

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**TOMÁŠ  
ŘEHÁK**



**ČVUT**  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Vliv technologie aditivního procesu WAAM na  
kvalitu návarů**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Tomáš Řehák

**VEDOUcí PRÁCE:** doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika  
strojírenství

**Praha 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Řehák** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466659**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv technologie aditivního procesu WAAM na kvalitu návarů**

Název bakalářské práce anglicky:

**The influence of technology the WAAM additive process on cladding deposits quality**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor problematiky aditivních metod a jejich porovnání s robotickým navařováním metodou WAAM
- 2) Popis metody WAAM, možnosti využití různých metod svařování a jejich modifikací
- 3) Návrh experimentu – porovnání vybraných metod
- 4) Vyhodnocení výsledku a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Chen, J.: Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012
- [2] Ding, D., Pan, Z., Cui, D., Li, H.: A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), Robotics And Computer-Integrated Manufacturing, 31, pp 101-110
- [3] Gurčík, T.: Stabilita procesu technologie WAAM, Diplomová práce, FS, ČVUT v Praze, Praha, 2018
- [4] Gurčík, T., Rohan, P.: Influence of shielding gas on geometrical quality of waam technology, metal 2019, Brno, 2019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

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

**Ing. Tomáš Gurčík ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi Ph.D., IWE za jeho ochotu, pečlivost a čas při odborném vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Gurčíkovi, IWE za jeho nemalý přínos při tvorbě experimentální části bakalářské práce. Děkuji také mé rodině, která mě celý život ve studiu podporovala.

## Anotace

V úvodu práce je rozebrána a popsána problematika aditivních metod zpracovávajících kovové materiály a jejich rozdělení podle způsobů depozice. Jednotlivé metody jsou v práci popsány a porovnány s robotickým aditivním navařováním metodou WAAM, která je v práci detailněji popsána včetně jejich modifikací.

Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na vliv technologie a vneseného tepla na kvalitu návaru. Za tímto účelem byl realizován experiment spočívající v navaření vzorků pomocí tří různých variant procesu CMT metody WAAM. V průběhu experimentu byly kontinuálně snímány teploty pomocí termočlánků. Teploty byly graficky vyhodnoceny v závislosti na čase. Porovnány byly velikosti vneseného tepla, zmonitorovány procesní parametry navařování nastavené parametry jednotlivých variant CMT a zhodnocen jejich vliv na kvalitu návaru.

<b>Název diplomové práce:</b>	Vliv technologie aditivního procesu WAAM na kvalitu návarů
<b>Autor práce:</b>	Tomáš Řehák
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Konzultant:</b>	Ing. Tomáš Gurčík, IWE
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	66 stránek, 5 tabulek, 45 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	WAAM, aditivní výroba, CMT, MAG, MIG

## Annotation

Additive methods for metallic materials processing and their categorization according to the deposition methods are discussed in the introduction of the thesis. Each additive method is described and compared with WAAM method. WAAM method is the main topic of the thesis and it is described in detail.

Practical part of the thesis is focused on the effect of the used technology and heat introduction to the weld. Experiment was performed to explore the effect of the heat introduction. Three samples were prepared with three different modifications of the CMT process. Temperature was measured during the experiment by the thermometers. Temperature depending on time was plotted. Process parameters and quality of each additive manufacturing method were evaluated. The amount of introduced heat was observed.

<b>Title of the final thesis:</b>	The influence of technology the WAAM additive process on cladding deposits quality
<b>Author:</b>	Tomáš Řehák
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Consultant:</b>	Ing. Tomáš Gurčík, IWE
<b>Academic year:</b>	2021/22
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	66 pages, 5 tables, 45 pictures
<b>Keywords:</b>	WAAM, additive manufacturing, CMT, MAG, MIG

# Obsah

1.	Úvod do problematiky aditivních metod .....	14
2.	Rozdělení AM zpracovávajících kovový materiál .....	15
2.1	Powder bed fusion (PBF).....	15
2.1.1	Selective laser melting (SLM) .....	16
2.1.2	Electron beam melting (EBM) .....	17
2.2	Binder jet printing (BJP) .....	18
3.3	Ultrasonic additive manufacturing (UAM) .....	18
3.4	Direct energy deposition (DED) .....	19
3.4.1	Laser metal deposition (LMD) .....	20
3.4.2	Laser wire deposition (LWD) .....	21
4	Wire and arc additiv manufacturing (WAAM) .....	22
4.1	Programování metody WAAM.....	23
4.1.1	Parametry svařování metody WAAM.....	25
4.2	Metody svařování používané pro technologii WAAM.....	25
4.2.1	Metoda MAG .....	25
4.2.2	Metoda MIG .....	26
4.2.3	Metoda TIG.....	26
4.2.4	Přenos kovu při obloukovém svařování MAG/MIG.....	27
	Zkratový přenos.....	27
	Sprchový přenos .....	28
	Přenos impulzním obloukem.....	28
	Přenos rotujícím obloukem .....	28
4.3	Ochranné plyny.....	29
4.4	Modifikace metod MIG/MAG procesu WAAM.....	29



4.4.1	Cold metal transfer (CMT) .....	30
4.4.2	Compulsively constricted WAAM .....	31
4.4.3	Micro WAAM .....	32
4.4.4	Tandem WAAM (TG-WAAM).....	32
4.4.5	Hybridní válcování (HDMR) .....	33
4.4.6	Kování v kombinaci s technologií WAAM (HF-WAAM) .....	33
4.4.7	Near-immersion active cooling (NIAC) .....	34
4.5	Materiály používané pro metodu WAAM.....	35
4.5.1	Titan .....	35
4.5.2	Nikl .....	35
4.5.3	Slitiny hliníku.....	35
4.5.4	Korozivzdorné oceli .....	36
5	Srovnání metody WAAM s ostatními AM .....	36
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	37
6.1	Popis experimentálního pracoviště .....	37
6.1.1	Robotizované pracoviště pro svařování .....	38
6.1.2	Měřicí pracoviště .....	39
6.2	Příprava experimentu .....	40
6.2.1	Přídavný materiál.....	42
6.2.2	Ochranný plyn.....	43
6.3	První vzorek - metoda CMT.....	43
6.4	Druhý vzorek metoda CMT – cc (cycle step).....	44
6.5	Třetí vzorek – metoda CMT- P (pulse) .....	46
6.6	Vyhodnocení měřených teplot .....	47
6.6.1	Porovnání tepelných průběhů .....	47
6.6.2	Vzorek vyrobený pomocí CMT.....	48

6.6.3	Vzorek vyrobený pomocí CMT-CC .....	49
6.6.4	Vzorek vyrobený pomocí CMT-P .....	50
6.7	Vyhodnocení geometrického tvaru návaru .....	51
6.7.1	Vzorek č.1 - metoda CMT .....	52
6.7.2	Vzorek č.2 - metoda CMT-CC.....	53
6.7.3	Vzorek č. 3 - metoda CMT-P .....	54
6.7.4	Srovnání tvaru vzorků .....	55
7	ZÁVĚR .....	57
8	Seznam použitých literárních zdrojů .....	58
9	Seznam tabulek .....	65
10	Seznam obrázků .....	65

## Seznam zkratk

WAAM	Wire and arc additive manufacturing (aditivní metoda navařování pomocí el. oblouku a drátového přídavného materiálu)
AM	Additive manufacturing (aditivní výroba)
CAD	Computer aided design (počítačem podporované návrhářství)
PBF	Powder bed fusion
SLM	Selective laser melting
EBM	Electron beam melting
BJP	Binder jet printing
UAM	Ultrasonic additive manufacturing
DED	Direct energy deposition
LMD	Laser metal deposition
LWD	Laser wire deposition
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
3D	Trojrozměrné
MAG	Metal active gas (obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře)
MIG	Metal inert gas (obloukové svařování tavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře)
TIG	Tungsten inert gas (obloukové svařování netavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře)
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
AC	Alternating current (střídavý proud)
CMT	Cold metal transfer
CMT-ADV	Cold metal transfer advance

CMT-PADV	Cold metal transfer pulz advance
CC-WAAM	Compulsively constricted Wire and arc additiv manufacturing
PAW	Plasma Arc Welding (plazmové svařování)
TG-WAAM	Tandem Wire and arc additiv manufacturing
HDMR	Hybrid deposition and micro-rolling (hybridní válcování)
HF-WAAM	Hot forging Wire and arc additiv manufacturing
NIAC	Near immersion active cooling
LEWD	Layer edge to water distance (vzdálenost okrajové vrstvy k vodní hladině)
BP	Bakalářská práce
ČVUT	České vysoké učení technické
CMT-CC	Cold metal transfer cycle step
CMT + P	Cold metal transfer pulse
EWT	Effective wall thickness (účinná tloušťka stěny)
SW	Surface waviness (vlnitost)

## Seznam použité symboliky

$\lambda$	[ $\mu\text{m}$ ]	vlnová délka
I	[A]	elektrický proud
U	[V]	elektrické napětí
t	[s]	čas
T	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	teplota

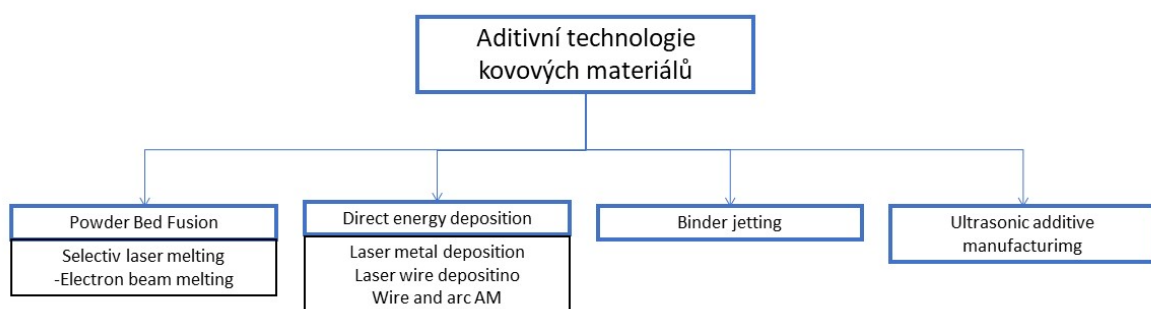
# 1. Úvod do problematiky aditivních metod

Aditivní technologie výroby jsou založeny na principu postupného vrstvení a spojování materiálu. Vrstvy jsou postupně kladeny jedna na druhou tak, aby finální díl odpovídal zadanému modelu. Materiál je nejčastěji přidáván ve formě kovového prášku nebo drátu, který je zdrojem energie roztaven a nanesen pomocí automatizovaného zařízení do jednolité vrstvy. Po ztuhnutí vrstvy se nanáší další vrstva. Tímto způsobem postupně vzniká ucelená součást. Mezi největší výhody patří minimální produkce odpadového materiálu oproti konvenčním způsobům výroby, jako je například obrábění, kde v důsledku odebrání materiálu vzniká velké množství odpadu. Potenciál aditivních technologií spočívá ve výrobě tvarově složitých a konvenčními metodami těžko vyrobitelných součástí. Výroba se provádí pomocí jediného automatizovaného pracoviště bez použití dalších nástrojů a přípravků a pouze na základě dat navrženého CAD modelu. Díky tomu se značně zkracuje doba výroby funkčních prototypů a zakázkové výroby. Dále tento způsob výroby umožňuje konstruktérům zcela nový přístup navrhování součástí s možností mnohem většího využití topologické optimalizace. Díky těmto vlastnostem dochází v posledních letech k velkému rozvoji aditivních technologií v různých odvětvích průmyslové výroby.

## 2. Rozdělení AM zpracovávajících kovový materiál

Aditivní výrobu kovových dílů lze provádět různými technologiemi. V současné době existují čtyři hlavní směry aditivní výroby kovových součástí, rozdělené podle metody depozice (viz obrázek 1). Tyto směry obsahují jednotlivé technologie, které se liší procesy aditivní výroby v závislosti na použitém zdroji energie, formě přídavného materiálu a konstrukci automatizovaného pracoviště. [18]

Další možností rozdělení aditivních metod je podle použitého zdroje, nebo podle použitého přídavného materiálu a způsobu jeho podávání. [1]



Obrázek 1 Rozdělení aditivních technologií kovových materiálů. Upraveno dle [18]

Jelikož se jedná o relativně nové technologie, jejichž vývoj stále probíhá všude po světě, není jejich terminologie zcela sjednocena, nebo chybí normovaný český překlad. Z těchto důvodů jsou názvy jednotlivých metod uváděny v anglickém jazyce, tak jak se uvádějí v odborné literatuře.

### 2.1 Powder bed fusion (PBF)

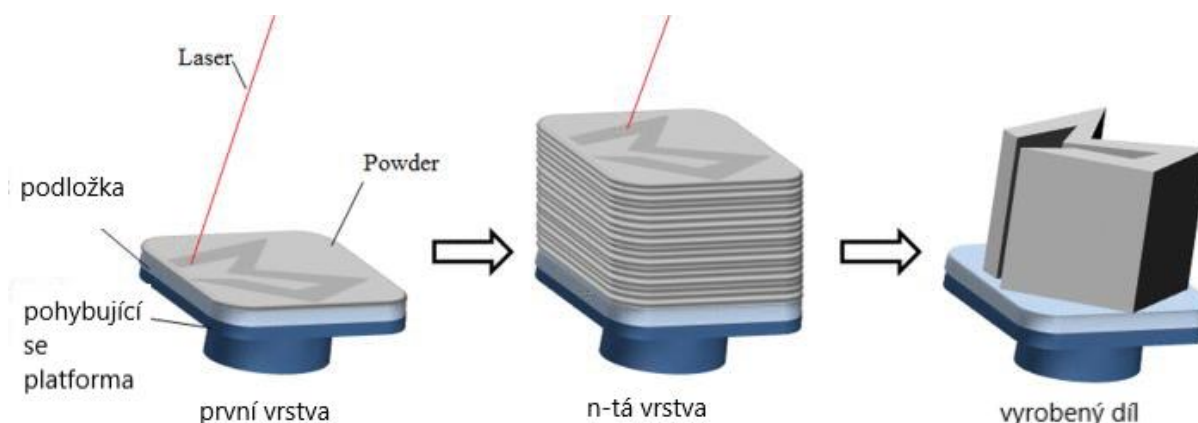
Jedná se o skupinu metod, které využívají přídavný materiál ve formě velmi jemného kovového prášku. Prášek se nanáší v ucelené vrstvě na podkladovou desku. Prášek se ve vrstvě spéká zdrojem energie, kterým může být laser, nebo elektrický oblouk. Následuje nanesení další vrstvy prášku, která se zdrojem energie opět spéká. Tímto způsobem se jednotlivé vrstvy spojují dohromady dokud nevznikne finální díl. Přebytný nespojený prášek se následně odstraní. Tato technologie nevyžaduje vytváření podpor, tuto roli plní samotný prášek. [1]

### 2.1.1 Selective laser melting (SLM)

Práškové vrstvy se postupně nanášejí na pohyblivou podkladovou desku, do které směřuje laserový paprsek. Jako základní materiál se často používají prášky z čistých kovů. Během procesu jsou částice základního materiálu zcela nataveny laserovým paprskem. Pro zamezení oxidace je pracovní prostor vyplněn inertním ochranným plynem. Po nanesení a natavení práškové vrstvy se podkladová deska vertikálně posune o tloušťku jedné vrstvy směrem dolů (ve směru osy Z). Tímto způsobem se vytvoří místo pro nanesení další vrstvy, která je nanášena pomocí speciálního válečkového nebo stíracího mechanismu. Tento postup se opakuje, dokud nevznikne požadovaná součást. Úplným natavením základního materiálu vzniká struktura o vyšší hustotě. K úplnému natavení základního materiálu se přivádí větší množství energie, které má za následek vznik nežádoucího zbytkového napětí a “kuličkování”. [2] [3] [4]

Kuličkování (balling) je jev, při kterém roztavený kov vytváří kuličky, které brání tvorbě souvislé taveniny v důsledku nedostatečné smáčivosti předchozí vrstvy. [2]

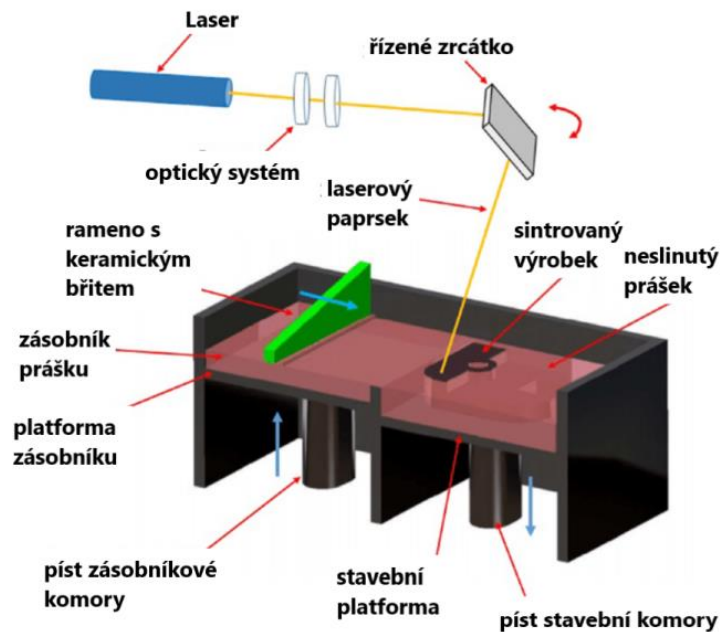
Laserové systémy pro SLM přešly z adaptovaných CO<sub>2</sub> laserů ( $\lambda \approx 10,6 \mu\text{m}$ ) k systémům využívající pevnolátkové Nd:YAG lasery ( $\lambda \approx 1,06 \mu\text{m}$ ) a následně na systémy s Yb:YAG krystaly lasery ( $\lambda \approx 1,03 \mu\text{m}$ ), které vykazují delší životnost a nižší energetické zatížení. [3]



Obrázek 2 Proces výroby dílu pomocí SLM. Upraveno dle [50]

Stejný postup aditivní výroby využívá také metoda SLS (selective laser sintering), která se používá převážně pro nekovové materiály, jako jsou plasty nebo keramika. Metoda se liší nižší intenzitou laserového paprsku, proto dochází k tzv. sintraci (teplota zahřívání prášku se pohybuje pod teplotou tavení). [1]

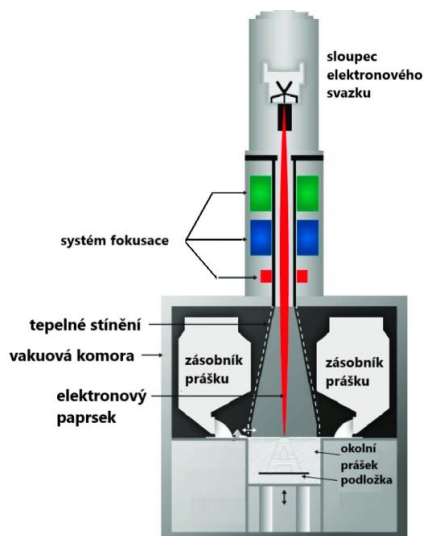




Obrázek 3 Schéma zařízení pro SLM. Upravené dle [51]

