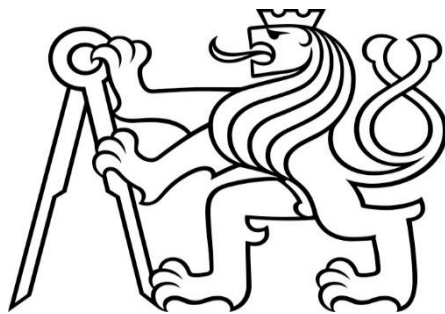


**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**Horáček**

**Jan**

**2023**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**VLIV TECHNOLOGIE ADITIVNÍHO PROCESU WAAM NA  
KVALITU HLINÍKOVÝCH NÁVARŮ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Bc. Jan Horáček  
**VEDOUcí PRÁCE:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE  
**STUDIJNÍ PROGRAM:** Výrobní inženýrství  
**STUDJNÍ OBOR:** Bez specializace

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horáček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **473534**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

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

Název diplomové práce anglicky:

**The influence of the WAAM additive process technology on aluminium overlay welds quality**

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor problematiky aditivních metod kovových materiálů a jejich porovnání s robotickým navařováním metodou WAAM
- Popis metody WAAM, možnosti využití různých metod navařování a jejich modifikací, vhodných pro AI a jeho slitiny
- Návrh experimentu – porovnání vybraných metod pro navařování AI
- Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolařík, L., Kovanda, K., Gurčík, T. Využití metody robotického navařování - WAAM a porovnání s 3D tiskem kovových materiálů, Dny svařovací techniky 2019, Rychnov nad Kněžnou, 2019
- [2] Chen, J.: Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012
- [3] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, 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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

**Ing. Miroslav Sahuš, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

\_\_\_\_\_  
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

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Vliv technologie aditivního procesu WAAM na kvalitu hliníkových návarů** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že 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 .....

.....

Jméno, Příjmení

## **Anotace**

**Název diplomové práce:** Vliv technologie aditivního procesu WAAM na kvalitu hliníkových návarů

**Autor práce:** Bc. Jan Horáček

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Konzultant:** Ing. Miroslav Sahul, Ph.D.

**Akademický rok:** 2022/2023

**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

**Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Rozsah práce:**

**Klíčová slova:** Wire and Arc Additive Manufacturing, Svařování MIG, slitiny hliníku

Diplomová práce „Vliv technologie aditivního procesu WAAM na kvalitu hliníkových návarů“ se zabývá v teoretické části rozбором aditivních metod výroby, rozebrání metody WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), základní svařovací metodu MIG s modifikačními procesy CMT (Cold Metal Transfer), CMT Puls a CMT Cycle Step, včetně přehledu aktuálního stavu svařování hliníkových slitin. V další části diplomové práce je realizován experiment, který se zabývá porovnáním procesů CMT, CMT Puls a CMT Cycle Step z hlediska kvality vytvořených návarů. U vzorků bylo provedeno měření geometrie, strukturní porovnání, včetně měření porozity a měření obsahu vodíku.

## **Annotation**

**Title of the thesis:** Influence of Wire and Arc Additive Manufacturing Technology on the Quality of Aluminum Weld Overlays

**Author:** Bc. Jan Horáček

**Supervisor:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Consultant:** Ing. Miroslav Sahul, Ph.D.

**Academic year:** 2022/2023

**University:** Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering,

**Institute:** 12133 – Institute of Manufacturing Technology

**Head of department:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Thesis Keywords:** Wire and Arc Additive Manufacturing, MIG Welding, Aluminum Alloys

The thesis titled "Influence of Wire and Arc Additive Manufacturing Technology on the Quality of Aluminum Weld Overlays" deals with the theoretical analysis of additive manufacturing methods, a breakdown of the WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) method, the basic MIG welding method with modification processes CMT (Cold Metal Transfer), CMT Pulse, and CMT Cycle Step, including an overview of the current state of aluminum alloy welding. In the subsequent part of the thesis, an experiment is conducted, focusing on the comparison of the CMT, CMT Pulse, and CMT Cycle Step processes in terms of the quality of produced weld overlays. The samples undergo measurements of geometry, structural comparison, including porosity measurement and hydrogen content measurement.

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE a za metodické vedení a odborné konzultace, které mi poskytl při zpracování mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat dále svým konzultantům pánům Ing. Martinovi Sahulovi, Ph.D., Ing. Miroslavovi Sahulovi, Ph.D., Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D a Ing. Jakubu Horvátovi, Ph.D a dalším kteří se podíleli na mé práci.

# Obsah

Čestné prohlášení .....	4
Anotace .....	5
Annotation.....	6
Poděkování .....	7
Seznam zkratk.....	10
Seznam Použité symboliky.....	11
1 Aditivní výroba.....	13
1.1 LAM – Laser Additive Manufacturing.....	14
1.1.1 SLS – Selective Laser Melting .....	14
1.1.2 SLM – Selective Laser Melting.....	15
1.1.3 LMD – Laser Metal Deposition .....	16
1.2 EBM – Electron beam melting.....	16
1.3 SMD – Shaped Metal Deposition .....	18
1.4 Technologie WAAM [5] [6] [7] [8].....	18
2 Technologie svařování .....	21
2.1 Přehled a rozdělení svařování .....	22
2.2 Tavné svařování .....	22
2.2.1 Metoda MAG .....	23
2.2.2 Metoda MIG.....	23
2.2.3 Metoda TIG .....	23
2.2.4 Přenos kovu při svařování metodou MIG/MAG .....	24
2.2.5 Ochranné plyny.....	26
3 Přizpůsobení metod MIG/MAG procesu WAAM.....	26
3.1 CMT-Cold Metal Transfer.....	26
3.2 CMT+P-Cold Metal Transfer + Pulse.....	28
3.3 CMT+CS – Cold Metal Transfer + Cycle Step [19] .....	30
4 Materiály používané v procesu WAAM.....	31



4.1	Slitiny Titanu .....	31
4.2	Slitiny na bázi niklu .....	32
4.3	Korozivzdorné oceli.....	32
4.4	Slitiny Hliníku .....	32
5	Experimentální část .....	35
5.1	Popis pracoviště.....	36
5.1.1	Univerzální 6osý robot FANUC ArcMate 100iC .....	37
5.1.2	Svařovací zdroj TransPuls Synergic 3200 CMT .....	38
5.2	Tvorba Vzorků .....	39
5.2.1	Podkladový a přídavný materiál .....	41
5.3	Vyhodnocení geometrického tvaru vzorků .....	42
5.3.1	Vzorek č.1 – metoda CMT .....	43
5.3.2	Vzorek č.2 – metoda CMT+P .....	43
5.3.3	Vzorek č.3 – Metoda CMT + CS .....	44
5.3.4	Srovnání a vyhodnocení geometrie stěn .....	45
5.4	Vyhodnocení z hlediska makrostruktury .....	46
5.5	Vyhodnocení z hlediska mikrostruktury.....	47
5.5.1	Vyhodnocení porozity pomocí softwaru ImageJ .....	49
5.5.2	Vyhodnocení porozity pomocí počítačové tomografie .....	53
5.5.2.1	Výsledky z počítačové tomografie.....	54
5.5.3	Vyhodnocení obsahu vodíku .....	58
6	Závěr .....	60

## Seznam zkratk

WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing
MIG	Obloukové svařování s tavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře
MAG	Obloukové svařování s tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře
TIG	Obloukové svařování s netavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře
AM	Additive manufacturing (aditivní výroba)
CAD	Computer aided design (počítačem podporované návrhářství)
3D	Trojrozměrné
PB	Powder based
WB	Wire based
LAM	Laser additiv manufacturing
EBM	Elektro Beam Melting
SMD	Shaped Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
ND:YAG	Pevnolátkový laser (neodymem dopovaný yttrio-aluminiový granát)
SLM	Selective laser melting
LMD	Laser metal deposition
EBM	Electron beam melting
BTF	Buy to fly
CMT	Cold metal transfer
CMT+P	Cold metal transfer with Plus
CMT+CS	Cold metal transfer with Cycle Step
ČVUT	České vysoké učení technické
DP	Diplomová práce
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý

CT	Počítačová tomografie
ZM	Základní materiál
Si	Křemík
Cu	Měď
Mn	Mangan
Mg	Hořčík
Cr	Chrom
Zn	Zinek
Ti	Titan
Al	Hliník
Zr	Zirkon

## **Seznam Použité symboliky**

Rm	Mez pevnosti [MPa]
As	Tažnost [%]
Re	Mez kluzu [MPa]

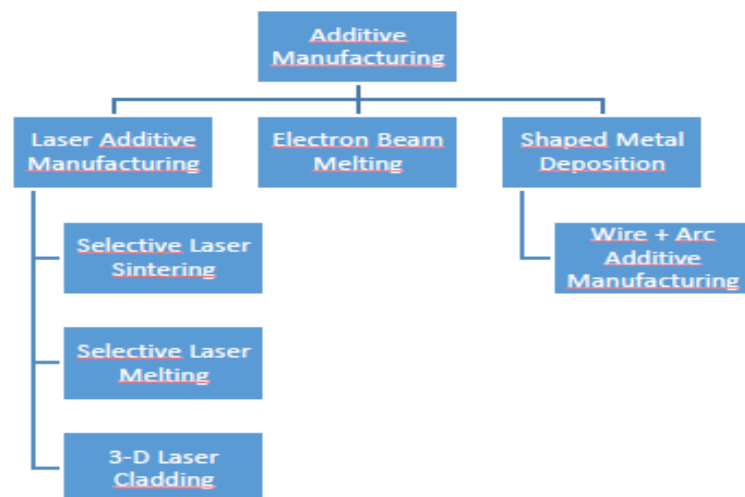
## Úvod

Jednou z významných výhod aditivní výroby je její minimální produkce odpadu ve srovnání s konvenčními výrobními metodami, jako je obrábění, při kterém vzniká značné množství materiálového odpadu v důsledku úběru materiálu. Aditivní technologie nabízejí obrovský potenciál pro výrobu složitých součástí, které jsou náročné na výrobu tradičními metodami. Výrobní proces je zefektivněn, protože se provádí pomocí jediné automatizované pracovní stanice, což eliminuje potřebu dalších nástrojů a nastavení, založených výhradně na datech z navrženého CAD modelu. To vede ke zkrácení doby výroby funkčních prototypů a zakázkové výroby. Aditivní výroba také umožňuje návrhářům přistupovat k návrhu komponent odlišně a využívat topologickou optimalizaci pro vyšší výkon. Výsledkem je, že aditivní technologie zaznamenaly významný rozvoj v různých průmyslových odvětvích a staly se hnací silou pokroku průmyslové výroby. Zatímco 3D tisk s plasty je přístupný mnoha lidem díky cenově dostupným 3D tiskárnám, u kovových dílů vstupují do hry různé technologie aditivní výroby, jako je Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). WAAM zahrnuje nanášení přídavného materiálu ve formě drátu (elektrody) pomocí procesů obloukového svařování jako MIG, MAG nebo TIG. Naskládáním svarových housenek na sebe se vytvoří 3D objekt.

