



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## 3D TISK KOVŮ

3D METAL PRINTING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Vrána

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Pavel Vrána</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Řiháček, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## 3D tisk kovů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk kovů je v současnosti vysoce žádaná a aktuální problematika, řešená ve všech odvětvích průmyslu. Představuje jednu z možných efektivních náhrad konvenčních technologií výroby, jako jsou slévání, kování, svařování, obrábění apod. Základním úkolem je tedy vypracovat literární rešerši zaměřenou na metody 3D tisku kovů, zejména využití modifikací svařovacích technologií, jako např. metodu obloukového svařování CMT.

### Cíle bakalářské práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na 3D tisk kovů,
- rozbor vybraných metod se zaměřením na využití modifikace technologie obloukového svařování,
- formulace výhod a nevýhod.

### Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook volume 6: Welding, Brazing and Soldering. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 1993. ISBN 978-0-87170-382-8.

DANIELSEN EVJEMO, Linn, Signe MOE, Jan Tommy GRAVDAHL, Olivier ROULET-DUBONNET, Lars Tore GELLEIN a Vegard BROTTAN. Additive manufacturing by robot manipulator: An overview of the state-of-the-art and proof-of-concept results. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2017. ISBN 978-1-5090-6505-9.

GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies. 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.

KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.

MESSLER, Robert Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.

MANOJ GUPTA. 3D Printing of Metals. MDPI AG - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. ISBN 9783038425915.

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

VRÁNA Pavel: 3D tisk kovů.

---

Práce předkládá literární rešerši současných technologií pro 3D tisk kovů. V úvodu práce jsou jednotlivé metody rozděleny podle formy materiálu na práškové, drátové a strunové. Z metod využívající prášek jsou zpracovány SLS, EBM a DED. Dále jsou rozebrány metody ADAM, PMD a WAAM. U každé technologie je nastíněn princip, tisknutelné materiály, využití a příklad výrobku. U metod využívající elektrický oblouk jsou rozepsány možné přenosy kovů a byla nastíněna jejich omezení.

Klíčová slova: 3D tisk kovů, EBM, DED, ADAM, PMD, WAAM

## **ABSTRACT**

VRÁNA Pavel: 3D metal printing.

---

The work presents a literature search of current technologies for 3D metal printing. In the introduction, the individual methods are divided according to the forms of material into powder, wire, and string. The methods using metal powder are SLS, EBM, and DED. Other methods are ADAM, PMD, and WAAM. For each technology are described the principle, printable materials, usage, and example of the product. For methods using electric arc are described possible metal transfers and their limitations.

Keywords: 3D metal printing, EBM, DED, ADAM, PMD, WAAM

### **Bibliografická citace**

VRÁNA, Pavel. *3D tisk kovů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-05]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

### **Čestné prohlášení**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 20.5.2021

.....

Podpis

## **Poděkování**

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

.....

Podpis

## Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Poděkování

Obsah

Str.

<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 PROCES 3D TISKU</b> .....	10
<b>2 TECHNOLOGIE 3D TISKU KOVŮ</b> .....	13
<b>2.1 Metoda ADAM</b> .....	14
<b>2.2 Technologie SLS</b> .....	16
<b>2.3 Technologie EBM</b> .....	18
<b>2.4 Technologie DED</b> .....	20
<b>2.5 Metoda PMD</b> .....	22
<b>2.6 Technologie WAAM</b> .....	23
2.6.1 Geometrie návarových housenek.....	27
<b>2.7 Metoda WAAM-CMT</b> .....	29
<b>3 ZÁVĚRY</b> .....	31
Seznam použitých zdrojů	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	



## ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Pro výrobu dílů existuje několik možností, jakou technologii zvolit. Existují klasické metody, jako jsou například metody tváření, obrábění, slévání. Jsou ale také metody, které se nazývají aditivní technologie. Do této kategorie patří tzv. 3D tisk.

3D tisk je technologie, která se využívá už od 80. let 20. století, nicméně zejména v poslední době se začíná více a více uplatňovat i v průmyslu, kde se doposud využívaly pouze konvenční technologie výroby. Aditivní technologie přistupují na tvorbu dílů odlišným způsobem. U konvenčních metod se materiál odebírá z polotovaru, ale u 3D tisku se nanáší do požadovaného tvaru. Díky této opačné koncepci je tato technologie velmi využívána pro rychlý návrh dílů, které jsou následně odzkoušeny v reálném provozu (obr.1). Má ale svou důležitou roli i v ostatních odvětvích. Proto je dnes kladen velký důraz na zdokonalení jak stávajících technologií 3D tisku, tak na vytváření nových.



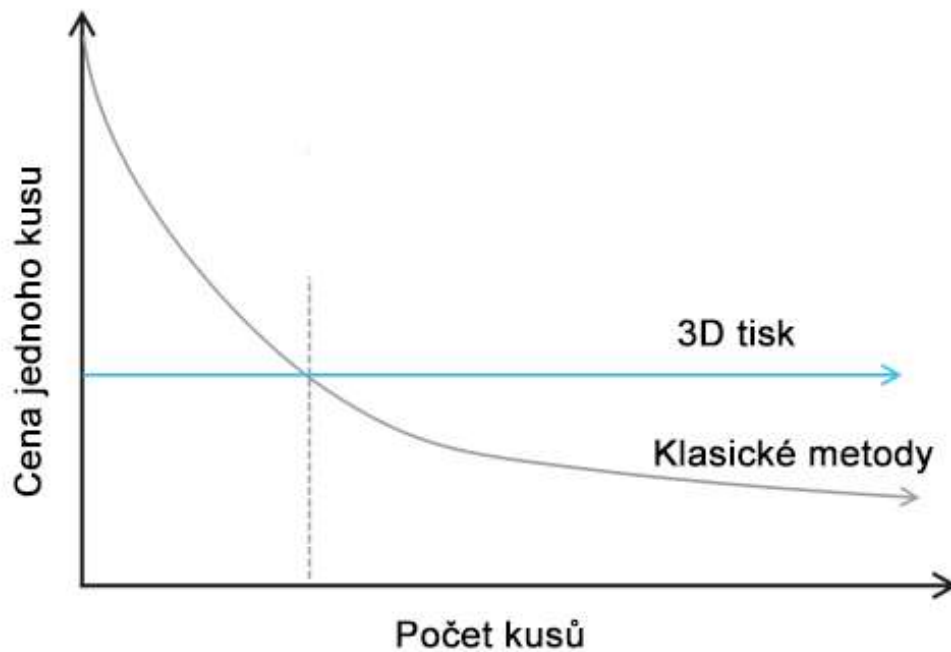
Obr. 1 Ukázka vytištěných dílů. [1], [2], [3]

## 1 PROCES 3D TISKU [5], [6], [7], [8]

Pro technologie 3D tisku je hlavním společným prvkem nanášení materiálu v tenkých vrstvách. Tento postup má oproti konvenčním metodám několik výhod, jako je např. možnost vytváření součástí, které jsou speciálně navrhnuté tak, aby co nejlépe přenášely namáhání při současném snížení hmotnosti. Snížení hmotnosti je nejvíce využíváno v leteckém a vesmírném odvětví, kde vede k úspoře paliva a možnosti převezení většího množství nákladu.

Při tisku součástí také dochází k úspoře obráběného materiálu. Tato úspora je specifická pro každý díl, ale například pro vesmírnou anténu je možné snížit množství obráběného materiálu až přes jednu tunu. Snížení obrábění je požadováno hlavně u hůře obrobitelných materiálů, jako je například titan, který díky vynikajícím mechanickým vlastnostem má mnoho využití.

Další výhodou je možnost navrhnutou součást nechat vytvořit pouze pro otestování a jednoduše tak vytvářet více variant a možnost tak vybrat tu nejlepší. S tím souvisí i nižší cena jednoho kusu. Na obrázku 2 lze vidět, že cena jednoho kusu je u 3D tisku stejná.

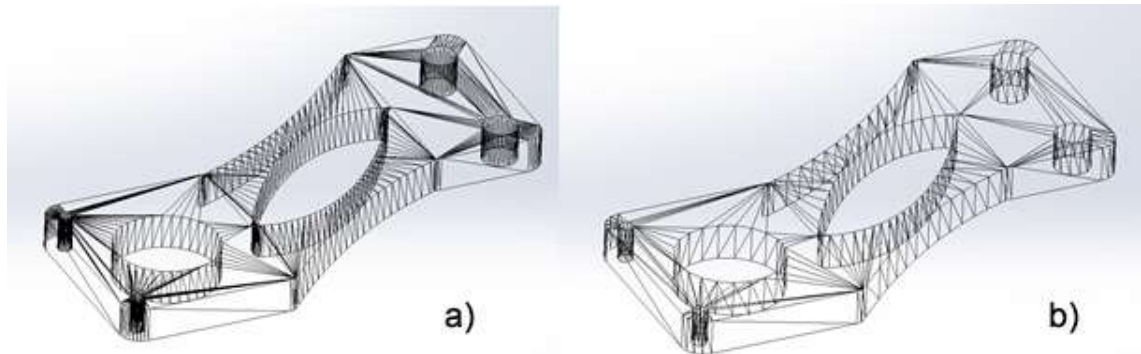


Obr. 2 Cena na jeden kus [7]

Oproti tomu u metody odlévání se cena s počtem kusů mění a pro velké množství kusů dosahuje nižší ceny než 3D tisk. Proces 3D tisku lze rozdělit do několika kroků, které jsou popsány níže.

- **Tvorba modelu** – před každým tiskem je nutné nejprve vytvořit 3D model součásti. Pro tvorbu modelu existuje velké množství programů, které poskytují tomuto procesu podporu. Jsou to například programy od společnosti Autodesk, jako např. Inventor, 3ds Max, Maya, ale mohou to být i programy, které se využívají spíše k umělecké tvorbě, jako je například Zbrush, nebo Blender.

U tvorby modelů je potřeba mít na paměti, že vymodelovaná součást je většinou ve formě polygonálního modelu. To znamená, že objekt je tvořen jednotlivými polygony. Polygonální reprezentace modelu je jedna z nevýhod 3D tisku. Na obr. 3 lze vidět, že stejný model může být vytvořen různým počtem polygonů. U vyššího počtu polygonů (a) je geometrie modelu lépe reprezentována, ale velikost souboru se zvyšuje. Velké soubory jsou nevýhodné pro další zpracování a zvyšuje nároky na výpočetní sílu elektroniky.



Obr. 3 Vliv množství polygonů na model

Cílem 3D modelu je mít co nejvíce polygonů na místech, kde je vysoká křivost a co nejméně na místech rovinných. Tato technologie optimalizace se dnes využívá například v počítačových hrách, kdy se například program Zbrush snaží zredukovat detaily na rovinných plochách, ale neodebrat je na okrajích, aby silueta modelu zůstala nezměněna.

- **Příprava modelu pro 3D tisk** - po vytvoření 3D modelu se musí tento model připravit pro samotnou 3D tiskárnu. Ve specializovaných programech, které se nazývají „slicery“, se model takzvaně rozřeže na vrstvy o určité tloušťce. Tyto vrstvy jsou dále převedeny na dráhu, která řídí pohyb tiskového nástroje. Ve slicerech se musí nastavit všechna nastavení pro 3D tiskárnu. Mezi hlavní nastavované parametry patří rychlost, výška vrstvy, šířka linky, ale můžou se zde nastavit i další možnosti tisku, jako je např. kde se bude zakončovat tisk vrstvy, možnost uchycení k základnímu materiálu, typ výplně, atd.