## 2.1.2 Electron beam melting (EBM)

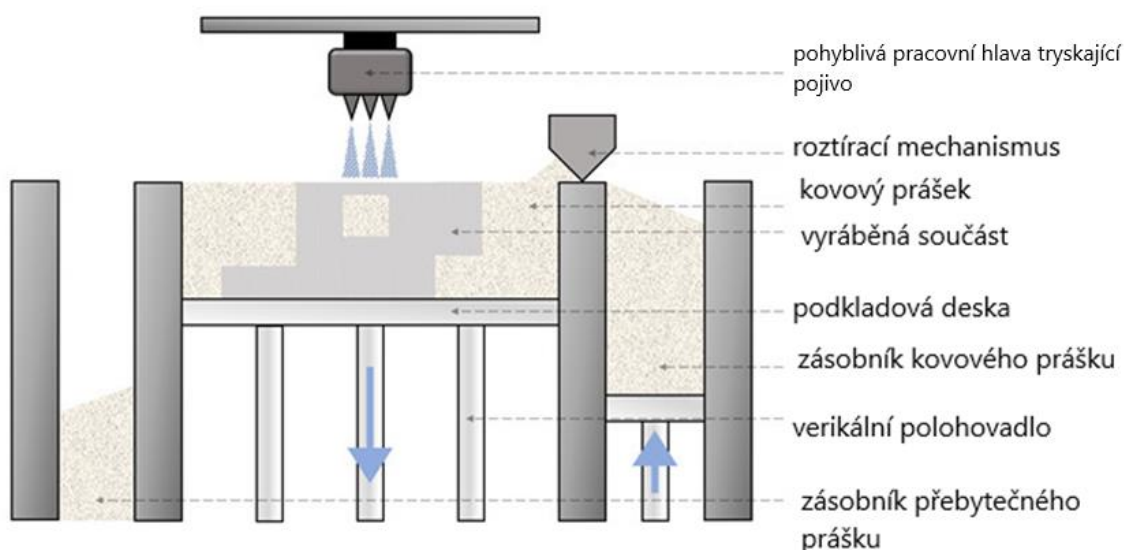
Metoda EBM využívá jako zdroj tepla elektronový svazek, který taví prášek (případně drátový přídatný materiál) v jednotlivých vrstvách. Výroba dílu probíhá ve vakuové komoře pro dosažení vysoké kvality bez nutnosti použití ochranného plynu. Výhodou EBM je, že zdroj tepla dokáže udržovat žíhací teplotu v průběhu výroby. Díky tomu díly vyrobené pomocí metody EBM, nevyžadují následné tepelné zpracování ke snížení vnitřního pnutí oproti metodě SLM. Nevýhodou této metody může být relativně drsný povrch dílu vyžadující povrchové úpravy. I přes vyšší pořizovací cenu vakuového systému se tato metoda využívá například k výrobě titanových dílů v leteckém průmyslu. [4][5][6]



Obrázek 4 schéma zařízení pro EBM. Upraveno dle [52]

## 2.2 Binder jet printing (BJP)

Metoda BJP spočívá v nanášení jednotlivých vrstev kovového prášku. Tato vrstva je následně zhutněna pomocí válce nebo pístu. Na zhutněnou vrstvu se nanáší pojivo. Pojivo se nanáší tak, aby tvarově odpovídalo řezu součásti v dané vrstvě. Následuje vertikální posuv podkladové desky směrem dolů a nanesení další vrstvy kovového prášku uloženého v zásobníku (viz obrázek 5). Celý proces se opakuje, dokud nevznikne požadovaná součást. [1][7]



Obrázek 5 Schéma metody BJP. Upraveno dle [53]

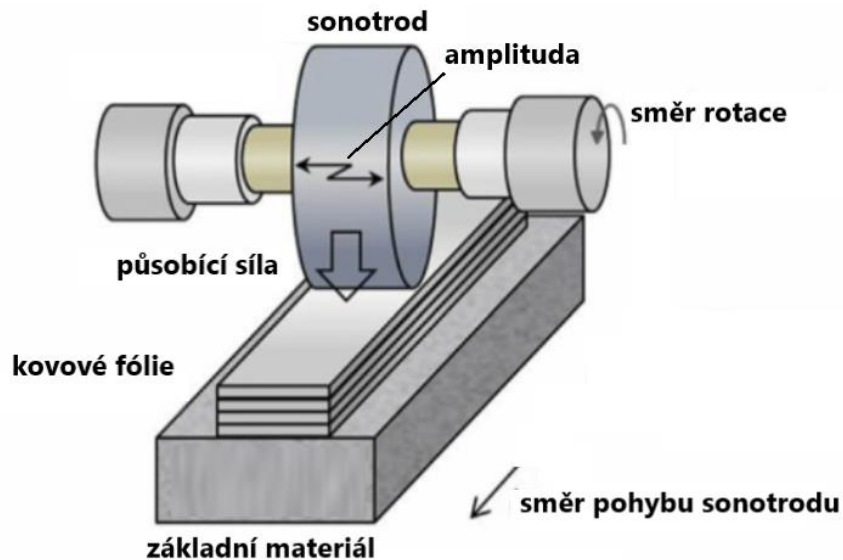
Následují procesy, jako je vytvrzování, odstranění nevázaných částic kovového prachu a žíhání. Tyto procesy mohou trvat déle než samotná výroba dílu. Přesto je metoda BJP rychlejší a nákladově patří mezi nejméně náročné varianty AM. Mechanické vlastnosti vyrobené součásti závisí na vlastnostech použitého pojiva.[8]

## 3.3 Ultrasonic additive manufacturing (UAM)

Jedná se o hybridní metodu výroby, která spojuje aditivní metodu vrstvení kovových plátů a obrábění. Proces výroby spočívá v postupném vrstvení kovových folií na sebe. Folie jsou postupně spojovány pomocí ultrazvukového svařování. Následně dochází k obrábění dílu

integrovanou numericky řízenou frézou, nebo laserem. Tento proces se opakuje, dokud nevznikne díl s požadovanou geometrií. [9]

Při použití technologie UAM nedochází k přetavení použitých kovů. Díky tomu v dílech nevznikají mikrostrukturální změny, zbytková napětí nebo defekty. Mechanické vlastnosti vyrobených dílů závisí především na vlastnostech a kvalitě spojení jednotlivých vrstev. [8][9]



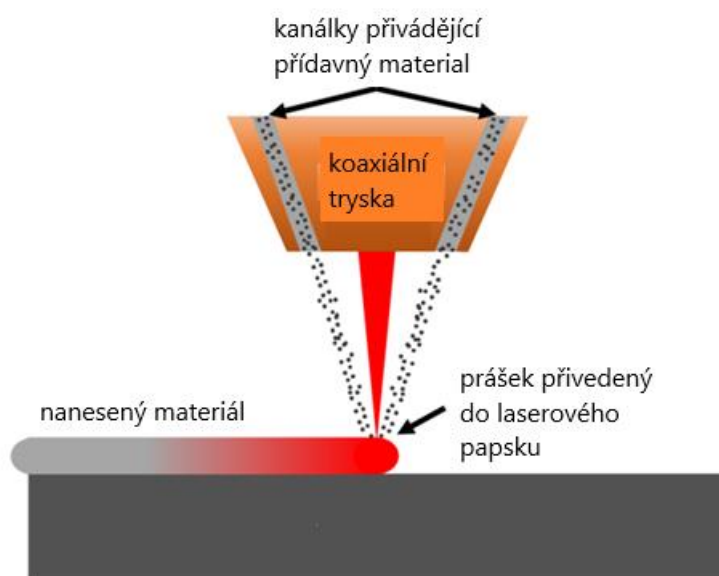
Obrázek 6 schéma procesu UAM. Upraveno dle [54]

### 3.4 Direct energy deposition (DED)

V systémech založených na procesech přímého energetického nanášení se přídatný materiál distribuuje pomocí trysky, nebo podavače přímo do tavné lázně. Přídatný materiál ve formě drátu nebo prášku se do lázně přivádí koaxiálně, nebo postranním podavačem. K roztavení přídatného materiálu se jako zdroj energie používá laser, plazma, nebo elektrický oblouk. Oproti ostatním metodám AM se metody DED vyznačují větším objemem jednotlivých vrstev a možností tvorby velkých dílů. Díky tomu se tyto metody používají jak k vytváření nových dílů, tak k opravě dílů vytvořených konvenčními způsoby výroby. Mezi tyto metody řadíme i technologii WAAM, která je detailně popsána v kapitole 4, a která je hlavním předmětem bakalářské práce. [1][11][12]

### 3.4.1 Laser metal deposition (LMD)

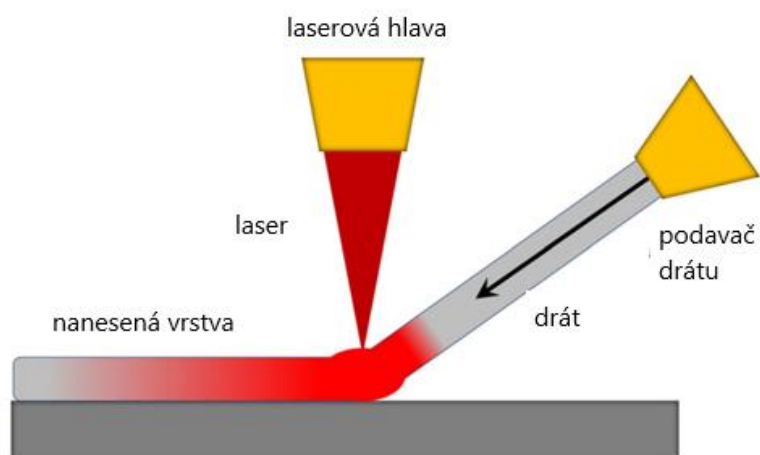
Tato aditivní technologie spočívá v přímém nanášení přídavného materiálu ve formě kovového prášku, který je vržen směrem do tavné lázně. Jako zdroj energie se používá laser. V průběhu LMD procesu dochází pomocí optických kabelů k přenosu laserových paprsků emitovaných laserovým zdrojem do hlavy přístroje. Současně se do pracovní hlavy přístroje dopravuje přídavný materiál ve formě prášku pomocí inertního plynu. Automaticky řízené trysky umístěné v hlavě přístroje regulují průtok a směr přídavného materiálu do svarové lázně vytvořené laserovým paprskem. Tímto způsobem vznikají návary, které tvoří jednotlivé vrstvy vyráběné součásti. Mezi klíčové parametry LMD procesu, které ovlivňují vlastnosti vyrobeného dílu patří: výkon laseru, rychlost posuvu hlavy, rychlost toku přídavného materiálu, vlnová délka laseru, množství ochranného plynu, průměr stopy dopadu laserového paprsku.[16]



Obrázek 7 Schéma metody LMD. Upraveno dle [55]

### 3.4.2 Laser wire deposition (LWD)

Technologie LWD se od LMD liší přídatným materiálem, který je ve formě drátu. Tato změna přináší řadu výhod jako je vyšší rychlost depozice, efektivnější využití materiálu, nižší náklady. Oproti metodám využívající jako základní materiál prášek jsou metody využívající přídatný materiál ve formě drátu šetrnější k životnímu prostředí. Nevýhodou je nižší přesnost nanesených vrstev a kvalita povrchu [13]

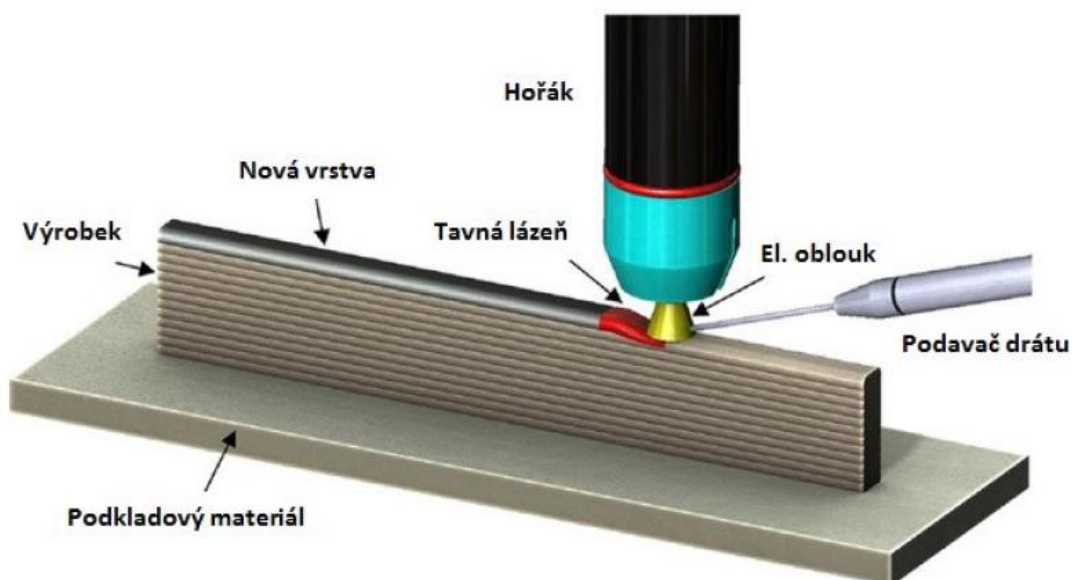


Obrázek 8 schématické znázornění metody LWD. Upraveno dle [55]

Za účelem zmenšení tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a snížením vnitřního pnutí se provádí modifikace technologie LWD předehřátím přídatného drátu. Zahřátí drátu se provádí nejčastěji pomocí odporového ohřevu. Tento proces usnadňuje jeho přechod do tavné lázně a snižuje požadavky na výkon laseru. Tímto krokem se zlepšuje stabilita procesu a vzhled nanesené vrstvy. [13][14][15]

## 4 Wire and arc additiv manufacturing (WAAM)

Technologie WAAM je založena na nanášení jednotlivých návarových housenek, které jsou postupně kladeny na sebe v jednotlivých vrstvách, dokud nevytvoří požadovanou součást. Jako zdroj tepla se využívá elektrický oblouk. Metoda je realizována nejčastěji pomocí robotizovaného pracoviště pro svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře. [18]



Obrázek 9 postup navařování pomocí metody WAAM [19]

První patent zabývající se touto metodou byl podán již v první polovině 20. století, rozvoj do nynější podoby začal v 90. letech 20. století na Cranfield University ve Velké Británii. [17]

Robotizované pracoviště pro metodu WAAM se skládá z univerzálního robotického ramene, standardní svařovací hlavy, podavače drátu, svařovacího zdroje a dálkového ovládání tohoto systému. Součást je tvořena z přídatného materiálu ve formě klasického svařovacího drátu (primárně určeného pro metodu MIG/MAG). Geometrie pokládání jednotlivých návarových housenek se řídí podle programu uloženého v řídicí jednotce. [19][20]

Metoda WAAM se oproti ostatním AM vyznačuje velkým objemem a vysokou rychlostí depozice materiálu. Rychlost nanášení se pohybuje v rozmezí 1 až 15 kilogramů za hodinu v závislosti na použité metodě WAAM. Díky tomu je metoda vhodná a převážně se využívá pro aditivní výrobu součástí velkých rozměrů. Rozměry vyráběné součásti jsou limitovány pouze prostorovým dosahem robotických ramen. Vyrobené součásti často vyžadují vyšší kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost, než dokáže samotný proces navařování poskytnout. V tomto případě se povrch dále obrábí. Obrábění se tak často stává finální operací výroby pomocí

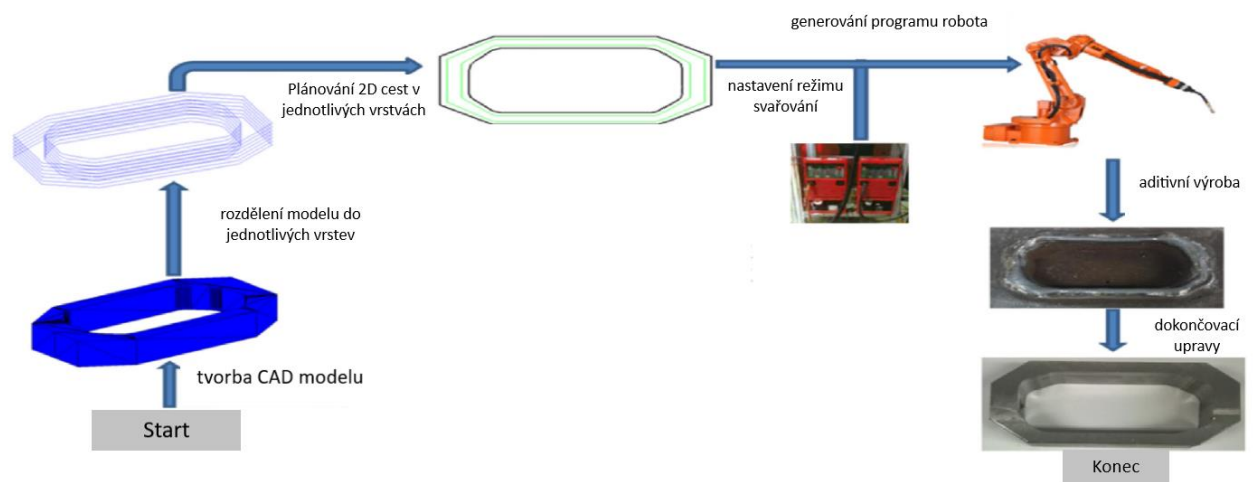
metody WAAM. Kombinací Aditivní výroby a technologií obrábění je možné ušetřit až 70% odpadu vzniklého použitím pouze technologií založených na odebrání materiálu. Kombinaci těchto technologií lze provádět pomocí jediného hybridního stroje, který disponuje vybavením pro metodu WAAM i obrábění. Další oblastí uplatnění je oprava součástí vyrobených konvenčními způsoby výroby. Oprava spočívá v navaření ulomených, nebo opotřebovaných míst součástí. Využívá se například v leteckém průmyslu k výrobě odlehčených dílů nebo v lodním průmyslu k výrobě a opravě lodních šroubů velkých rozměrů. [17-20]



*Obrázek 10 kombinace metody WAAM a obrábění [56]*

#### **4.1 Programování metody WAAM**

Prvním krokem při tvorbě dílu pomocí metody WAAM je vytvoření 3D modelu pomocí CAD programu. Model součásti je nutné převést do formátu, který umožňuje rozdělit model na jednotlivé řezy odpovídající vrstvám návarů. V jednotlivých vrstvách se podle vybrané strategie naplánuje vhodná depoziční cesta. V dalším kroku se z vytvořených dat vygeneruje kód tvořící program robota. Zároveň se přiřadí nastavení navařovacího režimu a jednotlivých parametrů. Následuje aditivní výroba pomocí automatizovaného resp. robotizovaného pracoviště, které se řídí podle vloženého programu. [19][20]



Obrázek 11 Postup programování. Upraveno dle [20]

Programování robota se provádí pomocí ručního online programování přímo na pracovišti nebo u složitějších návarů off-line programováním pomocí speciálního softwaru. Další možností je hybridní způsob programování kombinující off-line a online programování. [19][20]

Ruční způsob programování provádí obsluha na pracovišti. Programování spočívá v navádění robota na požadovanou trajektorii a ukládání jednotlivých bodů, které vytvářejí výslednou dráhu robota. Během tohoto procesu obsluha ukládá do programu také parametry navařování a speciální operace jako je zapálení, nebo zhasínání oblouku. [19],[20]

Off-line programování probíhá ve virtuálním prostředí pomocí speciálního softwaru. Program zobrazuje virtuální podobu automatizovaného pracoviště ve 3D prostředí. V tomto prostředí se provádí programování s využitím databází programu. Databáze obsahují již přednastavené speciální operace, nebo úkony které je možné implementovat do vytvořeného programu. Výhodou je, že programování může probíhat pouze pomocí počítače, aniž by byl robot připojen. Svařovací pracoviště tak může pracovat nepřetržitě. Vizualizace ve 3D prostředí umožňuje sledování vytvořeného programu ze všech uhlů. Umožňuje snadno rozpoznat konstrukční a technické nedostatky a předcházet kolizím skutečného robota. Po dokončení a otestování navrženého programu v off-line prostředí stačí program nahrát do řídicí jednotky robota. Off-line programování minimalizuje čas prostojů robota, což vede ke zvýšení jeho ziskovosti. [19],[20]