# 1 Aditivní výroba

Aditivní výroba (*AM – Additive Manufacturing 3D print apod.*) je označení pro průmyslový 3D tisk. Během tohoto výrobního procesu vznikají podle CAD předlohy, vrstvu po vrstvě určitého materiálu, trojrozměrné objekty (3D). Aditivní metody výroby se stávají stále více populárními, protože umožňují rychlou a přesnou výrobu prototypů a konečných produktů. Na rozdíl od konvenčních technologií výroby, aditivní technologie produkují zdatelně méně odpadového materiálu, jelikož vstupní materiál není celý profil, ale např. drát. Tyto metody jsou často využívány v oblastech jako jsou průmyslové design, lékařství, automobilový průmysl, letectví a mnoho dalších.

Celá diplomová práce je zaměřena na aditivní výrobu kovových materiálů. Technologie aditivní výroby lze klasifikovat ze dvou hlavních hledisek na základě typu použitého zdroje tepla a typu použitého přídavného materiálu. Na Obr. 1 je rozdělení na skupinu technologií. Dle tepelného zdroje dělíme AM na technologii využívající laserový paprsek (*LAM – Laser Additive Manufacturing*), elektronový paprsek (*EBM – Electro Beam Melting*) a elektrický oblouk (*SMD – Shaped Metal Deposition*).[1]



Obrázek 1-Rozdělení metod aditivní výroby pro kovové materiály [1]

## **1.1 LAM – Laser Additive Manufacturing**

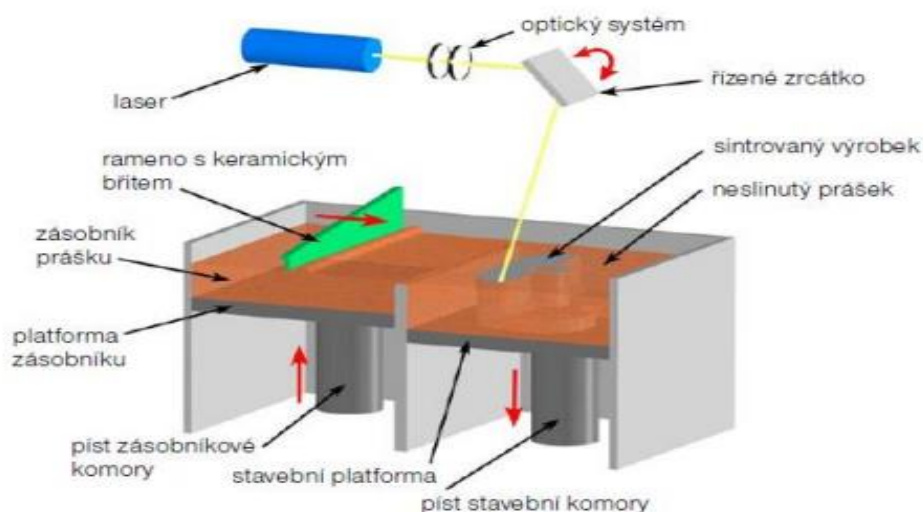
Při této technologii je využíván jako tepelný zdroj laserový paprsek. V procesu jsou díly stavěny pomocí tavení kovových prášků nebo zřídka drátů vrstvu po vrstvě. Tavenina se obvykle vytváří pomocí energie přiváděné Nd: YAG, diodovým nebo CO<sub>2</sub> laserem, a zároveň je do procesu přiváděn argon nebo helium, jako ochranný plyn, aby se zabránilo oxidaci. Mezitím se kovový prášek přivádí tryskou nebo se roztírá pokládacím práškovým zařízením. Metoda se dále dělí na Selective laser Melting (SLM), Selective laser Sintering (SLS) a Laser Metal Deposition (LMD). [2]

### **1.1.1 SLS – Selective Laser Melting**

SLS neboli „laserové spékání“ je typický AM proces. Jde o metodu, při které se využívá laser k selektivnímu spékání práškového materiálu, který se následně spéká a vytváří trojrozměrný objekt. Nicméně SLS se obvykle používá k označení procesu pro nekovové materiály, jako jsou plasty, nylon a keramika. Proto je tedy vhodnější označení DMLS (Direct Metal Laser Sintering), který se výhradně používá pro označení „3D tisku“ pro kovové materiály. [1]

Postup laserového spékání obsahuje 5 kroků. V první řadě se na pracovní stůl upevní vertikálně posuvná podkladová deska pro výrobu součástek. Poté se do pracovního prostoru vpustí ochranný plyn (obvykle inertní), aby došlo k zamezení oxidace. Následně se na podkladovou desku nanese tenká vrstva sypkého prášku o obvyklé tloušťce 20-100 μm pomocí pokládacího práškového zařízení. Laserový paprsek dále zahřívá povrch vrstvy prášku a vytváří profily po vrstvách podle sestavených dat CAD. Posledním krokem je opakování výše uvedených 4 kroků až do dokončení součásti. [2]

System SLS se skládá z laseru (obvykle CO<sub>2</sub>, Nd: YAG, Nd:Yb, vláknový, diskový apod.), automatického zařízení pro vrstvení a stírání prášku, počítačového řídicího systému a dalších pomocných zařízení, kterými jsou rozvod inertního plynu či vyhřívání pracovní desky viz. Obr. 2. [1]



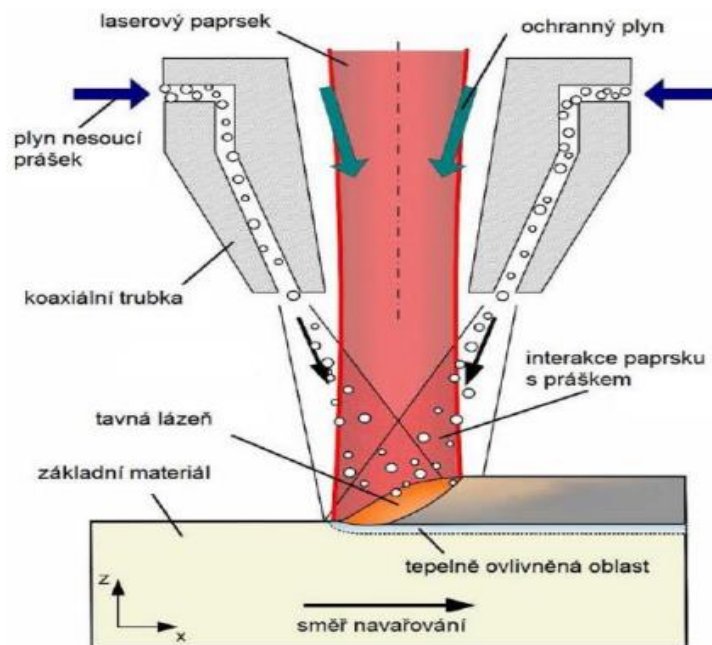
Obrázek 2-Schéma zařízení pro technologii SLS [2]

### 1.1.2 SLM – Selective Laser Melting

Technologie SLM s technologií SLS má stejný princip i zařízení, nicméně u technologie SLM dochází k úplnému roztavení přídavného materiálu a dochází k spojení na molekulární úrovni v homogenním stavu (ohřev těsně nad teplotu tavení), a proto tedy technologii SLM nazýváme „laserové tavení“. To je především důvod, proč se laserové tavení používá pro homogenní přídavné materiály. K natavení prášku je však potřeba vyšší energie paprsku. U technologie SLS můžeme použít heterogenní kovové prášky, ale není dosaženo z materiálového hlediska homogenity finální struktury. [3]

### 1.1.3 LMD – Laser Metal Deposition

Při procesu LMD se svarová stopa vytváří pomocí kovového prášku nebo drátu jako přídavného materiálu, který se prostřednictvím trysky přivádí do taveniny vytvořené soustředěným laserovým paprskem o vysoké hustotě výkonu. Inertní plyn a prášek jsou dopravovány tryskou do malé oblasti kolem ohniska laserového paprsku (viz. Obr.3). Současným pohybem trysky i laseru se v závislosti na parametrech procesu s vysokou přesností nanáší nová vrstva materiálu. Tímto způsobem umožňují techniky vícevrstvého nanášení vytvářet 3D struktury. Stejně jako u technologie SLM je vhodné použít čisté materiály pro jejich úplné roztavení. Hlavní předností technologie LMD je absence rozměrného zařízení pro stírání a nanášení kovového prášku nebo nutnost zaplnit pracovní komoru inertním plynem. [1]



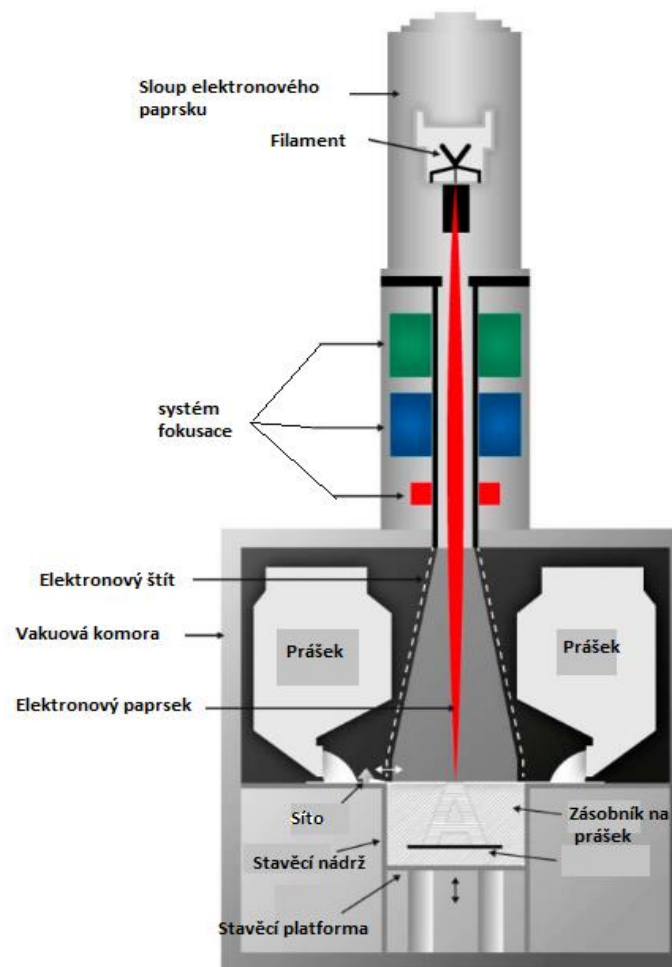
Obrázek 3 - Schéma zařízení pro technologii LMD [1]