Obr. 4 Ukázka výšky vrstvy [8]

Volba tloušťky vrstvy je jedno z hlavních kritérií, které ovlivní jak kvalitu, tak dobu tisku. Při malé tloušťce vrstvy bude výsledný model velmi detailní, ale doba tisku bude vysoká. Oproti tomu při velké tloušťce bude doba tisku výrazně nižší, ale povrch vytištěné součásti bude skokový, viz obr. 4.

Jednotlivé vrstvy nejsou u většiny technologií 3D tisku celistvé, ale jsou tvořeny konturami o určitém rozměru, které jsou na sebe nanášeny. Model se tak skládá z více částí, jako je například výplň, vnější perimetry, vrchní vrstva, a další, viz obr. 5.

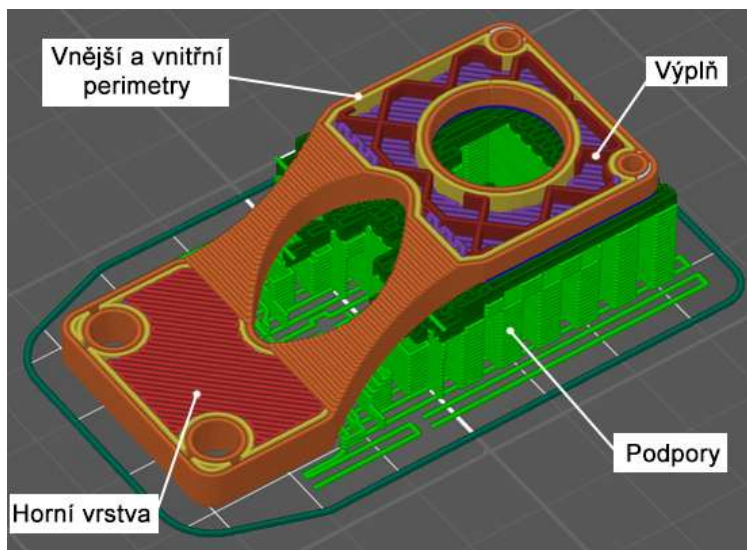
Pro každou část modelu lze nastavit specifické parametry. V praxi se ale většina parametrů tvoří plně automaticky podle jednoduchých vzorců. Příkladem může být rychlost tisku.

Nastavuje se pouze celková rychlost tisku, od které jsou procentuálně spočítány ostatní, jako je rychlost tisku vnějších perimetrů, vnitřních perimetrů, výplně atd.

Výplň je jedním z prvků, který zásadně ovlivňuje dobu tisku, ale ovlivňuje i mechanické vlastnosti vytištěného dílu. Výplň je reprezentována pomocí geometrického tvaru, který se opakuje a je rychle tisknutelný, například trojúhelník, čtverec. Tím je čas pro tisk jedné vrstvy zkrácen a taky se šetří materiál.

U modelů, kde se určitá část součásti tiskne pod úhlem větším jak  $45^\circ$ , je potřeba použít podpory. Podpora je jednoduchá geometrie, která podepře vznášející se část modelu a je po vytištění odstraněna. Odstranění podpor může být mechanické, nebo chemické. Mechanické odstranění se využívá pro modely, kde jsou podpory tištěny stejným materiálem jako díl. Pro chemické odstraňování je potřeba podpory tisknout materiálem, který se snadno rozpouští. Například PVA, které je rozpustné ve vodě. Většina rozpustných materiálů je dražší než materiál součásti, proto se tento dražší materiál tiskne pouze v několika vrstvách mezi díl a podpory.

- **Tisk** – samotný tisk, který probíhá na 3D tiskárně je zcela řízen počítačem, který ovládá tiskárnu podle instrukcí, které jsou vytvořeny ve sliceru. Celý tisk je řízen pomocí jednoho textového souboru, ve kterém jsou uloženy trasy nástroje, nastavení teplot i ovládání motorů a dalších doplňujících komponent.
- **Dokončovací operace** – po vytištění modelu mohou následovat další operace, které jsou u některých modelů a použitých materiálů nutné, jako je například odstranění podpor, popřípadě pomocné geometrie. Patří sem také operace, které zlepšují kvalitu povrchu. U plastů například chemické zhlazování povrchu a u kovů následně obrábění, broušení, případně i leštění.



Obr. 5 Jednotlivé části tisknutého modelu ve sliceru

## 2 TECHNOLOGIE 3D TISKU KOVŮ [7], [9]

Technologií pro 3D tisk je nepřehledné množství, a to dokonce i u tisku kovů, kterých je víc než 18 a každým rokem přibývají další. Proto se tyto technologie dělí do několika hlavních kategorií.

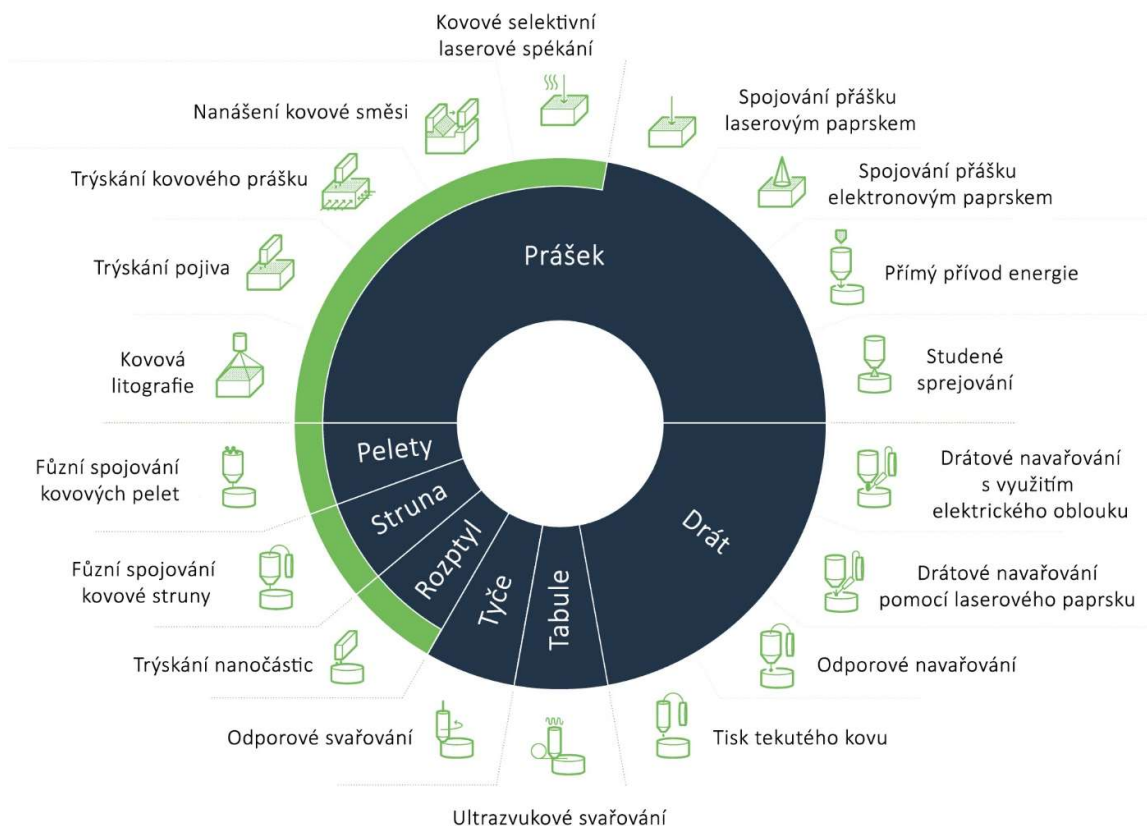
Dělit 3D technologie lze podle různých hledisek. Tato hlediska jsou například velikost tisknutelné plochy, minimální výška vrstvy, jestli je materiál spékán, či taven. Jako nejuniverzálnější rozdělení se jeví dělení podle formy materiálu, který se na dané tiskárně tiskne, viz obr. 6.

Nejrozsáhlejší kategorií jsou metody využívající prášek. Sem patří například SLS, EBM, Binder jetting a další.

Další forma materiálu, která je dnes velmi využívána, je drát. Sem se řadí metody PMD, WAAM spolu s metodami, které využívají modifikované oblouky např. CMT.

Rozdělení podle formy materiálu je výhodné pro rozdělení metod, které využívají pouze jednu určitou formu materiálu, ale existují i metody, které mohou využívat jak prášek, tak i drát a stále se jedná o jednu technologii.

Níže budou rozebrány metody, které využívají strunu (ADAM), prášek (SLS, EBM, DED) a drát (PMD, WAAM, CMT).

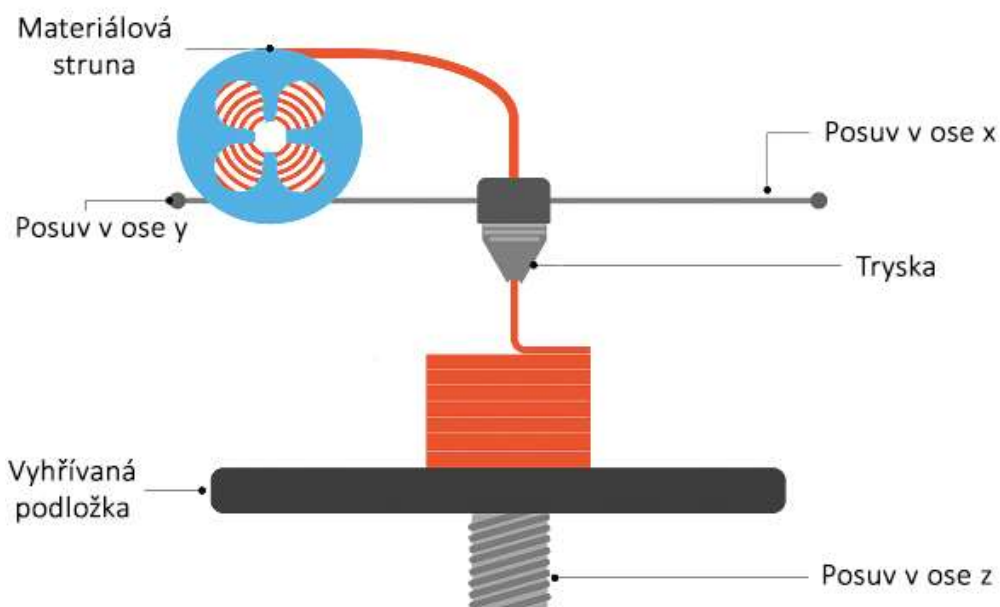


Obr. 6 Přehled technologií pro 3D tisk kovů [9]

## 2.1 Metoda ADAM [7], [10], [11]

Metoda ADAM (Atomic diffusion additive manufacturing) jako jedna z mála využívá materiál ve formě struny. Tuto technologii vyvinula společnost Markforged, ale dnes už není jediná na trhu. Proces 3D tisku je zde rozdělen do tří částí.