### **4.1.1 Parametry svařování metody WAAM**

Pro správný průběh aditivní výroby je nutné nastavit a sledovat hlavní parametry. Mezi sledované parametry patří: Svařovací proud, rychlost podávání drátu, svařovací napětí, rychlost svařování. Tyto parametry mají vliv na kvalitu vyráběného dílu a společně ovlivňují parametry, jako je tepelný příkon procesu výroby, geometrie a hloubka svaru, velikost tavné lázně, velikost objemu navařené vrstvy. Parametry se volí na základě přídatného materiálu ve formě drátu, použitého svařovacího režimu a případné zvolené modifikace metody WAAM.[22]

## **4.2 Metody svařování používané pro technologii WAAM**

Technologie WAAM využívá principů základních metod svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře. Při těchto metodách hoří elektrický oblouk mezi elektrodou a základním materiálem. Plyn tvořící ochrannou atmosféru proudí z ústí hořáku okolo elektrického oblouku směrem k svarové lázni a slouží k zamezení nežádoucí reakce svarové lázně s okolní vzdušnou atmosférou. Používané metody tavného svařování jsou: MAG, MIG, TIG a jejich modifikace. Svařovací metody se liší především v rychlosti navařování. [18][20]

### **4.2.1 Metoda MAG**

Jedná se o metodu obloukového svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře. Při této metodě je elektrodou přídatný materiál ve formě svařovacího drátu. Průměr drátu se pohybuje okolo jednoho milimetru. Mezi přídatným materiálem a základním materiálem hoří elektrický oblouk. Hoření oblouku má za následek odtavování přídatného materiálu, který se automaticky odvíjí ze zásobníku, kde je uložen na cívce. Rychlost odvíjení je závislá na nastavených parametrech svařování. Ochrannou atmosféru tvoří aktivní plyn  $\text{CO}_2$  nebo směs plynů argonu +  $\text{CO}_2$ , případně kyslíku. Plyn reaguje se svarovou lázní a přispívá ke zvýšení teploty svarové lázně, zvětšení hloubky závaru. Nežádoucí oxidační účinky ochranné atmosféry se potlačují dezoxidačními přísadami jako je Mn a Si. Dezoxidační přísady jsou obsaženy v přídatném materiálu. Metoda MAG se používá především ke svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. [23][26]

## 4.2.2 Metoda MIG

Metoda obloukového svařování tavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře. Od metody MAG se liší pouze odlišným ochranným plynem, který chemicky nereaguje se svarovou lázní. Jedná se o argon, helium nebo jejich směsi. Metoda MIG se používá ke svařování vysoce legovaných ocelí a neželezných kovů jako například Al, Cu, Ni. Rozsah parametrů svařování je pro metody MAG a MIG stejný. [23][24]

Tabulka 1 Rozsah parametrů metod MAG/MIG [23]

Svařovací proud [A]	40-500
Napětí el. oblouku [V]	16-36
Rychlost svařování [m/hod]	Až 90
Druh svařovacího proudu	Stejnoseměrný, obrácená polarita
Charakteristika zdroje	Plochá

## 4.2.3 Metoda TIG

Metoda spočívá v obloukovém svařování netavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře. Od předešlých metod se liší především netavící se elektrodou vyrobené z čistého wolframu, nebo z wolframu legovaným aktivujícími přísadami (Ce, La, Zr). Metoda TIG umožňuje svařování bez přídavného materiálu i s přídavným materiálem ve formě drátu automaticky odvíjeného z cívky, nebo podávaného ručně. Jako inertní ochranný plyn se nejčastěji používá argon, helium, jejich směs (případně směs argonu s příměsí dusíku nebo vodíku). [23]

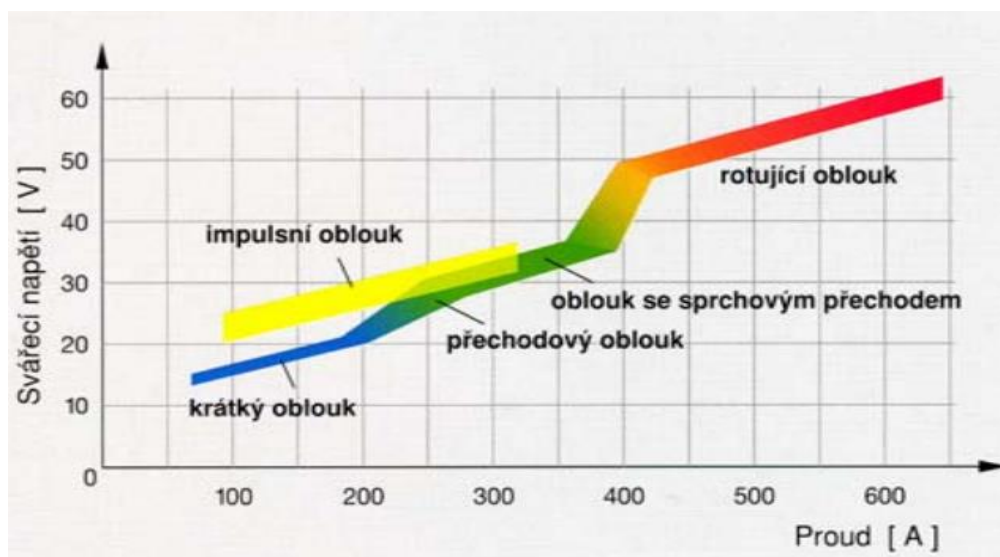
TIG umožňuje svařovat pomocí stejnosměrného (DC) i střídavého (AC) proudu. Stejnoseměrný proud se využívá pro svařování legované oceli, titanu, mědi niklu a dalších kovů a jejich slitin. Svařování pomocí střídavého proudu se využívá pro svařování hliníku nebo hořčíku a jejich slitin. U AC proudu se využívá čistícího účinku, kdy kladné ionty ionizovaného argonu bombardují základní materiál a tím napomáhají rozrušovat vrstvu oxidů hliníku ( $Al_2O_3$ ). Společně s vlivem tepelného účinku katodové skvrny dochází k čištění povrchu od vysokoteplotní oxidické vrstvy. Střídavý proud je kompromisem obou polarit poskytující hluboký závar s dostatečným čistícím účinkem.[23],[24]

Tabulka 2 Rozsah parametrů metody TIG [23]

Svařovací proud [A]	10-500
Napětí el. oblouku [V]	10-30
Rychlost svařování [m/hod]	6-50
Druh svařovacího proudu	Střídavý pro Al, Mg a jejich slitiny, stejnoseměrný pro ostatní materiály
Charakteristika zdroje	Strmá

#### 4.2.4 Přenos kovu při obloukovém svařování MAG/MIG

Vlastnosti svaru, u metod využívajících tavící se elektrodu, jsou ovlivňovány způsobem přenesení jednotlivých tekutých kapek přídavného materiálu do svarové lázně. Přenos kovu ovlivňuje: hloubku závaru, šířku housenky, vzhled svarové housenky (kvalitu a tvar povrchu). Způsob přenosu kovu má také vliv na stabilitu oblouku, rozstřík a metalurgické reakce probíhající mezi kovem, plyny a vznikající struskou. Základní typy přenosu svarového kovu závisí na velikosti svařovacího napětí a proudu (viz obrázek 12).



Obrázek 12 Základní typy přenosu svarového kovu [24]

#### Zkratový přenos

Nazývaný také jako „krátký oblouk“ vzniká při nízkých hodnotách svářecího napětí a proudu. V průběhu hoření oblouku dochází k protahování roztavené kapky přídavného materiálu. V momentě dotyku natavené kapky se svarovou lázní dochází ke zkratu a kapka je vtažena do svarové lázně vlivem dynamických účinků elektrického oblouku a povrchovým

napětím svarové lázně. Tímto způsobem se střídají režimy hoření oblouku a zkratu. Zkratový přenos se vyznačuje malou hodnotou tepelně ovlivněné oblasti a je vhodný pro svařování materiálů o malé tloušťce (například tenkých plechů). [23-25]

Mezi zkratovým a sprchovým přenosem je oblast přechodového oblouku. Tato oblast se vyznačuje nestabilním hořením oblouku a nepravidelnými zkraty. Dochází zde k tvorbě velkých kapek, které vlivem gravitační síly putují do svarové lázně. Tento proces provází velký rozstřík. Přenos v této oblasti se nazývá kapkový přenos. [23]

### **Sprchový přenos**

Jedná se o bezzkratový přenos, který probíhá při vyšších hodnotách svařovacího proudu a napětí. V tomto režimu vznikají na elektrodě malé kapičky kovu, které se s vysokou frekvencí oddělují a přesouvají do svarové lázně. S narůstající proudovou hustotou se zvyšuje počet kapiček a zmenšuje se jejich průměr. Odtavuje se tak větší množství přídavného materiálu a tvoří se rozměrnější svarová lázeň téměř bez rozstříku. Díky většímu množství vneseného tepla vzniká větší tepelně ovlivněná oblast, širší svarová housenka a větší závar, proto se režim hodí pro svařování materiálů větších tlouštěk. [23-25]

### **Přenos impulzním obloukem**

K přenosu kovu do svarové lázně se využívají proudové a napěťové pulsy. Frekvence pulsů, jejich šířka a poměr ovlivňuje výkon oblouku. Impulzní přenos tvoří dvě fáze. Základní fáze proudu udržuje stabilní hoření oblouku a zajišťuje přehřev elektrody a svařence. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 25 až 80 A. V impulsní fázi musí proud překročit hodnotu potřebnou pro sprchový oblouk, aby došlo k bezzkratovému přenosu přídavného materiálu do svarové lázně. Díky nízké hodnotě základního proudu se přenos vyznačuje malou tepelně ovlivněnou oblastí. Umožňuje svařovat tenké plechy bezzkratovým přenosem bez rozstříku. Proces je obvykle nastaven tak, aby se při každém pulzu odtavila jedna kapka tekutého kovu. Díky tomu je možné přesně řídit množství odtaveného kovu. [23-25]

### **Přenos rotujícím obloukem**

Rotující bezzkratový přenos vzniká při vysokých hodnotách svařovacího proudu a napětí. Nastavením větší délky volného drátu dochází k přehřevu drátu odporovým teplem na hodnotu blízkou teplotě tavení. Rotování oblouku je zapříčiněno působením elektromagnetických sil při vysoké proudové hustotě. Uvolněná kapka se při přechodu do tavné lázně rotací odklání do strany. Metoda se využívá pouze při automatizovaném svařování

a vytváří téměř stejnoměrný průvar s dobrým závarem. Používá se pro svařování ocelí o velké tloušťce. [23-25]

### 4.3 Ochranné plyny

Hlavním úkolem ochranných plynů je chránit svarovou lázeň, svařovací elektrodu a vlastní elektrický oblouk před nežádoucími vlivy okolní vzdušné atmosféry. Ochranná atmosféra má vliv na zapálení a stabilitu hoření elektrického oblouku. Dále ovlivňuje vlastnosti svarového kovu jako jsou především: tekutost a smáčivost svarové lázně. Ochranné plyny se rozdělují podle chemické aktivity na inertní, které nereagují se svarovou lázní (jsou chemicky „netečné“) a na aktivní plyny, které se účastní chemických reakcí ve svarové lázni. [27]

Argon je nejpoužívanější inertní plyn. Jedná se o jednoatomový bezbarvý vzácný plyn, který má nejlepší ionizační vlastnosti. Vyznačuje se ale malou tepelnou vodivostí a jeho měrná hmotnost je větší než vzduchu. Vyšší měrná hmotnost je vhodná pro ochranu svarové lázně při svařování v základních svařovacích polohách. Často se používá ve směsi s heliem (inertní směs), nebo s menším množstvím oxidu uhličitého případně kyslíku. Helium je další jednoatomový inertní plyn, který lépe vede teplo, ale má horší ionizační vlastnosti než argon, ale má menší měrnou hmotnost než vzduch.[27]

Oxid uhličitý patří mezi aktivní plyny používané při svařování. Jedná se o plyn s dobrou tepelnou vodivostí a horšími ionizačními vlastnostmi. Díky tomu se v dnešní době používá nejčastěji ve směsi: Ar+CO<sub>2</sub>, Ar+O<sub>2</sub> nebo Ar+CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>. Tyto směsi se používají jako aktivní ochranné atmosféry.[27]

### 4.4 Modifikace metod MIG/MAG procesu WAAM

Obecně platí, že pro aditivní výrobu metodou WAAM je třeba vyřešit problémy malé přesnosti a nadměrného množství vneseného tepla do materiálu vyráběné součásti. Akumulované teplo má vliv na kvalitu povrchu, vývoj mikrostruktury a mechanické vlastnosti součásti. Za účelem zlepšení stability procesu, kvality a přesnosti vyráběných dílů se vyvíjí velké množství modifikovaných procesů obloukového svařování využívaných pro metodu WAAM. [20],[29]

#### 4.4.1 Cold metal transfer (CMT)

Metoda CMT je založena na modifikovaném procesu metody MIG při svařování krátkým obloukem. Metoda byla vyvinuta za účelem snížení přívodu tepla do svařence. Od procesu svařování MIG/MAG se liší způsobem uvolňování kapky roztaveného přídavného materiálu. K uvolnění kapky dochází díky střídání dopředného a zpětného posuvu drátu v součinnosti s řízením svařovacího proudu a napětí. Drát (elektroda) se pohybuje směrem dopředu, dokud nedojde ke zkratu. Jakmile dojde ke zkratu, zhasíná elektrický oblouk, drát se začne zatahovat zpět a tím přispívá k uvolnění kapky. Po přerušení zkratu se směr opět obrací a celý proces se opakuje. Zpětný pohyb drátu je zajištěn druhým kladkovým podavačem zabudovaným přímo v hořáku. Součinnost obou podavačů je zajištěna pomocí tzv. vyrovnávacího členu, který zabraňuje „hromadění“ drátu ve chvíli kdy podavače působí pohybově proti sobě. Rychlost a směr pohybu drátu je určován dobou vzniku a přerušení zkratu. Regulace se provádí nastavením průměrné frekvence oscilačního pohybu drátu, která může dosahovat až 70 Hz. Díky tomuto způsobu regulace lze také snadno kontrolovat délku oblouku. CMT umožňuje zkratový proud udržovat na nízké úrovni, což spolu s kontrolovaným přerušením zkratu pomocí zpětného zatažení drátu vede k bez rozstříkovému svařování s velkým poměrem šířky ku výšce svaru. [29][30][31]

Metoda CMT prošla řadou vylepšení, které se liší podle použitého režimu oblouku. Současná generace svařovacích zdrojů umožňuje využívat proces CMT se nazývá CMT Advanced (CMT-ADV), a tento inovovaný proces kombinuje el. oblouk se zápornou a kladnou polaritou. Změna polarit probíhá ve fázi zkratu. Tato modifikace vede k cílenějšímu vnosu tepla, vyššímu odtavnému výkonu a vyšší stabilitě oblouku. Od této inovace se vyvinula modifikace CMT-PADV. CMT-PADV kombinuje cykly CMT se záporným pólováním elektrody a s kladnou polaritou pulzní fáze. Díky pulzní fázi dochází k bezzkratovému přenosu. CMT-PADV se vyznačuje nepatrným vneseným teplem s vysokým odtavným výkonem. [32],[33]

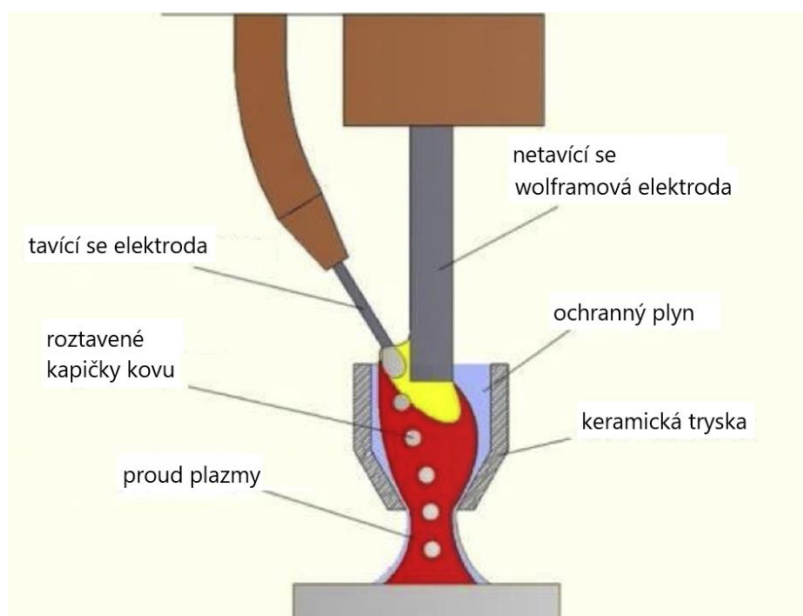
Svařování pomocí CMT se využívá ke svařování tenkých hliníkových plechů, ušlechtilých ocelí, hořčíku a k pájení pozinkovaných plechů pomocí svařovacího drátu slitin mědi nebo bronzu. Dále se využívá ke spojování oceli s hliníkem. V tomto případě se natavuje hliník, který se pájí na ocelový plech.[34],[35]

V dílech vyráběných metodou WAAM se s přibývajícemi vrstvami zvyšuje hodnota akumulovaného tepla. Přebytek tepla vede ke vzniku nežádoucích jevů jako je vysoké

zbytkové napětí, geometrické deformace, nadměrná oxidace a borcení navařených vrstev. Využití procesu CMT je účinný způsob, jak snížit množství vneseného tepla.[34]

#### 4.4.2 Compulsively constricted WAAM

Za účelem snížení vneseného tepla u metody CC-WAAM dochází k nepřímému hoření elektrického oblouku mezi wolframovou netavitelnou elektrodou a drátem přídavného materiálu použitého jako tavitelná elektroda. K hoření dochází v prostoru speciálně upravené zúžené trysky. Plazma spolu s kapičkami roztaveného přídavného materiálu jsou kontinuálně vytlačovány pomocí inertního ochranného plynu. Roztavený kov tak proudí zúženým obloukem regulovanou trajektorií skrz trysku k základnímu materiálu, kde tvoří vrstvu návaru (viz Obrázek 13). Tryska zužuje a tím urychluje průchod plazmatu (vnitřní tlak trysky je vyšší než okolní atmosférický tlak). Jako ochranný plyn se používá čistý argon, který chrání a reguluje pohyb plazmatu a roztaveného kovu. Rozměry jednotlivých vrstev jsou regulovány rychlostí posuvu a svařovacími parametry.[36]



Obrázek 13 metoda CC-WAAM. Upraveno dle [36]

Metoda CC-WAAM se podobá plazmovému svařování (PAW), která se vyvinula z metody TIG. Metoda CC-WAAM se liší průměrem trysky, který se pohybuje okolo 6 mm ve srovnání s menšími tryskami používanými metodou PAW (2 až 4mm). Výhodou metody CC-WAAM je, že vytlačeným plazmatem neprochází téměř žádný proud a nedochází tak k ovlivnění oblouku elektromagnetickými účinky oproti PAW. Keramický materiál trysky zajišťuje dobré izolační vlastnosti přispívající ke stabilnímu průchodu plazmatu. [49]

### 4.4.3 Micro WAAM

Rozlišení dílů vyráběných aditivní metodou WAAM je u metod svařování MIG/MAG z velké části dáno průměrem drátu přídatného materiálu. Obvyklý průměr drátu se pohybuje v rozmezí od 0,8 do 1,4 mm. Nově vyvíjená metoda micro WAAM se zabývá možností zpřesnit výrobu použitím drátů menších průměrů. Metoda využívá drát o průměru 0,25 mm. Pro tento drát je nutné použít upravenou hlavu hořáku s tryskou a podávacím zřízením upravenými pro daný průměr drátu. K vytvoření stabilního elektrického oblouku tak malého rozměru je nutné použít jiný zdroj než u klasických metod MAG/MIG. Zdroj pracuje ve zkratovém režimu s hodnotou napětí do 2,2 V a proudem do 16 A. Aby došlo k úspěšnému navaření nové vrstvy využívá se rychlost podávání drátu až 105 mm/s. Díky malému průměru drátu je rychlost depozice sedmkrát nižší než u klasické metody WAAM. Ve srovnání přesnosti výroby s ostatními aditivními metodami výroby se proces micro WAAM blíží metodě SLM (viz kapitola 2.1.1.), přičemž zvyšuje rychlost depozice. Hlavním cílem vývoje této modifikace je zpřesnění výroby a zachování výhod konvenční metody WAAM.[37]



