačený argon 4.6, který sloužil jako ochranná atmosféra v místě tavení oceli a částečně plnil funkci chlazení laserové hlavy. Zároveň bylo snahou zvolit objekt, který bude mít nějakou vnitřní sktrukturu, aby se využilo výhody aditivní výroby.



Obr. 6-1 Model v pístu v CAD

Pro měření byly využity dva měřicí přístroje, klasický elektroměr KWZ-3PHD-D63 a přístroj vyrobený Metrou Blansko PU 294 Delta, který lze použít pro revize třífázových elektrických spotřebičů. Na Obr. 6-2 je napravo elektroměr KWZ-3PHD-D63, uprostřed je přístroj PU 294 Delta, pomocí kterého bylo možné sledovat okamžité hodnoty napětí, proudu, činného a zdánlivého příkonu pro celé zařízení i pro jednotlivé fáze a vlevo je trojfázový adaptér.

Tabulka 3 Rozsahy a přesnost pro měřené veličiny pro přístroj PU 294

Měřená veličina	Rozsah	Přesnost
Odebíraný proud I_N	0 až 10 A	$\pm (2 \% + 5 \text{ dig.})$
Činný příkon P	0 až 2300 W	$\pm (3 \% + 10 \text{ dig.})$
Zdánlivý příkon S	0 až 2300 VA	$\pm (3 \% + 10 \text{ dig.})$
Účinník $\cos \varphi$	0,50 až 1	$\pm 5 \text{ dig.}$

Přístrojem PU 294 Delta lze měřit izolační odpory, proud ochranným vodičem, unikající proudy včetně zdravotnických přístrojů, dotykové napětí, síťové napětí, proud odebíraný

spotřebičem, činný příkon, zdánlivý příkon, účinník měřeného spotřebiče. Dále má možnost připojení snímače teploty, proudového klešťového transformátoru, otáčkoměru a snímače čárového kódu. Konkrétní rozsahy a přesnost pro měřené veličiny využité v diplomové práci jsou uvedeny v Tabulka 3.

KWZ-3PHD-D63 je digitální měřič spotřeby pro maximální hodnotou proudu 63 A od firmy EATON. Jedná se o dvoutarifní elektroměr pro přímé měření s třídou přesnosti 2. Lze ho použít pro jednofázové, dvofázové i trojfázové měření. Splňuje směrnici EN 62053-21. Základní technické parametry pro elektroměr jsou uvedeny v Tabulka 4.

Tabulka 4 Technické parametry pro elektroměr KWZ-3PHD-D63

Technické parametry	
Jmenovité napětí U_n	230/400 V AC
Pracovní rozsah	0,9 - 1,1 · U_n
Jmenovitý proud I_n	5 A
Maximální proud I_{max}	63 A
Jmenovitá frekvence	50 Hz ± 5 %



Obr. 6-2 Měřící přístroje

Jednotka pro 3D tisk se skládá z robotického ramene Fanuc a navařovací hlavy Meltio, jak je vidět na Obr. 5-2 v předchozí kapitole. Součástí je také chladicí jednotka a řídicí elektronika jako např. display a ovladač. Všechny tři fáze zatěžuje jen robotické rameno, laser zatěžuje dvě fáze a chlazení je jednofázové.

Na začátku procesu byla zjištěna hmotnost použitého drátu a odečten současný stav elektroměru. Byly zvoleny vstupní parametry: průtok plynu, výkon laseru, rychlost podávání drátu a rychlost robotického ramene. Dále muselo být zajištěno, aby deska, na kterou se bude objekt navařovat, měla přibližně 20 °C, tedy pokojovou teplotu. Vstupní parametry v Tabulka 5

byly zvoleny na základě doporučení od společnosti Meltio a poté experimentálně doladěny na základě kvality tisku pístu. Bylo provedeno 5 zkušebních tisků na základě, kterých bylo možno upravit program na převod modelu na trajektorii a parametry tak, aby tisk proběhl úspěšně.

Tabulka 5 Vstupní parametry pro aditivní výrobu

vstupní hodnoty parametrů	
výkon laseru (W)	1000
rychlost podávání drátu (mm/s)	15,25
průtok plynu (l/min)	9,93
rychlost robotického ramene (mm/s)	10
váha drátu (kg)	9,6
celková spotřeba na elektroměru (kWh)	32,6
počáteční čas měření (h:min)	8:15

Objekt se skládá z perimetru (obvodu) a z výplně. Vždy, když dokončí danou vrstvu se proces zastaví, aby vrstva vychladla a v tomto stavu je spotřeba 745 W. Příkon chlazení laserové hlavy je přibližně 1500 W. Pokud probíhá proces navařování, je příkon přibližně 3 kW a pokud při procesu sepne kompresor, stoupne příkon na hodnotu 4,5 kW. Tyto hodnoty byly získány pomocí přístroje PU 294 Delta a pomocí elektroměru. Po hodinovém měření a porovnání se zobrazenými hodnotami na ovladači k jednotce pro 3D tisk bylo ověřeno, že spotřeba energie byla 3 kWh.

V Tabulka 6 je patrné, jak byly jednotlivé fáze zatížené. Jedná se o okamžité efektivní hodnoty výkonu, proudu a také účinníku, které byly odečítány vždy při spuštění procesu navařování výplně pístu. Při navařování perimetru pístu nebo při chlazení probíhaly změny příliš rychle, než aby se daly zaznamenat a měřicí přístroj neumožňoval nastavení delšího času průměrování zobrazovaných hodnot. Na třetí fázi byla připojena chladicí jednotka a bylo patrné, že při sepnutí vzrostl proud a příkon se zvýšil o 1,5 kW.

Tabulka 6 Zatížení jednotlivých fází pro aditivní výroby

čas	L1			L2			L3		
	I (A)	Účinník (-)	P (W)	I (A)	Účinník (-)	P (W)	I (A)	Účinník (-)	P (W)
11:50	1,73	0,87	383	9,18	0,97	2057	2,54	0,8	507
12:06	1,78	0,87	377	9,1	0,97	2065	2,54	0,8	502
12:15	1,86	0,87	385	9,41	0,97	2144	9,11	0,8	2049
12:30	1,84	0,87	387	9,51	0,97	2147	9,11	0,8	2001
13:00	1,84	0,87	385	9,56	0,97	2144	9,09	0,8	2001
13:15	1,78	0,87	380	9,54	0,97	2140	2,62	0,8	511

Pro porovnání byla měřena celková spotřeba pomocí PU 294 Delta, elektroměru a zároveň bylo možné zobrazit spotřebu na ovladači jednotky 3D tiskárny. V Tabulka 7 jsou zaznamenány okamžité hodnoty zdánlivého a činného výkonu společně s účinníkem a dále odečet hodnot spotřebované energie z elektroměru.

Z Tabulka 7 je patrné, že hodinová spotřeba za měřený úsek od 12:15-13:15 byla 2,72 kWh a pro úsek 12:06 – 13:00 byla 2,4 kWh. Celková doba tisku byla 7 hodin a 34 minut. Tudíž odhadovaná spotřeba v prvním úseku by byla 20,4 kWh a v druhém úseku 18 kWh. Průměrná

hodinová spotřeba zaznamenaná elektroměrem byla 2,55 kWh, z čehož vyplývá předpokládaná průměrná spotřeba energie celého procesu 19 kWh.

Tabulka 7 Celková spotřeba jednotky pro 3D tisk

čas	PU 294 Delta – celkový			elektroměr	
	S (VA)	P (W)	Účinnost (-)	Odečet stavu spotřeby (kWh)	spotřeba (kWh)
11:50	4700	4375	0,94	918,86	0
12:06	4727	2934	0,94	919,16	0,3
12:15	3158	2944	0,94	919,55	0,69
12:30	4850	4527	0,94	920,23	1,37
13:00	4780	4530	0,94	921,56	2,7
13:15	4748	4506	0,94	922,27	3,41
13:22	3255	3018	0,94	922,7	3,84

Výstupní hodnoty byly zaznamenány do Tabulka 8. Celková spotřeba materiálu, plynu a energie byla porovnána se vstupními hodnotami a následně byly vypočítané výsledné spotřeby.

Tabulka 8 Výstupní hodnoty aditivní výroby

Výsledné hodnoty parametrů	
váha drátu (kg)	8,8
celková spotřeba na elektroměru (kWh)	50,3
počáteční čas měření (h:min)	15:49
doba spotřeby plynu (min)	312,7

V Tabulka 9 jsou výsledné spotřeby pro aditivní výrobu. Spotřeba drátu byla po zvážení drátu 0,8 kg, po zvážení čisté desky a desky s vytištěným materiálem byla výsledná spotřeba drátu 0,9 kg. V obou případech byla spotřeba materiálu pod 1 kg. Celková spotřeba energie byla 17,7 kWh, tudíž odhad z hodinové spotřeby 18 kWh byl velmi blízko.