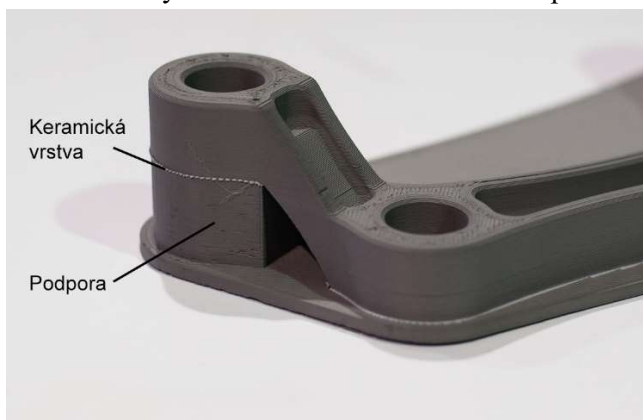
Princip tisku spočívá v natavení struny v trysce a následné nanášení nataveného materiálu do tenkých vrstev, viz obr. 7. Materiálová struna u této metody obsahuje velké množství kovového prášku s příměsí plastu, který má zde funkci pojiva. Tisk je velmi podobný tisku plastu. V první části nedochází k natavování prášku, ale pouze plastu, a kovový prášek je



Obr. 7 Princip tisku [10]

pomocí nataveného materiálu nanesen do vrstvy. Postupným nanášením jednotlivých vrstev vznikne požadovaný model, který má podobné vlastnosti jako model vytištěný z plastu, jako například rozdílná pevnost v horizontální a vertikální ose. Pohyb trysky je ovládán elektronikou a pro posuv se využívají krokové motory. Tisk v ADAM tiskárně musí probíhat ve vyhřívané komoře a na vyhřívané podložce, aby se zamezilo deformaci dílu. K omezení deformace se využívají i další geometrické prvky, jako je například tzv. límec. Při tisku pod úhlem větším jak 45° se využívají podpory. Mezi podpory a vytištěný model se nanáší keramická vrstva, která usnadňuje odstranění pomocného materiálu. (obr. 8)

V druhé části musí model projít vymýváním, kdy se za zvýšené teploty rozpouští polymer. Rozpouštědlo musí rozpustit většinu polymeru v celém objemu. Doba vymývání je závislá na



Obr. 8 Ukázka podpor [7]

velikosti a tloušťce stěn modelu. Proto se může doba vymývání pohybovat v řádu hodin, ale může trvat až den. Po vymytí a usušení modelu je součástka křehčí než po vytisknutí a obsahuje malé množství polymeru.

Poslední část výroby součásti je spékání. Vymytá součást je přesunuta do pece, kde se při 85% teplotě tání nechá prášek spojit. Výsledná součást obsahuje 99,7 % kovu. Při spékání se součást zmenší o cca 17 %, proto se toto smrštění musí kompenzovat v návrhu modelu.

Firma Markforged vyrábí komplet celý systém pro ADAM 3D tisk, viz obr. 9. Tiskárnu, vymývací i spékací stanici si může zákazník objednat od jednoho výrobce.

Jejich tiskárna umožňuje tisk o velikosti vrstvy 50 až 125  $\mu\text{m}$ , pro součásti do velikosti  $300 \times 220 \times 180$  mm. Samozřejmě poskytují i software, který je speciálně navržený pro jejich systém. Dále taky nabízejí několik druhů materiálů, jako je např. korozivzdorná ocel, nástrojová ocel a dokonce měď, kterou člověk může použít například při tisku speciálních chladičů.

Využití tato metoda nachází hlavně pro tisk prototypů, příkladem mohou být odlehčená ozubená kola, či brzdící páka na motorku. (obr. 10)



Obr. 9 Metal X systém [7]



Obr. 10 Ukázka dílů [11]

Výhodami ADAM tisku je dobrá přesnost, nízká cena, možnost tisku komplikovaných součástí, a dobrá pevnost, která je dokonce vyšší než u odlévaných součástí.

Méně výhodný je pro tisk malých součástí. Nevýhodou je také nutnost mít pro výrobu 3 stroje.

## 2.2 Technologie SLS [1], [4], [12], [13], [14], [15], [16]

Metoda SLS (Selective Laser Sintering) byla vyvinuta na Univerzitě v Texasu v polovině 80. let. Tato technologie využívá laser, který spéká kovový prášek o určité tloušťce a tím vytváří model. Výhodou použití laseru je možnost využít každý materiál, který absorbuje elektromagnetické záření. Při tisku musí být prášek i laser v komoře, která je vyplněna inertním plynem. Inertní plyn zabraňuje oxidaci spékaného materiálu.

SLS tiskárna se skládá z několika částí: laser (1), zrcátko (2), válec (3), zásobník materiálu (4), stavěcí platforma (5), viz obr. 11.

Samotný tisk začíná nanesením tenké vrstvy prášku na stavěcí platformu pomocí nanášejícího válečku. Nanášený prášek je předehřátý těsně pod teplotou tání pomocí infračerveného vyhřívače, který je umístěn ve válečku. Předehřátí prášku snižuje deformaci, smršťování, pórovitost vytištěného materiálu a potřebný výkon laseru.

Nanesená vrstva prášku je pomocí výkonného laseru spečena, popřípadě roztavena a tím je vytvořena jedna vrstva modelu. Pohyb laseru je kontrolován pomocí pohybujícího se zrcátka.

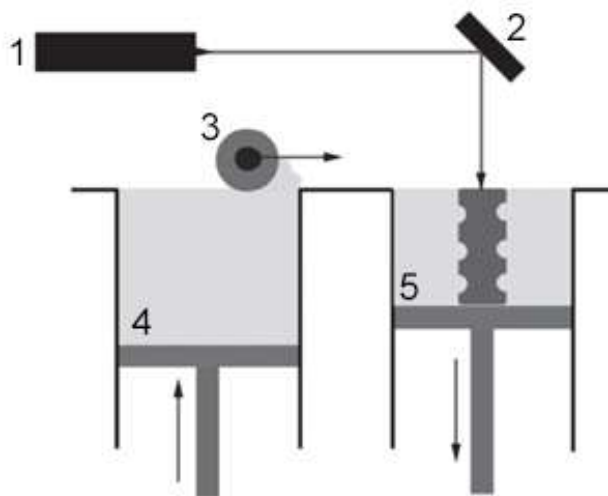
Po vytisknutí jedné vrstvy se stavěcí platforma sníží o tloušťku další vrstvy a zásobník materiálu vysype prášek v požadovaném množství. Tento postup se opakuje, dokud není vytištěn celý model. Při tisku metodou SLS není potřeba tvořit podpory, protože model podepírá nevytvrzený prášek.

Vytisknutý model musí být očištěn od nespečeného prášku, a to i od prášku, který se zachytí uvnitř vytisknutého modelu (obr. 12). Aby se prášek dal z modelu odstranit, musí se využívat speciální geometrické tvary výplně, které umožní jednoduché vysypání prášku.

Princip metody SLS je teoreticky velmi jednoduchý. Má však svá úskalí. Mezi hlavní problémy, které způsobují špatně vytisknutý model, patří správné nastavení všech parametrů tiskárny.

Tyto parametry se dělí na:

- parametry laseru - velikost paprsku, rychlost posuvu laseru, výkon laseru,
- materiálové parametry - teplota tání, tepelná vodivost, velikost částic prášku,
- geometrické parametry - vzdálenost jednotlivých drah laseru, orientace drah vůči ostatním vrstvám, tloušťka vrstvy.



Obr. 11 Součásti SLS tiskárny [4]



Všechny tyto parametry se musí správně nastavit, aby výsledný model měl požadované vlastnosti a nedošlo k chybám tisku.



Obr. 12 Očišťování vytisknutých dílů [1]

Mezi výrobce SLS tiskáren se řadí například firma EOS. Jejich první tiskárna EOS M 100 je určena pro menší modely. Tato tiskárna využívá 200 W laser s velikostí paprsku 40  $\mu\text{m}$ , rychlost tisku je až 7  $\text{ms}^{-1}$  a maximální rozměr tisku je válec o průměru 100 mm a výšce 95 mm. Druhá tiskárna od EOS s označením EOS M 290 (Obr. 13) je určena pro větší modely.

Prostor pro tisk je u této tiskárny tvaru kvádru o velikosti 250  $\times$  250  $\times$  325 mm. Tato tiskárna využívá výkonnější 400 W laser s větším průměrem paprsku 100  $\mu\text{m}$ .

Pro tisk lze využít velké množství materiálů, jako jsou například hliníkové, titanové slitiny, korozivzdorné a nástrojové oceli a další.

Tato metoda nachází největší uplatnění u tisku funkčních součástek, které jsou speciálně odlehčeny pro snížení hmotnosti při současném zachování pevnostních vlastností (obr. 14), tím se omezí jak množství odpadního materiálu, který vznikne při následném obrábění, tak k snížení ceny. Využit lze ale taky pro tisk šperků ze vzácných kovů.

Výhody této metody jsou vysoká přesnost, kvalita tisku, nízká výška tisku (20 až 50  $\mu\text{m}$ ), nízké rozdíly pevnosti v horizontální a vertikální rovině, velké množství tisknutelného materiálu.



Obr. 13 EOS M 290 [13]

Nevýhody jsou omezení velikosti tištěné součástky, horší únavové vlastnosti s porovnáním s tradičně vyráběnou součástí



Obr. 14 Odlehčené součástky [16]

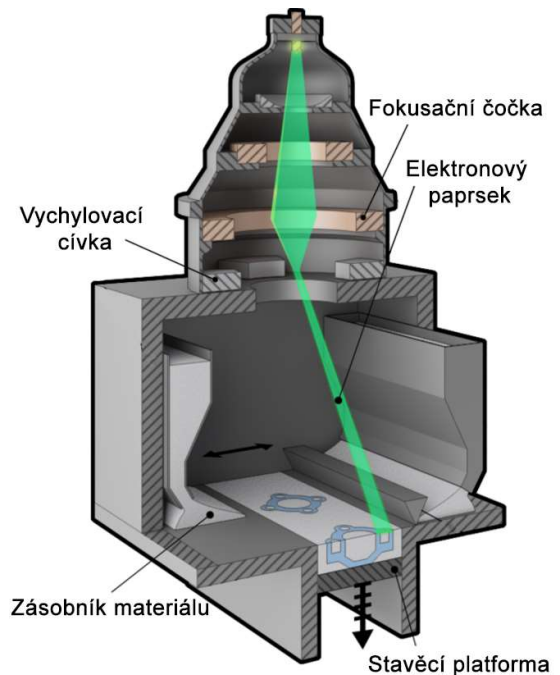
### 2.3 Technologie EBM [15], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]

Při využití technologie EBM (electrom beam melting) se pro vytvoření vrstvy používá natavování pomocí elektronového paprsku. Schéma elektronového paprsku je zobrazeno na obrázku 15.

Svařování pomocí elektronového paprsku se využívá již od 50. let, ale s využitím pro 3D tisk přišla až Švédská firma Acram v roce 1997.

Princip elektronového paprsku spočívá v urychlování elektronů na třiceti až sedmdesáti procentní rychlost světla. Urychlený elektron má vysokou kinetickou energii, která se při nárazu do prášku mění na teplo. Proces natavování nepotřebuje ochranu atmosféru, ale i tak se většinou využívá komora, kde je možno měnit tlak. Podle tlaku se metoda dělí na vakuovou a atmosférickou.