Obrázek 14 stěna vytvořená metodou micro WAAM. [37]

### 4.4.4 Tandem WAAM (TG-WAAM)

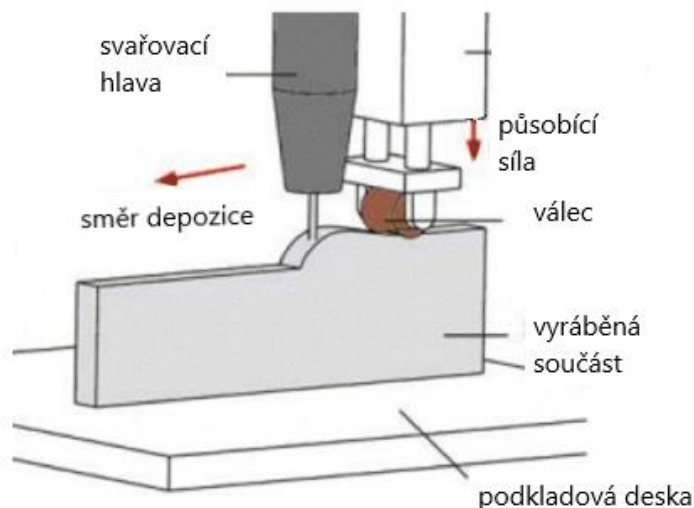
Za účelem zvýšení množství navařeného materiálu v nižším čase vznikla modifikace TG-WAAM, která funguje na principu tandemového svařování. Tandemové svařování je vysokovýkonné svařování dvěma elektrodami metody MIG nebo MAG. Svařovací hlava je složena ze dvou vzájemně izolovaných elektrod. Každá z elektrod je vybavena samostatným podavačem drátu a napájena vlastním zdrojem. Obě elektrody vytváří společnou tavnou lázeň a jsou chráněny ochranným plynem přiváděným do společné hlavy. Samostatné napájení elektrod umožňuje kombinovat různé provozní režimy. Synchronizace obou oblouků podporuje stabilitu procesu. Tandemová sestava poskytuje možnost zdvojnásobit účinnost a výkon navaření oproti tradiční sestavě WAAM s jednou elektrodou. Využití dvou elektrod



znamená zvýšení vneseného tepla, což vede k horší tvarové přesnosti vyráběného dílu. Za účelem zpřesnění výroby se využívá aktivní chlazení pomocí kapalného argonu nebo termoelektrické chlazení. [38],[39]

#### 4.4.5 Hybridní válcování (HDMR)

Vysokotlaké válcování bylo původně navrženo za účelem zlepšení mikrostruktury svarů. Válec působí valivým tlakem podél svaru a vyvolává plastickou deformaci v celém průřezu svaru. Modifikace procesu válcování pro metodu WAAM se provádí pomocí profilovaného mikro válce, který synchronizovaně následuje svařovací hořák a provádí válcování za tepla. Válcování se provádí po nanesení každé vrstvy. Kombinací technologie WAAM a mikro válcování se eliminuje zbytkové napětí a dochází ke zjemnění zrna, zlepšení mechanických a geometrických vlastností vyráběného dílu. Metoda se využívá pro návary slitin hliníku a hořčíku kde válcování nahrazuje tepelné zpracování a dochází ke zlepšení únavových vlastností. [40-44]

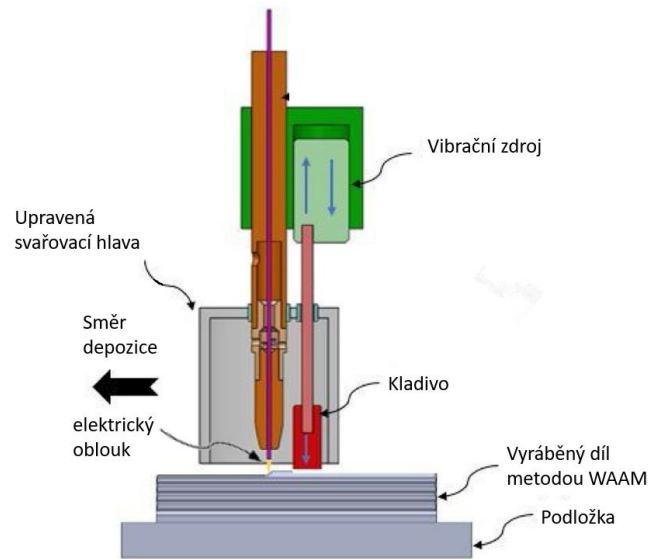


Obrázek 15 Hybridní válcování

#### 4.4.6 Kování v kombinaci s technologií WAAM (HF-WAAM)

Tato metoda je založena na lokálním kování za tepla mezi nanesenými vrstvami. Cílem metody je jako u metody HDMR zjemnění mikrostruktury a zlepšení mechanických vlastností pomocí plastické deformace. Kování probíhá za vysokých teplot bezprostředně po nanesení materiálu. Kovací kladivo poháněné vibračním pohonem je umístěno uvnitř svařovací hlavy. Díky tomu se kladivo pohybuje spolu s hořákem umístěným na robotickém rameni. Kovací síla se pohybuje v rozmezí 17 až 55 N. Výhodou metody je její jednoduché zařazení do procesu WAAM použitím upravené svařovací hlavy. Nevýhodou jsou vznikající vibrace, které je nutné

odstínit. Metoda HF-WAAM má za následek zvýšení meze kluzu, meze pevnosti v tahu a snížení množství vnitřních pórů korozivzdorných ocelí. [45]



Obrázek 16 Svařovací hlava metody HF-WAAM. Upraveno dle [45]

#### 4.4.7 Near-immersion active cooling (NIAC)

Proces je založen na aktivním chlazení vyráběného dílu pomocí chladicí kapaliny. Navařovaná součást je částečně ponořena do chladicí kapaliny, což vede ke zlepšení odvodu tepla. Hladina se udržuje v konstantní vzdálenosti od navařované vrstvy po celou dobu depozice. Tento parametr je definován jako vzdálenost okrajové vrstvy k vodní hladině (LEWD). Tímto způsobem je zajištěno postupné chlazení všech nanesených vrstev a tím výrazně snížena teplota interpass. Regulace hladiny se provádí pomocí hydraulického systému. Parametr LEWD slouží k regulaci intenzity chlazení. Čím je vzdálenost hladiny od okrajové vrstvy menší, tím je odvod tepla účinnější. Účinný odvod tepla touto technikou udržuje nízkou vnitřní teplotu nezávisle na počtu vrstev a výšce vyráběného dílu. Rychlý odvod tepla snižuje šířku a zvětšuje výšku jednotlivých vrstev. Zvyšuje se pravidelnost vrstev a zlepšují se mechanické vlastnosti kovu. Omezení metody spočívá v obtížné manipulaci s nádrží na kapalinu ve víceosých výrobních systémech s pohyblivým pracovním stolem. Geometrie součástí je omezena uložením ve vodorovné poloze. Kvůli možnosti kontaminace chladicí kapaliny vodíkem se metoda využívá převážně pro slitiny hliníku. [46][47]

## 4.5 Materiály používané pro metodu WAAM

Obecně lze použít pro výrobu metodou WAAM kovové materiály, které se dodávají ve formě svařovacího drátu, primárně určené pro metody MAG, MIG a TIG. Mezi používané materiály patří slitiny titanu, korozivzdorné oceli, slitiny niklu, hliník a hořčík a jejich slitiny. Díky rychlosti a nízkým nákladům metody WAAM, která dokáže vyrábět odlehčené díly s minimálním vznikem odpadu, se množství použitelných materiálů stále zvyšuje. Výsledné slitiny mají v některých případech horší mechanické vlastnosti kvůli metalurgickým defektům. K docílení co nejlepších mechanických vlastností se používají různé modifikace obloukových metod svařování. [17][48]

Metodou WAAM lze vyrábět i heterogenní součásti. Za předpokladu přesného monitorování a dodržování výrobního postupu. [19]

### 4.5.1 Titan

Titan a jeho slitiny patří mezi materiály s vysokou pořizovací cenou. Vyznačují se špatnou obrobiteľností a vysokou pevností a teplotou tavení v poměru k měrné hmotnosti. Díky těmto vlastnostem se využívají například v leteckém a kosmickém průmyslu. Rychlost nanášení pomocí metody WAAM se pohybuje v rozsahu 0,75 až 2 kilogramy za hodinu. Výhodou použití metody WAAM je zvýšení odolnosti proti cyklickému namáhání (slitiny Ti-6Al-4V) až o jeden řád oproti výrobě pomocí konvenčních metod. Nevýhodou je horší pevnost v tahu vlivem vzniklých deformací v příčném i normálním směru při výrobě. Při zpracování titanu je nutné dbát na „dokonalou“ ochranu tavné lázně a ohřátých částí před oxidací. Ochrana se nejčastěji provádí použitím ochranné atmosféry tvořenou inertními plyny. [48]

### 4.5.2 Nikl

Díky schopnosti udržet vysokou pevnost při zvýšených teplotách a vysokým pořizovacím nákladům se často využívají k výrobě dílů pomocí AM i niklové slitiny. Díly vyrobené metodou WAAM se vyznačují velkými sloupcovými zrny s dendritickými hranicemi. Mechanické vlastnosti jako je mez kluzu, mez pevnosti v tahu a prodloužení, jsou srovnatelné s díly vyrobenými tvářením nebo litím. [48]

### 4.5.3 Slitiny hliníku

Technologie WAAM se používá pro výrobu dílů velkých rozměrů se stěnami menších tlouštěk. Výroba malých dílů slitin hliníku se z ekonomického hlediska více vyplatí konvenčními způsoby výroby. Mechanické vlastnosti vyrobených metodou WAAM jsou horší ve srovnání

s ostatními technologiemi výroby. Pro získání lepších mechanických vlastností se provádí tepelná zpracování. [48]

#### **4.5.4 Korozivzdorné oceli**

Díly z korozivzdorné oceli vyrobené pomocí technologie WAAM vykazují dobré mechanické vlastnosti. Mikrostruktura navařených součástí obsahuje kombinaci austenitu a feritu. Jejich poměr se dá ovlivnit úpravou rychlosti chladnutí součástí. Po tepelném zpracování díly dosahují vlastnosti srovnatelné s konvenčně vyráběnými díly. [48]

## **5 Srovnání metody WAAM s ostatními AM**

Mezi hlavní výhody metody WAAM patří rychlost depozice jednotlivých vrstev, které je možné nanášet ve velkém objemu oproti ostatním AM. Využití sestavy s robotickým ramenem umožňuje prakticky neomezenou velikost vyráběných dílů. Oproti tomu metody PBF využívající práškové lože jsou omezeny velikostí podkladové desky, na kterou je prášek nanášen. Přídavný materiál ve formě prášku je až desetkrát dražší než přídavný materiál ve formě drátu využívaný technologií WAAM. Nespornou výhodou je také univerzálnost pracoviště, které lze mimo aditivní výrobu použít i k automatizovanému svařování metodami MAG/MIG/TIG. Pořizovací a provozní cena tohoto pracoviště je také mnohonásobně nižší oproti aditivním metodám využívajícím jako zdroj energie laserové nebo elektronové systémy. Jednoduchost automatizovaného pracoviště metody WAAM umožňuje jeho začlenění do obráběcího stroje. Tato hybridní technologie zkracuje čas výrob, zvyšuje využití materiálu a snižuje množství odpadu vzniklého obráběním pomocí jediného stroje.

Aditivní výroba pomocí WAAM přináší však i nevýhody. Díky velkému množství vneseného tepla potřebného k vytvoření návaru se v součásti akumuluje velké množství tepla, které způsobuje nepříznivé mikrostrukturální změny, jako je hrubnutí zrna nebo metalurgické defekty. Změny mikrostruktury mohou vést ke zhoršení mechanických vlastností. Geometrická přesnost a tvarová složitost je omezena možnostmi svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře a je nižší než u ostatních AM. Další nevýhodou je, že vyráběný díl je přivařen k základní kovové podložce, kterou je nutné odříznout. [20],[17],[18]

## **6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Experimentální část bakalářské práce se zabývá vlivem vneseného tepla během navařování na kvalitu návaru. Řada studií [např. 17, 18] prokázala, že při metodě WAAM je vhodné využít varianty snižující množství vneseného tepla do materiálu. Jedním ze způsobů, jak snížit množství tepla, je využití metody CMT (blíže popsané v kapitole 4.4.1). Jak již bylo naznačeno v teoretické části, tato moderní modifikace MAG svařování má řadu variant, které se od sebe odlišují s předpokladem, že se bude lišit i jejich tepelný příkon. BP tedy posuzuje vybrané varianty CMT procesu první generace a základním způsobem hodnotí a porovnává kvalitu vytvořených dílů. Vnesené teplo bylo vyhodnoceno nepřetržitým snímáním teplotního cyklu v průběhu navařování pomocí sady termočlánků.

### **6.1 Popis experimentálního pracoviště**

Experiment proběhl v Laboratoři výuky svářečských technologií na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze. K vytvoření zkoumaných součástí bylo použito robotizované pracoviště pro svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře. Pro zaznamenání teplot bylo robotizované svařovací pracoviště doplněno měřicí ústřednou a procesní parametry byly průběžně monitorovány externím senzorickým systémem Weldmonitor 4.5.

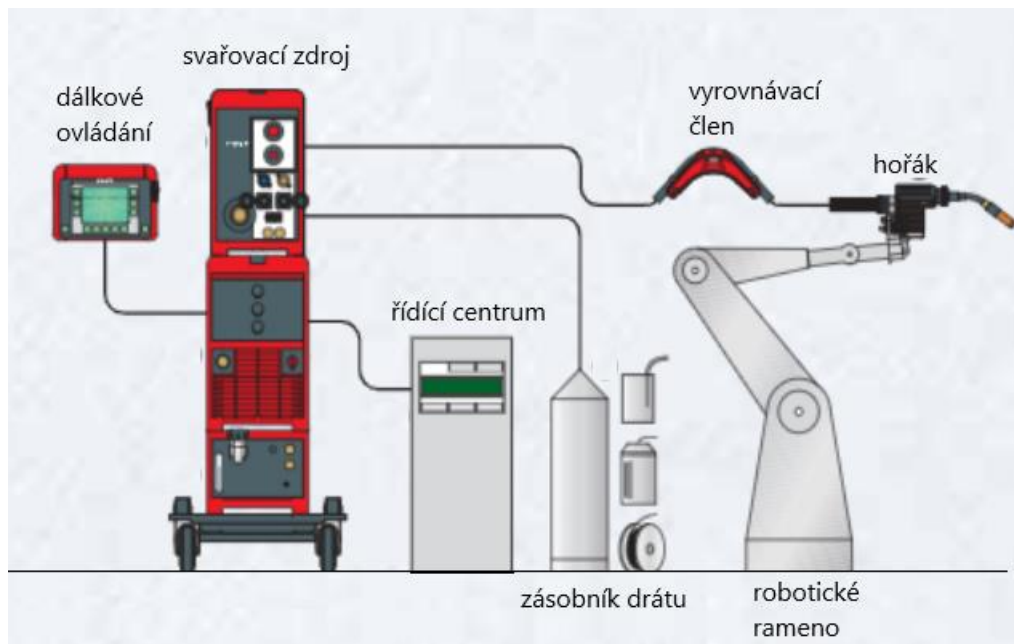


*Obrázek 17 Robotizované svařovací pracoviště*

### **6.1.1 Robotizované pracoviště pro svařování**

Pracoviště se skládá z univerzálního průmyslového 6ti-osého robota Fanuc Arc Mate 100iC, který se vyznačuje vysokou přesností pohybu s opakovatelností 0,08 mm, nosností 10 kilogramů (na konci 6 osy) a dosahem ramene 1420mm. Ovládání pracoviště a komunikaci mezi robotem a svařovacím zdrojem zajišťuje řídicí jednotka R30iA.

Robotické rameno je vybaveno automatickým podavačem drátu Fronius VR 7000 a svařovacím zdrojem Fronius TPS 3200CMT, který je schopen pracovat i v režimu CMT. Svařovací zdroj je možné ovládat pomocí dálkového ovládání RCU 5000i. Robot byl osazen strojním svařovacím hořákem Fronius Robacta drive, vybaveným speciálním push-pull systémem podávání drátu pro proces CMT a na rameni robota byl připevněn vyrovnávací člen pro posuv drátu. Navařování probíhalo na univerzálním jednoosém polohovadle FANUC P250 (s nosností 250 kg), vybaveným upínacím pracovním stolem se stavebnicovým přípravkovacím systémem. Dále je pracoviště vybaveno tlakovou lahví a přívodem ochranného plynu do svařovacího hořáku. Pracoviště je vybaveno bezpečnostními prvky ve formě ochranné klece a světelné závory, zamezující vstupu do pracovního prostoru robota v průběhu svařování. Odvod zplodin je zajištěn centrálním odsávacím systémem.



Obrázek 18 schéma automatizovaného svařovacího pracoviště

### 6.1.2 Měřící pracoviště

Měřící obvod se skládá z šesti termočlánků, které jsou připojeny k univerzální měřicí ústředně Ahlborn Almemo 5690-2. Měřicí ústředna je vybavena 9 primárními kanály a 27 dodatečnými kanály pro připojení snímačů. Dále je vybavena A/D převodníkem zaručujícím přesné měření rychlostí 2,5 až 100 měření za sekundu. Univerzální měřicí ústředna byla připojena k počítači, který průběžně zaznamenával naměřenou teplotu. K svařovacímu zdroji byl napojen ještě druhý počítač, který monitoroval základní procesní parametry svařování pomocí systému Weldmonitor 4.5. Primárně byl snímán svařovací proud a napětí na oblouku (WM-UI). Systém je vybaven také snímačem posuvu drátu (WM-WFS), snímačem rychlosti průtoku a spotřeby plynu, vytvářejícího ochrannou atmosféru (WM-FLOW).



*Obrázek 19 Experimentální měřicí pracoviště se zapojenou měřicí stanicí*

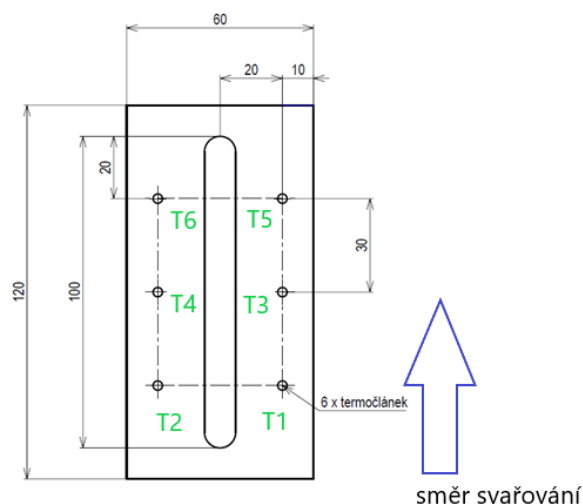
## **6.2 Příprava experimentu**

K měření teploty bylo použito šest chrom-niklových termočlánků typu K s rozsahem:  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $1100^{\circ}\text{C}$ , které bylo nejdříve nutné sestavit přišroubováním konců dvou termočlánekových drátů do společného konektoru na jedné straně a svařením konců na druhé straně. Následně byly termočlánky přivařeny k základové desce pomocí kondenzátorového přivařovacího zařízení BT-2. Termočlánky byly rozmístěny s pravidelnými rozestupy (viz obrázek č.17 a 18). Základové desky (na které byly experimentální vzorky navařeny) byly vyrobeny z konstrukční oceli S275 a byly připevněny k polohovacímu stolu ve vodorovné poloze. Základové desky s rozměry  $120 \times 60 \times 15 \text{ mm}$  byly opatřeny dvěma přivařenými šrouby M8 na spodní desce, pro snadné upnutí do stavebnicového systému UPS.