Tabulka 9 Celková spotřeba pro aditivní výrobu

Celkové spotřeby aditivní výroby	
váha drátu (kg)	0,8
celková spotřeba na elektroměru (kWh)	17,7
celková doba tisku (h:min)	7:34
celková spotřeba plynu (l)	3127

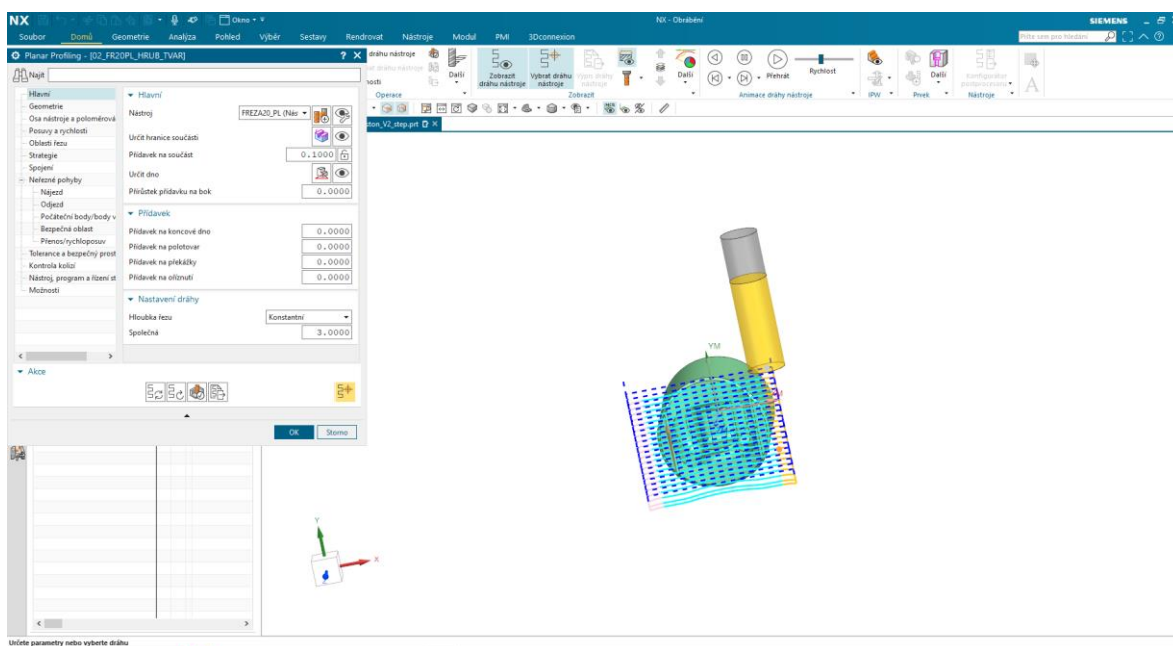
Spotřeba inertního plynu byla 3127 litrů tedy 31,3 hl. To ale není odpovídající objemu lahví s argonem při normálním atmosférickém tlaku. Jelikož se jedná o 20 litrové lahve s tlakem 200 barů, tak možné přibližně vypočítat dobu čerpání plynu při průtoku 9,93 litrů za minutu na 402,8 minut. Tím, že je láhev plněná pod tak vysokým tlakem argonu, tak vystačí na celý proces výroby dílu. Spotřebuje se 78 % obsahu láhve a zbude ještě 90,1 minut možného čerpání argonu.

$$\text{přibližná doba použití} = \frac{\text{obsah náplně s argonem} \cdot \text{tlak láhve}}{\text{průtok plynu}} = \frac{20 \cdot 200}{9,93} = 402,8 \text{ min [1]}$$

6.2 Frézování pístu

Další metodou výroby kovových částí, u které byla zkoumána energetická náročnost, bylo frézování na CNC stroji. Byl zvolen tento typ obrábění, jelikož zde byla obdobná úroveň automatizace jako u aditivní výroby. Příkon CNC stroje byl 18 kW, dále byl ke stroji připojený systém vodního chlazení. Jednalo se o uzavřený okruh, tudíž spotřeba vody pro chlazení byla minimální. Spotřeba CNC stroje velice závisí na hmotnosti výrobku a technologii. Pokud je velký výrobek a bude se pohybovat celý stůl, tak je potřeba vyšší výkon motorů a tudíž bude větší spotřeba. Pro malé výrobky stačí polohovadlo a malý motor, což je případ zvolené výroby pístu.

Při sestavování programu frézování pístu bylo nutné zvolit optimální řezné podmínky, například rychlost obrábění, která se musí přizpůsobit opotřebením nástrojů, technologickým postupům. Dále bylo nutno zvolit správné nástroje a dodržet posloupnost kroků. Jak program vypadá je patrné na Obr. 6-3, jedná se o program Nx od společnosti Siemens. Pomocí programu Nx lze navrhovat výrobní procesy nejen pro obrábění, ale i pro jiné procesy výroby kovových částí.



Obr. 6-3 Program Nx od firmy Siemens pro obrábění pomocí různých procesů výroby kovových částí

Pro frézování byl použit CNC stroj s polohovadlem, který umožňuje pěti osé obrábění, díky kterému bylo možné použít jen jednu frézu pro obrobení celého výrobku. Pokud by bylo použito jen tříosé obrábění, tak by bylo nutné použít na celý proces frézy tři.

Obsluha musí hlídat celý proces a dávat pozor, aby probíhal správně. Například pokud se nástroj poškodí, tak by to obsluha měla slyšet nebo vidět jiskření. Celý proces se řídí pomocí ovládacího panelu, který je napravo na Obr. 6-4.



Obr. 6-4 CNC stroj pro obrábění kovových dílů

Pro frézování byly použity čtyři hrubovací nástroje a dva nástroje na čisto. Nástroje můžete vidět na Obr. 6-5. Program byl rozdělen na 6 procesů podle nástrojů, jak je uvedeno v tabulce na Obr. 6-6. Celý program se skládá z deseti dílčích procesů. Tyto operace jsou sloučeny do skupin podle použitých nástrojů a k nim jsou přiřazeny orientační časy. Orientační proto, že v průběhu jednotlivých procesů obsluha pozoruje, zda by se nastavené parametry nedaly vylepšit. Hlavní faktor, který se měnil, byla rychlost obrábění. Tudíž byly některé dílčí procesy zkráceny z třiceti minut na dvacet pět.



Obr. 6-5 Použité nástroje pro frézování. Napravo nástroje na čisto, nalevo hrubovací nástroje

Tool Number	Tool Name	Tool Description	Tool Diameter	Adjust Register	Cutcom Register	Flute Length	Tool Ext. Length	Holder Description	Tool Path Time in Minutes	Operation Name
0	FREZA20_PL	Nástroj frézování - 5 parametrů	20.0000	1	1	50.0000	75.0000		28.01	01_FR20PL_HRUBD80 02_FR20PL_HRUB_TVBAR
0	FREZA8	Nástroj frézování - 5 parametrů	8.0000	0	0	20.0000	40.0000		36.20	03_FR8_HRUB_VNITREK
0	FREZA6	Nástroj frézování - 5 parametrů	6.0000	0	0	18.0000	40.0000		18.51	04_FR6_HRUB_VNITREK
0	KULOVKA6	Nástroj frézování – kulová fréza	6.0000	0	0	50.0000	75.0000		19.88	05_KUL6_HRUB
0	MONOLIT20	Nástroj frézování - 5 parametrů	20.0000	0	0	50.0000	75.0000		11.04	06_MON20_CISTO_D80 07_MON20_TVBAR_CISTO
0	KULOVKA4	Nástroj frézování – kulová fréza	4.0000	0	0	50.0000	75.0000		60.57	08_KUL4_CISTO 09_KUL4_DNO 10_KUL4_SRAZENI