Samotný tisk je velice podobný metodě SLS, ale při bližším zkoumání jsou zde rozdíly. Tím nejviditelnějším je využití elektronového paprsku namísto laseru. Elektronový paprsek tady není nasměrováný pomocí zrcátka, ale pomocí cívek, které tento paprsek vychylují. Dalším rozdílem je to, že u EBM se materiál vždy natavuje úplně.



Obr. 15 Schéma EBM tiskárny [23]

Díky úplnému roztavení materiálu má výsledný výtisk velmi dobré mechanické vlastnosti.

U EBM se netiskne po trasách, ale elektronový paprsek je vychylován do jednotlivých bodů vrstvy. Díky možnosti rychlé změny paprsku je možnost tisknout body, které jsou od sebe vzdálené a omezit tak deformaci, která by vznikla při delším působení paprsku na jednom místě.

Zařízení, která využívají technologii EBM vyrábí pouze firma GE Additive. Mezi jejich poslední stroje patří Arcam EBM Spectra L a Arcam EBM Spectra H.

Arcam EBM Spectra L (Obr. 16) využívá paprsek o výkonu 4,5 kW a vnitřní rozměr pro tisk má tvar válce o rozměru 350 × 430 mm.

Arcam EBM Spectra H používá výkonnější paprsek 6 kW, ale vnitřní prostor je menší 250 × 430 mm.

Firma také nabízí svoje starší modely, které mají méně výkonné paprsky a menší tisknutelnou plochu.

Kvůli využití elektronového paprsku lze tisknout pouze vodivé materiály, proto touto technologií nelze tisknout plasty ani keramické materiály. Dnes se tato metoda využívá hlavně pro tisk titanových a chrom-kobaltových slitin.

Metoda EBM dosahuje velmi vysoké přesnosti tisku, ale paprsek je větší než u laseru.

Využívá se ve vesmírném, leteckém průmyslu, ale také v medicíně, například pro tisk kyčelních jamek. (obr. 17)

Tavení pomocí elektronového paprsku má několik výhod. Je to například využití velkých rychlostí posuvu, možnost ovlivnit tvar natavování, možnost předežhřát prášek a omezit deformaci.

Mezi nevýhody patří např. omezení maximální velikosti modelu, tisk v uzavřené komoře, nutnost tisknout po bodech.



Obr. 16 Tiskárna Arcam Spectra L [22]



Obr. 17 Vytisknutá kyčelní jamka metodou EBM [24]

## 2.4 Technologie DED [7], [25], [26], [27], [28], [29]

Direct energy deposition je skupina aditivních procesů, které přidávají materiál přímo do tepelného zdroje a nevyužívají nanášení materiálu na stavěcí podložku. Teplo pro natavení materiálu se dodává pomocí laseru, elektronového paprsku, nebo plazmy. Materiál může být jak ve formě prášku, tak ve formě struny.

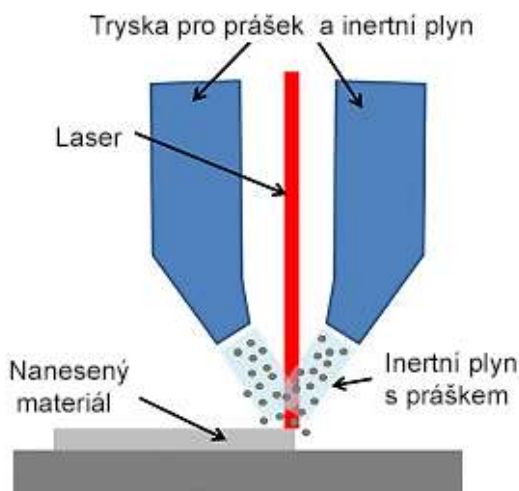
Při využití elektronového paprsku se materiál přivádí ve formě struny. Tento způsob není moc obvyklý, protože je nutnost tisknout materiál ve vakuové komoře.

Využití prášku vykazuje nižší efektivitu nanášení vrstvy a je potřebný přívod ochranného plynu. Ten je využit jak pro ochranu proti oxidaci, tak se využívá pro přivedení prášku, viz obr. 18. Tento způsob nanášení materiálu je velmi výhodný, protože nepotřebuje ochrannou komoru. Díky tomu je možnost touto technologií tisknout i velké součásti (až do 6 m).

Proces nanášení vrstvy spočívá v přívodu tepla skrz trysku do místa, kde je natavován přivedený prášek. Pohyb trysky může být tříosý, ale využívá se i více pohybových os, kdy se natáčí i tisknutý výrobek. Při využití více os je možné tisknout i tvarově složité modely. (obr. 19)

Technologii DED nabízí spousta výrobců, jako je například Sciaky, Optomec, BeAM, atd. Tiskárna EBAM 300 (obr. 20) je největší tiskárna, kterou vyrábí firma Sciaky. Velikost tisknutelné plochy této tiskárny je 5791 × 1219 × 1219 mm.

Technologie DED nabízí možnost tisknout velký rozsah materiálů. Od slitin titanu, přes nerezové slitiny, nástrojové oceli, až po slitiny niklu a mědi.



Obr. 18 Schéma nanášení vrstvy [25]



Obr. 19 Tisk pomocí DED [7], [28]

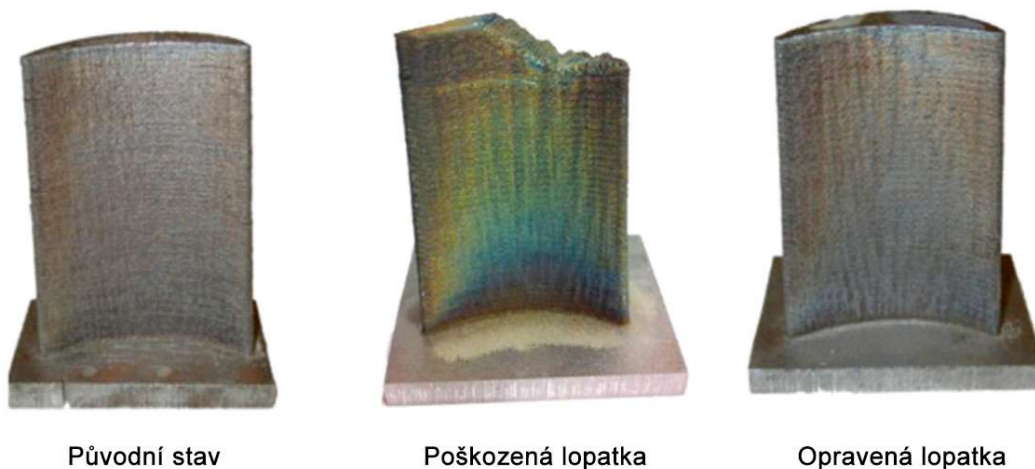
DED se dnes využívá hlavně v leteckém průmyslu pro tisk titanových součástek. Používá se ale i ve vesmírném, ropném průmyslu a dokonce při opravě opotřebených dílů, viz obr. 21.



Obr. 20 Tiskárna EBAM 300 [27]

Výhodami DED jsou velké rozměry tištěných dílů, relativní vysoká hustota materiálu (99,8 %), nižší spotřeba materiálu oproti technologiím, které nanáší prášek, vysoká rychlost tisku, možnost integrace do obráběcích center.

Mezi nevýhody řadíme nízkou kvalitu povrchu a pořizovací cenu zařízení, která se pohybuje kolem 5 400 000 Kč.



Původní stav

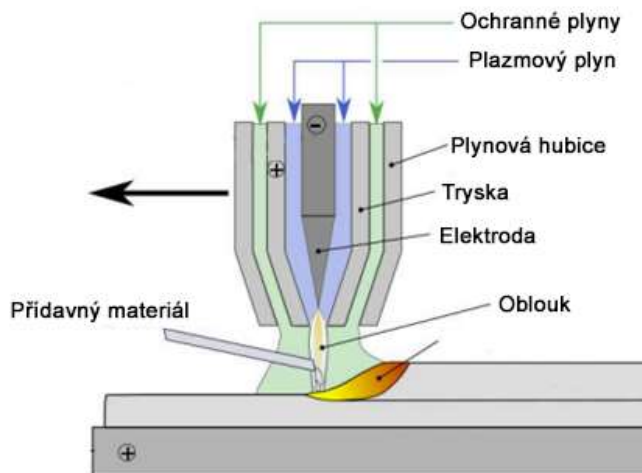
Poškozená lopatka

Opravená lopatka

Obr. 21 Ukázka opravení dílu [29]

## 2.5 Metoda PMD [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37]

U aditivní metody PMD (Plasma metal deposition) se pro natavení materiálu používá plazma. Princip metody PMD, viz obr. 22, spočívá v přívodu plazmového plynu, který se kolem netavící se elektrody zionizuje a následně vytváří vodivý oblouk mezi elektrodou a základním materiálem. Vodivý oblouk je usměrňován pomocí měděné trysky, která zvýší přesnost, délku a teplotu plazmy až 20000 °C. Usměrnění plazmatu má taky za následek zlepšení přenosu tepla a tím i zvýšení účinnosti, která způsobuje rychlejší tisk přídavného materiálu. Přídavný materiál je veden do místa tisku jako drát, popřípadě jako prášek. Jelikož u metody PMD se elektroda neodtavuje, není tak možné vést drát skrz plazmový hořák a je nutné mít přívod materiálu mimo hořák, viz obr. 23.



Obr. 22 Princip PMD [32]

Pro ochranu nataveného materiálu se využívá přívod dalšího plynu, který je většinou inertní, ale může se využívat i aktivní plyn.



Obr. 23 Boční přívod materiálu u metody PMD [34]

Pohyb hořáku je ovládán elektronicky, například pomocí robotické ruky, která může být rozšířena o monitorovací kameru. Monitorovací kamera slouží pro dálkovou kontrolu tisku bez nutnosti přiblížení pracovníka ke stroji.

Firma SBI nabízí hned několik produktů, které využívají plazmu. Zabývají se jak tvorbou celých linek pro 3D tisk, tak možností koupě pouze doplňujících rozšíření pro robotické ruky.

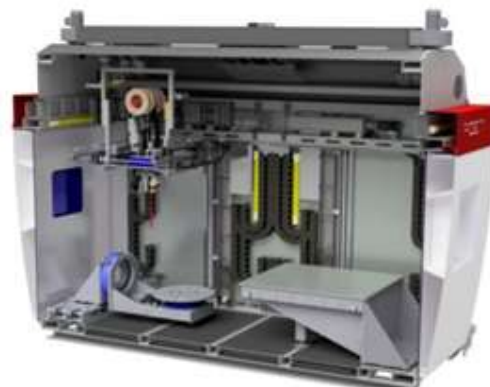
Jejich osmiosý systém (obr.24) nabízí tisk do maximálního rozměru  $\text{Ø}1000 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$  a při použití pětiosé modifikace je maximální rozměr  $2000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ .

Materiály, které se dají tisknout touto metodou jsou všechny kovy, slitiny a dokonce žáruvzdorné materiály, jako je například karbid wolframu.