*Obrázek 20 fotografie rozložení termočlánků*





Obrázek 21 výkres a rozložení termočláneků

Pozn.: T1 -termočlánek č.1, T2 -termočlánek č.2, T3 -termočlánek č.3, T4 – termočlánek č.4, T5 – termočlánek č.5, T6 – termočlánek č.6

Každý vzorek byl vytvořen použitím jiné varianty metody CMT v kombinaci s technologií WAAM. Celkem byly vyrobeny tři díly: metodou CMT, CMT-CC, CMT+P. Pro každou variantu metody svařování bylo nutné odladit a nastavit vhodné svařovací parametry pomocí dálkového ovládání zdroje. Parametry pro jednotlivé varianty CMT byly upraveny po navaření a vizuálním vyhodnocení první vrstvy tak aby byl proces navařování dalších vrstev plynulý a s vyhovující kvalitou návaru (viz tabulka 4).

Tabulka 3 Nastavené svařovací parametry metody CMT/CMT-CC/CMT+P

Režimy navařování	Svařovací proud I [A]	Napětí na oblouku U [V]	Posuv drátu v [m/min]	Rychlost svařování [mm/min]
CMT	131	10,4	3,8	300
CMT-CC	129	11,7	5,3	300
CMT + P	106	15,8	9	300

Svařovací hořák umístěný na robotickém rameni se pohyboval podle programu, který byl stejný pro všechny vytvořené díly (vzorky). Program byl sestavený tak, aby po přiblížení k základové desce na přesně definovaném místě došlo k zapálení elektrického oblouku. Hořák se při depozici pohyboval v přímočarém směru a v přesně definovaném místě došlo k ukončení depozice materiálu zhasnutím oblouku. Následně se robotické rameno vzdálilo od

základové desky a přesunulo do výchozího bodu. Z výchozího bodu rameno zahájilo další cyklus s posuvem o šířku nanesené vrstvy výše. Tímto způsobem byla vytvořena stěna skládající se z dvaceti jednotlivých vrstev dlouhých 100mm.



Obrázek 22 Režim pohybu hořáku

### 6.2.1 Přídavný materiál

Jako přídavný materiál byl použit poměděný drát o průměru 1,2mm s označením G3Si1 dle ČSN EN ISO 14341 určený pro svařování pomocí metod MIG/MAG. Tento přídavný materiál se převážně používá pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných konstrukčních ocelí. Mez kluzu přídavného materiálu je 420 MPa a mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí 500 až 640 MPa. Vyznačuje se chemickým složením uvedeným v tabulce 5. Přídavný materiál G3Si1 lze svařovat v ochranné atmosféře tvořené Ar+CO<sub>2</sub> nebo čistým CO<sub>2</sub>. Monitorovací systém Weldmonitor 4.5 zaznamenal že pro navaření první vrstvy byla spotřeba drátu pro variantu CMT 2,12m, pro variantu CMT CC 1,61m a pro CMT+P byla spotřeba 1,49m.

Tabulka 4 Chemické složení G3Si1 [hm. %]. Upraveno dle [59]

	C	Si	Mn	P	S	Cu
G3Si1	0,088	0,9	1,51	0,012	0,012	0,19

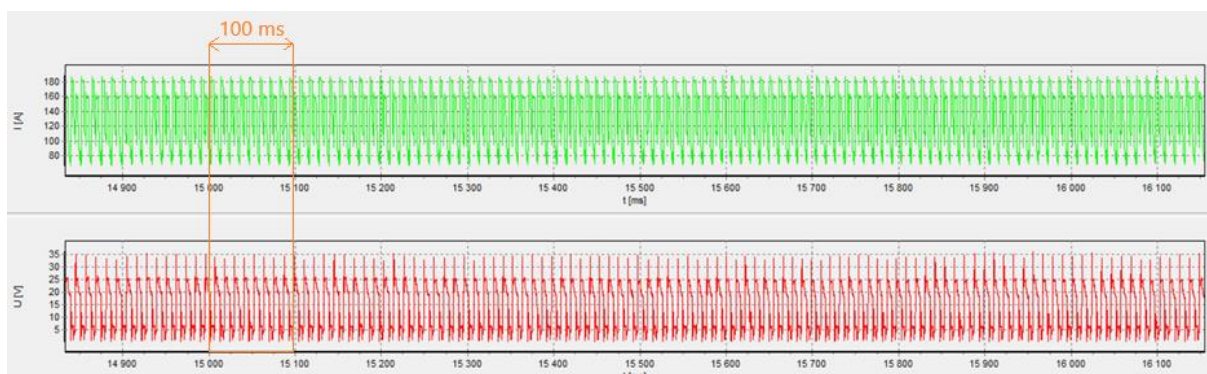
## 6.2.2 Ochranný plyn

Vzhledem k použitému přídavnému materiálu byla zvolena ochranná atmosféra ze skupiny M21 dle EN ISO 14175. Ochranná atmosféra je tvořena směsí argonu (Ar) a oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) v poměru 82:18. Pro vzorek vyrobený variantou CMT byl průtok ochranného plynu hubicí nastaven na 15,2 l/min. Pro CMT CC byl průtok nastaven na hodnotu 11,9 l/min a pro variantu CMT+P byl nastaven nejnižší průtok 11,7 l/min.

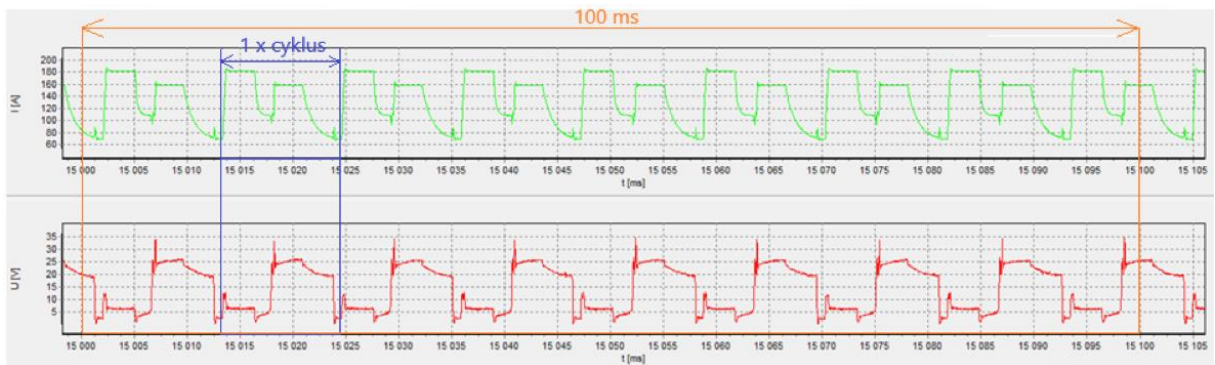
## 6.3 První vzorek - metoda CMT

První vzorek byl vytvořen modifikovanou metodou obloukového svařování CMT (cold metal transfer). Díky regulovanému střídání fáze hoření a zkratu se metoda CMT vyznačuje malým množstvím vneseného tepla. Tato technologie bezroztříkového svařování velmi stabilním obloukem je podrobně popsána v kapitole 4.4.1.

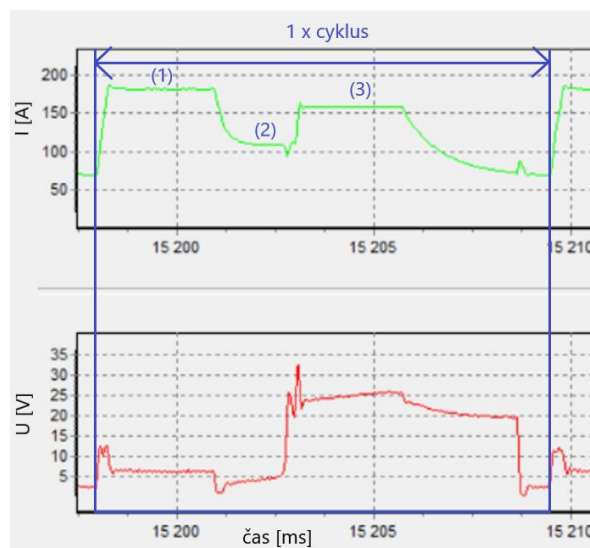
Při experimentu byly hodnoty základních parametrů (svařovací proud I, napětí na oblouku U) zaznamenány pomocí monitorovacího softwaru (weldmonitor). Z uvedených charakteristik je možné ověřit a přesně určit velikost, délku a počet jednotlivých fází. Z detailu charakteristiky průběhu svařovacího proudu v závislosti na čase (viz obrázek č.22) vyplývá, že fáze zkratu trvá pouze okolo 1,2 ms, napětí se drží na hodnotě 5 V po dobu 2,7ms a poté stoupá na pracovní hodnotu, která se pohybuje v rozmezí od 20 do 26 V. V tomto okamžiku dosahuje svařovací proud hodnoty až 155 A. Pracovní část cyklu trvá 2,7 ms. Jeden cyklus, při kterém dojde k oddělení kapky kovu trvá 11,25 ms. Tento cyklus se opakuje bez přerušení po celou dobu navařování.



Obrázek 23 Průběh svařovacího proudu při svařování CMT vzorku č.1



Obrázek 24 Detail průběhu svařovacího proudu při CMT svařování



Obrázek 25 Přiblížení průběhu proudu a napětí svařování metodou CMT

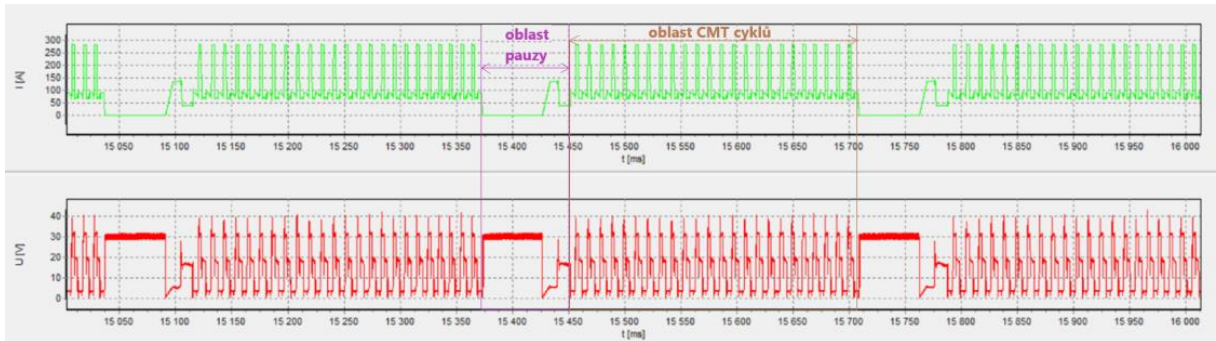
Pozn.: (1) fáze proudového peaku, (2) fáze tzv. background proudu, (3) fáze zkratu

## 6.4 Druhý vzorek metoda CMT – cc (cycle step)

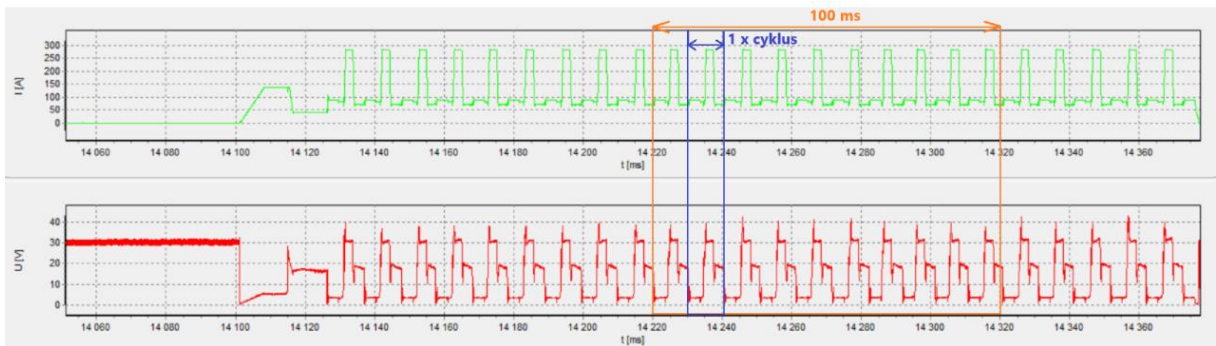
Druhý vzorek byl vytvořen metodou CMT cycle step. Jedná se o zdokonalenou modifikaci procesu CMT, ve které je svařovací cyklus přerušováno pauzou. Pomocí cycle step je možné ovládat dobu jednotlivých fází cyklu. Díky tomu je možné přesně nastavit a opakovat množství navařeného materiálu v jednotlivých bodech. Přerušování fáze svařování pauzou má za následek ještě větší snížení vneseného tepla do materiálu. Mimo aditivní výrobu se tento proces používá zejména pro svařování velmi tenkých plechů nebo v automobilovém průmyslu pro tvorbu pohledových svarů. [57]

Na první pohled je v průběhu svařovacího proudu v závislosti na čase svařování (viz obrázek č.26) patrná pauza mezi navařovacími cykly, která trvá přibližně 70 ms. Úsek oddělený pauzou, ve kterém se opakují svařovací/navarovací cykly CMT trvá 280ms. Z detailního

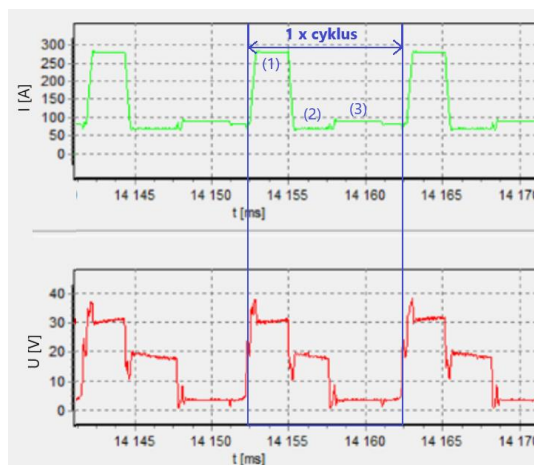
průběhu lze vyzorovat, že při dosažení oblasti peaku trvající 2ms se proud pohybuje okolo 270A a napětí je na hodnotě 32V. Když dosáhne přídavný materiál svarové lázně, oblouk zhasne a svařovací proud postupně klesá až na hodnotu okolo 75A. Ve fázi zkratu je opět udržován nízký proud.



Obrázek 26 Průběh svařovacího proudu při svařování CMT CC vzorku č.2



Obrázek 27 Detail průběhu proudu CMT CC

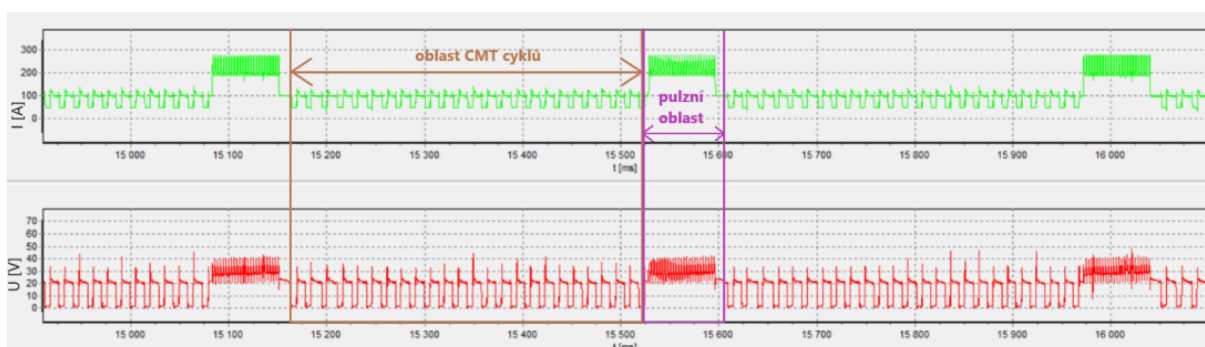


Obrázek 28 Přibližný detail jednoho cyklu průběhu proudu svařování CMT CC. Pozn.: (1) fáze proudového peaku, (2) fáze background proudu, (3) fáze zkratu

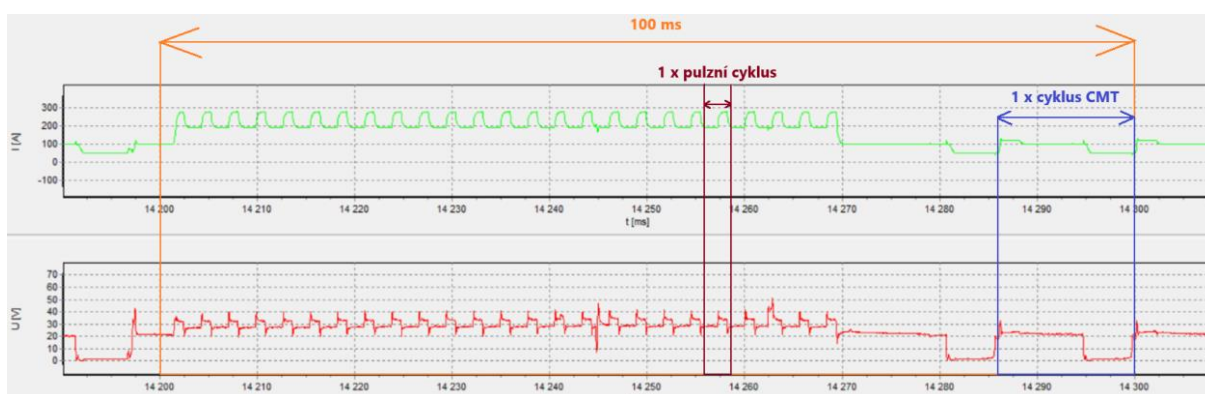
## 6.5 Třetí vzorek – metoda CMT- P (pulse)

Poslední vzorek byl vyroben metodou CMT pulse. Jedná se o kombinaci, ve které se střídají pulzní cykly s cykly CMT. Oproti ostatním použitým variantám procesu, CMT v kombinaci s pulzním obloukem, vyznačuje zvýšeným výkonem navařování za cenu vyššího tepelného zatížení. Nastavitelné střídání pulzů s cykly CMT umožňuje přesně regulovat tepelný příkon, závar a geometrii svaru. [58]

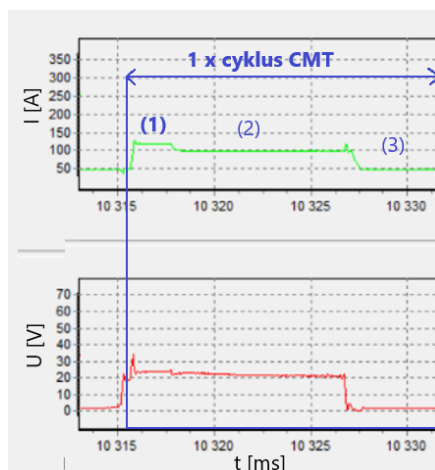
Pulzní proces je znázorněn na obrázku č.29. Z průběhu napětí na oblouku a svařovacího proudu (v závislosti na čase) je patrné, že při použitém nastavení navařování probíhalo v pulzním režimu po dobu 68 ms, poté se proces automaticky přepnul na režim CMT, ve kterém se opakovaly cykly po dobu 387ms. Tímto způsobem se střídaly režimy po celou dobu navařování. V pulzním režimu se pohybuje proud v rozmezí od 190 do 285 A, napětí v rozmezí 29 až 40 V. V režimu CMT se proud pohybuje v rozmezí 50 až 125 A při napětí od 2 do 32 V.