## 1.2 EBM – Electron beam melting

EBM (Electron Beam Melting) je aditivní výrobní technologie založená na použití elektronového svazku, který je nasměrován na materiál, jako je například kovový prášek. Elektronový paprsek roztaví prášek přesně v místech, kde má být vytvořen 3D objekt. Roztavené materiály pak rychle ztuhnou a vytvoří pevnou a hustou strukturu. Tento proces



probíhá ve vakuu, aby se elektrony nezpomalovaly odražením od částic v atmosféře či oxidaci materiálů. Toto především zajišťuje vyšší kvalitu výsledné struktury, která obsahuje znatelně méně nečistot a méně mikroporozity. Proces EBM se proto používá zejména v lékařství a leteckém průmyslu, a to díky vakuu, kdy se mohou tisknout reaktivní materiály, jako je například titan a jeho slitiny. [1][4]



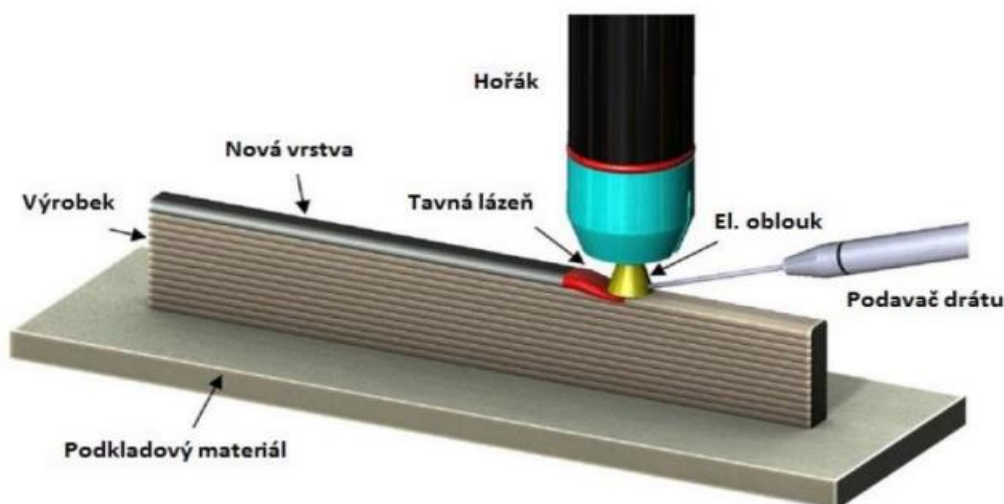
Obrázek 4 - Schéma technologie EBM. Upraveno dle [29]

### 1.3 SMD – Shaped Metal Deposition

SMD – Shaped Metal Deposition je technologie aditivní výroby, která umožňuje vytvářet kompletní kovové díly nebo provádět opravy poškozených kovových součástek. Tento proces byl vyvinut na Cranfield University pro společnost Rolls Royce, při výrobě dílů motorů v letech 1994 až 1999. Metoda spočívá v nanesení tenkých vrstev kovového drátu pomocí laseru nebo elektronového svazku na předem stanovené místo. Přesnost a kvalita jsou horší než u výše popsaných procesů využívající laser nebo elektronový svazek, ale rychlost nanášení je vyšší. Nicméně u této metody lze použít jako zdroj tepla i elektrický oblouk. SMD se používá například v letectví, automobilovém průmyslu, strojírenství a v elektrotechnice. [1]

### 1.4 Technologie WAAM

Proces Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) zahrnuje pokládání značného počtu jednotlivých návarových housenek buď vedle sebe nebo na sebe (viz Obr.5). Přesné modely návarové housenky a geometrie vrstev (tvořené překrývajícími se návarovými housenkami) jsou zásadní pro určení kvality povrchu a rozměrové přesnosti vyráběných produktů. Součásti se vyrábějí postupným přidáváním jednotlivých vrstev podél požadovaného tvaru součásti (vždy zdola nahoru) s konstantní nebo adaptivní tloušťkou návarové "stěny" nebo ukládáním materiálu do těchto obrysů za účelem vytvoření plných částí.

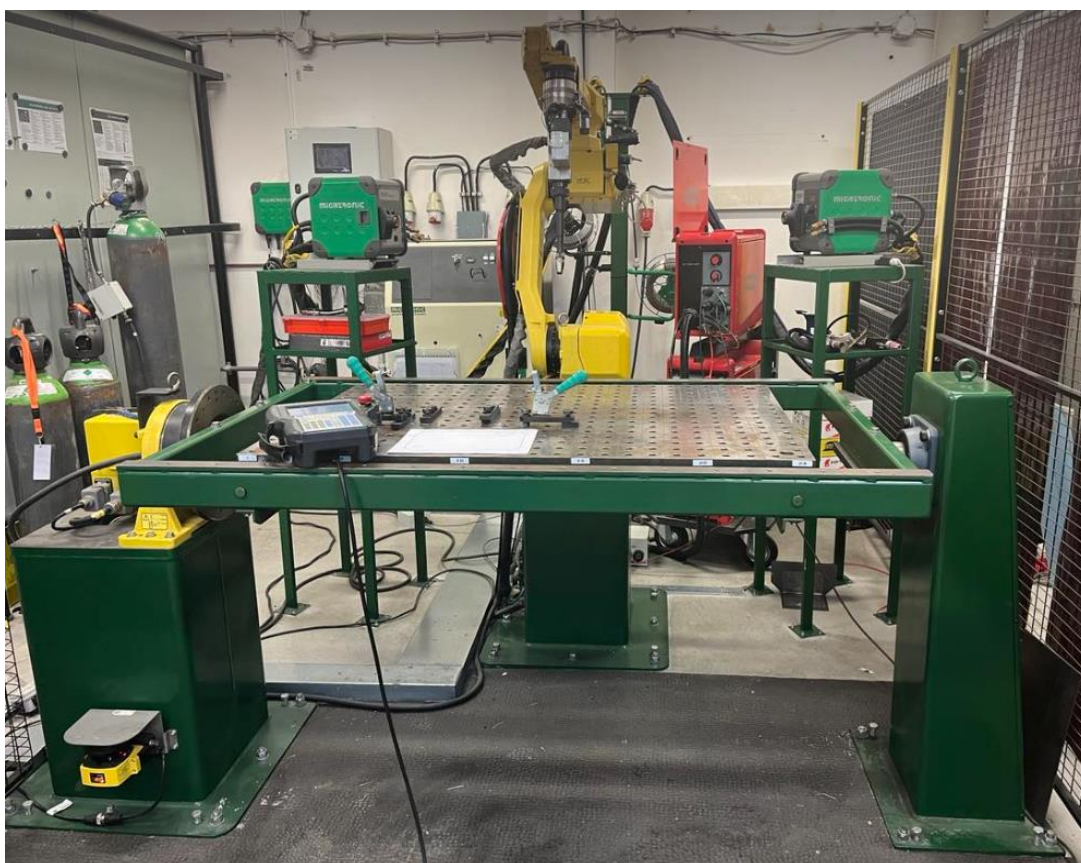


Obrázek 5-Princip metody WAAM (s pomocí TIG navařování) [8]

Metoda WAAM, zařazená do technologie SMD (Shaped Metal Deposition), spočívá v kombinaci elektrického oblouku s použitím kovového drátu jako přídavného materiálu (používají se běžné svařovací elektrody nebo svařovací dráty). Termín „WAAM“ byl vytvořen ve Velké Británii na Cranfield University v 90. letech 20. století. WAAM se osvědčil při výrobě aerodynamických komponentů pro motory. Vzhledem k tomu, že poptávka leteckého průmyslu rostla, technologie AM rozšířily své použití mimo části motorů, aby zahrnovaly součásti trupu letadel. Procesy laserového a elektronového paprsku využívající práškové přídavné materiály mají omezení z hlediska rychlosti nanášení vrstvy a velikosti vyrobitelných částí. Metoda WAAM naopak vyniká jako účinný proces, který je speciálně vhodný pro výrobu velkých součástí pro letecký průmysl, protože u procesu rozměry vyráběných součástí jsou litovány pouze prostorovým dosahem průmyslových robotů, které jsou použity k manipulaci navařovacím hořákem. WAAM je dále široce používáno v oblastech, jako jsou automobily, architektonický design a biomedicína. Metoda navařování elektrickým obloukem v AM (zahrnující kontinuální nanášení samonosných svarů) nabízí kombinaci výhod, jako je vysoká rychlost navařování, energetická účinnost, bezpečný provoz a hospodárnost. Technika WAAM se objevila jako výsledek technologického pokroku v různých oblastech, vyžadujících správnou kombinaci parametrů svařovacího procesu, robotického programování a odborných znalostí v oblasti tepelné analýzy k dosažení požadovaných mechanických vlastností produktu. Významným faktorem, který je jeden z hlavních důvodů použití této technologie je využití principu „buy-to-fly“ (BTF), zajišťující optimální poměr mezi množstvím vstupního výrobního materiálu a množstvím materiálu použitého k vytvoření hotového produktu. Tento přístup minimalizuje tvorbu odpadu, na rozdíl od konvenčních metod obrábění. Proces WAAM vyžaduje automatizaci, které lze dosáhnout pomocí univerzálních robotických pracovišť. Velikost těchto pracovišť omezuje rozměry nebo dosah pracovní plochy. WAAM nabízí značnou výhodu oproti jiným technologiím aditivní výroby díky nižším nákladům na nastavení a provoz, zejména při použití konvenčních metod používaných standardně pro svařování. Pohyb navařovacího zařízení, buď robotického systému nebo počítačem řízeného portálu, lze naprogramovat tak, aby proces provedl automaticky. Zatímco metoda WAAM se méně často používá pro malé a složité tvarované součásti, oproti klasickému 3D tisku kovových materiálů – např. metodě DMLS. Může však vyrábět velké součásti a někdy mohou na stejné součásti spolupracovat dva roboti. Omezení pracovního prostoru pro WAAM je minimální; pokud je pracovní prostor robota nedostatečný, lze jej rozšířit pomocí většího počtu robotů. Velkou výhodou WAAM je jeho kompatibilita s tradičními

robotickými pracovišti. S pomocí dostupných softwarových nástrojů, jako jsou off-line simulátory robotických pracovních stanic nebo off-line programovací software, lze WAAM reálně implementovat do výroby a nahradit tak neekonomické výrobní procesy pro konkrétní strojní součásti. [5] [6] [7] [8]

Robotizované pracoviště pro WAAM obsahuje univerzální průmyslového robota, standardní svařovací hlavu (zde používanou pro navařování), podavače drátu, svařovací zdroje a dálkové ovládání celého systému (viz. Obr.6). Součást je vyrobena z přídatného materiálu v podobě klasického svařovacího drátu, primárně určeného pro svařování metodou MIG/MAG. Geometrii jednotlivých svarových housenek určuje program uložený v řídicí jednotce robota.