Author : cnc

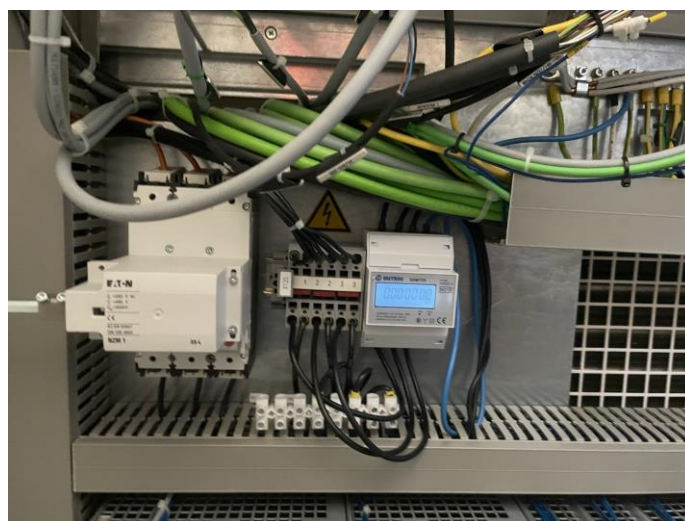
Checker : cnc

Date : Thu May 11 10:46:39 2023

Obr. 6-6 Jednotlivé procesy programu pro frézování pístu

Pro výrobek byl zvolen plný materiál z uhlíkaté oceli o hmotnosti 2,4 kg. Výrobek byl po dokončení procesu opět zvážen a měl hmotnost stejnou, jako při výrobě pomocí aditivní technologie, tedy 0,8 kg. Spotřeba materiálu byla 2,4 kg, protože se jednalo o metodu, kde se vytvářel konečný produkt odebráním materiálu a nikoliv přidáváním. Tedy ztrátový materiál byl 1,6 kg. Po konzultaci s obráběčem by bylo možné použít menší množství materiálu, ale celý proces by se tím zkomplikoval, jelikož by bylo potřeba vymyslet úchyty pro výrobek a vše by muselo být přesnější.

Měření spotřeby energie bylo provedeno pomocí elektroměru, který byl zapojen do rozvaděče CNC stroje hned za hlavní vypínač, tak bylo zajištěno přesné měření spotřeby celého CNC stroje, včetně systému chlazení.



Obr. 6-7 Zapojený elektroměr pro měření spotřeby CNC stroje

Z elektroměru byl odečítán stav spotřeby energie přibližně po patnácti minutách, aby mohlo být zjištěno, jestli byla shodná spotřeba pro jednotlivé procesy. Z naměřených dat byl následně vytvořen graf Figure 1, ze kterého je zřejmé, že na elektroměru narůstala spotřeba energie rovnoměrně a tudíž byl podíl dílčích procesů na celkové spotřebě stejný. Na každý z procesů bylo spotřebováno stejné množství energie.

Tabulka 10 Spotřeba energie při frézování pístu v závislosti na čase

Čas (h:min)	spotřeba (kWh)
8:58	0,2
9:02	0,3
9:16	1,1
9:33	2,1
9:44	2,6
10:08	4,0
10:30	5,2
10:54	6,4
11:13	7,4
11:23	7,9
11:30	8,3
11:41	8,9
11:45	9,0
11:47	9,1
12:03	9,8
12:12	10,3

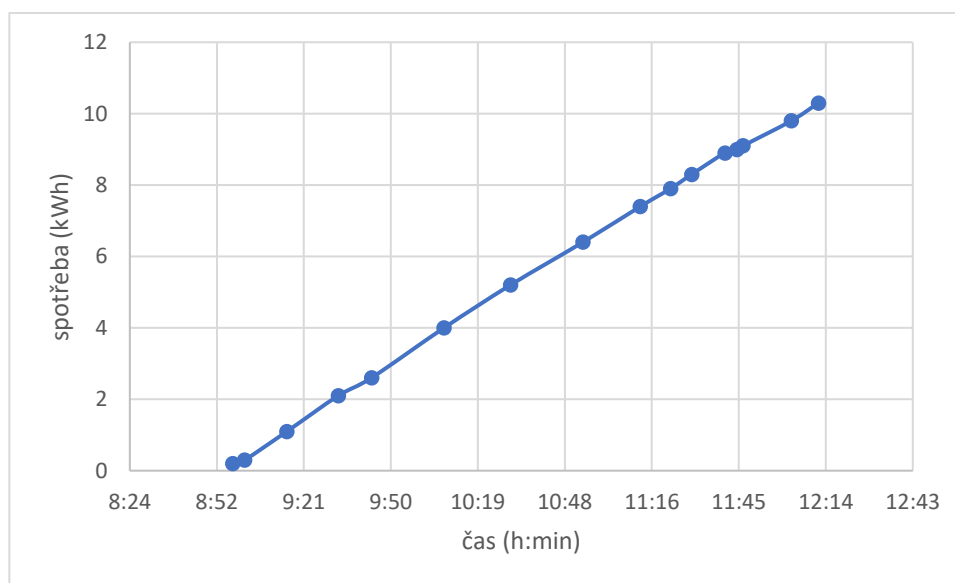


Figure 1 Spotřeba energie při frézování pístu v závislosti na čase

Nakonec byla vytvořena podobná tabulka výstupních hodnot, jako pro aditivní výrobu, aby bylo možné dané výrobní procesy porovnat na základě zvolených parametrů. V Tabulka 11 je patrné, že celková spotřeba elektrické energie pro výrobu pístu pomocí frézování byla 10,3 kWh.

Zároveň byla doba výrobního procesu pouze 3 hodiny a 14 minut. Čas výroby dílu byl poměrně dlouhý, jelikož se jednalo o prototyp. Pokud by šlo o sériovou výrobu, čas by se dal snížit přibližně na dvě hodiny. K tomu by bylo zapotřebí nákupu specializovaných nástrojů a provedení úpravy programu na základě výroby prototypu prvního pístu. Dalším zkrácením procesu při sériové výrobě by bylo frézování dvou nebo tří výrobků současně. Čímž by se ale zvětšila spotřeba energie, jelikož by k tomu byl potřeba vyšší výkon motorů pro manipulaci s obráběnými písty.

Tabulka 11 Celková spotřeba materiálu, energie a časová náročnost výroby při frézování

Celkové spotřeby pro frézování	
váha materiálu (kg)	2,4
celková spotřeba na elektroměru (kWh)	10,3
celková doba výroby (h:min)	3:14

6.3 Odlití pístu

Odlití pístu bylo stanoveno kvalifikovaným odhadem na základě teorie. K roztavení oceli byla použita indukční pec a odlévání by probíhalo z pánvi se spodní výpustí, viz Obr. 6-8. Slévárny Lutín mi poskytly kalkulaci parametrů pro píst o hmotnosti 80 kg z uhlíkaté oceli. Jako modelové zařízení je brán jeden model na deskách a příslušenství, které obsahuje vtokovou soustavu a nálitky. Pro odlévání byla zvolena jednorázová forma z furanu, aby bylo možné srovnání s aditivní výrobou a frézováním, kde je možné vytvořit široké spektrum výrobků.



Obr. 6-8 Odlévání z pánvi s dolní výpustí

Poskytnuté hodnoty jsou v Tabulka 12. Dále byl proveden přepočítání na píst o hmotnosti 0,8 kg, aby byly hodnoty srovnatelné. Výpočet je pouze orientační a jelikož jde o metodu často využívanou pro velkovýrobu, tak bylo dále předpokládáno, že za uvedených deset hodin by se odlilo 100 pístů o hmotnosti 0,8 kg. Tabulka 13 je tedy pouze orientační spotřeba energie a materiálu na jeden píst.

Tabulka 12 Celková spotřeba pro odlití pístu o hmotnosti 80 kg

Celkové spotřeby pro odlévání	
celková spotřeba materiálu (kg)	160,00
celková spotřeba el. energie (kWh)	440,00
celková doba výroby (h:min)	10:00

Tabulka 13 Celková spotřeba pro odlití pístu o hmotnosti 0,8 kg

Celkové spotřeby pro odlévání	
celková spotřeba materiálu (kg)	1,60
celková spotřeba el. energie (kWh)	4,40
celková doba výroby (h:min)	0:06