Rychlost tisku se u těchto tiskáren pohybuje do  $10 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  u slitin na bázi niklu a pro titan maximálně  $4,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Využití plazmy má několik výhod. Patří mezi ně vysoká teplota pro natavení materiálu při současně malém ovlivnění už vytištěné vrstvy. Další výhodou je vysoká nanášecí rychlost a velká rozmanitost nastavení průřezu vrstvy. Výška vrstvy se pohybuje od 1 do 5 mm a šířka až do 25 mm.

Mezi nevýhody patří kvalita tisku. Nelze dosáhnout vysoké složitosti tisknutého dílu, omezená je i možnost tisku topologicky optimalizovaných součástí (obr. 25).



Obr. 24 M3DP systém [32]



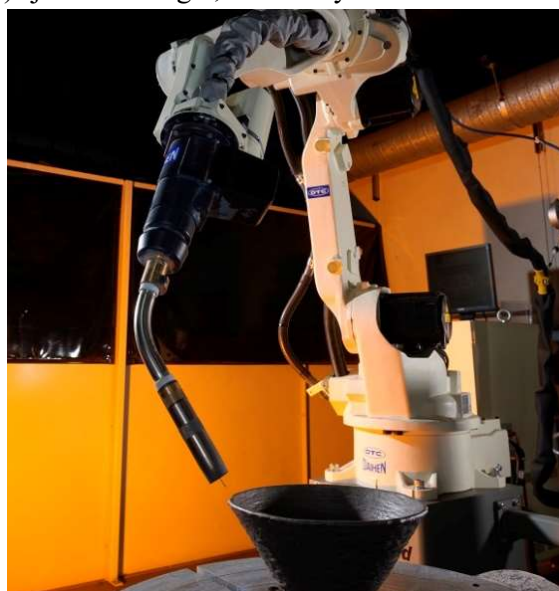
Obr. 25 Součást vyrobená metodou PMD [35]

## 2.6 Technologie WAAM [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47]

Wire arc additive manufacturing (WAAM) je technologie, která využívá navařování materiálu pomocí oblouku. Podle typu oblouku se jednotlivé technologie dále dělí a jednotlivé typy oblouků mají svá specifika, která ovlivňují výsledný model. Jedná se o metodu, která se snaží snížit náklady a rozšířit tak 3D technologii tisku kovu. Technologie svařování pomocí oblouku jsou dnes hojně využívány, a proto je snaha WAAM zdokonalit, aby bylo možno tuto technologii využít i ve firmách, které využívají obloukové svařování a mohly tak svoje zkušenosti využít v aditivním procesu.

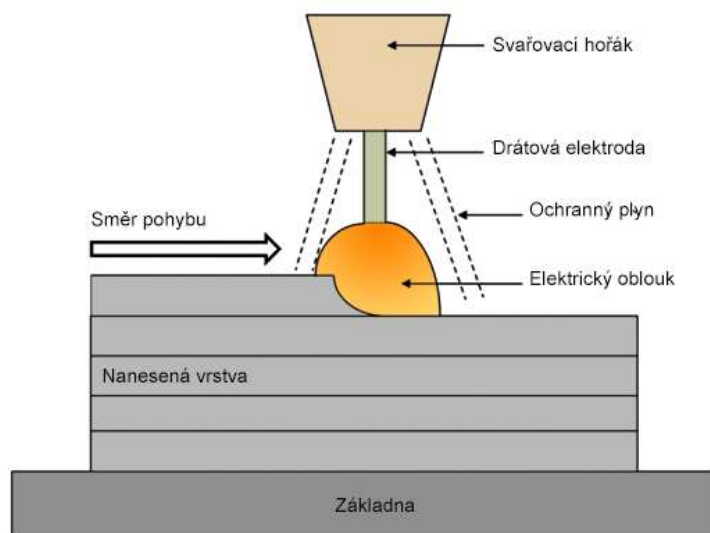
Pro tisk metodou WAAM je potřeba několik součástí. Jsou to svařovací hořák, napájecí zdroj, zařízení pro pohyb hořáku a elektronika, která řídí pohyb. (obr. 26)

Pro tisk se většinou volí metoda MIG nebo MAG, ale je možné navařovat i plazmou.



Obr. 26 Robotický WAAM systém [40]

Tisk pomocí technologie WAAM je ve své podstatě velmi jednoduchý. Jedná se totiž o skládání svarových housenek na sebe, vedle sebe a tím vytvářet 3D model, viz obr.27. Proces skládání jednotlivých housenek je realizován pomocí robotické ruky, které sice nebyly navrženy pro aditivní technologii, ale díky svému všestrannému použití se zde využívají. Použití robotické ruky přináší spoustu výhod. Mezi tyto výhody patří například možnost tisknout velké modely. Rozměr je totiž omezen pouze dosahem robotické ruky. Dále pak jednodušší zavedení do provozu, protože tyto robotické ruce se využívají už dnes. Přestože je velká část tvorby modelu automatizovaná, je nutný odborný pracovník.



Obr. 27 Schéma WAAM [42]

Jak už bylo nastíněno, princip WAAM technologie spočívá v navařování svarových housenek. U tvorby tlustších stěn se jednotlivé housenky překrývají. Toto překrytí výrazně zvyšuje kvalitu povrchu a rovinnost vytištěné vrstvy. Rovinnost vytištěné vrstvy je jeden z velmi důležitých kritérií všeobecně. U WAAM technologie nerovná vrstva vede ke změně délky oblouku a tím i k jeho nestabilitě. Tento problém je možné řešit snímači, které v reálném čase budou monitorovat a měnit délku oblouku.

U složitějších modelů je také nutné brát v potaz, že celá vrstva nemůže být vytištěna najednou, neboli na jedno zapálení oblouku. Proto se model musí rozdělit do několika menších částí, které se tisknou postupně. Taky nesmíme zapomenout, že u velkých modelů je potřeba proces přerušovat, kvůli zdroji napájení.

Při navařování dochází k úplnému natavení materiálu, který je na vzduchu ochlazen. Proto u této metody výroby musíme nastavit parametry jak pro tisk, tak musíme brát v potaz tepelnou vodivost materiálu, která může velmi výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti a vznik zbytkového napětí. Cílem je vytvořit model, který by měl v celém objemu stejnou strukturu a stejné mechanické vlastnosti.

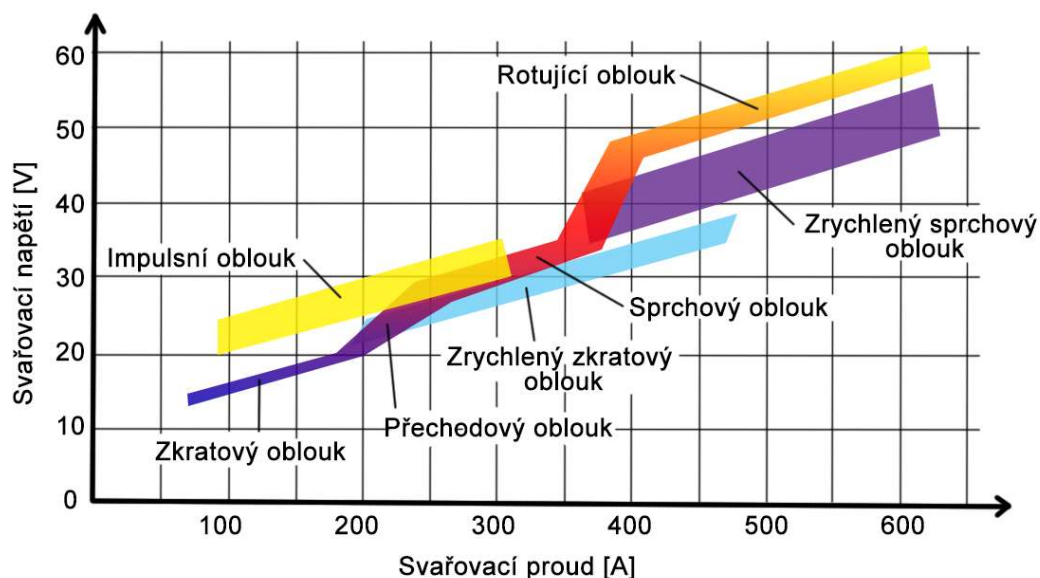
Typickými materiálovými vadami, které vznikají u metody WAAM, je mikro pórovitost a horší únavové vlastnosti, které mohou být zlepšeny pomocí dalších operací, jako je např. obrábění, leštění. Pórovitost materiálu je způsobena absorpcí kyslíku, dusíku a vodíku do roztaveného kovu. Kvůli tisku po vrstvách je rozdílná mez pevnosti vzhledem k orientaci tisku. Pro rovinu tisku (X-Y) je dosažena vyšší pevnost než ve vertikální ose (Z), a to přibližně o 10 %, viz tab.1.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálu Ti-6Al-4V vytištěný metodou WAAM [47].

Vlastnosti	X-Y	Z
Mez kluzu $R_e$ [MPa]	950	803
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	1033	918



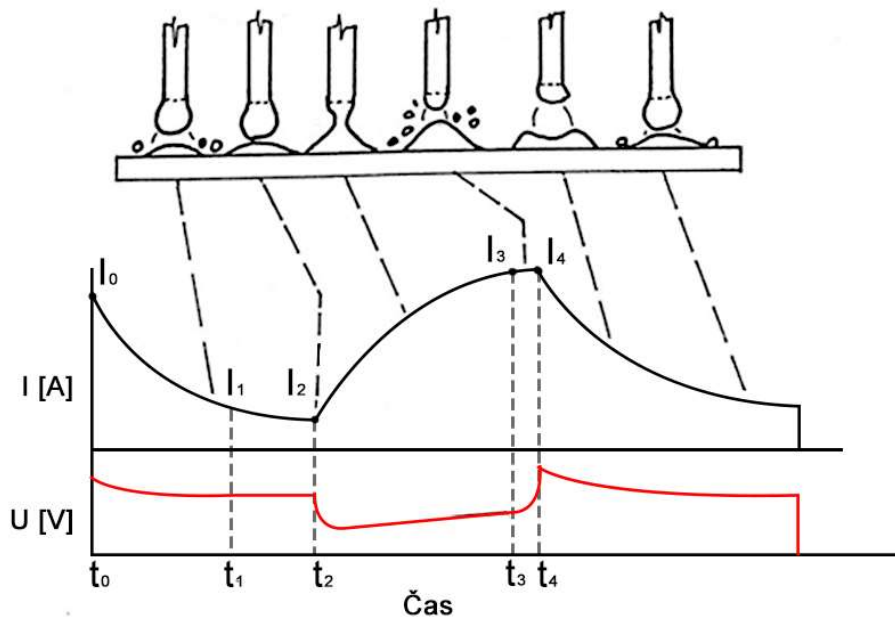
U obloukového svařování máme několik možností, jak kov přenášet. viz obr 28.



Obr. 28 Typy a oblasti přenosu kovu v oblouku [45]

Každá metoda má své výhody, ale i nevýhody a nelze je všechny použít u aditivního procesu. Mezi základní typy přenosu kovů řadíme:

- **Krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu** – u tohoto způsobu přenosu dochází k přerušení oblouku zkratem, při kterém se oddělí část natavené elektrody, která se vlivem povrchového napětí spojí s tavnou lázní. Svařovací proud se pohybuje v rozmezí 60 až 180 A a napětí 14 až 22 V. Průběh napětí a proudu vidíme na obr. 29.