Obrázek 6-Ukázka pracoviště pro metodu WAAM (Robotické svařovací pracoviště na Ústavu strojní technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze – šestiosý univerzální robotu Fanuc ArcMate 100iC s rotačním polohovadlem)

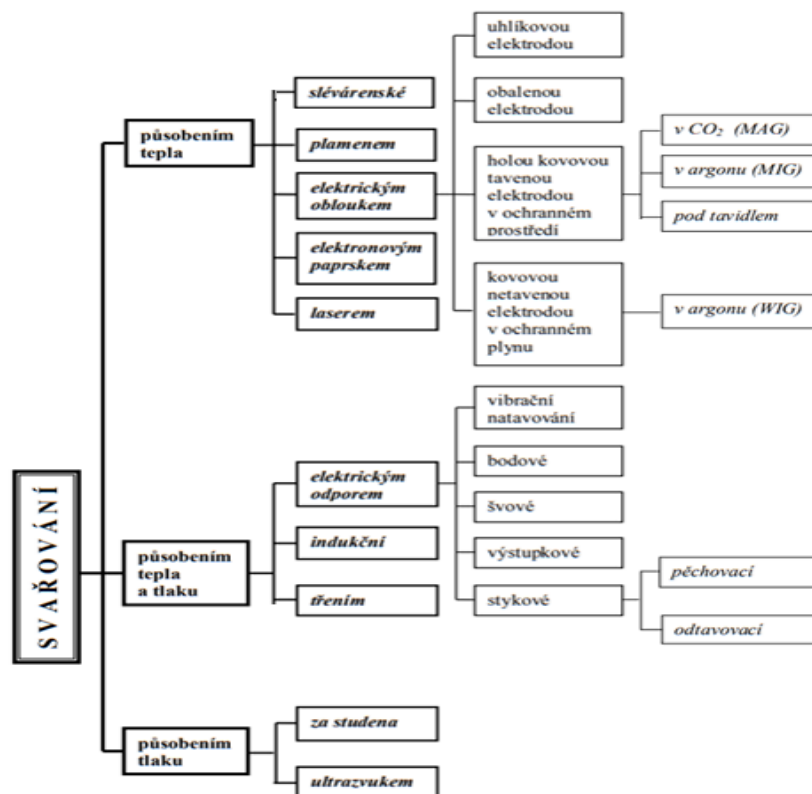
## 2 Technologie svařování

Protože metoda WAAM využívá základní techniky svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře, jako je metoda MIG/MAG nebo TIG, je nutné se s těmito procesy seznámit.

Svařování vytváří spoje mezi částmi strojů nebo celými konstrukcemi pomocí tepla, tlaku a v některých případech přidáním podobného materiálu k základnímu materiálu. Tato spojení jsou tvořena z jednoduchých tvarovaných součástí, primárně za použití tvářených kovových polotovary, jako jsou tyče, pásy, plechy, trubky a jiné profily, a příležitostně z výkovků nebo odlitků. Výsledné polotovary, běžně označované jako svařence nebo svary, jsou typicky podrobeny dalšímu zpracování, zejména obráběním. Výroba svařenců, zejména pro složité konstrukce a náročné materiály, může být náročná, ale často vede k efektivním řešením. Svařením více snadno vyrobitelných dílů se vytvoří větší a složitější celek, který zjednodušuje výrobní proces a přináší nákladově efektivní výsledky ve srovnání s alternativními přístupy. [9]

## 2.1 Přehled a rozdělení svařování

Na obr.7 je zobrazeno základní rozdělení metod svařování do hlavních skupin a jejich podskupin. Toto rozdělení pomáhá kategorizovat a pochopit různé metody svařování podle jejich charakteristik a aplikací. Hlavní skupiny zahrnují svařování za působením tepla (tavné metody svařování), tlaku a tepla a tlaku (tlakové metody svařování). Každá z těchto skupin se dále dělí na podskupiny, které reprezentují konkrétní techniky a postupy svařování.



Obrázek 7-Přehled a rozdělení svařování [9]

## 2.2 Tavné svařování

Při tavném svařování je spoj vytvořen zavedením tepelné energie do oblasti svařování, což způsobí roztavení základního materiálu příp. i přídavného materiálu. Kapalná fáze přilne k pevné fázi adhezivními silami a jak se roztavený kov ochlazuje a tuhne, slabá adheze se transformuje na chemickou vazbu ve formě krystalické mřížky. Během tohoto procesu se tvoří nová zrna a původní hranice mezi roztaveným kovem a pevnou fází mizí. Růst zrn probíhá ve směru opačném k rozptylu tepla a kolmo k

izotermám. Svařovaný kov se vyznačuje dendritickou krystalizací, kde velikost dendritů závisí na množství dodaného tepla na jednotku délky svaru. [10]

### **2.2.1 Metoda MAG**

Velké využití metody svařování MAG je způsobeno především její vysokou produktivitou, širokým výběrem přídavných materiálů, ochranných plynů, snadnou mechanizací, robotizací a širokou škálou dostupných svařovacích zařízení. Svařování metody MAG je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v aktivní ochranné atmosféře oxidu uhličitého nebo směsi oxidu uhličitého, argonu a kyslíku. Drát je dodáván prostřednictvím podávacích kladek umístěných buď v hořáku, podavači nebo kombinací obou. Svařovací proud je veden k drátu třecím kontaktem v ústí hořáku, což zajišťuje nejkratší elektricky zatíženou délku drátu. Svařuje se výhradně stejnosměrným proudem při kladné polaritě elektrody. Hluboký závar a úzký svar umožňuje svařovat plechy do tloušťky 12 [mm] bez úkosů. Pro svařování tenkých plechů – do tloušťky 3 [mm] je vhodné používat magnetické tavidlo, čímž je lépe stabilizován oblouk. Metoda MAG se používá ke svařování nelegovaných, nízkolegovaných i vysokolegovaných ocelí a k navařování ocelí. [9] [11]

### **2.2.2 Metoda MIG**

Metoda MIG je forma obloukového svařování, kdy se používá tavící se elektroda v inertní atmosféře pro ochranu. Od metody MAG se odlišuje pouze ve volbě jiného ochranného plynu, který nemá aktivní chemickou reakci se svařovací lázní. Typicky se používá argon, helium nebo jejich směsi jako ochranný plyn. Metoda MIG je ideální pro svařování vysoce legovaných ocelí a neželezných kovů, jako jsou hliník, měď nebo nikl. [9] [12]

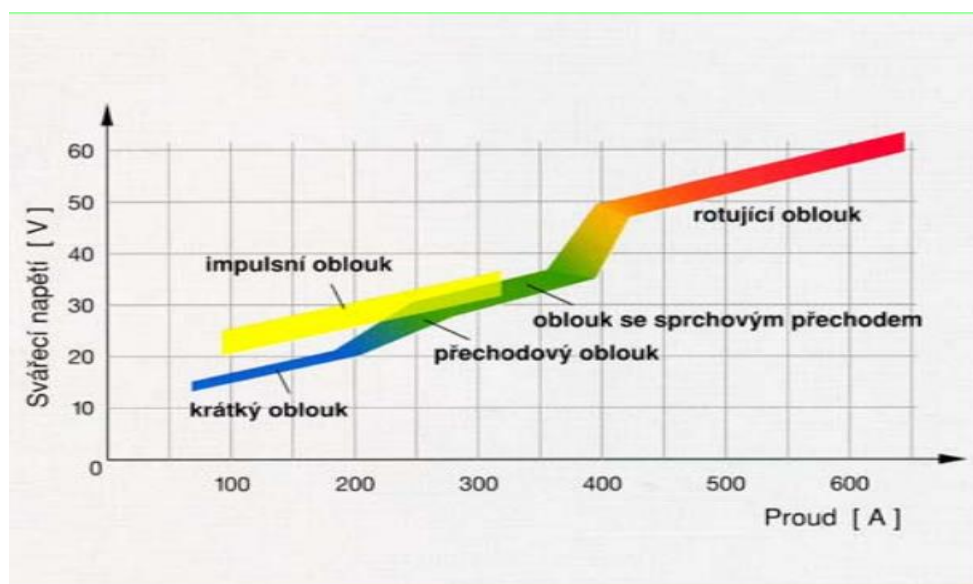
### **2.2.3 Metoda TIG**

Při svařování metodou TIG (Tungsten Inert Gas) hoří oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Pro ochranu elektrody a tavné lázně před okolní atmosférou se používá inertní plyn s vysokou čistotou, minimálně 99.995%. Tento plyn může být argon, helium nebo jejich směs. Hlavním důvodem použití inertního plynu je

ochrana wolframové elektrody a tavné lázně před účinky kyslíku, zejména při svařování vysoce reaktivních kovů. Svařování metodou TIG lze provádět s přídavným materiálem ve formě drátu buď manuálně nebo automaticky s použitím podavače drátu, který umožňuje konstantní nebo proměnnou rychlost podávání drátu v souladu s požadovaným postupem svařování. Obecně lze svařování TIG rozdělit podle druhu proudu. Svařování střídavým proudem se používá pro hliník, hořčík a jejich slitiny. Naopak, svařování stejnosměrným proudem se využívá při práci s prostředně a vysokolegovanou ocelí, mědí, niklem, molybdenem a dalšími kovy. Svařování uhlíkové oceli metodou TIG je méně běžné kvůli riziku vzniku pórů ve svaru a z ekonomických důvodů. Metoda TIG se také využívá pro spojování obtížně svařitelných materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku, jako jsou například titan a zirkon. [11]

#### 2.2.4 Přenos kovu při svařování metodou MIG/MAG

Způsob přenosu kovu v oblouku je klíčovým prvkem svařování a závisí především na nastaveném napětí a proudu (viz Obr. 8). Tento charakter přenosu je rovněž ovlivněn druhem použitého ochranného plynu, průměrem a druhem přídavného materiálu a také materiálem, který se bude svařovat. [13]



Obrázek 8-Základní typy přenosu svarového kovu [14]



Přenos kovu lze rozdělit na:

### **Krátký oblouk**

Je charakterizován nízkým výkonem, což znamená, že pracuje s malým napětím a nízkou rychlostí podávání drátu. Tento typ oblouku je vhodný pro svařování téměř ve všech polohách. Vytváří jen malé množství rozstříků, což umožňuje snadnou kontrolu nad svařovacím procesem. Krátký oblouk je ideální zejména pro svařování tenkých plechů a pro vytváření kořenových vrstev, což jsou první vrstvy svaru, které jsou vystaveny nejvyšším nárokům.[15]