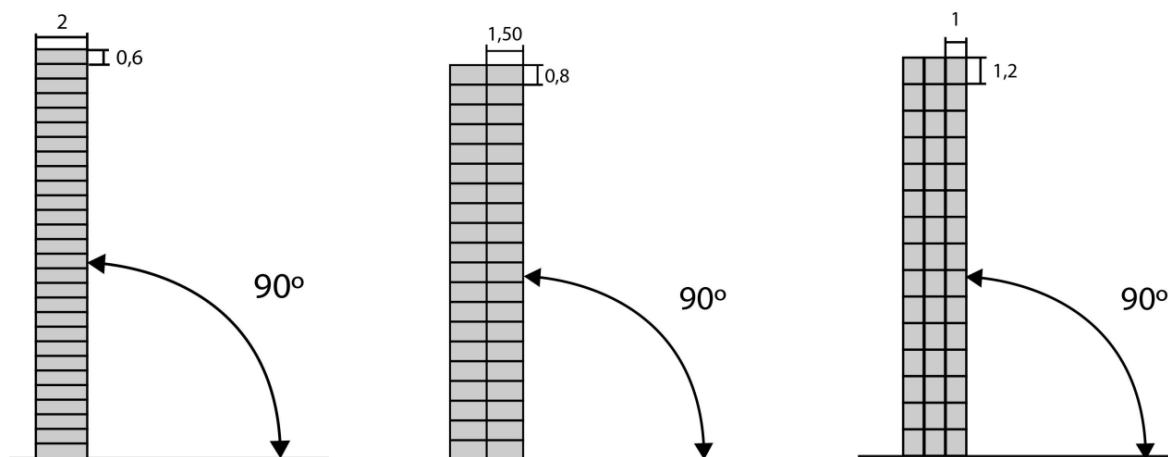
KAPITOLA 7: SIMULACE PROCESU VÝROBY

Program pro převod modelu z CAD do trajektorie robota je teprve ve fázi vývoje. Byl využit software pro 3D tisk je od firmy RH-Tech pod jménem RHCamPost processor. Trajektorie se skládala ze souřadnic (x, y, z). Do programu byla zadána rychlost robota, přičemž bylo možné zvolit počet perimetrů v počtu jeden, dva nebo tři obvodové perimetry. Méně perimetrů povede k hladšímu a tedy estetičtějšímu výsledku. Při více perimetrech zajíždí výplň mezi perimetry a tím je zajištěna větší pevnost. Tudíž je nutné zvolit počet perimetrů podle požadovaného výsledku či využití.

Tabulka 14 Dané parametry v závislosti na počtu perimetrů

Print type	Layer height	Layer width	Robot speed	Feeder speed
Hollow/1 Perimeter	0,6	2	10	15,28
Hollow/2 Perimeters	0,8	1,5	10	15,28
Hollow/3 Perimeters Solid - Infill	1,2	1	10	15,28
HQ SOLID REFRIGERATED BASE	1	1	5	6,37

Zvoleným počtem perimetrů se mění výška vrstvy, viz Tabulka 14. To bere program v potaz a přepočítá podle toho z-část trajektorie. Čím širší je perimetr, tím více se tiskne dovnitř objektu.



Obr. 7-1 Výška a šířka vrstvy v závislosti na počtu perimetrů

Výplň je zde dána automaticky plná narozdíl od 3D tisku plastů, kde může být různá vnitřní struktura. Program na základě simulace vygeneruje čas tisku.

Nyní je program ve fázi vývoje a funguje tedy spíš na zpětné vazbě z experimentů tisku. Výrobek byl několikrát vytištěn a na základě pozorování, zda se materiál správně rozlévá a tvoří požadovanou strukturu, bylo vyhodnoceno, jestli je program nutné pozměnit.

Programátor potřebuje mít zadaný typ materiálu, počet perimetrů a uvážit, jak podle toho bude vypadat výška a šířka vrstvy a rychlost robota, viz Tabulka 14. Na základě těchto informací vytvoří trajektorii a vypočte čas tisku.

V době, kdy bylo na 3D tiskárně prováděno měření, byl program ve fázi vývoje. Nyní je program schopný podle zadaného materiálu a perimetru pro daný model sám určit rychlost robota, rychlost podávání drátu, výkon laseru a průtok plynu. Do programu je tak možné vložit přes flash disk 3D modely ve formátech STEP, STL a IGES. Dále je možné zvolit materiál a počet perimetrů a zadat pokyn pro tisk. Nastavení parametrů je tak zcela automatizováno a je možné získat také informace o spotřebě, tudíž odvodit zákazníkovi přesnou cenu výrobku.

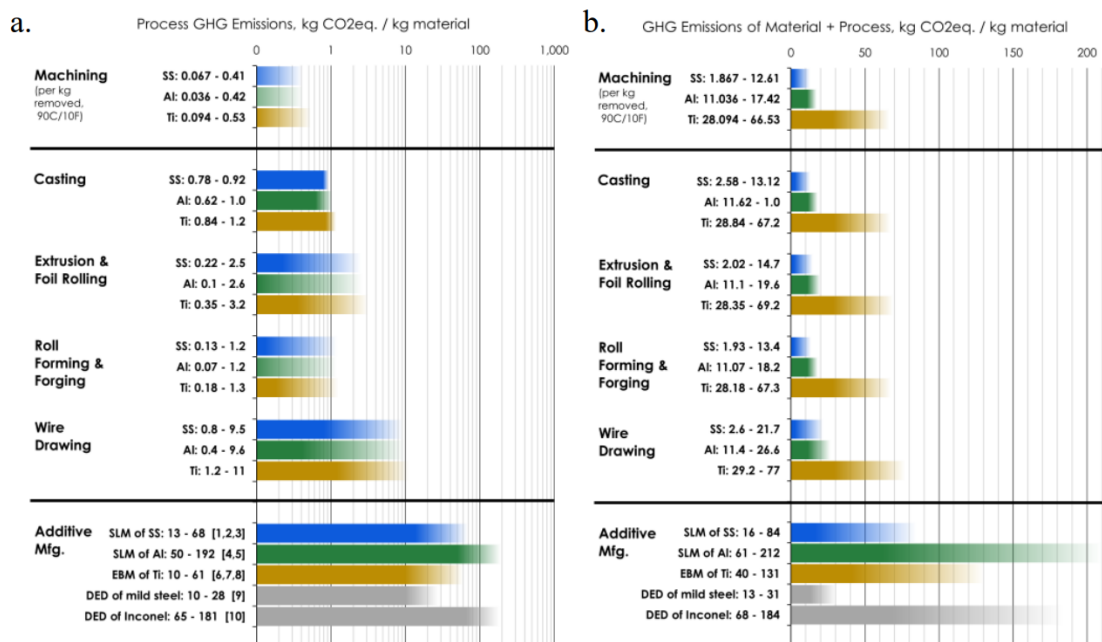
KAPITOLA 8: ENVIROMENTÁLNÍ DOPADY

Dalším z faktorů, který má v dnešní době velký vliv na výběr použité technologie je dopad daných metod na životní prostředí. Dopad je stanoven nejen pro samotný proces výroby, ale jsou brány v potaz dopady spojené s těžbou surovin, jejich zpracováním, dovozem a všech podprocesů, které výrobek má od vytěžení po dodání zákazníkovi.

V prvních dvou podkapitolách byly čerpány informace z již provedených studií na danou problematiku a v poslední podkapitole bylo provedeno zjednodušené porovnání pomocí naměřené spotřeby energie a materiálu. Enviromentální dopady jsou složité a nelze mezi sebou přímo porovnávat jednotlivé technologie a proto je ve studiích uvedeno více faktorů pro porovnání, než jen přímá produkce CO₂. Například životnost, pokud výrobek vydrží delší dobu, není nutné znovu provést procesy pro výrobu, a podobně.

8.1 Porovnání pomocí uhlíkové stopy

Jednou z metod měření enviromentálních vlivů výroby je uhlíková stopa tedy kg CO₂eq na kg. Tato metoda je velmi rozšířená a je k ní dostupné velké množství dat. Pomocí této metody je možné porovnávat různé produkty z různých materiálů, jelikož se vztahuje jen k hmotnosti. Což je na jednu stranu její výhoda, ale bohužel tím, že se jedná o zjednodušenou metodu, tak zanedbává mnoho enviromentálních vlivů. Dalším problémem je, že ne vždy je k dispozici uhlíková stopa, ale pouze spotřebovaná energie v MJ. Tu je možné přepočítat na kg CO₂eq na kg, ale tím se stává informace nepřesná. Jelikož chybí informace o zdrojích energie, které byly pro výrobu využity. Tudíž není známé kolik energie bylo například ze solárních nebo větrných elektráren, proto byl pro převod použit energetický mix US. (6)



Obr. 8-1 a. Dopad konvenčních metod výroby v porovnání s aditivní výrobou v kg CO₂eq na kg zpracovaného materiálu (log měřítko). b. Dopad výroby plus vliv materiálu samotného (lineární měřítko). SS = stainless steel (nerez), Al = aluminium (hliník), Ti = titanium (titan). Čísla v závorkách odkazují na citace ve zdrojovém textu. (6)

Na Obr. 8-1 je patrné, že pokud bude uvažován jen výrobní proces, tak aditivní výroba má mnohem větší uhlíkovou stopu, než konvenční metody výroby jako je obrábění, odlévání, tváření, válcování a tažení drátu. Nejistota pro aditivní výrobu je $\pm 40\%$, protože se data pro aditivní výrobu takto liší pro zdroje, ze kterých tato studie čerpala. Proto je část dat transparentní (to znázorňuje tu nejistotu). (6)