Obrázek 29 Průběh svařovacího proudu při svařování CMT-P vzorku č.3



Obrázek 30 Detail průběhu proudu svařování CMT - P



Obrázek 31 Přibližný detail jednoho cyklu průběhu proudu svařování CMT P. Pozn.: (1) fáze proudového peaku, (2) ustálená horní hodnota proudu CMT cyklu, (3) spodní hodnota

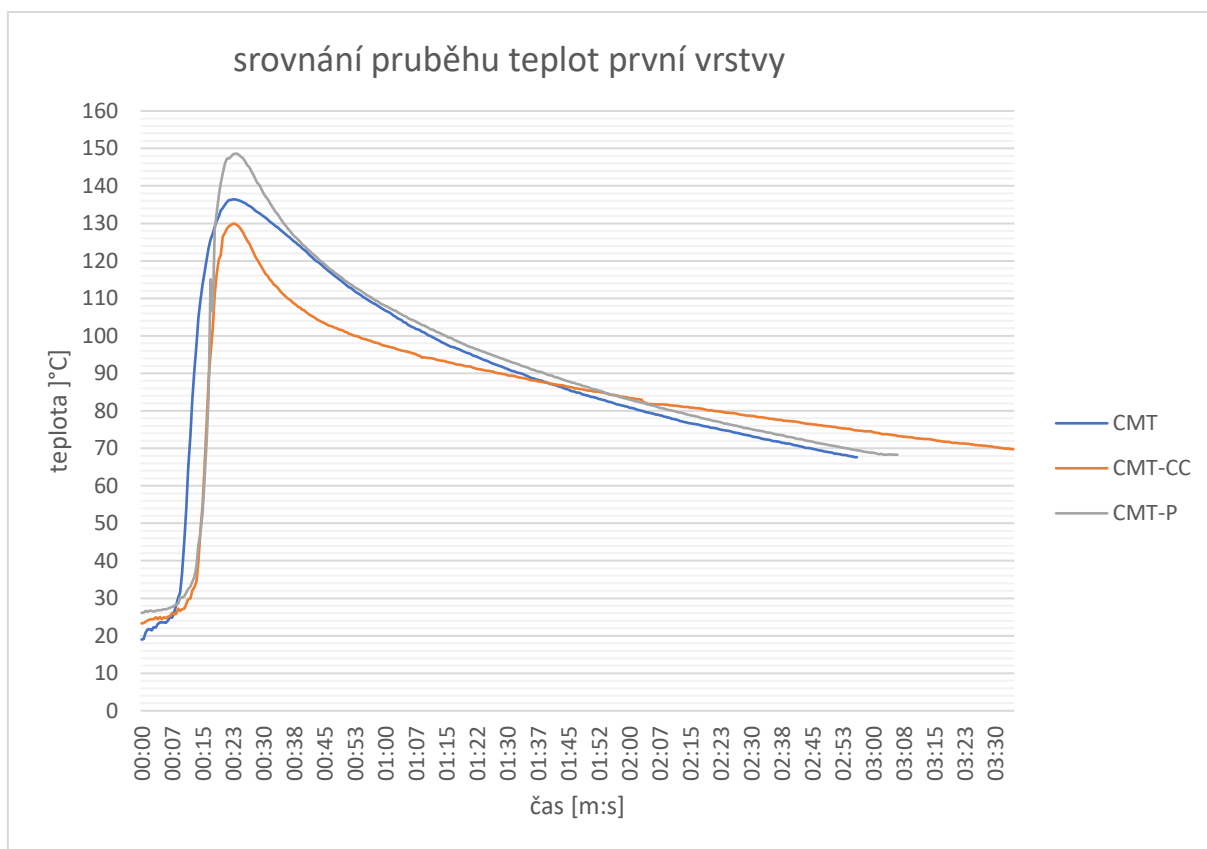
## 6.6 Vyhodnocení měřených teplot

Měření všech vzorků začíná při teplotě odpovídající teplotě v laboratoři (pokojová teplota). Po nanesení první vrstvy je aditivní výroba pozastavena po dobu chladnutí vzorku na hodnotu alespoň 90 °C, aby bylo metody možné porovnat. Ostatní intervaly mezi jednotlivými návary, po které byl program zastavován jsou u všech vzorků nahodilé. Vzhledem k, rekonstrukci laboratoří ÚST, která probíhala od 10/2021 do 05/2022, byl experiment spojen z kapacitních důvodů s dalšími měřeními experimentů kolegů, která se prováděla na stejném vzorku mezi jednotlivými návary, a proto se doba chladnutím mezi jednotlivými vrstvami liší. Mezi sebou se tak porovnávaly místo celých průběhů pouze teploty prvních vrstev jednotlivých vzorků, které měly stejné počáteční podmínky (viz kapitola 6.6.1).

### 6.6.1 Porovnání tepelných průběhů

Graf na obrázku 32 porovnává průběh teplot, které jsou vneseny do podkladové desky pomocí technologií CMT/CMT-CC/CMT-P. Před zahájením navařování první vrstvy měla ve všech případech podkladová deska teplotu odpovídající teplotě v laboratoři, která se liší v jednotkách stupňů, a proto je možné technologie porovnat mezi sebou. Teplota vystoupala na maximální hodnotu při procesu navařování první housenky, který trval dvacet vteřin. Podle měření vnáší nejvíce tepla metoda CMT-P, u které vystoupala teplota v místě termočlánku na nejvyšší hodnotu 148°C. Pokles teploty byl ale strmější než u „klasické“ metody CMT. Maximální teplota „klasické“ metody CMT byla naměřena 136 °C. Nejlepší výsledek s nejmenším množstvím vneseného tepla vykazuje metoda CMT-CC s maximální naměřenou teplotou 130°C. Z grafu je možné vypočítat rozdílnou rychlost ochlazování, kde k ochlazení

na hodnotu 90 °C dochází nejrychleji při použití varianty CMT-CC. Pokles teploty je zároveň nejprudší. Rychlost chladnutí závisí na kombinaci faktorů: počáteční teplotě, variantě metody, množství navařeného kovu.



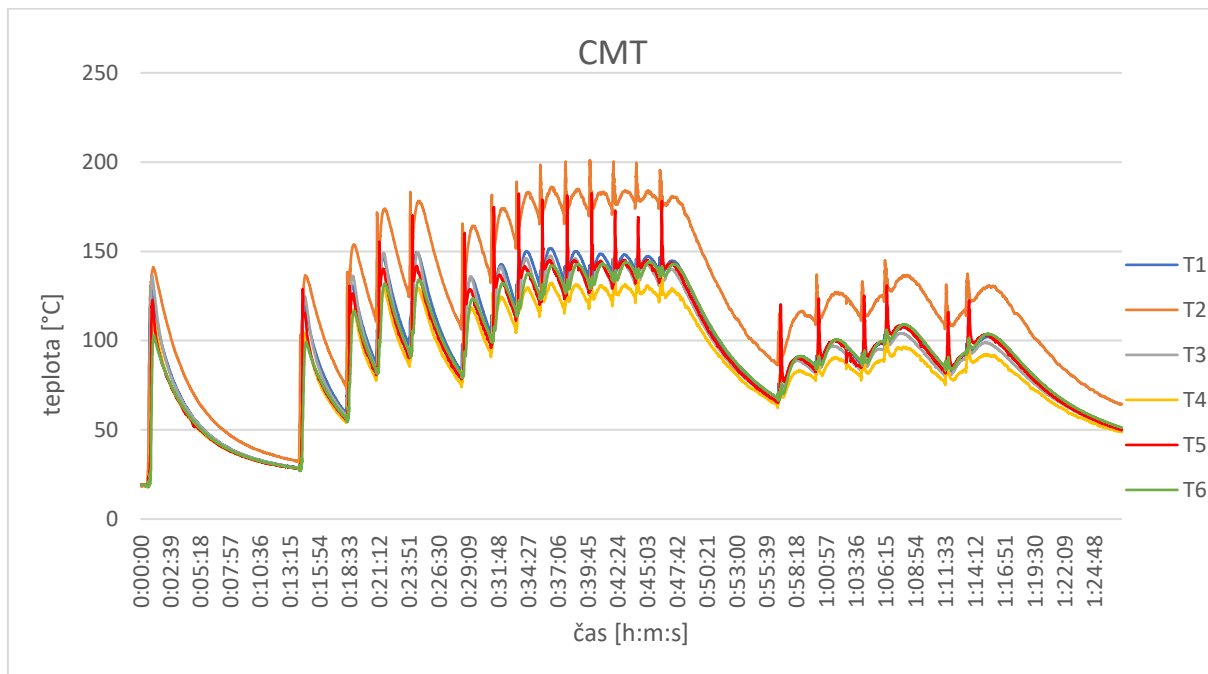
Obrázek 32 srovnání teplotních cyklů první vrstvy návarů u metod CMT, CMT-CC, CMT-P

## 6.6.2 Vzorek vyrobený pomocí CMT

Navařování prvního vzorku pomocí CMT trvalo hodinu a dvacet minut. Během této doby bylo navařeno postupně dvacet svarových housenek. Po navaření každé vrstvy byl program zastaven (na odlišně dlouhou dobu, během které docházelo k chladnutí návaru a jeho okolí.) Proto je možné na záznamu pozorovat „hromadění a chladnutí vneseného tepla“ v závislosti na délce pauzy mezi navařováním jednotlivých vrstev (viz obrázek 29). Z grafu je patrné, že k největšímu jednorázovému nárůstu vneseného tepla došlo při tvorbě prvního návaru, kdy se teplota ve snímaných bodech zvýšila během 27 vteřin o 121,8 °C. Na tento jev má velký vliv fakt, že je první vrstva nejbliž rozmístěným termočládkům. Nejvyšší naměřená teplota v materiálu 186 °C byla zaznamenána po navaření devátého návaru pomocí termočládku T2, jehož průběh je od ostatních termočládků „posunutý“. Ostatní termočládky se pohybují okolo maximální teploty 150°C. Přestože bylo dalších pět návarů nanášeno



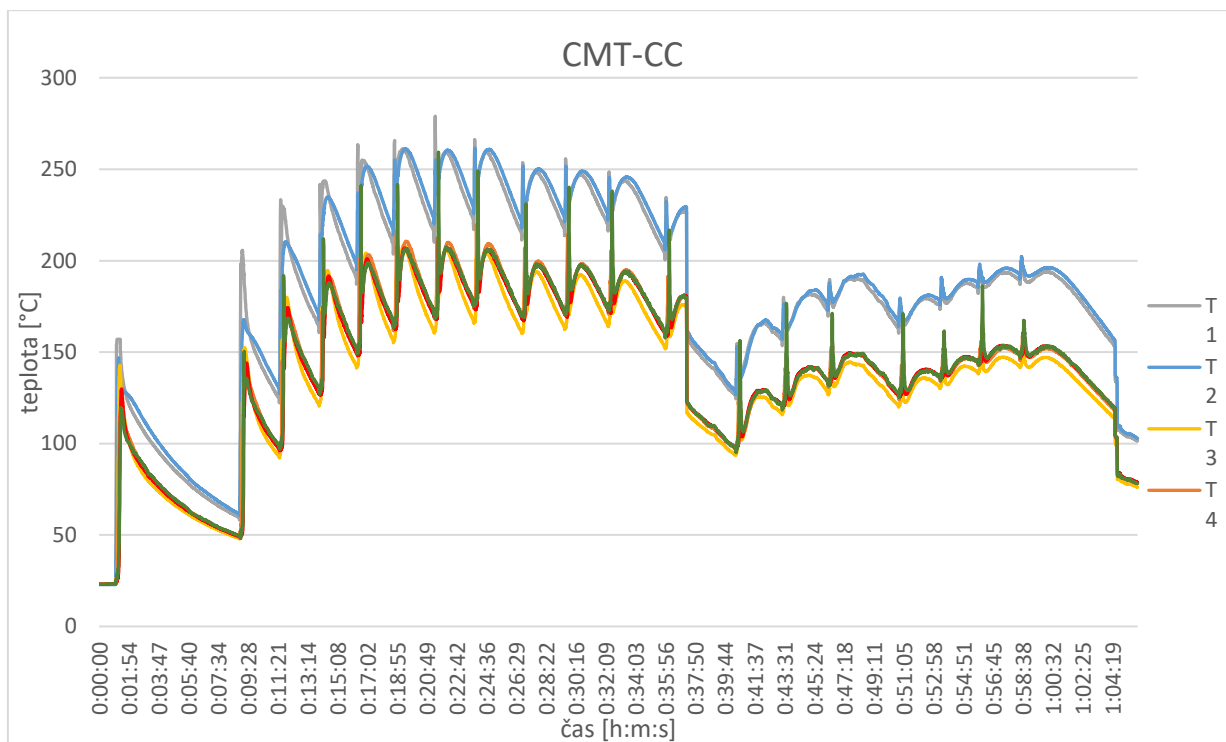
v rychlém sledu, k dalšímu nárůstu maximální naměřené teploty nedošlo díky zvětšující se vzdálenosti nanášených vrstev od termočlánků. Před pozvolnými nárůsty teploty, způsobenými teplem postupujícím materiálem jsou patrné strmé nárůsty a poklesy teploty, které jsou způsobeny hořením elektrického oblouku v blízkosti termočlánku při navařování.



Obrázek 33 Průběh teplotního cyklu vzorku č.1 - CMT

### 6.6.3 Vzorek vyrobený pomocí CMT-CC

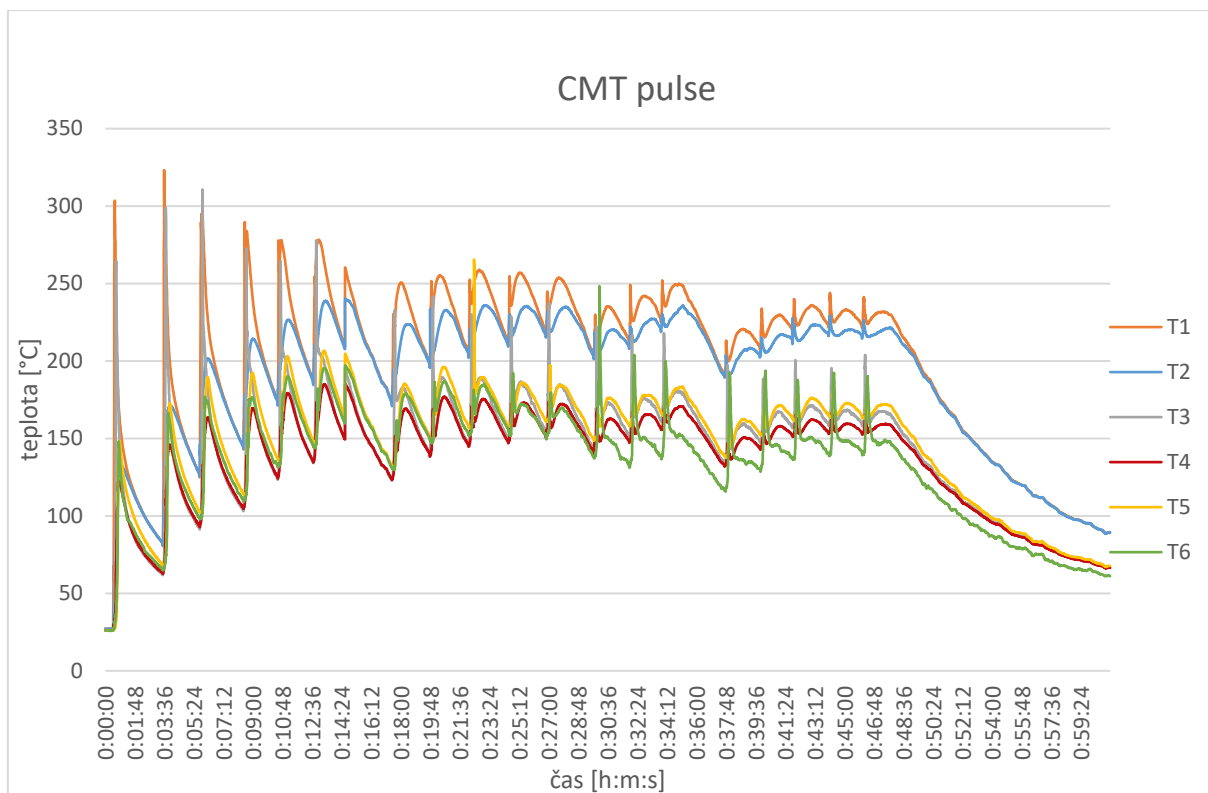
Výroba dílu složeného z dvaceti návarů trvala metodou CMT-CC přibližně hodinu a deset minut. Interval chladnutí mimo první vrstvu se mezi navařováním jednotlivých vrstev pohyboval v průměru okolo dvou minut. Stejně jako u metody CMT největší nárůst teploty probíhal ve spodních svarových vrstvách, které jsou nejbliž k rozmístěným termočlánkům. K nejvyšší zaznamenané teplotě došlo během navařování sedmé vrstvy, kde byla naměřena teplota 260,7 °C Stejně jako u metody CMT nejvyšší teplotu zaznamenali termočlánky umístěné v první třetině vzorku (viz obrázek 21). Ostatní termočlánky se pohybovaly v teplotách o 50°C nižší. Přesto že zůstal interval pauzy mezi navařováním podobný, k dalšímu zvýšení maximální vnesené teploty v místě senzorů nedošlo. Během měření došlo k výpadku snímání teploty vlivem poruchy měřícího přístroje. Porucha byla relativně brzy odhalena a neměla velký vliv na celkový záznam průběhu teploty (viz obrázek 34).



Obrázek 34 Průběh teplotního cyklu u vzorku č.2- navařování metodou CMT-CC

#### 6.6.4 Vzorek vyrobený pomocí CMT-P

Navaření stěny trvalo metodou CMT pulse 46 minut. Doba chladnutí mezi jednotlivými návarů byla průměrně dvě minuty. Z grafu na obrázku č.35, pro metodu CMT pulse je patrné, že po nanesení prvních čtyř vrstev návarů se hodnota maximální teploty dále nezvyšovala, ale udržovala se na ustálené úrovni při krátkém čase chladnutí mezi nanášením jednotlivých vrstev. Díky pulzním cyklům jsou v prvních pěti vrstvách patrné výrazné strmé nárůsty a poklesy teploty zkreslující naměřenou teplotu, způsobené hořením oblouku v blízkosti senzoru, proto tyto výkyvy nejsou relevantní. Maximální teplotu opět zaznamenal senzor T1 a to 254°C. Teploty, zaznamenané senzory umístěnými ve zbylých dvou třetinách vzorku, jsou přibližně o 70°C nižší.