### **Přechodový oblouk**

Dochází v něm k nepravidelnému střídání mezi zkraty a rozstříkovými přechody. Tato nestabilita vytváří zvýšenou tvorbu rozstříků, což není žádoucí, a proto se doporučuje se tomuto typu oblouku podle možností vyhnout. Tento typ oblouku není příliš kontrolovatelný a může mít nepřesné výsledky, což ztěžuje kvalitní svařování. Proto se snažíme volit jiné stabilnější typy oblouků, které umožňují lepší kontrolu nad svařovacím procesem a minimalizují tvorbu rozstříků. [15]

### **Sprchový oblouk**

Je oblouk, který hoří trvale a nepřerušovaně bez tvorby zkratu. Přídavný materiál je přenášen do svařovací lázně vysokou rychlostí ve formě drobných kapek. Tento oblouk generuje vysoký výkon tepla do svařence a způsobuje hluboký průvar. Díky těmto vlastnostem je obzvláště vhodný pro svařování silnějších plechů, kde je potřeba vysoce efektivního a silného svařového spoje. [15]

### **Pulzní oblouk**

Je speciální typ oblouku, který se řídí pulzy, aby se minimalizovaly nežádoucí zkraty. Díky této regulaci vzniká univerzálně použitelný oblouk s velmi malým rozstříkem. Pulzní oblouk umožňuje svařování různých druhů a tloušťek materiálů s vysokou kvalitou. Tento typ oblouku poskytuje vysokou flexibilitu a přesnost při svařování, což umožňuje dosahovat vynikajících výsledků nezávisle na druhu svařovaného materiálu. [15]

### **Rotující oblouk**

Je velmi účinná metoda svařování, která se vyznačuje vysokým přenosem tepla, což umožňuje svařování velmi silných svařenců. Při této metodě se kapka uvolněná z drátu

odklání do strany a vstupuje do tavné lázně s otáčivým pohybem. Tato technika se však používá pouze v mechanizované podobě, což omezuje její možnosti aplikace na určité oblasti a typy prací. [15]

### **2.2.5 Ochranné plyny**

Hlavním úkolem ochranných plynů je chránit oblast svařování, včetně elektrody, oblouku, tavné lázně, jejího okolí a kořene svaru, před účinky kyslíku. Kyslík může způsobit oxidaci, naplnění pórů a propálit prvky, což má negativní vliv na kvalitu svaru. Ochranné plyny také ovlivňují různé aspekty svařovacího procesu, jako je typ přenosu kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, chování tavné lázně, hloubka závaru, rychlost svařování a další parametry. [16]

Metoda MAG používá jako ochranné plyny především čistý oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) nebo směsi více komponentních plynů založených na argonu s přídavkem CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> nebo He. Při svařování metodou MIG se často využívá čistý argon nebo směsi argonu s heliem. Důležité je zajistit čistotu plynů a přesné míchání směsí, což je stanoveno normou EN 439. [16]

## **3 Přizpůsobení metod MIG/MAG procesu WAAM**

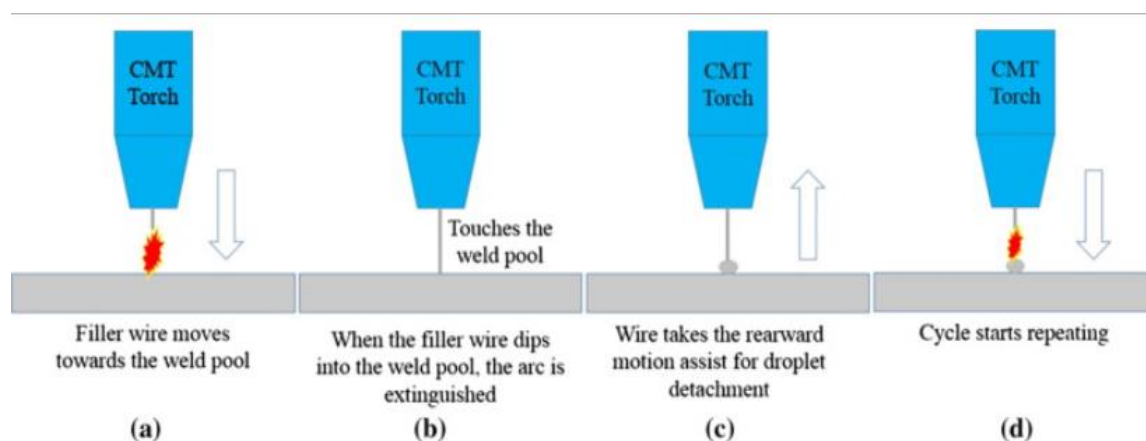
Proces Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) čelí výzvám souvisejícím s omezenou přesností a nadměrným přívodem tepla do vyrobeného materiálu. Akumulované teplo ovlivňuje kvalitu povrchu, mikrostrukturu a mechanické vlastnosti vyráběných součástí. Pro zvýšení stability procesu, kvality a přesnosti vyráběných dílů se vyvíjejí různé modifikované procesy obloukového svařování a používají se pro metodu WAAM. [6]

### **3.1 CMT-Cold Metal Transfer**

Jak již bylo zmíněno dříve, nejběžněji používané metody pro výrobu WAAM zahrnují obloukové svařování v ochranné atmosféře, jako je metoda MIG/MAG. Rychlost navařování pro WAAM může být poměrně vysoká, při použití metody MIG/MAG může dosáhnout několika kilogramů za hodinu. Nevýhoda metody MIG/MAG však spočívá v její nižší stabilitě oblouku a rozstříkávání při nanášení návaru, což může vést ke zvýšené

pórovitosti. Tyto problémy lze zmírnit použitím upravených modifikací metody MIG/MAG, které snižují tepelný příkon a vykazují charakter bez rozstříkového navařování, jako je metoda Cold Metal Transfer (CMT) vyvinutá společností Fronius. Výzkumné práce jasně ukazuje, že CMT a podobné modifikace nabízejí několik výhod při aplikaci pro WAAM. Mezi tyto výhody patří vysoce kvalitní a bez rozstříkové nanášení návarů, nízký tepelný příkon, vynikající reprodukovatelnost, vysoký navařovací výkon a možnost vytvářet menší tloušťky stěn a jemnější mikrostruktury. Využití modifikovaných metod, jako jsou např. CMT, Cold Metal Transfer + Pulse (CMT+P) a Cold Metal Transfer + Cycle Step (CMT+CS) ve WAAM (podrobněji vysvětleno a popsáno v kapitole 3.2 a v kapitole 3.3), překonává výzvy, které představuje tradiční svařování MIG/MAG, umožňuje zlepšit kvalitu návaru, snížit vady a zvýšit efektivitu procesu. [1] [17]

Technika CMT pracuje díky synchronizovanému pohybu drátu, což umožňuje přesné řízení přívodu tepla do svařovaných plechů. Proces funguje tak, že během každé fáze zkratu se přeruší napájení, reguluje se zatažení drátu, což má za následek zcela bez rozstříkový provoz s nízkým tepelným příkonem. Svařovací hořák používaný v CMT řídí pohyb přídatného drátu s průměrnou frekvencí až 70 Hz. Princip navařování CMT, je znázorněn na obrázku 12. Na obrázku 12(a) vidíme, jak se roztavený přídatný drát pohybuje směrem ke společné lázni. Na obrázku 12(b) je výplňový drát ponořen do svarové lázně a oblouk se uhasí. Během této fáze, jak je znázorněno na obrázku 12(c), je pohyb drátu opačný, což způsobí oddělení kapky při zachování nízkého proudu souvisejícího se zkratem. Následně, jak je znázorněno na obrázku 12(d), se výplňový drát pohybuje dopředu a celý cyklus se opakuje. [17]



Obrázek 9-Princip metody CMT [17]

CMT svařování je běžně automatizováno pomocí robotických systémů. V tomto procesu robot detekuje zkrat a vyšle signál k zatažení PM, což umožní spoji vychladnout, než se usadí další kapka. Výsledkem jsou jednotné a zlepšené spoje ve srovnání se spoji vytvořenými pomocí tradičních svařovacích technik. Významnou výhodou CMT je jeho schopnost svařovat i tenké plechy, které jsou konvenčními metodami náchylné k deformaci a propálení. CMT svařování je všestranné a vhodné jak pro silnější profily, tak pro tenčí plechy (<9 mm), což vede k významným úsporám nákladů ve srovnání s konvenčními přístupy. Počítačově řízený systém svařování CMT zajišťuje vysokou přesnost a preciznost, který vytváří prostředí bez rozstříku s minimální struskou, což má za následek hladký povrch spoje. [17]

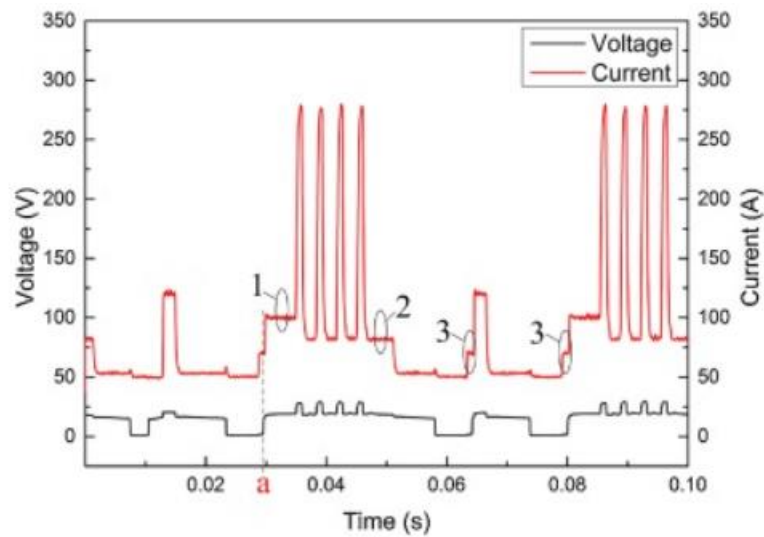
### **3.2 CMT+P-Cold Metal Transfer + Pulse**

Proces CMT zásadně proměnil oblast svařování. Mezi jeho přednosti patří minimální příkon tepla, extrémně stabilní regulace oblouku, přesné uvolňování kapek, zamezení rozstříku, spojování tenkých a povlakovaných plechů, různých kovů a materiál větší tloušťky, jak bylo uvedeno výše. Díky procesu CMT+P neboli Cold Metal Transfer v kombinaci s pulzním obloukem je inovativní svařovací technika, která kombinuje dva režimy přenosu spojení pulzních cyklů s cykly CMT, což má za následek, že se procesní okno (tzn. energetická oblast výkonu), opět rozšířilo směrem nahoru. Tento svařovací proces dává svářeči k dispozici energetický prostor mezi CMT a pulzním obloukem v jakékoliv požadované velikosti. K tomu přistupuje zvýšená stabilita procesu i při „čistém“ pulzním oblouku díky výhodám řídicí techniky postupu CMT. Během procesu navařování CMT + P se v každém cyklu oddělí další kapka, což vede k vyšším rychlostem odtavování. Svařovací cyklus lze podrobně popsat takto (viz. Obr. 11): [17] [18]