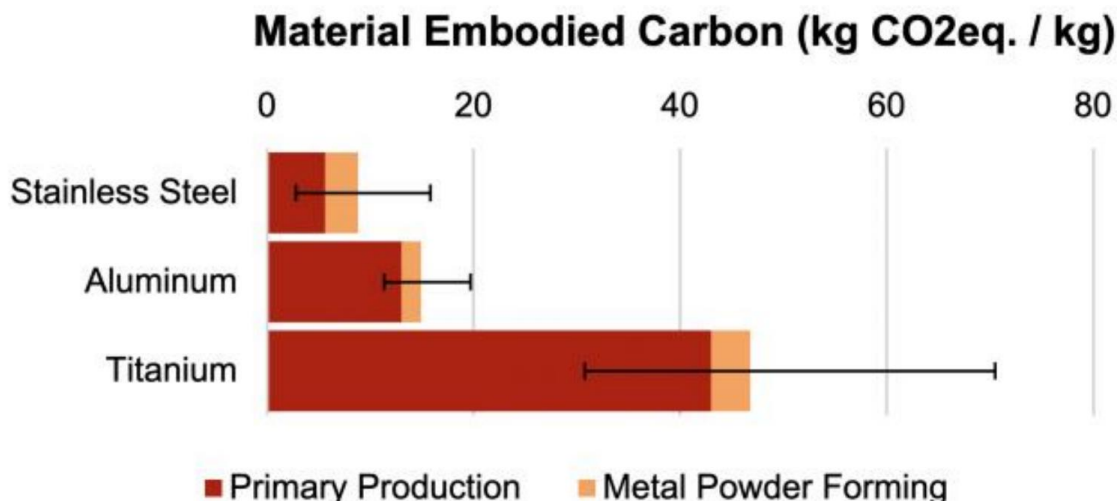
Obr. 8-1 b. zobrazuje vliv daného výrobního procesu na životní prostředí spolu s vlivem materiálu jako je například zpracování daného materiálu do formy prášku. A je zřejmé, že se rozdíl o dost zmenšil. Když se například zaměříme na uhlíkatou ocel (mild steel), která byla využita při měření v praktické části této práce, tak je jeho uhlíková stopa při aditivní výrobě srovnatelná s konvenčními metodami. Největší výhoda této metody porovnání je převod logaritmického měřítka do lineárního.

Narážíme tady na další problém v posuzování uhlíkové stopy. Pro frézování se měří podle odstraněného materiálu z počátečního kusu železa, načež u aditivní výroby a jiných konvenčních metod se měří pomocí materiálu, který byl přidán. Proto má geometrie daného objektu velký vliv na uhlíkovou stopu a špatně se zjednodušeně porovnává s aditivní výrobou.

Z těchto porovnání v Obr. 8-1 b. vyplývá, že aditivní výroba kovových částí je méně udržitelná, než konvenční výroba kovových částí. Toto ale neplatí vždy. Jak již bylo poukázáno v Kapitola 3: pokud jsme díky lepší technologii schopni zmenšit hmotnost výrobku, tedy i množství spotřebovaného materiálu, nebo je možnost rozdělení výsledného objektu na menší počet částí tím, že je možné vytisknout větší části vcelku a zmenšit požadavek na množství sváření. Aditivní výroba je ideální metoda pro výrobu originálních kusů, prototypů a pro speciální využití, ale z dostupných dat je patrné, že se nejedná o náhradu velkovýroby kovových částí.

Typ tiskárny, která byla zvolena pro výrobu kovového dílu v praktické části práce, používal materiál ve formě přídatného drátu. Při porovnání materiálu ve formě prášku a přídatného drátu vyplývá, že prášek má větší přesnost a proto se využívá v aplikacích, kde jsou vyžadované komplexnější tvary vyráběného dílu se složitější vnitřní strukturou. Materiál ve formě přídatného drátu je levnější, tisk je poté rychlejší, je zde větší bezpečnost a celkově se celý proces zjednoduší. (7)

Pro názornost, jak velký podíl má příprava prášku na uhlíkovou stopu aditivní výroby, byl přiložen graf na Obr. 8-2. Je zřejmé, že příprava prášku má největší podíl při využití nerezové oceli. Lze předpokládat, že jelikož je výroba přídatného drátu méně náročná, tak i dopad na životní prostředí by měl být menší. Nicméně je patrné, že pro Titan je vliv přípravy prášku zanedbatelný a pro hliník nejspíš také.



Obr. 8-2 Znázorňuje vliv v kg CO₂eq. na kg pro primární výrobu a pro výrobu kovového prášku. Nejistoty obou hodnot jsou vyjádřeny černou chybovou křivkou. (6)

Přímé porovnání frézování a aditivní výroby není úplně přesné, protože každá metoda se hodí pro jiný typ výrobků. Frézování je vhodné pro celistvé zcela vyplněné objekty, jako například krychle. Načež aditivní výroba vyniká ve výrobě dutých profilů a mřížek.

Studie z roku 2017 vzala v potaz rozdílné kvality frézování a aditivní výroby a provedla porovnání na třech různých objektech: jeden plný, jeden částečně dutý a jeden tenkostěnný. V této studii byla pro aditivní výrobu zvolena metoda s elektronovým svazkem tedy EMB (Electron-beam additive manufacturing) a materiál pro posouzení byl zvolen titan. Jak bylo uvedeno na Obr. 8-1, tak výrobní proces aditivní výroby má větší enviromentální dopad, než konvenční metody výroby kovových částí. Pro aditivní výrobu při použití titanu, klesá dopad materiálu na životní prostředí s rostoucí hmotností objektu. Načež pro konvenční výrobu zůstává dopad stejný. Tím, že je titan na výrobu velmi energeticky náročný tak v případě částečně dutého a tenkovrstvého objektu vyšla aditivní výroba jako udržitelnější metoda. Tím, že enviromentální vliv neměří pomocí kg materiálu, ale využívá referenční součástku, ke které je možné vliv vztáhnout, tak se jedná o přesnější porovnání. (8)

Další studie z roku 2020 porovnávala odlití lopatky turbíny pomocí metody ztraceného vosku s metodou aditivní výroby SLM (Selective laser melting). Tato studie vzala v potaz i konečné dopracování výrobku jako je konečné broušení a frézování povrchu. Výsledkem této studie bylo, že SLM má menší dopad na životní prostředí než odlévání, což je v rozporu s rozbohem na Obr. 8-1 z první studie. (9)

Postupně z těchto studií vyplývá, že využití aditivní výroby je i z hlediska enviromentálních vlivů na uvážení a jsou situace, kde je její využití udržitelnější, než konvenční metody, ale stále tato oblast vyžaduje více dat z procesů aditivní výroby a další přezkoumání.

Jako vhodné přezkoumání se jeví volba různých referenčních objektů, jelikož každá metoda vyniká pro jiné druhy objektů a jeví se udržitelnější nebo je obecně jednodušší danou strukturu touto metodou vytvořit.

Taková porovnání by bylo vhodné udělat pro kosmický a letecký průmysl. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, tak právě zde je velký potenciál uplatnění aditivní výroby. Jako objekt je možné zvolit výrobek s vnitřními kanály. Další objekt by měl mít vysoké požadavky na přesnost a povrchovou úpravu, jelikož díl vytvořený aditivní výrobou musí být ještě po vytištění dopraven frézou nebo nějak obroušen, což opět přidá na environmetálním dopadu.

8.2 Porovnání pomocí dalších faktorů a dopadů

Dalším důležitým faktorem pro porovnání aditivní výroby s konvenčními metodami je životnost daných výrobků, neboli odolnost vůči vnějším vlivům okolního prostředí, mechanická pevnost, apod.