Obrázek 35 průběh teplotního cyklu u vzorku č.3- metoda CMT pulse

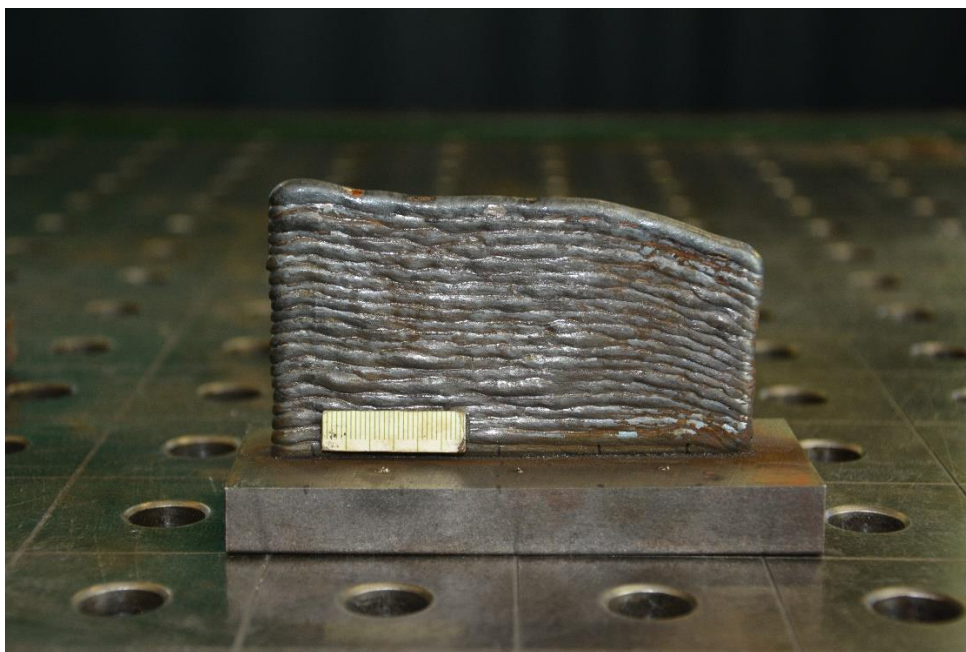
## 6.7 Vyhodnocení geometrického tvaru návaru

Geometrie součástí se obvykle vyhodnocuje z parametrů účinné tloušťky stěny (Effectivity wall thickness EWT) a vlnitosti (surface waviness SW). Tyto parametry jsou ovlivněny nastavenými parametry procesu jako je: rychlost podávání drátu, průměr drátu a rychlost navařování. Jedná se o destruktivní způsob vyhodnocení, jelikož se provádí v kolmém řezu stěny. V případě vytvořených vzorků variantami CMT bylo vyhodnocení zjednodušeno a rozměry nebyly měřeny v příčném řezu na výbruse, ale na vytvořeném vzorku tak, aby nebylo nutné vzorky poškodit (jako tloušťka a výška vzorku).

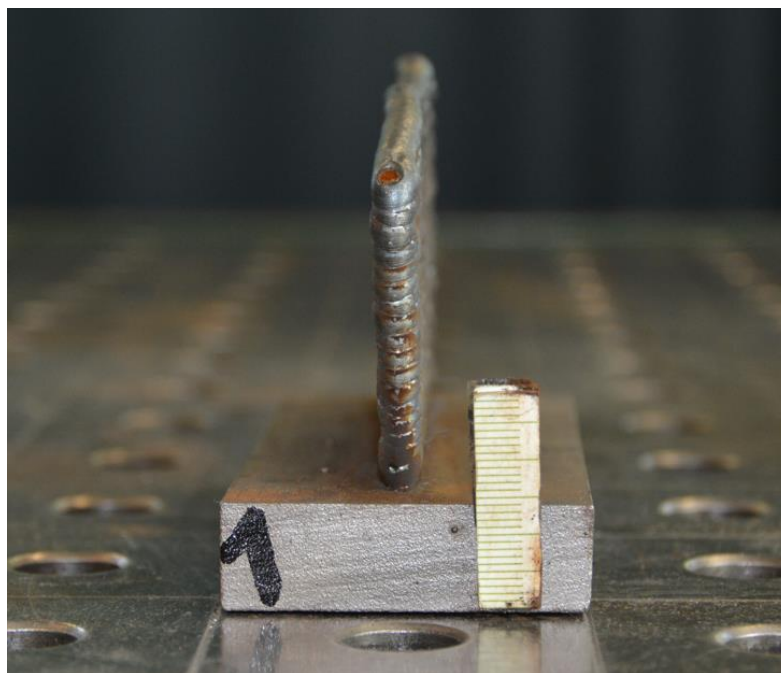
Vyrobené vzorky byly vytvořeny „přirozeným způsobem“ bez uprav napomáhajících k rovnoměrné geometrii součástí, aby bylo možné pozorovat vliv teplotního ovlivnění na kvalitu návaru.

### 6.7.1 Vzorek č.1 - metoda CMT

Na součásti navařené pomocí CMT je patrná snižující se výška navřené stěny, která v nejvyšším bodě dosáhla hodnoty 59 mm. Výška se snižuje zejména v poslední třetině součásti. Díky tomuto poklesu výšky se zmenšuje efektivní výška návaru na hodnotu 48 mm. Dále je patrné mírné „roztékání“ jednotlivých vrstev (viz obrázek 36). Šířka součásti se výrazněji mění především na začátku a konci navařené stěny. Nejširší hodnota byla naměřena 7,3mm a v nejužším místě byla šířka 6 mm.



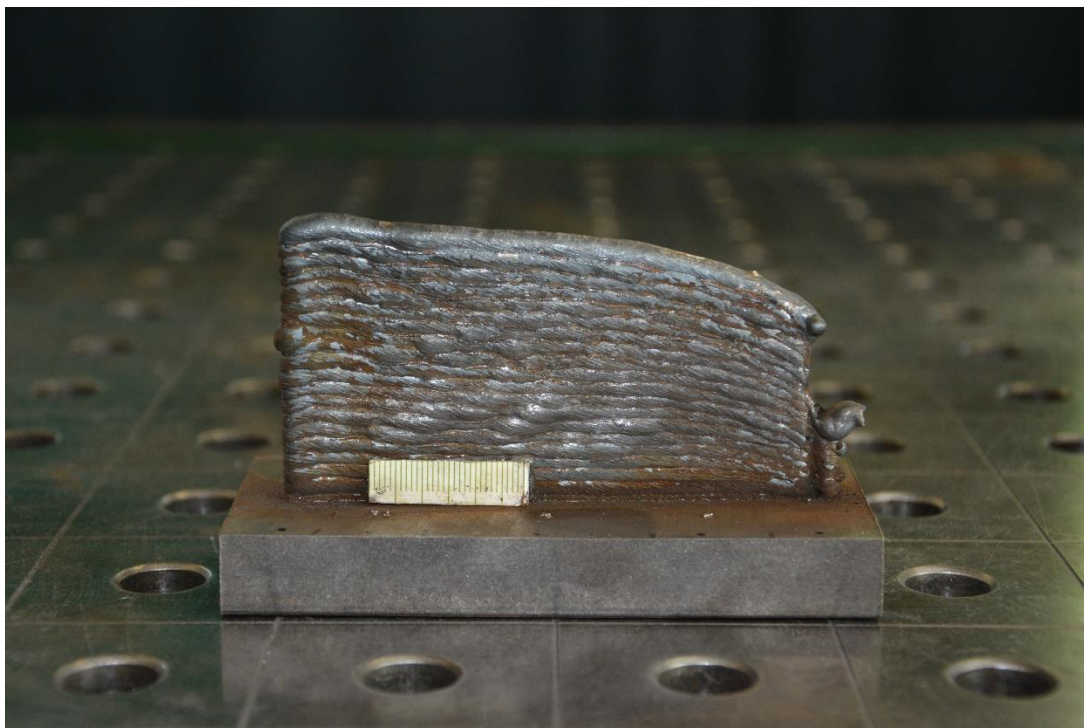
Obrázek 36 součást vyrobená pomocí CMT



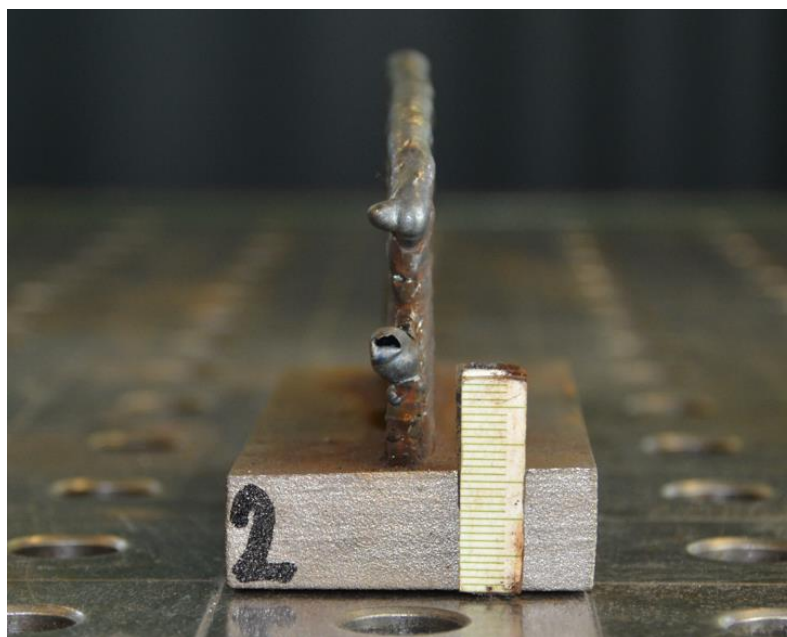
Obrázek 37 Profil vzorku vyrobeného pomocí CMT

### 6.7.2 Vzorek č.2 - metoda CMT-CC

Na vzorku vyrobeném metodou CMT-CC dochází opět ke zmenšování výšky navařené stěny. V pravé části stěny došlo k jejímu roztavení a zhroucení během svařování. Došlo také k výraznějšímu roztékání do stran, proto se šířka součásti pohybuje v rozmezí od 6,5 mm do 8 mm. Maximální výška stěny je 55 mm. Použití procesu CMT-CC způsobilo také větší znečištění jednotlivých vrstev.



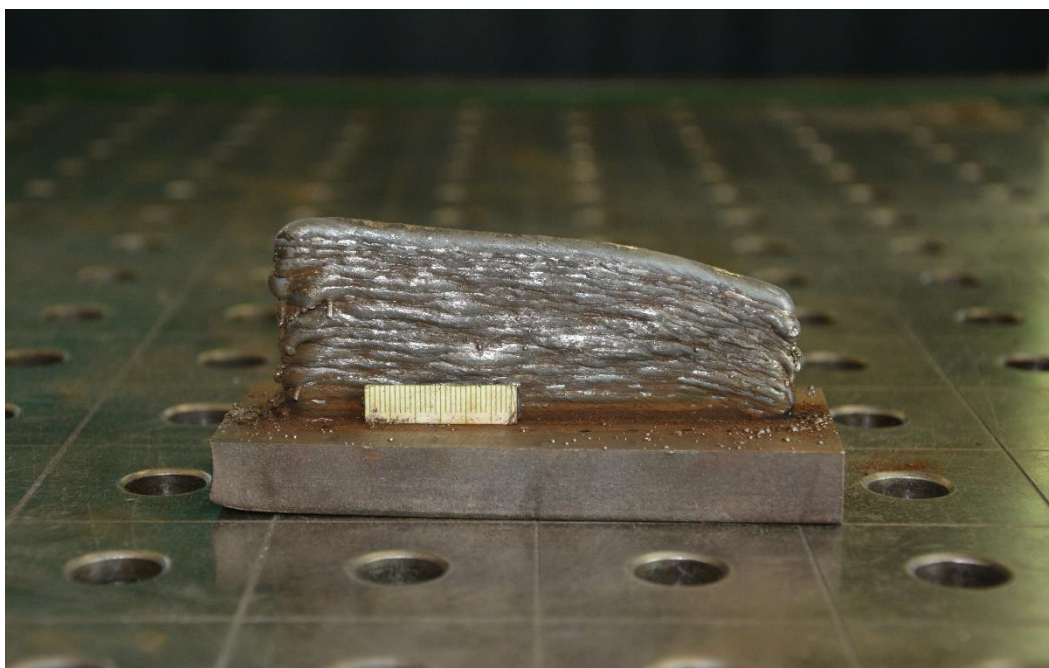
*Obrázek 38 vzorek č.2 vyrobený pomocí CMT-CC*



*Obrázek 39 Profil vzorku vyrobeného metodou CMT-CC*

### 6.7.3 Vzorek č. 3 - metoda CMT-P

Povrch součásti vyrobené metodou CMT-P je nejméně rovnoměrný a kvalitní. Na povrchu jsou vidět velké kapky vzniklé roztékáním jednotlivých návarů do stran. Vady vznikly v důsledku nedostatečného času chladnutí mezi jednotlivými vrstvami. Šířka se mění od 7,4 mm do 8 mm v průběhu celé délky součásti. Jako u obou předchozích vzorků i zde dochází ke snižování výšky stěny na konci návaru. Výška na začátku stěny je 42 mm a na konci 28 mm.



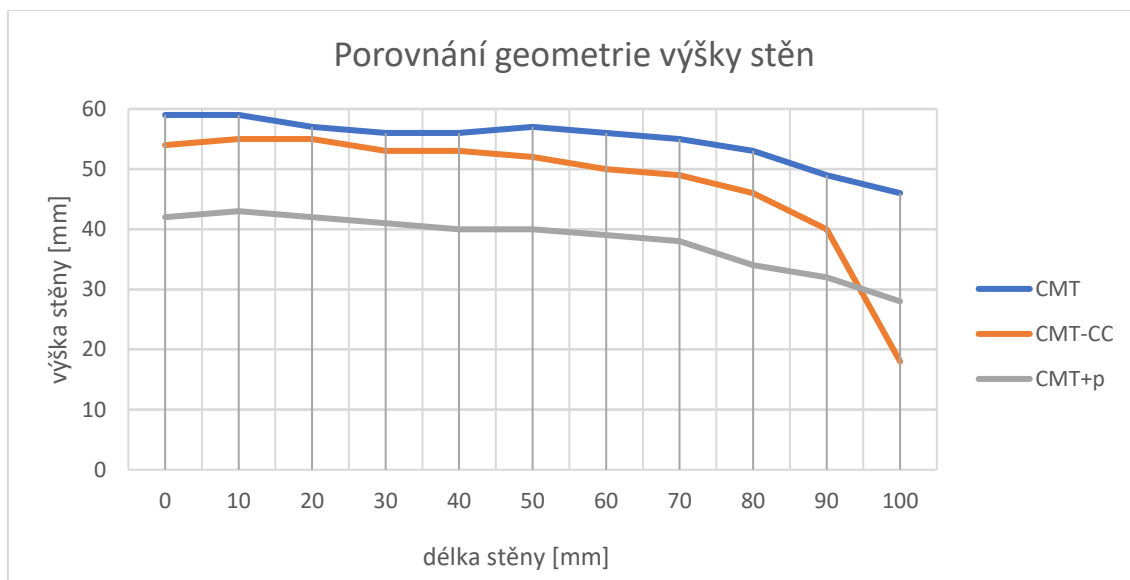
Obrázek 40 vzorek vyrobený metodou CMT-p



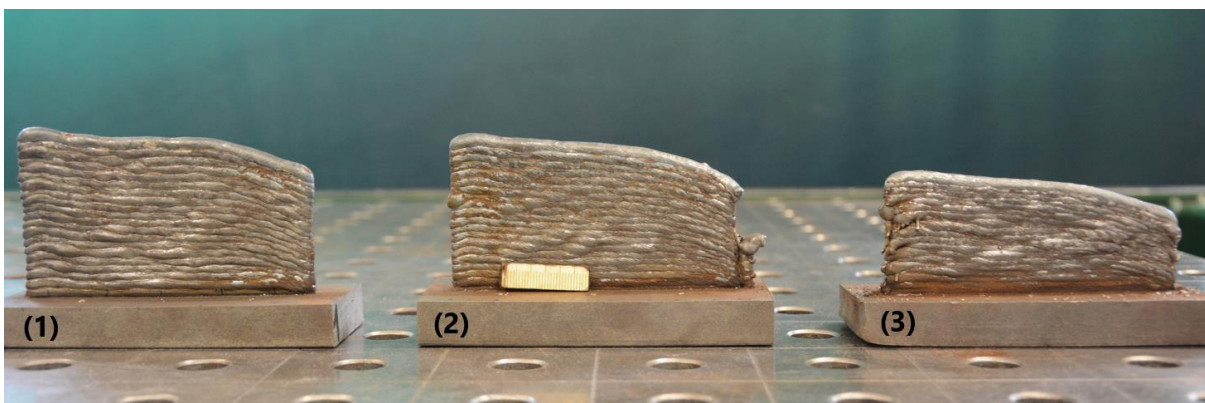
Obrázek 41 Profil vzorku vyrobeného metodou CMT-P

#### 6.7.4 Srovnání tvaru vzorků

Obrázek 42 graficky porovnává tvar a výšku navařených stěn v jednotlivých bodech vzorků, vyrobených pomocí technologií CMT, CMT-CC, CMT-P. Z grafu je patrné, že nejmenší stálost výšky navařené stěny vykazuje díl vyrobený metodou CMT-CC, kde došlo 10 mm od konce k jejímu zhroucení.



Obrázek 42 Stálost výšky stěny

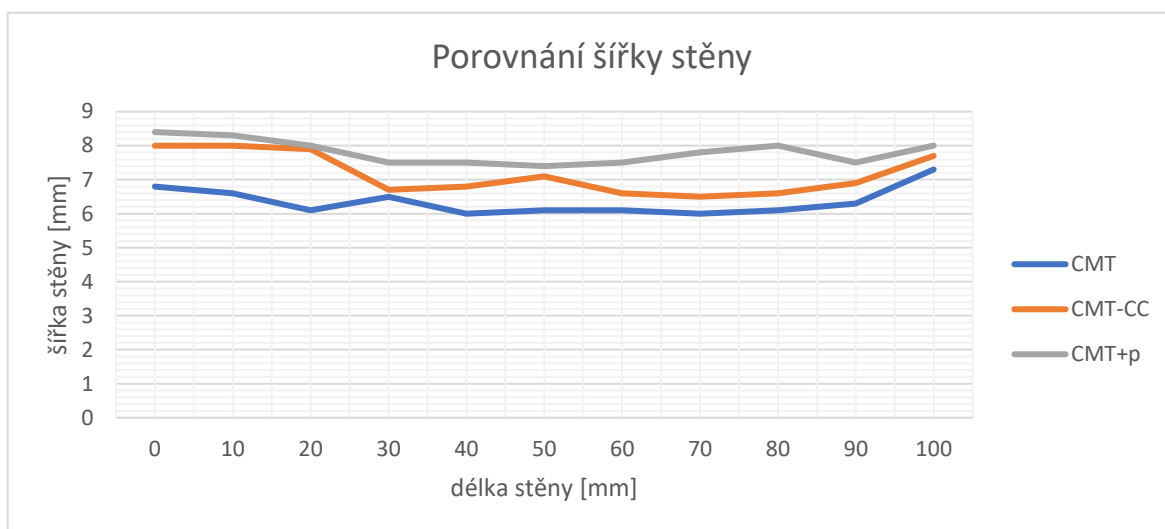


Obrázek 43 Srovnání výšky navařených vzorků

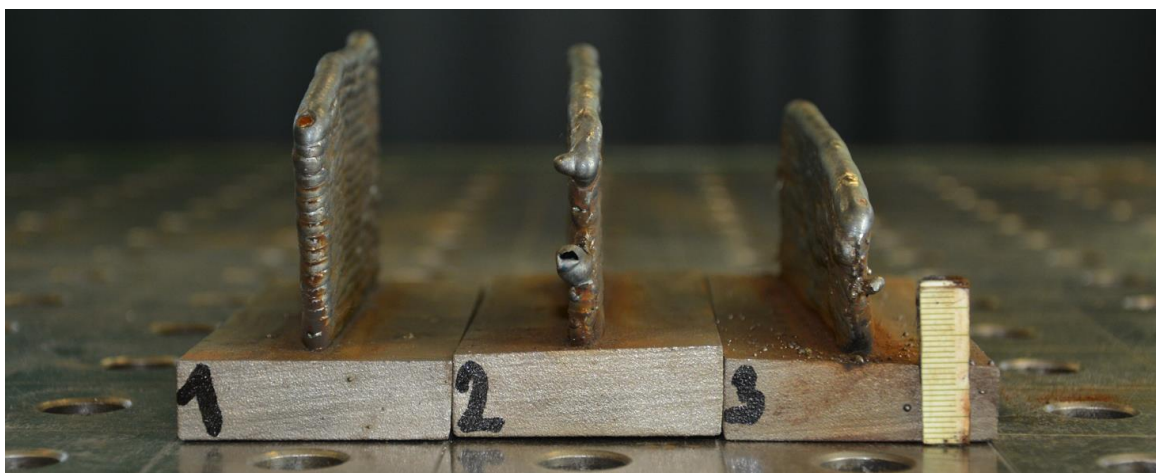
Pozn.: (1) CMT, (2) CMT-CC, (3) CMT-P

Z grafu porovnávajícího šířku stěn v jednotlivých bodech stěny je patrné, že všechny použité varianty metody CMT mění šířku především na začátku a na konci nanesené vrstvy (viz Obrázek č. 44). U varianty CMT je rozdíl naměřených šířek 1,2 mm, rozdíl naměřených šířek vzorku vyrobeného variantou CMT-CC je 1,5 mm v průběhu celé součásti. Nejmenší rozdíl naměřených šířek 1mm má vzorek vytvořený Variantou CMT-P a zároveň je jeho šířka

největší. To je způsobeno velkým „roztékání“ vrstev do stran.