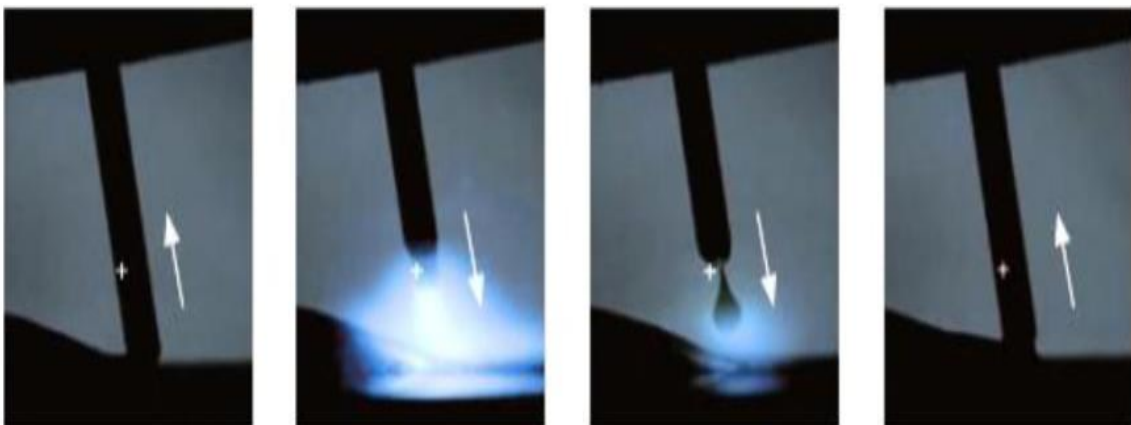
- 1) V době pulzní špičky proud i napětí rychle klesají na své maximální hodnoty a poté na nich zůstávají. V důsledku vysokého pulzního proudu se vytvoří malá roztavená kapka. [30]
- 2) Během základní doby impulzu proud i napětí klesají. Kapka je zahřívána trvalým přívodem tepla, což podporuje přenos kapky do svarové lázně. [30]
- 3) Ve fázi oblouku procesu CMT má doba špičky vyšší proud než doba základny. Během této fáze se svařovací oblouk snadno vznítí a na špičce drátu

se vytvoří kapka. Během základní doby kapka pomalu roste s nižším proudem až do začátku fáze S/C, aby se zajistil přenos CMT zkratem, nikoliv kapkovitý přenos. [30]

- 4) Ve fázi S/C dosáhne kapka svarové lázně. Napětí je nulové a proud dosahuje minima. Současně se iniciuje zkratový přenos. Po přenosu kapky do svarové lázně se oblouk znovu zapálí a cyklus svařování se opakuje. [30]



Obrázek 10-Průběhy proudu a napětí pro metodu CMT +P [30]



Obrázek 11-Schematické znázornění svařovací techniky CMT + P [17]

### 3.3 CMT+CS – Cold Metal Transfer + Cycle Step

Proces Cold Metal Transfer“ (CMT) s názvem Cycle Step je také založen na procesu MIG/MAG CMT, který je znám svým nízkým tepelným příkonem, jak je uvedeno výše. Během tavení svařovacího drátu usnadňuje digitální regulace procesu oddělování kapek pohybem drátu dopředu. Přejít kapky do roztavené lázně způsobí zkrat, při kterém se drát stáhne. Oblouk se poté znovu zapálí a začne nový svařovací cyklus. Proces Cycle Step má možnost tyto cykly jemně ovládat. Může zde být definován přesný počet kapek na svařovaný bod a dobu pauzy mezi cykly, což umožňuje vytvoření svarových bodů v libovolné požadované velikosti a přesné reprodukovatelnosti. Tento proces poskytuje minimální přívod tepla a vynikající kontrolu procesu, díky čemuž je vhodný i pro velmi tenké plechy a užitečný při svařování/navarování ve vynucených polohách tolerancemi mezery. Definované svařovací cykly zajišťují vizuálně bezchybné svary s výrazným vzhledem housenky, bez přebytku materiálu nebo rozstříků (viz. Obr.12). Cycle Step je ideálním řešením pro vysoce kvalitní viditelné svary, umožňuje svařování malých upevňovacích bodů a slouží jako alternativa k bodovému svařování. Může být dokonce použit pro jemné svařování a nachází uplatnění v aditivní výrobě. [19]



*Obrázek 12-Ukázka svaru procesu CMT+CS [20]*

Pro praktickou část DP budou použity všechny více zmíněné modifikace metod svařování MIG/MAG a to modifikace CMT, CMT+P a CMT+CS.

## 4 Materiály používané v procesu WAAM

Různé slitiny materiálů v podobě cívek svařovaných drátů jsou snadno dostupné a běžně používané ve svařovacím průmyslu, ale mohou také sloužit jako vstupní materiály pro proces WAAM, což je jedna z jeho zásadních výhod oproti běžnému 3D tisku (ve formě prášku). Pro zajištění bezchybných a spolehlivých dílů je zásadní důkladná znalost dostupných procesů, jejich klíčových konceptů, proměnných řízení procesu a vstupních materiálů. Tabulka 1 uvádí některé často používané slitiny a jejich aplikace použitelné pro metodu WAAM. [21]

Tabulka 1- Kovy s jejich oblastmi použití s využitím WAAM [21]

Aplikace	Slitiny			
	Ti	Al	Ocel	Ni
Letecký průmysl			-	
Automobilový průmysl	-			-
Armádní průmysl		-		-
Odolnost proti korozi		-	-	
Vysoké teploty		-	--	
Nářadí a formy	-	-		-

### 4.1 Slitiny Titanu

Titanové slitiny jsou oblíbené pro svůj vysoký poměr pevnosti k měřené hmotnosti, ale jsou drahé a náročné na obrábění. Proces WAAM pro slitiny titanu vykazuje rychlosti nanášení v rozmezí od 0,75 do 2 kg/hod. V důsledku toho jsou nanesené vrstvy husté, což eliminuje potřebu dalších procesů a velikost součásti je omezena pouze dosahem robota. Titanová slitina Ti-6Al-4V nanesená pomocí WAAM vykazuje zlepšené vlastnosti odolnosti proti poškození, zejména při velkém cyklickém zatížení. Je však třeba poznamenat, že slitiny titanu vykazují silnou anizotropii, pokud jde o tažnost a pevnost v tahu. Tato anizotropie je přisuzována deformacím vzniklým v součásti v důsledku procesu nanášení. Navzdory tomu vykazuje součást získaná pomocí WAAM vynikající vlastnosti ve srovnání s konvenčními metodami. Při zpracování titanu je nezbytné věnovat pečlivou pozornost na ochranu svarové lázně a ohřátých částí proti oxidaci. Této ochrany se běžně dosahuje použitím ochranné atmosféry složené z inertních plynů. [21]

## 4.2 Slitiny na bázi niklu

Slitiny na bázi niklu jsou rozsáhle studovány a používány v aditivní výrobě (AM) díky své schopnosti udržovat vysokou pevnost při zvýšených teplotách. Mezi těmito materiály jsou Inconel 718 a Inconel 625 obzvláště oblíbené v rámci techniky WAAM, protože nabízejí nákladově efektivní výrobu ve srovnání s tradičními metodami. Inconel 718 vyrobený WAAM vykazuje mikrostrukturu s velkými sloupcovými zrny a dendritickými hranicemi. Mechanické vlastnosti jako je mez kluzu, mez pevnosti v tahu a prodloužení, jsou srovnatelné s díly vyrobenými tvářením nebo litím. [21]

## 4.3 Korozivzdorné oceli

Schopnost dílů vyráběných z korozivzdorných ocelí procesem WAAM nese dobré mechanické vlastnosti a mikrostrukturu. Nejčastěji jsou používány korozivzdorné austenitické oceli, ale při svařování nebo nanášení lze pozorovat kombinaci austenitu a feritu. Fázový podíl korozivzdorné oceli je ovlivněn tepelným cyklem a chemickým složením. Správný výběr procesních parametrů je nezbytný pro dosažení vyvážené mikrostruktury oceli. [21]

## 4.4 Slitiny Hliníku

Hliník je stříbrošedý kov s vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí. Je vysoce tvárný a snadno recyklovatelný. Teplota, při které čistý hliník taje, činí 658 °C. V porovnání s jinými technickými kovy jsou mechanické vlastnosti hliníku relativně nízké, přičemž jeho pevnost v tahu je kolem 70 N·mm<sup>-2</sup>. Z tohoto důvodu se čistý hliník v oblasti strojírenství a pro konstrukční účely využívá jen zřídka. Aby se zvýšily mechanické vlastnosti hliníku, lze jej legovat nebo podrobit mikrolegování. Tepelné zpracování také může přispět ke zlepšení vlastností. Mikrolegovací příměsi, jako například beryllium (Be) nebo bor (B), se používají k posílení materiálu. Kromě toho se jako legovací příměsi hojně využívají měď (Cu), hořčík (Mg), křemík (Si), zinek (Zn) a mangan (Mn), které přinášejí zlepšení mechanických vlastností. Nicméně tato zlepšení jsou obvykle provázena určitým ústupem v oblasti chemické stability materiálu. [32]



Díky ochranné vrstvě oxidu vytvořeného na jeho povrchu vykazuje hliník dobrou odolnost proti korozi, ale na druhou stranu je to zásadní problém při jeho zpracování svařováním, protože oxid  $Al_2O_3$  má rozdílné fyzikální a chemické vlastnosti než čistý Al (více o nevýhodách svařování hliníku v následující kapitole).[21]

V praxi se obvykle ke svařování hliníku preferuje MIG svařování ve větším rozsahu než TIG. Při tomto způsobu svařování metodou MIG se používá stejnosměrný proud a elektroda je kladně polarizovaná. Naopak u TIG svařování se pracuje se střídavým nebo stejnosměrným proudem, přičemž elektroda je negativně polarizovaná. Pro konvenční MIG svařování se často volí dílce s tloušťkou mezi 3 a 50 mm, zatímco TIG svařování je vhodné pro tloušťky v rozmezí 0,5 až 6 mm (a v některých případech až 10 mm). MIG svařování obecně umožňuje dosáhnout vyšší svařovací rychlosti než metoda TIG, a to až dvou až třikrát. Oba způsoby svařování lze automatizovat, a proto je možné je provádět pomocí svařovacích robotů.