Pro kosmický průmysl má velký vliv využití aditivní výroby pro výrazné snížení váhy součástí. Tím totiž dochází nejen k úspoře materiálu, ale hlavně k úspoře paliva o 6,4 %. Takto výrazný vliv, ale využití lehčích součástí vytvořených aditivní výrobou nemá na automobilový a železniční průmysl. Ze studií vyplývá, že letecký průmysl pro komerční lety na dlouhé vzdálenosti ušetří 2000x více energie ve formě paliva, než automobilový a letecký průmysl. Tento velký rozdíl je zapříčiněn kratší životností automobilů, kratšími vzdálenostmi přepravy a obecně rozdílnou aerodynamikou a fyzikálními vlivy na let oproti pohybu po silnici. Z dalších studií vyplývá, že využití aditivní výroby by se vyplatilo z hlediska ušetřeného paliva v případě, že by se životnost vozidla zdvojnásobila a jeho hmotnost by se snížila o 30 %. Je to také dáno tím, že v automobilovém průmyslu jsou si vědomi, jaké výhody má snížení hmotnosti a zlepšení aerodynamiky některých částí a již si je nechávají vyrábět konvenčními metodami. Také je důležité vzít v úvahu, že u automobilů mají součástky mnohem menší rozměry a vyrábí se sériovou výrobou. (10)

Vhodné je maximalizovat využití tiskárny a ne porovnávat kus ke kusu, jelikož některé metody aditivních procesů jsou schopné tisknout několik objektů najednou nebo tisknout rovnou ze dvou různých materiálů. Pokud byla tato skutečnost ve studiích zohledněna, tak vyšel dopad aditivní výroby na životní prostředí o 50 % menší než v Obr. 8-1. (6)

8.3 Vlastní porovnání z měření

Při vlastním porovnání z měření byl proveden převod spotřebované energie na uhlíkovou stopu, vzhledem k energetickému mixu České republiky. Podle ENTSO-E Vision byly průměrné emise pro Českou republiku za rok 2022 444 g CO₂eq /kWh. (11)

Byl tedy proveden zjednodušený přepočítání spotřebované energie na emise s koeficientem 0,444 kg CO₂eq/kWh. Pro aditivní výrobu 7,86 CO₂eq/kWh na 0,8 kg materiálu, tedy 9,8 CO₂eq/kWh na 1 kg. Pro frézování je to 4,57 CO₂eq/kWh výrobek o stejné váze tedy 0,8 kg, ale spotřebě materiálu 2,4 kg. Pro srovnání je to 5,7 CO₂eq/kWh na 1 kg. Teoretický odhad pro odlití sto pístů je 195,36 CO₂eq/kWh tedy pro jeden píst by to bylo 1,95 CO₂eq/kWh.

Tabulka 15 Spotřebované emise pro jednotlivé procesy na 1 kg materiálu

Spotřebované emise pro jednotlivé procesy na 1 kg materiálu	
Aditivní výroba (CO ₂ eq/kWh)	9,8
Frézování (CO ₂ eq/kWh)	5,7
Odlití (CO ₂ eq/kWh)	1,95

Uvedené porovnání je pouze zjednodušené, jelikož nebere v potaz vliv materiálu jako je například jeho zpracování a podobně. Ale stejně jako v daných studiích i pro vlastní měření v této práci vychází při frézování menší dopad na životní prostředí.

Z naměřených dat v této práci byl odvozen závěr, že při sériové výrobě má nejmenší dopad na životní prostředí odlévání a největší dopad by měla aditivní výroba. Což odpovídá výsledkům z první studie.

KAPITOLA 9: NÁROKY NA ÚDRŽBU, KVALIFIKACI OBSLUHY A VYBAVENÍ

Zvolené metody pro výrobu kovových částí můžeme také porovnat podle jejich nároků na kvalifikaci údržby, požadavků na údržbu a potřebného vybavení. Kvalifikovaná obsluha je nejen nákladnější, ale také je jí nedostatek, a tak hraje požadovaná kvalifikace obsluhy nemalou roli ve výběru zařízení. Dalším velkým výdajem je údržba stroje, jak její náročnost, tak interval ve kterém je nutné ji provádět. Požadavky na vybavení se pak také odráží na variabilitě výrobků. Aditivní výrobou je možné vytisknout velkou řadu výrobků bez jakékoli výměny příslušenství. U frézování a odlévání je výroba různých součástek závislá právě na daném příslušenství.

9.1 Nároky na kvalifikaci obsluhy a údržbu

U všech zvolených metod je potřeba projektanta strojích zařízení, který vytvoří výkres pístu v CAD. Dále se metody liší podle nutného zpracování výkresu do trajektorií technologie a v požadavcích na obsluhu a údržbu zařízení.

9.1.1 Aditivní výroba

U aditivní výroby probíhá jednou ročně preventivní údržba laserové hlavy a robotického ramene, kde může dojít k výměně čoček, trysek pro inertní plyn a promazání robota.

Aditivní výroba má minimální požadavky na kvalifikaci obsluhy. Úkolem obsluhy 3D tiskárny na kov je vložit daný výrobek ve formě výkresu z CAD do programu k tiskárně, zvolit materiál a zvolit tisk. Veškerá nastavení jako je rychlost podání drátu, rychlost robota, výkon laseru, průtok plynu apod. provede program. Požadavky na obsluhu jsou poměrně jednoduché, jako například zvládat úkony jako je umytí sklíček a kontrola přípravného drátu. Tudíž není potřeba další vybavení a dovednosti zpracování kovů. Obsluhovat 3D tiskárnu na kovy tedy může i operátor výroby.

Pro konečnou úpravu povrchu je potřeba frézování, to ale nezabere tolik času jako u frézování z plného materiálu a je výhodnější tuto část dopracování realizovat externě.

9.1.2 Frézování

U frézování je podobná údržba jako u aditivní výroby. Frézu je stejně jako robota potřeba promazávat. Preventivní údržba se provádí přibližně jednou za 3 měsíce.

Požadavky na obsluhu jsou mnohem vyšší než při aditivní výrobě. Na rozdíl od aditivní výroby je nutné mít programátora, který na základě zkušeností navrhne program a zvolí optimální řezné podmínky. Dále je potřeba mít obsluhu CNC stroje, která v případě špatného nastavení zastaví proces a případně ho bude schopná do jisté míry optimalizovat nebo předat programátorovi informace o poruše. Obsluha řídí proces pomocí ovládacího panelu, musí tedy pozorovat proces a nejlépe poruše zamezit, tím že vyhodnotí situaci včas.

9.1.3 Odlévání

Odlévání má největší požadavky na údržbu ze všech tří metod. V první řadě je poměrně časově náročná, dále jsou zde velká bezpečnostní rizika. Indukční pec je nutné pravidelně kontrolovat, důraz se klade na elektrické spoje ve výkonové části. Celé zařízení musí být zbaveno prachu a nečistot stlačeným vzduchem. Velkou pozornost také vyžaduje chladicí systém výkonových prvků, na kterém se provádí důkladné kontroly. Nejnáročnější operací údržby indukčních pecí je výměna vyzdívky, která se provádí přibližně po každé sté tavbě. Stará vyzdívka se odstraní a za pomoci formy se nanese nová vyzdívka, která se postupně vypálí. Poté je pec připravena k opětovnému použití.

Obsluha musí být kvalifikovaná, jelikož bude provádět metalurgické procesy tavení kovů, kde musí znát správné postupy, aby nedošlo k zranění nebo poškození zařízení.

9.2 Nároky na vybavení (nástroje)

K aditivní výrobě je potřeba mít laserovou tiskovou hlavu, nějaké robotické rameno nebo CNC stroj a uzavřený prostor s oknem s ochranným sklem a ochranné brýle pro možnou kontrolu procesu.

K frézování je potřeba velké množství hrubovacích nástrojů a nástrojů na čisto, které se liší pro jednotlivé výrobky. Jako nástroje jsou používány frézky a vrtáky. Dále jsou potřeba řezné plátky, které se nasadí na frézku a vyměňují se podle opotřebení. To závisí na vhodně zvolených řezných podmínkách.

K odlévání je potřeba bezpečnostní vybavení, dobře větrané pracoviště, forma, žíhací nádoba, kleště, hořák nebo vypalovací pec.

KAPITOLA 10: POSOUZENÍ MOŽNOSTI AUTOMATIZACE DANÝCH METOD

Procesy automatické můžeme zařadit do přípravy před výrobou, výroby samotné. Pak následuje finální dopracování a úprava po výrobě. Neboli na pre-processing, processing a post-processing.

10.1 Pre-processing

Pro pokročilejší automatizaci aditivní výroby slouží již zmiňovaný software, který je schopen převést model výrobku v CAD do trajektorie robota nebo CNC stroje.

10.2 Processing

Pro frézování je automatizace formou CNC stroje. Díky využití CNC stroje se zvýší možná přesnost výrobku. Pro klasické obrábění je přesnost ± 0.05 mm a pro obrábění s CNC stojem je 0.005 mm až 0.003 mm nebo vyšší. Maximální rychlost pro klasické obrábění je 10 000 rpm., protože je potřeba udržet nástroj stabilní, aby nedocházelo k vibracím. Což není manuálně možné. Maximální rychlost pro CNC stroj se pohybuje mezi 7 000 rpm a 18 000 rpm. Dále dojde k zvýšení efektivity na 97 %. Největší úsporou v automatizaci je snížení vyžadovaného množství lidské práce. Kontrolu procesu stejně jako u aditivní výroby provádí software, a tak může operátor obsluhovat více strojů. Navíc dochází ke zvýšení bezpečnosti celého procesu. Co se týče ceny tak tradiční frézování je levnější a výhodnější pro výrobu prototypů. (12)

Pro případ aditivní výroby je automatizace již na vysoké úrovni. Celý proces probíhá v uzavřené jednotce a za pomoci kamer, čidel a softwaru. Tudíž je samotný tisk i kontrola jeho kvality automatizována a operátor může opět obsluhovat více strojů najednou.