*Obrázek 44 Srovnání stálosti šířky*



*Obrázek 45 Srovnání šířky navařených vzorků*

*Pozn.: (1) CMT, (2) CMT-CC, (3) CMT-P*



## 7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se věnuje měření teplotních průběhů během navařování variantami CMT, CMT-CC, CMT-P procesu metody WAAM. Teplotní průběhy celého procesu navařování zobrazují vliv rozdílných intervalů chladnutí na velikost teploty uvnitř vzorků. Díky tomu je možné posoudit vliv zvolené varianty procesu CMT metody WAAM na kvalitu návaru.

Byly mezi sebou porovnány teploty prvních vrstev jednotlivých vzorků, které měly stejné počáteční podmínky. Toto srovnání potvrdilo předpoklad, že nová varianta metody CMT, tzn. varianta CMT-CC umožňuje nižší tepelné zatížení.

I přes výpadky měření teploty při snímání teplotního průběhu varianty CMT-CC (způsobené poruchou měřicí ústředny Almemo) je možné pozorovat horší kvalitu návarů všech vzorků při nedodržení, nebo nahodile zvolené teplotě interpass. Experiment prokázal oproti „klasické variantě“ CMT dokonce zhoršení kvality návarů vyrobených pomocí novější generace variant CMT-CC a CMT+P, které za normálních okolností přispívají ke zlepšení kvality. U vzorku vyrobeném metodou CMT-CC došlo ke zhroucení stěny v poslední třetině vzorku. Vzorek vyrobený variantou CMT+P se vyznačuje špatnou kvalitou povrchu v důsledku „roztékání jednotlivých vrstev“. Přestože vzorek vyrobený „klasickou“ variantou CMT vyšel ze srovnání geometrie návaru nejlépe, prokazuje podobné kolísání výšky a šířky jako ostatních varianty, ani jeho geometrie tak není optimální. Výsledkem je tedy informace, že je potřeba ke každému procesu přistupovat individuálně a dodržovat přesně stanovené teplotní režimy, závislé zejména na parametrech procesu, ale i na velikosti navařeného vzorku a typu materiálu.

V dalších experimentech by bylo vhodné vytvořit vzorky stejnou metodou variantami procesu CMT při dodržení předepsaných časů chladnutí mezi vrstvami a ověřit předpoklad zlepšení kvality návarů dodržením teplotních režimů.

## 8 Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] BADIRU, A., V. VALENCIA a D. LIU. *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry*. 3rd. Dayton Ohio: CRC Press, 2017. ISBN 9781482264098.
- [2] KRUTH, J. P., L. FROYEN, J. VAN VAERENBERGH, P. MERCELIS, M. ROMBOUTS a B. LAUWERS. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, 149(1-3), 616-622 [cit. 2022-07-28]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051
- [3] MURR, L. E., S. M. GAYTAN, D. A. RAMIREZ, et al. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2012, 28(1), 1-14 [cit. 2022-07-28]. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/S1005-0302(12)60016-4
- [4] KÖRNER, C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. *International Materials Reviews* [online]. 2016, 61(5), 361-377 [cit. 2022-07-28]. ISSN 0950-6608. Dostupné z: doi:10.1080/09506608.2016.1176289
- [5] ZÄH, M. a S. LUTZMANN. Modelling and simulation of electron beam melting. *Production Engineering* [online]. 2010, 2010, 2010(4), 15-23 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s11740-009-0197-6
- [6] MURR, L. E., S. M. GAYTAN, D. A. RAMIREZ, et al. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2012, 28(1), 1-14 [cit. 2022-07-28]. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/S1005-0302(12)60016-4
- [7] MOSTAFAEI, A., E. L. STEVENS, J. J. FERENEC, D. E. SCHMIDT a M. CHMIELUS. Binder jetting of a complex-shaped metal partial denture framework. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 21, 63-68 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.02.014
- [8] GOKULDOSS, P. K., S. KOLLA a J. ECKERT. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials* [online]. 2017, 10(6) [cit. 2022-07-28]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10060672
- [9] FRIEL, R.J. a R.A. HARRIS. Ultrasonic Additive Manufacturing — A Hybrid Production Process for Novel Functional Products. *Procedia CIRP* [online]. 2013, 6(6), 35-40 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2013.03.004

- [10] LEVY, A., A. MIRIYEV, N. SRIDHARAN, T. HAN, E. TUVAL, S. S. BABU, M. J. DAPINO a N. FRAGE. Ultrasonic additive manufacturing of steel: Method, post-processing treatments and properties. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2018, 256, 183-189 [cit. 2022-07-28]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.02.001
- [11] FARAYIBI, P.K., T.E. ABIOYE, A. KENNEDY a A.T. CLARE. Development of metal matrix composites by direct energy deposition of 'satellited' powders. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, 45, 429-437 [cit. 2022-07-28]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.07.029
- [12] RIBEIRO, K. S.B., F. E. MARIANI a R. T. COELHO. A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes. *Procedia Manufacturing* [online]. 2020, 48, 663-670 [cit. 2022-07-28]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2020.05.158
- [13] SANG, Y., M. XIAO, Z.ZHANG a Q. FU. Effect of auxiliary heating process on low power pulsed laser wire feeding deposition. *Materials & Design* [online]. 2022, 218 [cit. 2022-07-28]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2022.110666
- [14] HUANG, W., J. XIAO, S. CHEN a X. JIANG. Control of wire melting behavior during laser hot wire deposition of aluminum alloy. *Optics & Laser Technology* [online]. 2022, 150 [cit. 2022-07-28]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2022.107978
- [15] AKBARI, M. a R. KOVACEVIC. An investigation on mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 23(1), 487-497 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.08.031
- [16] SOLOMON, I., P. SEVVEL, J. GUNASEKARAN a P. TANUSHKUMAAR. A review on additive manufacturing of alloys using laser metal deposition. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 64, 44-50 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.03.510
- [17] DEREKAR, K. S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. *Materials Science and Technology* [online]. 2018, 34(8), 895-916 [cit. 2022-07-28]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1080/02670836.2018.1455012
- [18] LIU, J., Y. XU, Y. GE, Z. HOU a S. CHEN. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

*Technology* [online]. 2020, 2020(111), 149-198 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05966-8>

[19] GURČÍK, T. *Stabilita procesu technologie WAAM*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Kovanda Karel.

[20] SINGH, S., S.SHARMA a D. W. RATHOD. A review on process planning strategies and challenges of WAAM. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, 47, 6564-6575 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.02.632

[21] PATEL, M., S. MULGAONKAR, H. DESAI a T. BORSE. Development and Implementation of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Based on Pulse Spray GMAW for Aluminum Alloy (AlSi7Mg). *Transactions of the Indian Institute of Metals* [online]. 2021, (74), 1129-1140 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-020-02154-w>

[22] WANG, Y., X. XU, Z. ZHAO, W. DENG, J. HAN, L. BAI, X. LIANG a J. YAO. Coordinated monitoring and control method of deposited layer width and reinforcement in WAAM process. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, 71, 306-316 [cit. 2022-07-28]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.09.033

[23] KUBÍČEK, J. *ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ*. Brno: Ústav strojírenské technologie, 2006.

[24] KOVAŘÍK, R. a F. ČERNÝ. *Technologie svařování*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 9788070821121.

[25] JISKRA, M. *POROVNÁNÍ CMT TWIN S OSTATNÍMI MIG/MAG PROCESY*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

[26] DRÁPELA, P. *Vliv vybraných parametrů na geometrii svarů u MAG procesu svařování*. Liberec, 2008. Diplomová práce. TUL. Vedoucí práce Heinz Neumann.

[27] GURČÍK, T., K. KOVANDA a P. ROHAN. INFLUENCE OF SHIELDING GAS ON GEOMETRICAL QUALITY OF WAAM TECHNOLOGY. *Metal 2019* [online]. BRNO, 2019, 715-721 [cit. 2022-07-28]. ISSN 2694-9296. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.37904/metal.2019.871>

[28] ÇAM, G. Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 62, 77-85 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.02.137

- [29] BALASUBRAMANIAN, M., M. VINEETH CHOUDARY, A. NAGARAJA a K. OM CHARAN SAI. Cold metal transfer process – A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, 33, 543-549 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.05.225
- [30] NAGASAI, B. P., S. MALARVIZHI a V. BALASUBRAMANIAN. Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2022, 36, 100-116 [cit. 2022-07-28]. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2021.11.005
- [31] SCOTTI, F. M., F. R. TEIXEIRA, L. J. SILVA, D. B. DE ARAÚJO, R. P. REIS a A. SCOTTI. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2020, 57, 23-35 [cit. 2022-07-28]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.06.007
- [32] *CMT advanced* [online]. Praha: Fronius International, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/fronius-welding-processes/cmt-advanced>
- [33] *CMT pulse advanced* [online]. Praha: Fronius International, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/fronius-welding-processes/cmt-pulse-advanced>
- [34] CHEN, X., SU a WANG. Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* [online]. 2018, 2019, 2018(12), 1278–1284 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1134/S102745101901004X>
- [35] SELVI, S., A. VISHVAKSENAN a E. RAJASEKAR. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. *Defence Technology* [online]. 2018, 14(1), 28-44 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22149147. Dostupné z: doi:10.1016/j.dt.2017.08.002
- [36] LIU, W., C. JIA, M. GUO, J. GAO a C. WU. Compulsively constricted WAAM with arc plasma and droplets ejected from a narrow space. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, 27, 109-117 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.03.003
- [37] OLIVEIRA, J.P., F. M. GOUVEIA a T. G. SANTOS. Micro wire and arc additive manufacturing ( $\mu$ -WAAM). *Additive Manufacturing Letters* [online]. 2022, 2 [cit. 2022-07-28]. ISSN 27723690. Dostupné z: doi:10.1016/j.addlet.2022.100032

- [38] Tandemové svařování [online]. Praha: Fronius International, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-tandemove-svarovani/>
- [39] JUNBIAO SHI, FANG LI, SHUJUN CHEN, YUN ZHAO a HONGYU TIAN. Effect of in-process active cooling on forming quality and efficiency of tandem GMAW-based additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, 2019, 2019(101), 1349–1356 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-2927-4>
- [40] LIAO, Z., B. YANG, S. XIAO, G. YANG a T. ZHU. Fatigue crack growth behaviour of an Al-Mg4.5Mn alloy fabricated by hybrid in situ rolled wire + arc additive manufacturing. *International Journal of Fatigue* [online]. 2021, 151 [cit. 2022-07-28]. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2021.106382
- [41] ZHANG, T., H. LI, H. GONG, J. DING, Y. WU, C. DIAO, X. ZHANG a S. WILLIAMS. Hybrid wire - arc additive manufacture and effect of rolling process on microstructure and tensile properties of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2022, 299 [cit. 2022-07-28]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117361
- [42] M. ABBASZADEH, J. R. HÖNNIGE, F. MARTINA, L. NETO, N. KASHAEV, P. COLEGROVE, S. WILLIAMS a B. KLUSEMANN. Numerical Investigation of the Effect of Rolling on the Localized Stress and Strain Induction for Wire + Arc Additive Manufactured Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2019, 2019(28), 4931–4942 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-019-04249-y>
- [43] ZHOU, X., H. ZHANG, G. WANG, X. BAI, Y. FU a J. ZHAO. Simulation of microstructure evolution during hybrid deposition and micro-rolling process. *Journal of Materials Science* [online]. 2016, 2016, 2016(51), 6735–6749 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-016-9961-0>
- [44] GAO, Y., C. WU, K. PENG, et al. Towards superior fatigue crack growth resistance of TC4-DT alloy by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2021, 15, 1395-1407 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.152
- [45] DUARTE, V. R., T. A. RODRIGUES, N. SCHELL, R.M. MIRANDA, J.P. OLIVEIRA a T. G. SANTOS. Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM). *Additive Manufacturing* [online]. 2020, 35 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101193
- [46] DA SILVA, L., D. MONTEIRO SOUZA, D. BEZERRA DE ARAÚJO, R. RUHAM PABLO REIS a A. SCOTTI. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *The*

*International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, (107), 2513–2523 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05201-4>

[47] SCOTTI, F. M., F. R. TEIXEIRA, L. J. SILVA, D. B. DE ARAÚJO, R. P. REIS a A. SCOTTI. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2020, 57, 23-35 [cit. 2022-07-28]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.06.007

[48] SINGH, S. R. a P. KHANNA. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, 44, 118-128 [cit. 2022-07-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.08.030

[49] JIA, C., W. LIU, M. CHEN, M. GUO, S. WU a C. WU. Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, 34 [cit. 2022-08-03]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101235

[50] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, 2(4) [cit. 2022-08-13]. ISSN 1931-9401. Dostupné z: doi:10.1063/1.4935926

[51] Selective Laser Sintering. In: CUSTOMPART.NET [online]. 2008 [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>

[52] LANCASTER, R., G. DAVIES, H. ILLSLEY, S. JEFFS a G. BAXTER. Structural Integrity of an Electron Beam Melted Titanium Alloy. *Materials* [online]. 2016, 9(6) [cit. 2022-08-13]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma9060470

[53] All About Binder Jetting 3D Printing [online]. [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/all-about-binder-jetting-3d-printing/>

[54] Ultrasonic Additive Manufacturing. INSIDE METAL ADDITIVE MANUFACTURING [online]. [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/ultrasonic-additive-manufacturing?view=full>

[55] ANDERSON, R., TERRELL, J., SCHNEIDER, J. et al. Characteristics of Bi-metallic Interfaces Formed During Direct Energy Deposition Additive Manufakturní Processing. *Metall Mater Trans B* 50, 1921–1930 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01612-1>

[56] COST EFFECTIVE MANUFACTURING OF METAL COMPONENTSWIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING. *Fronius* [online]. 2022 [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en-in/india/welding-technology/info-centre/magazine/2019/waam>

[57] A New Level of Welding Process Control CMT Cycle Step from Fronius: CMT Cycle Step from Fronius. *INDUSTRIAL MACHINERY DIGEST* [online]. 2018 [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: <https://industrialmachinerydigest.com/industrial-news/product-news/a-new-level-of-welding-process-control/>

[58] IMOUDU, N. E., Y. Z. AYELE a A. BARABADI. The characteristic of cold metal transfer (CMT) and its application for cladding. In: 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1883-1887 [cit. 2022-08-14]. ISBN 978-1-5386-0948-4. Dostupné z: doi:10.1109/IEEM.2017.8290218

[59] Weld G3Si1. ESAB [online]. 2022 [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: [https://esab.com/cz/eur\\_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1/](https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1/)



## 9 Seznam tabulek

Tabulka 2 Rozsah parametrů metod MAG/MIG [23] .....	26
Tabulka 3 Rozsah parametrů metody TIG [23].....	27
Tabulka 4 Nastavené svařovací parametry metody CMT/CMT-CC/CMT+P .....	41
Tabulka 5 Chemické složení G3Si1 [hm. %] .....	42

## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení aditivních technologií kovových materiálů. Upraveno dle [18] .....	15
Obrázek 2 Proces výroby dílu pomocí SLM. Upraveno dle [50] .....	16
Obrázek 3 Schéma zařízení pro SLM. Upravené dle [51] .....	17
Obrázek 4 schéma zařízení pro EBM. Upraveno dle [52] .....	17
Obrázek 5 Schéma metody BJP. Upraveno dle [53] .....	18
Obrázek 6 schéma procesu UAM. Upraveno dle [54] .....	19
Obrázek 7 Schéma metody LMD. Upraveno dle [55] .....	20
Obrázek 8 schématické znázornění metody LWD. Upraveno dle [55].....	21
Obrázek 9 postup navařování pomocí metody WAAM [19] .....	22
Obrázek 10 kombinace metody WAAM a obrábění [56] .....	23
Obrázek 11 Postup programování. Upraveno dle [20].....	24
Obrázek 12 Základní typy přenosu svarového kovu [24] .....	27
Obrázek 13 metoda CC-WAAM. Upraveno dle [36] .....	31
Obrázek 14 stěna vytvořená metodou micro WAAM. [37].....	32
Obrázek 15 Hybridní válcování.....	33
Obrázek 16 Svařovací hlava metody HF-WAAM. Upraveno dle [45] .....	34
Obrázek 17 Robotizované svařovací pracoviště .....	38
Obrázek 18 schéma automatizovaného svařovacího pracoviště .....	39
Obrázek 19 Experimentální měřící pracoviště se zapojenou měřící stanicí.....	40
Obrázek 20 fotografie rozložení termočlánků.....	40

Obrázek 21 výkres a rozložení termočlánků.....	41
Obrázek 22 Režim pohybu hořáku .....	42
Obrázek 23 Průběh svařovacího proudu při svařování CMT vzorku č.1.....	43
Obrázek 24 Detail průběhu svařovacího proudu při CMT svařování .....	44
Obrázek 25 Přiblížení průběhu proudu a napětí svařování metodou CMT.....	44
Obrázek 26 Průběh svařovacího proudu při svařování CMT CC vzorku č.2 .....	45
Obrázek 27 Detail průběhu proudu CMT CC .....	45
Obrázek 28 Přiblížený detail jednoho cyklu průběhu proudu svařování CMT CC.....	45
Obrázek 29 Průběh svařovacího proudu při svařování CMT-P vzorku č.3 .....	46
Obrázek 30 Detail průběhu proudu svařování CMT - P.....	46
Obrázek 31 Přiblížený detail jednoho cyklu průběhu proudu svařování CMT P. ....	47
Obrázek 32 srovnání teplotních cyklů první vrstvy návarů u metod CMT,CMT-CC,CMT-P .....	48
Obrázek 33 Průběh teplotního cyklu vzorku č.1 - CMT .....	49
Obrázek 34 Průběh teplotního cyklu u vzorku č.2- navařování metodou CMT-CC.....	50
Obrázek 35 průběh teplotního cyklu u vzorku č.3- metoda CMT pulse.....	51
Obrázek 36 součást vyrobená pomocí CMT .....	52
Obrázek 37 Profil vzorku vyrobeného pomocí CMT .....	52
Obrázek 38 vzorek č.2 vyrobený pomocí CMT-CC.....	53
Obrázek 39 Profil vzorku vyrobeného metodou CMT-CC .....	53
Obrázek 40 vzorek vyrobený metodou CMT-p.....	54
Obrázek 41 Profil vzorku vyrobeného metodou CMT-P.....	54
Obrázek 42 Stálost výšky stěny .....	55
Obrázek 43 Srovnání výšky navařených vzorků .....	55
Obrázek 44 Srovnání stálosti šířky.....	56
Obrázek 45 Srovnání šířky navařených vzorků.....	56