Kromě uvedených způsobů existuje také celá řada modifikovaných postupů. V poslední době se stále častěji využívá impulsní oblouk při MIG svařování jako je tomu tak u modifikační metody MIG proces CMT+P. [22]

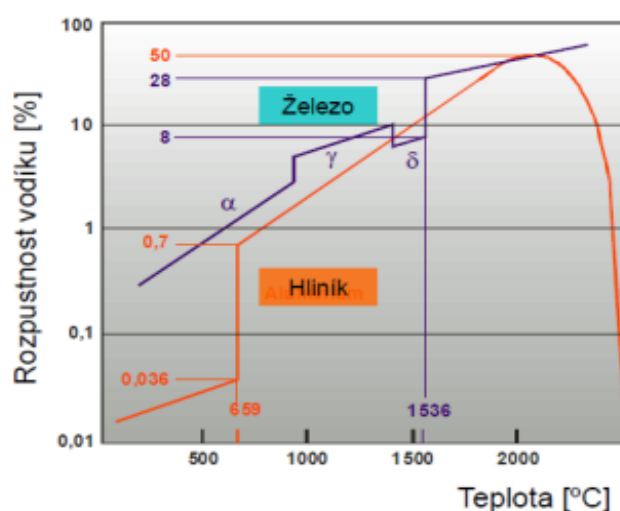
#### **4.4.1 Nevýhody svařování hliníku**

Hliník má výraznou tendenci k reakci s kyslíkem, což vede k vytvoření tenké oxidické vrstvy známé jako  $Al_2O_3$ . Tato vrstva má obvykle tloušťku kolem 0,01  $\mu m$ . Nicméně za vyšších teplot a v přítomnosti vlhkosti může tato vrstva na vzduchu zesílit na tloušťku 0,03 až 0,1  $\mu m$ . Oxidická vrstva má sice ochrannou funkci, která brání další oxidaci materiálu, ale současně má charakteristiky, které negativně ovlivňují proces svařování. Její vysoká teplotní stabilita (tavení  $Al_2O_3$  nastává při teplotě 2054 °C) v porovnání s hliníkem a neschopnost rozpustit se ve tavenině znamená, že tato vrstva zůstává prakticky netavená při svařování a musí být odstraněna ze svarového místa před i během procesu svařování. [22]

Oxid  $Al_2O_3$  je elektricky nevodivý, což způsobuje potíže při nastavování správných svařovacích parametrů při obloukovém svařování. Jeho větší hustota ve srovnání se základním materiálem znamená, že případné zbytky oxidu se mohou při svařování propadat do svarové lázně. [22]

Oxidická vrstva je také velmi schopná absorbovat vlhkost z okolí, což může vést ke zvýšenému vytváření pórů během svařování. Proto se před svařováním provádí odstranění oxidické vrstvy, a to buď mechanickým způsobem (často kartáčováním s kartáči z korozivzdorné oceli) nebo chemicky (například mořením). Je však třeba mít na paměti, že nová oxidická vrstva se začne vytvářet ihned po odstranění, a proto je vhodné vrstvu odstraňovat i během samotného svařování. Během svařování lze oxidickou vrstvu odstranit také pomocí chemických tavidel nebo pomocí čistícího účinku elektrického oblouku v ochranném plynu, například argonu. [22]

Vysoká tepelná vodivost hliníku má za následek efektivní odvod tepla při navařování. U malých dílů, které nedokážou účinně přenášet teplo do okolí, je však nutné chlazení dílu (částečné nebo úplné). Vysoká teplota představuje problémy, protože může vést k rozpuštění zpevňovacích fází v tepelně ovlivněné oblasti po navaření. Hliník a jeho slitiny mají mnohem vyšší rozpustnost vodíku než železo, kdy tato vlastnost se mění s rostoucím obsahem nečistot a s rostoucí teplotou s teplotou (viz Obr. 13). Proto je důležité přijmout opatření během navařování, aby se minimalizovala absorpce vodíku. Pokud by nedošlo k řádné kontrole a minimalizaci vstřebání vodíku, mohly by vzniknout póry v součásti. [23]



Obrázek 13-Závislost rozpustnosti H<sub>2</sub> v Al v závislosti na teplotě (a porovnání s rozpustností v Fe) [22]

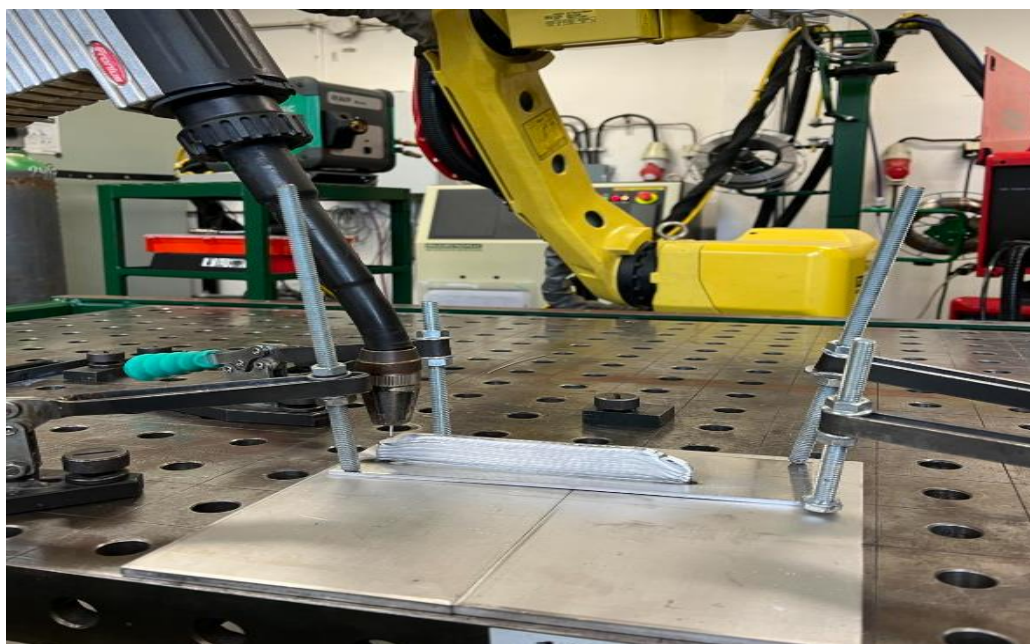
Další běžnou vadou při navařování hliníku je praskání za tepla. Praskání za tepla jsou výsledkem snížené schopnosti deformace zrn a snížené soudržnosti na hranicích zrn během tuhnutí. Přítomnost legujících prvků významně ovlivňuje vznik trhlin za tepla, takže technika navařování, rychlost a příprava povrchu jsou zásadní pro zamezení vzniku takových defektů. [24]

## 5 Experimentální část

V části experimentální části diplomové práce zkoumá, jak aditivní proces WAAM ovlivňuje kvalitu navařených hliníkových návarů. Hlavním cílem experimentu je kombinovat metodu WAAM s modifikacemi svařovacího procesu CMT, konkrétně CMT, CMT+P a CMT+CS. Tyto různé metody byly následně porovnány na základě tvaru a geometrie navařených stěn, makrostruktury a mikrostruktury (včetně obsahu vodíku a míry porézности). Pro tento účel bylo vytvořeno tři vzorky (stěny), kdy každá byla navařena jednou z uvedených metod.

Optimální parametry navařování pro každou z metod byly určeny na základě předchozích experimentů realizovaných na ÚTS. Vzorky byly vytvořeny z hliníkového plechu AlMg4,5Mn0,7 o tloušťce 4 mm a rozměrech 100 x 200 mm. Jako přídavný materiál byl použit drát o průměru 1,2 mm, konkrétně drát ESAB OK Autrod 5087 (AlMg4,5MnZr), což je podrobněji popsáno v kapitole 5.2.1.

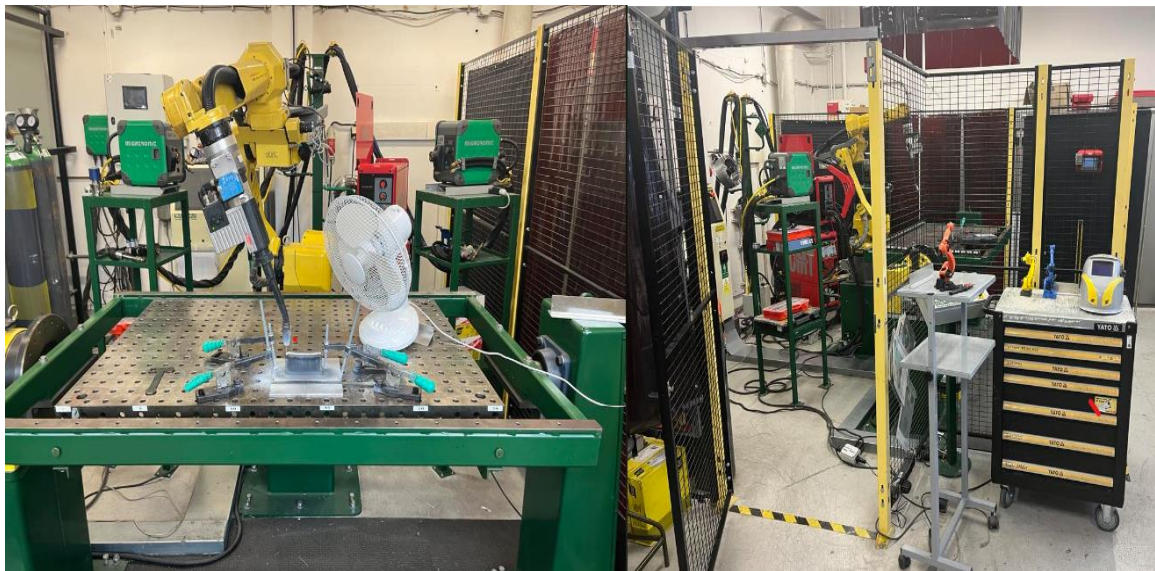
Pro upevnění základního materiálu bylo využito jednoosého polohovadla součástí robotického pracoviště, a to pomocí čtyř svorek umístěných v rozích základního materiálu (viz obrázek 14). Dráha robota byla naprogramována tak, aby navařovala podle předem stanovených trajektorií. Pro ochranu vytvářených svarů a přídavného materiálu byl použit Argon X 50S podle normy EN ISO 14175.



*Obrázek 14- Ukotvení základové desky na jednoosém polohovadle pomocí rychloupínek*

## 5.1 Popis pracoviště

Experiment byl realizován na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze, v laboratoři výuky svařovacích technologií (LVST). Laboratoř je vybavena svařovacími zařízeními, včetně specializovaného robotického pracoviště pro obloukové svařování a navařování. Součástí pracoviště je univerzální 6osý robot FANUC ArcMate 100iC s maximálním dosahem ramene 1420 mm, řízený jednotkou R-J3iC, a jednoosé polohovadlo FANUC P250 (viz Obr. 14). Pro experiment byla použita metoda svařování MIG se svařovacím zdrojem Fronius TransPuls Synergic 3200 CMT. Jako ochranný plyn byl použit Argon (čistota 99,996 %) splňující požadavky EN ISO 14 175. Pracoviště je také vybaveno plynovými lahvemi, podavači drátu a zásobníky svařovacího drátu. V laboratoři je instalován centrální odsávací systém, který odstraňuje škodlivé výpary vznikající při navařování. Bezpečnostní prvky, jako jsou světelná závora a dveřní spínač, jsou instalovány kolem pracovní stanice robota pro další bezpečnostní opatření.