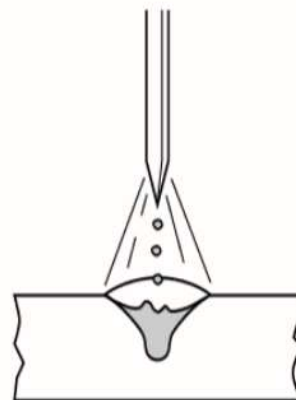
Obr. 29 Průběh napětí a proudu při zkratovém přenosu [44]

Z obrázku je jasně patrné, že proud a napětí nejsou konstantní. Teplo, které vytváří oblouk, a které slouží pro natavení materiálu závisí z velké části na velikosti proudu.

Cyklus zkratového přenosu se skládá z několika částí. První je zapálení oblouku v čase  $t_0$ . V čase  $t_0$  až  $t_1$  dochází k ohřevu, který způsobuje zkrácení oblouku a pokles proudu. V bodě  $t_2$  dojde ke zkratu a natavená elektroda je dále ohřívána odporovým teplem až do doby  $t_4$ , kdy dojde k odtržení nataveného materiálu.

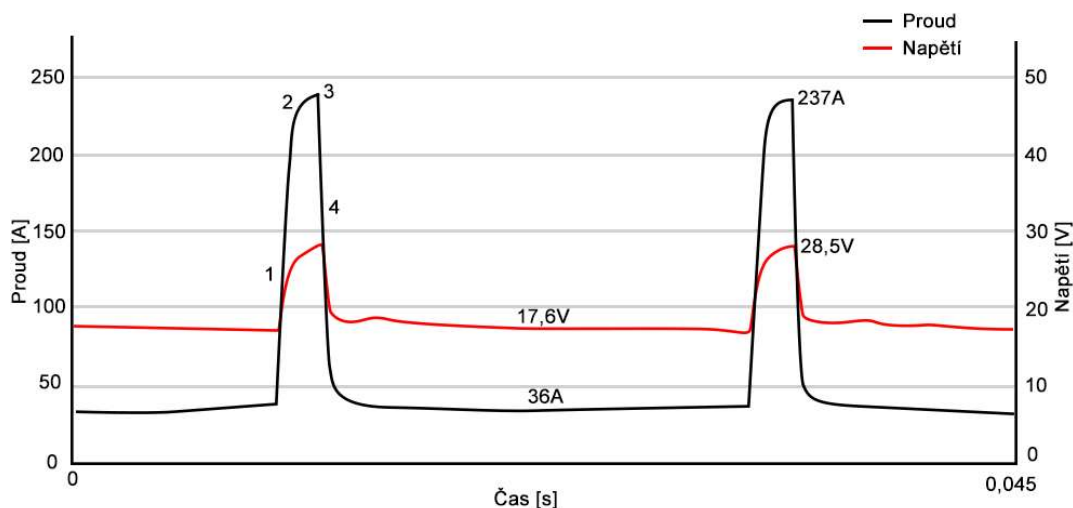
Zkratový přenos díky nižším proudům a napětím využíváme pro svařování tenkých plechů i vysokolegovaných ocelí. Výhodou pro 3D tisk je nízké vnášení tepla do místa návaru.

- **Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem** – je typický pro svařovací proudy 200 až 500 A a napětí 28 až 40 V. Oblouk tohoto přenosu hoří a nedochází při něm ke zkratu. Odtavená kapka elektrody je totiž oddělena bez dotyku a do svarové lázně jsou přenášeny plazmatem, viz obr. 30. V průběhu celého cyklu oblouk hoří a dostává se do místa svaru velké množství tepla. Proto je tento přenos typický velkou hloubkou závaru, která je lineárně závislá na hodnotě proudu. Tento typ přenosu dosahuje vysokého výkonu ( $3-12 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Svarová housenka je na povrchu hladká, čistá a má plynulý přechod do základního materiálu. Kvůli velkému přenosu tepla se tento způsob nedá využít pro svařování tenkých plechů, kdy zde hrozí deformace svařovaného materiálu.



Obr. 30 Oddělení a pád natavené kapky [46]

- **Impulsní bezzkratový přenos** – jedná se o speciální způsob bezzkratového přenosu kovu. Proud není konstantní jako u sprchového přenosu, ale při oddělení kapky proud poklesne. Celý průběh cyklu je znázorněn na obrázku 31. V bodě 1 narůstá proud ze základních hodnot 20 až 50 A. Zvýšený proud začne ohřívát jak elektrodu, tak základní materiál se svarovou lázní. V bodě 2 se proud začne snižovat a dochází k vytváření kapky, která se při maximálním proudu oddělí. Po oddělení kapky se proud sníží opět na základní hodnoty, aby se omezilo vnášené teplo.



Obr. 31 Průběh napětí a proudu při zkratovém přenosu [45]

Průběh proudu je řízen elektronicky a může mít několik průběhů, jako je například pravoúhlý, oblý, popřípadě speciálně tvarovaný pro jednotlivé druhy přídavných materiálů. Typickou vlastností pro sprchový oblouk je závislost frekvence impulzů na proudu. Tato závislost je volena tak, aby se docílilo konstantní velikosti kapky. Proto při malé hodnotě proudu se frekvence impulzů snižuje a u vysokých hodnot proudu zvyšuje. Jelikož se při sprchovém přenosu dostává do svaru méně tepla, lze tento přenos využít i pro tenké plechy.

- **Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu** – je velmi výkonný bezzkratový přenos materiálu mezi elektrodou a základním materiálem. Přenos kovu je uskutečňován pomocí intenzivního magnetického pole, které vzniká při proudech 450 až 650 A a napětích 50 až 65 V. Přenos natavených kapek vytváří kuželovou plochu, viz obr. 32. Tento oblouk je charakteristický velmi dobrým závarem a vytváří hluboký a široký svar s miskovitým profilem.



Obr. 32 Rotující oblouk [45]

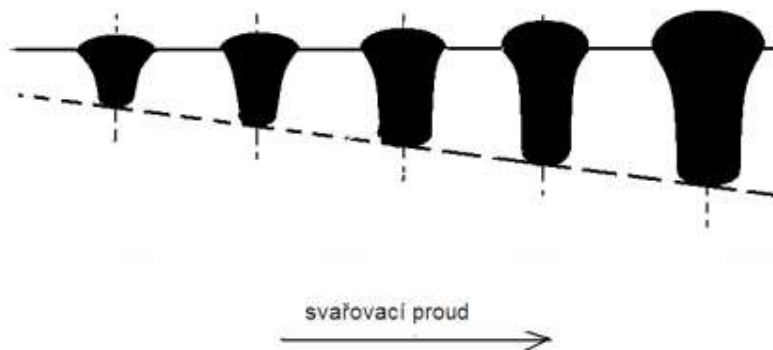
Při využití 3D tisku nelze využívat všechny přenosy kovů a jsou vhodné pouze ty, u kterých je omezen přenos tepla do materiálu. Vysoký přenos tepla způsobuje delší ochlazování nanesených vrstev, které se mohou při pokládání další vrstvy natavit a způsobit tak deformaci.

Proto se u metody WAAM využívá přenos impulsní, zkratový a hlavně přenosy modifikované, jako je například CMT.

### 2.6.1 Geometrie návarových housenek [46], [48], [49]

Kvalitní tvar navařené housenky je hlavním kritériem pro 3D tisk. Je nutné zajistit co nejpravidelnější tvar housenky, a to hlavně její šířku a výšku, protože výška vytváří rovný podklad pro další vrstvu a šířka ovlivňuje výsledný povrch součástí. Požadovaný tvar navařené housenky je ale v realitě velmi složité dosáhnout a je ovlivněn spoustou parametrů:

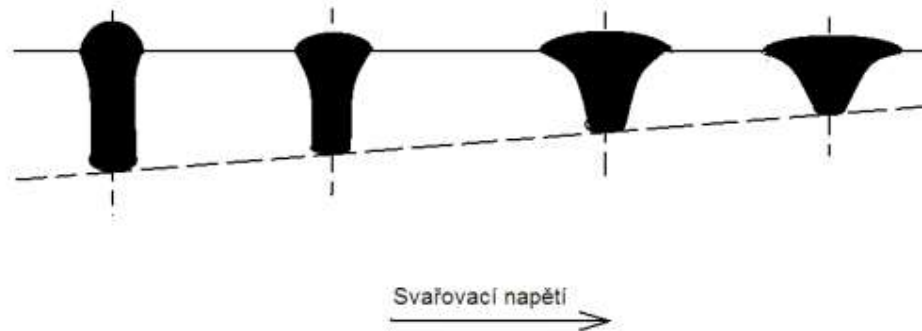
- **Vliv proudu** – ovlivňuje rychlost natavování elektrody a proto je tento parametr nutno volit společně s rychlostí podávání drátu. Při zvýšení proudu se elektroda odtavuje rychleji a musí se zvýšit i rychlost podávání drátu, aby bylo docíleno stálé délky oblouku. Nastavený proud ovlivňuje množství vneseného materiálu. Tento materiál se na výsledné housence projeví



Obr. 33 Tvar svaru s rostoucím proudem [48]

jak v její šířce, tak ve výšce, viz obr. 33. Zároveň také ovlivní množství vneseného tepla, které může způsobit vnitřní pnutí.

- **Vliv napětí** - ovlivňuje délku hořícího oblouku. Při zvýšení napětí dochází k prodloužení oblouku. Napětí neovlivňuje množství nanášeného materiálu a není tak hlavním faktorem, který by ovlivnil tisk, ale ovlivní geometrii navařené housenky. Na obrázku 34 je znázorněn vliv napětí na tvar housenky. Vyšší napětí způsobuje rozšíření svarové housenky a zároveň dojde k jejímu snížení.