Pro odlévání lehkých slitin, jako je například hliník, už existují automatizované buňky například od firmy ItalPresseGauss, součástí buňky je i software pro simulaci procesu. Tyto buňky slouží pro tlakové odlévání. Pro tento způsob odlévání je nutné pořídit speciální tlakové formy a stroje. Model buňky je na Obr. 10-1. Odlévání je energeticky velmi náročný proces. Zahřátí kovového materiálu na teplotu tání, dále chlazení materiálu a různé přesuny mezi jednotlivými procesy spotřebovávají velké množství energie. Čtyřicet procent energie je spotřebováno ve stand by módu. Automatizace se zavádí ve fázi lití a vstřikování pomocí robotických ramen. Tímto opět dochází k zvýšení bezpečnosti, protože obsluha nemusí manipulovat s roztavenými kovy. Úspora energie je také v automatizaci plánovaných i neplánovaných prostojů výrobních zařízení. Software by měl nečinnost robotů vyhodnotit a v případě potřeby roboty vypnout. Dále je celá buňka navržena tak, aby byly prostroje způsobené přesuny výrobku odstraněny nebo byly minimální. (13)

Obecně využití CNC strojů nebo robotů vede k větší konzistenci výroby. Dále dochází ke zrychlení výrobního procesu. Tudíž je možné zhotovit větší množství výrobku na stejné množství energie. U všech procesů dochází k zvýšení bezpečnosti, ať už kvůli laseru, ostrým předmětům nebo nebezpečným látkám, se kterými při klasických procesech obsluha manipuluje.

10.3 Post-processing

Pro aditivní výrobu to znamená automatizaci finálních úprav produktu, to může zahrnovat očištění, frézování, vyleštění, barvení a další možné procesy úpravy. Všechny tyto procesy se dají automatizovat pomocí robotů nebo již zmiňovaných CNC strojů, jelikož se jedná o jednoduché, lehce automatizovatelné úkony.



Obr. 10-1 Zcela automatizovaná buňka pro odlévání lehkých slitin (10)

KAPITOLA 11: EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomické zhodnocení technologií aditivní výroby kovových dílů metodou DED, frézováním a odléváním bylo provedeno pomocí NPV. Net present value, neboli čistá současná hodnota, vyjadřuje rozdíl mezi hodnotou očekávaných příjmů a výdajů na investici. Můžeme říct, že se jedná o součet všech cash flow (hotovostních toků), které zdiskontujeme. Tedy převedeme na jejich současnou hodnotu.

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_z} CF_t \cdot (1+r)^{-t} - IN \quad [2]$$

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_z} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad [3]$$

Vysvětlení veličin ve vzorci:

- r – diskont, vychází k ceny ušlé příležitosti a charakterizuje časovou hodnotu peněz a riziko.
- T_z – ekonomická doba životnosti, volena s ohledem na technické a morální opotřebení
- IN – investiční výdaje
- CF_t – cash flow neboli hotovostní tok v t -tém roce

$$CF_T = \text{výnosy} - \text{provozní výdaje} - \text{jednorázové výdaje} \\ - \text{investiční výdaje na zařízení celkem}$$

Vyhodnocení NPV:

- Pro NPV větší než nula tak investice přináší za dobu hodnocení vyšší výnos, než je zadaná hodnota diskontu a tyto investice je doporučené realizovat.
- Pokud je NPV rovno nule, tak za sledovanou dobu bude dosaženo míry výnosu vloženého vlastního kapitálu právě v očekávané výši diskontu.
- Pro NPV menší než nula jejich míra výnosu bude menší než zadaný diskont a tyto investice nejsou doporučované realizovat.

Pro vyhodnocení budeme potřebovat následující parametry:

- Proměnné náklady
 - Spotřebovaný materiál
 - Spotřebovaná energie
 - Přídavné materiály (např. argon)
- Stálé náklady
 - Mzdy a zákonné pojištění
 - Opravy a údržbu

Modeluji situaci, kde firma uvažuje nad investicí do technologie na výrobu kovových částí. Uvažuje tři možné technologie výroby: aditivní výrobu, frézování a odlévání. Jelikož pro všechny tyto možnosti budeme potřebovat prostor k provozování, tak zanedbáme ve stálých nákladech

nájem. Dále zanedbáme veškeré stálé náklady pro provoz firmy, které by byly pro všechny metody stejné.

Předpokládáme, že budeme vyrábět stejný výrobek, v našem případě píst, který nám ve všech variantách bude vydělávat stejně. Tudiž v modelu jsou porovnávány jen náklady na pořízení a provoz daných technologií. Finance potřebné pro počáteční investici na pořízení dané technologie předpokládáme formou půjčky. Pro cenu elektřiny byly porovnány ceny, za které je elektrická energie nasmlouvaná v dané lokalitě. Variabilní náklady pro vyhodnocení byly naměřeny pro výrobu jednoho produktu. Pro spotřebu argonu byl nejprve proveden výpočet ceny za jednu minutu průtoku plynu při tlaku 200 bar z lahve o obsahu 20 litrů, viz Tabulka 16.

Tabulka 16 Spotřeba argonu při aditivní výrobě

spotřeba argonu při aditivní výrobě	
obsah náplně s argonem (l)	20
tlak láhve (bar)	200
průtok plynu (l/min)	9,9
přibližná doba použití (min)	402,8
cena náplně argonu za 20 l při 200 bar (Kč)	1198
cena za 1 min průtoku plynu při tlaku 200 bar (Kč)	2,97
celková cena za spotřebovaný plyn (Kč)	930,3

Tabulka 17 Vstupní parametry pro ekonomické posouzení pro aditivní výrobu

vstupní parametry pro aditivní výrobu	
životnost laserové hlavy Meltio (let)	10
pořizovací cena jednotky pro 3D tisk (Kč)	7 608 250
cena za spotřebovaný drát za rok (Kč)	97 427
cena za spotřebovaný argon za rok (Kč)	241 878
cena za celkovou spotřebovanou energii za rok (Kč)	23 010
cena za finální úpravu za rok (Kč)	2 977
náklady na licence CAD pro 3D tisk ročně (Kč)	280 920
mzdové náklady ročně (Kč)	401 400
údržba jednou ročně za robota (Kč)	14 000
údržba jednou ročně za laser (Kč)	6 000

Tabulka 18 Vstupní parametry pro ekonomické posouzení pro frézování

vstupní parametry pro frézování	
životnost CNC stroje (let)	10,
počáteční investice za pořízení CNC stroje (Kč)	14 000 000
pořizovací cena za program Nx Siemems (Kč)	1 200 000
cena za spotřebovaný materiál za rok (Kč)	392 028
cena za spotřebovanou energii za rok (Kč)	40 170
mzdové náklady na obsluhu CNC stroje za rok (Kč)	642 240
mzdové náklady na programátora CNC stroje (Kč)	722 520
náklady na licence Nx ročně (Kč)	240 000
celkem údržba za rok (Kč)	40 000
cena energie za rok (Kč)	40 170

Tabulka 19 Vstupní parametry pro ekonomické posouzení pro odlévání

vstupní parametry pro odlévání	
životnost zařízení pro odlévání (kusů)	240
pořizovací cena zařízení na odlévání (Kč)	50000
cena za formy ročně (Kč)	360000
cena za spotřebovaný materiál ročně (Kč)	480000
cena za celkovou spotřebovanou energii ročně (Kč)	360000
cena za finální úpravu ročně (Kč)	0
náklady na licence ročně (Kč)	6000
mzdové náklady ročně (Kč)	480000

Poté bylo na základě možného počtu vyrobených kusů za rok převedeno na náklady za rok. Za pomoci kvalifikovaného posouzení byl odhadnut počet výrobků vyrobených aditivní výrobou na 260 kusů za rok, frézováním na 780 kusů za rok a za odlévání 24 000 kusů. Přepočty pak byly zaznamenány do Tabulka 17, Tabulka 18 a Tabulka 19 a tím byla vytvořena tabulka pro vstupní parametry pro posouzení NPV. Jako diskont byla pro všechny tři metody zvolena hodnota 8 %.

Pomocí těchto parametrů bylo provedeno nákladové NPV a porovnáno, jaká investice se vyplatí víc. Tím, že se cena výrobku odvíjí od nákladů, tak byly v NPV zanedbány výnosy. Proto pro obě metody vyšlo NPV záporné. Pro aditivní výrobu vyšlo NPV -14 772 018 a pro frézování -19 578 744. Z ekonomického hlediska tedy vyšel 3D tisk jako vhodnější investice. Je to dáno velkými počátečními investicemi na CNC stroj. Samotný provoz CNC stroje je pak téměř o polovinu levnější. Pokud porovnáme výsledky i s teoretickým odhadem pro odlévání, tak pro něj vychází NPV -11 648 701, tudíž je pro sériovou výrobu ideální investicí.