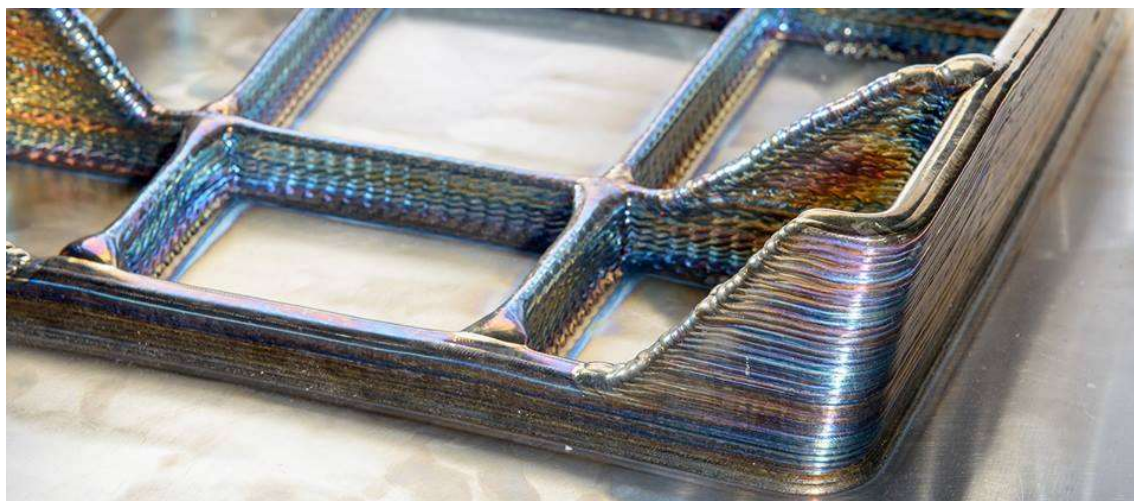
Obr. 34 Vliv svařovacího napětí na tvaru housenky [48]

- **Rychlost navařování** - neboli také rychlost posuvu hořáku má hlavní vliv na tvar nanášené housenky. Při zvýšení rychlosti dochází ke zkrácení času pro nanášení materiálu. Proto bude mít výsledná housenka menší průřez. U vyšších rychlostí se nestihne vnést do základního materiálu velké množství tepla a proto je možno využít vyšších svařovacích proudů a snížit tak dobu tisku při zachování objemu vneseného materiálu. Ale vyšší rychlosti mají také svá úskalí, jako je možnost vzniku nekonztantního průřezu housenky, nestabilního hoření, nedostatečného průtoku ochranného plynu.
- **Vliv ochranné atmosféry** - má velký vliv na kvalitu povrchu nanášené vrstvy. Ochranná atmosféra chrání natavený kov před okolním vzduchem a zamezí vzniku oxidické vrstvy, která by způsobila zhoršení mechanických vlastností, degradaci materiálu. Ochranná atmosféra zajišťuje stabilní hoření, které ovlivní tvar housenky. Typ ochranné atmosféry se vždy volí podle tisknutého materiálu, obzvláště u materiálů, které mají vysokou kyslíkovou afinitu. Průtok ochranného plynu je závislý na ostatních parametrech tisku, jako je například rychlost navařování.
- **Vliv sklonu hořáku** - se projeví hlavně v poměru výšky ku šířce housenky. Při tažném způsobu navařování (sklon hořáku ve směru navařování) je výsledný průřez housenky vyšší a užší než při tlačném způsobu navařování.

Metoda WAAM se řadí mezi aditivní technologie, které nemají sice vysokou kvalitu povrchu, ale dosahují vysokých hodnot nanášení materiálu. U metody WAAM se nanášecí rychlost pohybuje okolo 5 kg/h. Pro srovnání metoda SLS dosahuje nanášecí rychlosti 0,1 kg/h.

Výhodou, kterou jiné technologie nemají, je možnost tisknout standartní materiály, které se dnes využívají pro svařování.

Nevýhodou je nutnost vytištěný model kvůli kvalitě povrchu dále obrábět, viz obr. 35. Vrstva, která se musí obrábět je většinou 1 mm.

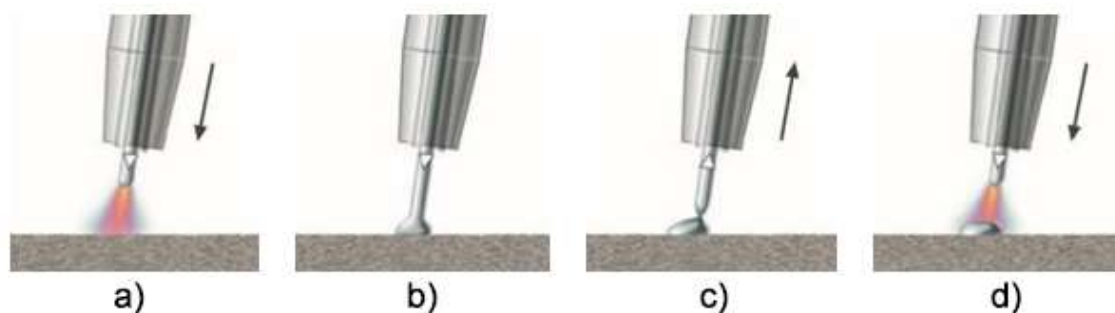


Obr. 35 Vytištěný model před obráběním [43]

## 2.7 Metoda WAAM-CMT [6], [45], [46], [50], [51], [52]

Metoda navařování s využitím modifikovaného oblouku CMT je jednou z nejvíce rozšířenou metodou WAAM, která se využívá pro 3D tisk.

Princip modifikovaného oblouku CMT spočívá v kombinaci horké a studené fáze oblouku. Při horké fázi dochází k největšímu ohřevu a ve studené je množství vneseného tepla omezeno. Proces navařování je zobrazen na obrázku 36. V první fázi se zapálí oblouk a dochází k natavování jak elektrody, tak základního materiálu. Následuje dotyk elektrody se svarovou lázní a dochází ke zkratu. Při zaznamenání zkratu se drát vsune zpět do hubice. Zpětné vtážení



Obr. 36 Průběh fází CMT [50]

podporuje oddělení kapky bez rozstříku.

Celý proces je charakteristický velmi vysokou stabilitou, malým vneseným teplem, hladkými housenkami a zvýšenou svařovací rychlostí.

Proces se nazývá „studený“, protože je velmi omezeno množství vneseného tepla. Nejvíce tepla je do svaru vnášeno při první fázi, kdy je potřeba natavit elektrodu. V dalších krocích se proud udržuje na nízkých hodnotách. U ocelí se tímto postupem svařování omezí vnesené teplo až o 50 %, u hliníkových slitin až o 90 %. Proto se tato metoda využívá pro svařování tenkých hliníkových plechů (0,8 mm).

Ve využití pro 3D tisk se tato metoda volí jak kvůli množství vneseného tepla, tak kvůli stabilitě a spolehlivosti procesu.

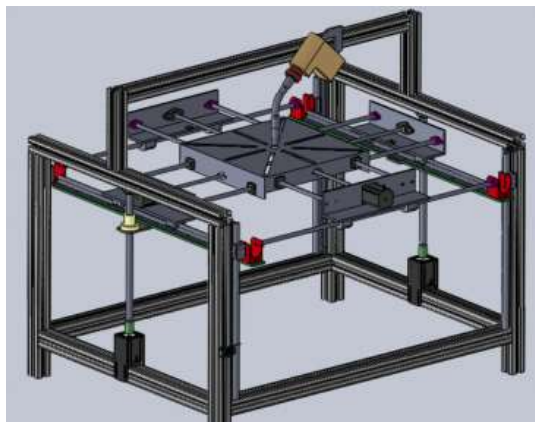
Pro pohyb svařovací hlavičky se může využít jak robot, tak speciálně vytvořený systém pro 3D tisk, který se může podobat koncepci klasické FDM tiskárny, viz obr. 37.

Při využití metody CMT se geometrie housenky pohybuje v šířce okolo 3 mm a výšce do 20 mm. Výkon při tisku je ovlivněn nastavenými parametry. Nastavuje se několik parametrů, které ovlivní výsledný tisk. Jsou to parametry, které jsou společné pro všechny tiskárny, jako je například rychlost posuvu, ale nastavují se také parametry jako je například maximální proud, který odtavuje konec elektrody, dále doba, po kterou prochází maximální proud, velikost nízkého proudu, rychlost posuvu drátu a další, které ovlivní chování tavení elektrody.

Mezi výrobce, kteří se specializují na tisk s využitím CMT metody, patří například firma MX3D. Tato firma využívá pro pohyb robota od společnosti ABB s IRC5 kontrolérem a pro navařování využívá hořák Fronius TPS/i 500i CMT. Vizí společnosti MX3D je využívat roboty nejen pro tisk součástek, ale i pro tisk velkých konstrukcí (obr. 38), jako jsou např. mosty a má potenciální využití pro tisk ve vesmíru.

Dalším uplatněním této metody je tisk složitých dílů, jako jsou například oběžná kola větráků, která se využívají v elektronickém průmyslu, či tisk titanových součástek, které se využívají v leteckém odvětví, kde výrazně snižují náklady na výrobu dílu.

Výhodou využití modifikovaného oblouku jsou spolehlivost tisku, malé množství vneseného tepla, vysoká rychlost tisku a další, které jsou typické pro metody WAAM.



Obr. 37 3D tiskárna využívající CMT [51]



Obr. 38 Využití robota při tisku metodou WAAM-CMT [52]

### 3 ZÁVĚRY

Práce se především zabývá rozбором jednotlivých technologií, které se dnes využívají pro 3D tisk kovu. U každé technologie byl rozebrán princip, využití, výhody a nevýhody. Dále byly ukázány příklady tisků a současní výrobci tiskáren. Metody, které využívají navařování pomocí elektrického oblouku, byly detailněji rozebrány kvůli své univerzálnosti.

Každá metoda, která se dnes využívá, je vhodná pro jiné použití a nedá se jednoznačně říct, která je nejlepší. Klasickými aplikacemi je tisk velkých součástek, kde je výrazně snížena cena výroby, a tisk prototypových dílů pro rychlé otestování v reálném prostředí.

Mezi jedno z nejzajímavějších využití je použití 3D tisku v biomedicíně, kde je potřeba pro každou osobu vytvořit speciální náhrady a tvorba těchto náhrad je klasickými metodami velmi omezená a nákladná.

Metody, které mají největší potenciál, jsou ty, které nachází uplatnění ve vesmírném průmyslu, kde je potřeba vytvářet součástky malých sérií a ze speciálních materiálů.

Na základě provedené rešerše lze usuzovat, že metody, které využívají navařování materiálu, budou v současnosti nejvíce využívány. Jejich výhodou nad ostatními technologiemi je jednoduchá robotizace a možnost tak tvořit velké modely bez přítomnosti člověka. I přestože tyto metody nejsou vhodné pro tisk malých součástí, jejich možné využití v jiných odvětvích, což z této technologie dělá jednu z nejuniverzálnějších. Dále mají větší potenciál pro zdokonalování a rozšiřování použití než metody pro tisk prototypů, u kterých je hlavním cílem zlepšit kvalitu tisku. S jistotou je možné očekávat nárůst využití a zlepšování všech technologií 3D tisku.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [53]

1. VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to metal 3D printing. *Hubs* [online]. c2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/#what>
2. ESSOP, Anas. Airbus and sigma labs partner to qualify metal 3D printing for aerospace. *3DPrintingIndustry* [online]. 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/airbus-and-sigma-labs-partner-to-qualify-metal-3d-printing-for-aerospace-159332/>
3. ENGLISH, Adam. The Wealth Warrior Sneak Peek: Dr. Kott's Top 10 Army Techs. *Outsider Club* [online]. Baltimore, 2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.outsiderclub.com/the-wealth-warrior-sneak-peek-dr-kott-s-top-10-army-techs/94993>
4. KOÇ, Muammer a Tuğrul ÖZEL. 20.1.1 Selective Laser Sintering Process. *Modern Manufacturing Processes*. John Wiley, s. 499. ISBN 978-1-11807-192-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0125HVKB/modern-manufacturing/general-ov-selective-laser>
5. 3D Printing Basics. *Markforged* [online]. Massachusetts, c2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics>
6. LAYER BY LAYER. *Fronius* [online]. Wels, 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <http://fronius.com.tw/en/welding-technology/info-centre/magazine/2019/waam>
7. Design for Additive Manufacturing: Metals. *Markforged* [online]. Massachusetts, c2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals>
8. 3D PRINTING SOFTWARE. *Miller3dprintingsystem* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: [https://miller3dprinting.com/library\\_resource/learning-library/how-do-3d-printers-work/3d-printing-software/](https://miller3dprinting.com/library_resource/learning-library/how-do-3d-printers-work/3d-printing-software/)
9. Technology overview metal Additive Manufacturing. *AMPOWER* [online]. Hamburg, c2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: [https://am-power.de/tools/metal-additive-manufacturing/#av\\_section\\_2](https://am-power.de/tools/metal-additive-manufacturing/#av_section_2)
10. High precision uv resins & services for dlp 3d printer technologies. *Druckwege* [online]. Hennef [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://druckwege.de/en/home-en/technology/fused-deposition-modelling-fdm>
11. An Introduction to ADAM Metal 3D printing. *Additive-x* [online]. Ripon, 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.additive-x.com/blog/an-introduction-to-adam-metal-3d-printing/>
12. EOS M 100. *EOS* [online]. Krailling, c2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-100>
13. EOS M 290. *EOS* [online]. Krailling, c2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>



14. 3D tisk kovů. *Materialise* [online]. Leuven, c2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
15. ŽABA, Tomáš. *Přehled technologií pro rapid prototyping pro výrobu kovových prototypů* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/10632/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojího inženýrství, ústan konstruování.
16. Aluminum Prototype 3D Metal Printing SLS Flexible High Rigidity. *Cncmachinedprototypes* [online]. c2015-2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <http://www.cncmachinedprototypes.com/sale-7497072-aluminum-prototype-3d-metal-printing-sls-flexible-high-rigidity.html>
17. O'BRIEN, Annette a Kathy SINNES. 4.6.3 Electron Beam Welding. *Welding Handbook, Volume 2 - Welding Processes, Part 1*. 9th ed. American Welding Society (AWS). ISBN 978-0-87171-856-3. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CQNWS1/welding-handbook-volume/other-weld-electron-beam>
18. Additive manufacturing machines. *GENERAL ELECTRIC* [online]. c2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines>
19. Electron-beam additive manufacturing. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam\\_additive\\_manufacturing](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam_additive_manufacturing)
20. MURR, Lawrence E., Sara M. GAYTAN, Diana A. RAMIREZ, et al. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012, 28(1), 1-14. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4)
21. The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM) in 3D Printing. *3dnatives* [online]. 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/#!>
22. Arcam EBM Spectra L. *GENERAL ELECTRIC* [online]. c2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/arcam-ebm-spectra-l>
23. Electron Beam Melting, EBM. *Manufacturingguide* [online]. Stockholm [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/electron-beam-melting-ebm>
24. 100,000 patients later: The 3D-printed hip is a decade old and going strong. *GENERAL ELECTRIC* [online]. 2018 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/stories/100000-patients-later-3d-printed-hip-decade-old-and-going-strong>
25. NARAYAN, Roger. 2.2.1 Powder Bed Fusion. *Rapid Prototyping of Biomaterials - Techniques in Additive Manufacturing*. 2nd ed. [2020]: Elsevier. ISBN 978-0-0810-2663-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0122Y7LP/rapid-prototyping-biomaterials/powder-bed-fusion>

26. Metal 3D Printing: What is Direct Energy Deposition? *AMFG* [online]. London, 2018 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/09/27/metal-3d-printing-what-is-direct-energy-deposition/>
27. Turnkey Industrial Metal 3D Printers for Production Parts, Prototypes, & More. *Sciaky* [online]. Chicago, c2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/industrial-metal-3d-printers>
28. The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing. *3dnatives* [online]. 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
29. LIU, Shunyu a Yung SHIN. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review: A review. *Materials & Design*. 2018, 164, 107552. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.107552
30. O'BRIEN, Annette. *Welding Handbook, Volume 2 - Welding Processes, Part 1*. 9th ed. American Welding Society (AWS), [2004]. ISBN 978-0-87171-729-0. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpWHVWPP02/welding-handbook-volume/welding-handbook-volume>
31. ALHUZAIM, Abdullah. *Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture* [online]. Montana, 2014 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/7086881/INVESTIGATION\\_IN\\_THE\\_USE\\_OF\\_PLASMA\\_ARC\\_WELDING\\_AND\\_ALTERNATIVE\\_FEEDSTOCK\\_DELIVERY\\_METHOD\\_IN\\_ADDITIVE\\_MANUFACTURE?source=swp\\_share](https://www.academia.edu/7086881/INVESTIGATION_IN_THE_USE_OF_PLASMA_ARC_WELDING_AND_ALTERNATIVE_FEEDSTOCK_DELIVERY_METHOD_IN_ADDITIVE_MANUFACTURE?source=swp_share). Magisterská práce. Montana Tech of the University of Montana.
32. NIEDERMAYER, Johannes a Michael KITZMANTEL. *M3DP – WHEN 3D COMPONENTS GROW BEYOND THE POWDER BED* [online]. Ziersdorf [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: [https://www.sbi.at/media/pages/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line/401f9802a5-1616074582/2021-m3dp-am-systems\\_lowres.pdf](https://www.sbi.at/media/pages/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line/401f9802a5-1616074582/2021-m3dp-am-systems_lowres.pdf)
33. ALALUSS, Khaled a Peter MAYR. Additive Manufacturing of Complex Components through 3D Plasma Metal Deposition—A Simulative Approach. *Metals (Basel)*. 2019, 9(5), 574. Dostupné z: doi:10.3390/met9050574
34. M3DP industrial line. *SBI* [online]. Ziersdorf: SBI, c2020-2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.sbi.at/en/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line>
35. *M3DP: PARTS AND DEMONSTRATORS BY PLASMA METAL DEPOSITION* [online]. Ziersdorf, c2020 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: [https://www.sbi.at/media/pages/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line/8a50736657-1619836063/2021\\_pmd-applications.pdf](https://www.sbi.at/media/pages/products/plasma-additive-manufacturing/m3dp-industrial-line/8a50736657-1619836063/2021_pmd-applications.pdf)
36. CUNAT, Pierre Jean a . *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. Euro Inox, 2007 [cit. 2021-5-16]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/BrochureWeldability\\_CZ.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf)

37. HÖFER, Kevin, Alexander NITSCHKE, Andre HÄLSIG a Peter MAYR. Manufacturing of Titanium Components with 3DPMD. *Metals*. 2019, **9**, 562. Dostupné z: doi:10.3390/met9050562
38. TABERNERO, Iván, Amagoia PASKUAL, Pedro ÁLVAREZ a Alfredo SUÁREZ. Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*. 2018, **68**, 358-362. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.095
39. MARŠÍK, Petr. *Adaptivní optimalizace pulzního proudu plazmového navařovacího automatu* [online]. 2018 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74605/F2-DP-2018-Marsik-Petr-Marsik\_diplomka.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky.
40. WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM). *Twi-global* [online]. Cambridge: twi-global, c2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137
41. KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam
42. DEREKAR, Karan, Adrian ADDISON, Sameehan JOSHI, Xiang ZHANG, Jonathan LAWRENCE, Lei XU, Geoff MELTON a David GRIFFITHS. Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, **107**. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-04946-2
43. An Introduction to Wire Arc Additive Manufacturing. *AMFG* [online]. London: AMFG, 2018 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://amfg.ai/2018/05/17/an-introduction-to-wire-arc-additive-manufacturing/
44. DOHNAL, Ivo. *Vliv složení ochranné atmosféry na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www\_base/zav\_prace\_soubor\_verejne.php?file\_id=5811. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie.
45. KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II – ČÁST SVAŘOVÁNÍ* [online]. Brno, 2006 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\_technologie\_2\_svarovani\_tavne\_kubicek.pdf
46. TRNKA, Filip. *Technologie navařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79900/F2-BP-2018-Trnka-Filip-Bakalarska\_prace\_-\_Trnka.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie.

47. FRAZIER, William. Metal Additive Manufacturing: A Review: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014, 23(6), 1917-1928. ISSN 1544-1024. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-014-0958-z
48. ADOLF, Tomáš. *Vliv průměru drátu na tvar svarové lázně při svařování metodou MAG* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2876/bc\\_19645.pdf?sequence=1](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2876/bc_19645.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
49. RAMOS-JAIME, Daniel, Ismael López- JUÁREZ a Pedro PEREZ. Effect of Process Parameters on Robotic GMAW Bead Area Estimation. *Procedia Technology*. 2013, 7, 398-405. ISSN 2212-0173. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.050>
50. ŠOULÁK, Petr. *Porovnání TOO metod svařování TIG, MAG a CMT* [online]. Brno, 2017 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/65819/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie.
51. ORTEGA, Arturo Gomez, Luis Corona GALVAN, Frédéric Deschaux BEAUME, Bachir MEZRAG a Sébastien ROUQUETTE. Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process. *Science and Technology of Welding and Joining*. Taylor & Francis, 2018, 23(4), 316-332. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1080/13621718.2017.1388995
52. ABOUT MX3D. *MX3D* [online]. Amsterdam: MX3D, c2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://mx3d.com/company/about/>
53. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázka vytištěných dílů. [1], [2], [3] .....	9
Obr. 2 Cena na jeden kus [7] .....	10
Obr. 3 Vliv množství polygonů na model.....	11
Obr. 4 Ukázka výšky vrstvy [8].....	11
Obr. 5 Jednotlivé části tisknutého modelu ve sliceru .....	12
Obr. 6 Přehled technologií pro 3D tisk kovů [9] .....	13
Obr. 7 Princip tisku [10] .....	14
Obr. 8 Ukázka podpor [7].....	14
Obr. 9 Metal X systém [7] .....	15
Obr. 10 Ukázka dílů [11] .....	15
Obr. 11 Součásti SLS tiskárny [4] .....	16
Obr. 12 Očišťování vytisknutých dílů [1].....	17
Obr. 13 EOS M 290 [13] .....	17
Obr. 14 Odlehčené součástky [16].....	18
Obr. 15 Schéma EBM tiskárny [23] .....	18
Obr. 16 Tiskárna Arcam Spectra L [22] .....	19
Obr. 17 Vytištěná kyčelní jamka metodou EBM [24].....	19
Obr. 18 Schéma nanášení vrstvy [25].....	20
Obr. 19 Tisk pomocí DED [7], [28].....	20
Obr. 20 Tiskárna EBAM 300 [27] .....	21
Obr. 21 Ukázka opravení dílu [29] .....	21
Obr. 22 Princip PMD [32] .....	22
Obr. 23 Boční přívod materiálu u metody PMD [34].....	22
Obr. 24 M3DP systém [32].....	23
Obr. 25 Součást vyrobená metodou PMD [35].....	23
Obr. 26 Robotický WAAM systém [40].....	23
Obr. 27 Schéma WAAM [42].....	24
Obr. 28 Typy a oblasti přenosu kovu v oblouku [45].....	25
Obr. 29 Průběh napětí a proudu při zkratovém přenosu [44] .....	25
Obr. 30 Oddělení a pád natavené kapky [46] .....	26
Obr. 31 Průběh napětí a proudu při zkratovém přenosu [45] .....	26
Obr. 32 Rotující oblouk [45].....	27
Obr. 33 Tvar svaru s rostoucím proudem [48].....	27
Obr. 34 Vliv svařovacího napětí na tvaru housenky [48].....	28
Obr. 35 Vytištěný model před obráběním [43].....	29
Obr. 36 Průběh fází CMT [50].....	29
Obr. 37 3D tiskárna využívající CMT [51].....	30
Obr. 38 Využití robota při tisku metodou WAAM-CMT [52] .....	30

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálu Ti-6Al-4V vytištěný metodou WAAM [47].....	24
---	----