Výsledkem tedy je, že pořizovací náklady na CNC stroj dvojnásobně převyšují pořizovací náklady na jednotku pro 3D tisk. Ale co se týká provozních nákladů, tak ty jsou pro frézování poloviční, než pro aditivní výrobu a mnohem menší v porovnání s odléváním. Záleží tedy na maximálním využití stroje. Nejnižší provoz má ale rozhodně frézování.

ZÁVĚR

Vývoj zpracování kovů prošel dlouhou cestou a ve spojení s vývojem mikroprocesorů vedl až k aditivní výrobě. V průběhu tohoto procesu došlo v osmdesátých letech k zavedení sedmi základních metod aditivní výroby kovových částí. Z těchto sedmi metod byla pro praktickou část této práce zvolena metoda DED (Directed Energy Deposition). Tato metoda realizuje nanášení materiálu pomocí trysky připojené na několika-osé rameno, typicky čtyř až pěti-osé. Materiál ve formě drátu nebo prášku je roztavován pomocí laseru nebo elektronového svazku a objekt je tak postupně vytvářen vrstvu po vrstvě na pevné nehybné podložce.

Nejprve byla porovnána energetická náročnost aditivní výroby kovového pístu metodou DED se dvěma klasickými metodami výroby – frézováním a odléváním. Měření bylo provedeno u metody DED a frézování. Náročnost metody odlévání bylo stanoveno kvalifikovaným odhadem na základě teorie. Celková spotřeba energie při výrobě pístu pomocí frézování byla 10,3 kWh, což je o 7,4 kWh méně, než u aditivní výroby. Tudíž jako energeticky úspornější vychází frézování. Pokud bychom chtěli takových pístů vyrobit sto tak při použití odlévání bychom je mohli odlít v jednom procesu, který by teoreticky spotřeboval 440 kWh, což je jednoznačně nejvhodnější varianta. Velice tedy záleží na tom, jestli je potřeba danou metodu použít pro jeden specializovaný výrobek nebo pro sériovou výrobu.

Při porovnání spotřeby materiálu vyšla aditivní výroba jako jasně výhodnější, než frézování a odlévání. Pro aditivní výrobu bylo spotřebováno 0,8 kg materiálu, pro frézování 2,4 kg a pro odlévání by bylo teoreticky potřeba 1,6 kg. Jelikož při aditivním procesu se výrobek vytváří přidáváním materiálu, spotřebuje se téměř jen ten materiál, který je na finální výrobek potřeba. Naopak u frézování je výrobek tvořen odebráním materiálu, a tudíž vzniká zbytkový materiál. U odlévání není takové množství zbytkového materiálu, jako u frézování. Avšak musí být použito přibližně dvojnásobné množství materiálu, než je finální hmotnost pístu. U odlévání je podobně jako u frézování potřeba velká homole materiálu, kterou je nutné roztavit a odlít ve formě, což způsobuje vznik zbytkového materiálu. U aditivní výroby byl navíc spotřebován stlačený argon, což bylo zohledněno při ekonomickém posouzení metod.

Z hlediska dopadu na životní prostředí existují způsoby využití, při kterých je aditivní výroba výhodnější oproti konvenčním způsobům výroby, jako je například frézování a odlévání. Není možné konstatovat, že by to platilo vždy. Velice záleží na geometrii a vnitřní struktuře vyráběného objektu a možnostech daných metod. Kvůli větší energetické náročnosti aditivní výroby je většinou vhodnější využít konvenční metody. Aditivní výroba vyšla z dostupných studií jako udržitelnější, zejména pro tisk součástek se sníženou hmotností, například pro letadla určená pro komerční lety na dlouhé vzdálenosti. Dále pokud je aditivní výrobou možné spojit několik výrobních procesů do jednoho, například možností vytištění celé součástky, bez nutnosti svařování menších částí k sobě. Další možnost snížení dopadu na životní prostředí je snížení spotřebovaného materiálu. U nákladných materiálů jako je titan je tento dopad značný. Velkou výhodou aditivní výroby jsou součástky přímo na míru, které jsou potřeba především ve zdravotnictví, například pro výrobu implantátů.

Při ekonomickém posouzení vyšel 3D tisk jako výhodnější investice oproti frézování kvůli výrazně nižším investičním nákladům. Z pohledu provozních nákladů se jeví lépe frézování, ale vysoké pořizovací náklady v NPV převážily a proto jako vhodná investice vyšla jednotka pro 3D tisk. Pokud byl uvažován i teoretický odhad energetické náročnosti odlévání, tak pro velkou sériovou výrobu, jako nejvhodnější investice ze všech zvolených metod, vyšlo právě odlévání. Nejnižší provozní náklady by i tak mělo frézování a odlévání by mělo provozní náklady nejvyšší.

Z porovnání různých hledisek je zřejmé, že aditivní výroba nejspíš nenahradí konvenční výrobu kovových částí nebo není přímou náhradou za konvenční výrobu, ale je důležité zvážit její výhody ve výrobě komplexních součástí se složitou vnitřní strukturou, což může být využito například pro chladicí systémy. Další výhodou může být prodloužení životnosti daného výrobku například aplikací potisku odolnější vrstvy na namáhané plochy dílu vyrobeného jinou technologií. Velkou výhodou je samozřejmě i možnost tisku výrobku přímo na míru, kde je zákazník za individuálnost výrobku ochoten si připlatit.

LITERATURA

1. **History.com.** Bronze Age. *HISTORY*. [Online] 24. srpen 2021. [Citace: 27. září 2022.] <https://www.history.com/topics/pre-history/bronze-age>.
2. —. Iron Age. *HISTORY*. [Online] 27. Říjen 2021. [Citace: 4. Říjen 2022.] <https://www.history.com/topics/pre-history/iron-age>.
3. **Milewski, John O.** *Additive Manufacturing of Metals. From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. Switzerland : © Springer International Publishing AG, 2017.
4. **Loughborough University.** About Additive Manufacturing. *Loughborough University*. [Online] [Citace: 8. Prosinec 2022.] <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>.
5. **Arzt, Kristin.** Beginners Guide to Metal Casting. *The crucible*. [Online] [Citace: 1. Květen 2023.] <https://www.thecrucible.org/guides/metalworking/metal-casting/>.
6. **Van Sice, C., Faludi, J.** *Comparing Environmental Impacts of Metal Additive Manufacturing*. [pdf] Gothenburg : in Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21), 2021.
7. **Huckstepp, Alex.** Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing - Part 12 . *Digital Alloys*. [Online] Copyright © 2020 Digital Alloys, 24. Září 2019. [Citace: 29. Duben 2023.] <https://www.digitalalloys.com/blog/powder-vs-wire/>.
8. *Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions.* **Priarone, P.C., Ingarao, G., Lorenzo, R. di and Settineri, L.** pp. S191–S202, místo neznámé : *Journal of Industrial Ecology*, 2017, Sv. Vol. 21 No. S1.
9. *Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades.* **Torres-Carrillo, S., Siller, H.R., Vila, C., López, C. and Rodríguez, C.A.** p. 119068, místo neznámé : *Journal of Cleaner Production*, 2020, Sv. Vol. 246.
10. *Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry.* **Mohd Yusuf, S., Cutler, S. and Gao, N.** p. 1286, místo neznámé : *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2019, Sv. Vol. 9 No. 12.
11. **nowtricity.** CURRENT EMISSIONS IN CZECH REPUBLIC. *nowtricity*. [Online] 28. Duben 2023. [Citace: 28. Duben 2023.] <https://www.nowtricity.com/country/czech-republic/>.
12. **SANSMACHINING.** Difference & Advantages of CNC VS Conventional Machining. *SANSMACHINING*. [Online] © Dalian Sansheng Precision Machinery Co., LTD, 1. Říjen 2020. [Citace: 21. Květen 2023.] <https://www.sansmaching.com/difference-advantages-of-cnc-vs-conventional-machining/>.
13. **Manufacturing Automation Cells for Casting.** *ItalPresseGauss*. [Online] © Norican Group 2023. [Citace: 5. Květen 2023.] <https://www.italpressegauss.com/en-us/die-casting-automation-cell..>
14. **Fisher, David J.** *Additive Manufacturing of Metals*. Millersville : Materials Research Forum LLC, 2020.
15. **Kellens, Karel.** Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing? *Elsevier*. [Online] 19. Duben 2017. [Citace: 27. Duben 2023.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116313130>.