*Obrázek 15-Robotizované pracoviště v laboratoři Fakulty strojní ČVUT v Praze*

### 5.1.1 Univerzální 6osý robot FANUC ArcMate 100iC

Robot FANUC ARC Mate 100ic je navržen tak, aby pokryl pohybový rozsah 1,4 m až 2,0 m, díky čemuž je adaptabilní pro širokou škálu aplikací. Klíčové komponenty, jako je motor, reduktor a ovladač, jsou standardizovány u všech modelů ARC Mate 100/C, což zjednodušuje dostupnost náhradních dílů. Je pozoruhodné, že tento robot dokáže umístit špičku drátu hladce a bez vibrací, a to i při rychloposuvu. Jeho kombinace vysokorychlostního a vysoce přesného pohybu zvyšuje celkovou produktivitu systému. Technické specifikace (viz Tab. 2) [25]

Tabulka 2-Tehnické parametry FANUC Robot ARC Mate 100iC [25]

Model		ARC Mate 100+C/12
Řízené osy		6 os (J1, J2, J3, J4, J5, J6)
Dosah		1420 mm
Rozsah pohybu (maximální rychlost)	Osa J1	340° / 360° (230°/s) 5,93 rad / 6,28 rad (4,01 rads/s)
	Osa J2	250° (225°/s) 4,36 rad (3,93 rad/s)
	Osa J3	445° (230°/s) 7,76 rad (4,01rad/s)
	Osa J4	380° (430°/s) 6,63 rad (7,50 rad/s)
	Osa J5	380° (430°/s) 6,63 rad (7,50 rad/s)
	Osa 6	720° (630°/s) 12,57 rad (11,0 rad/s)
Max. nosnost		12 kg
Přípustný zatěžovací moment	Osa J4	22,0 N.m
	Osa J5	22,0 N.m
	Osa J6	9,8 N.m
Přípustná setrvačnost zatížení	Osa J4	0,65 kg.m <sup>2</sup>
	Osa J5	0,65 kg.m <sup>2</sup>
	Osa J6	0,17 kg.m <sup>2</sup>
Hmotnost		130 kg

### 5.1.2 Svařovací zdroj TransPuls Synergic 3200 CMT

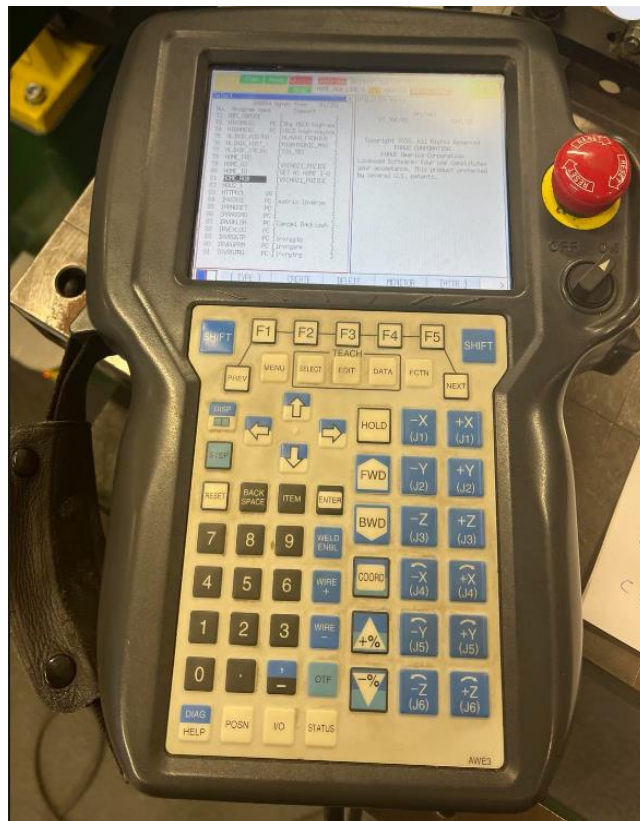
Zařízení TransPuls Synergic 3200 CMT pro krátký, sprchový a impulzní oblouk je zcela digitalizovaný a mikroprocesorem řízený svařovací zdroj MIG/MAG o výkonu 320 A. Zdroj umožňuje v každém ohledu optimální vlastnosti svařování a svařovací výsledky, které lze libovolně často reprodukovat. Díky své schopnosti multiprocesního provozu se tento svařovací zdroj hodí i pro svařování MIG/MAG, TIG a svařování obalenou elektrodou v manuálním i robotizovaném provozu. Pohyb drátu je začleněn do procesního řízení, díky tomu je teplo přiváděno pouze krátkou dobu, přenos materiálu probíhá téměř bez proudu. V tabulce 3 jsou zobrazeny technické parametry zdroje [26]

Tabulka 3-Technické parametry svařovacího zdroje TransPuls Synergic 3200 CMT [26]

Svařovací proud maximální	320 A
Svařovací proud minimální	3 A
Dovolené zatížení [10min/40°C] 40%	320A
Dovolené zatížení [10min/40°C] 60%	260 A
Dovolené zatížení [10min/40°C] 100%	220 A
Rozsah pracovního napětí	14,2 – 30,0 V
Napětí naprázdno	65 V
Síťová frekvence	50 – 60 Hz
Síťové napětí	3 x 400 V
Síťové jištění	35 A
Rozměr / šířka	290 mm
Rozměr / délka	625 mm
Váha	34,6 kg
Krytí	IP23

## 5.2 Tvorba Vzorků

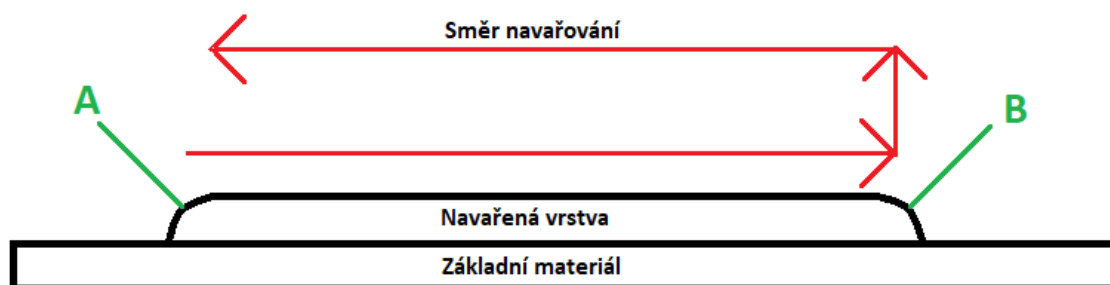
WAAM je nepřetržitý proces robotického navařování, tudíž byl vytvořen program robota s nepřetržitou smyčkou tvorby návaru, pomocí ručního teachpendantu, který hlídal počet cyklů a výšku každého návaru (vytvořených postupně „na sebe“) z předešlého cyklu (viz Obr. 16). Dráha robota byla u všech vzorků stejná. K realizaci experimentu byl vybrán jednoduchý tvar vzorků, tvořený lineárními návarovými housenkami (viz Obr. 22) na podkladovou desku o rozměrech 100 x 200 mm a tloušťce 4 mm.



Obrázek 16- ručního teachpendantu

Dráha robota se během vytváření všech vzorků neměnila. Základní pohyb byl navržen tak, aby umožnil robotu rychle přesunout svařovací hořák do výchozího bodu navařování (viz Obr. 17 bod A). Poté se hořák přiblížil k základnímu materiálu a zapálil elektrický oblouk. Po zapálení oblouku se hořák pohyboval po přímce pracovní rychlostí do vzdálenosti 115 cm. Po dokončení této vzdálenosti (viz Obr. 17 bod B) se elektrický oblouk vypnul. Poté se čekalo 120 sekund, aby se vzorek (respektive část navařené stěny) dostatečně schladil a nedocházelo k deformaci a borcení stěny. Aby bylo zefektivněno chlazení, byl nainstalován na polohovací stůl větrák (viz Obr. 15). Po uplynutí 120 sekund

se svařovací hořák posunul o jednu tloušťku vrstvy nahoru směrem v ose Z od základního materiálu a elektrický oblouk byl znovu zapálen. Hořák se začal pohybovat směrem zpět do bodu A. Po ujeté vzdálenosti hořáku se elektrický oblouk vypl a čekalo se 120 sekund. Tento celý cyklus se opakoval pro další vrstvy stejným způsobem. Celá stěna se skládala z 24 návarových housenek u všech tří vzorků.



Obrázek 17-Směr navařování

Před tvorbou stěny byly na zdroji FRONIUS TransPlus Synergie 3200 CMT přes jednotku dálkové ovládaní RCU 5000i nastaveny základní procesní parametry navařování. Pro každý proces bylo mírně odlišné nastavení (viz Tab. 4), tak aby kvalita výsledných návarů byla co nejvyšší (parametry byly převzaty z předchozích experimentů realizovaných na ÚTS). Byl nastaven svařovací proud, svařovací napětí, svařovací rychlost a rychlost posuvu drátu.

Tabulka 4-Základní parametry svařování

Režim	Svařovací proud (A)	Svařovací napětí (V)	Rychlost navařování (cm/min)	Rychlost posuvu drátu (m/min)
CMT	85	12,6	40	5,0
CMT+P	86	16,7	40	4,3
CMT+CS	80	11,3	40	5,5



### 5.2.1 Podkladový a přídavný materiál

Jako přídavný materiál byl použit svařovací drát (primárně určený pro MIG svařování) o průměru 1,2 mm ESAB OK Autrod 5087 (AlMg4,5MnZr). Tento drát je určen pro svařování hliníkových slitin s obsahem hořčíku do 5 % a slitin s požadavkem na vyšší pevnost. Legování zirkoniem (Zr) zlepšuje odolnost proti trhlinám za tepla při tuhnutí svarového kovu. Tento typ svařovacího drátu je vhodný například pro svařování slitiny AlMg5, AlMg4,5Mn, AlMgSi1 a jiných. Chemické složení svařovacího drátu je uvedeno v Tab. 5. [27]

Tabulka 5- Obsah hlavních legujících prvků OK Autrod 5087 [27]

Mn	Si	Al	Mg	Zn	Zr
0,8	<0,25	zbytek	4,7	0,2	0,15

Dalšími důležitými charakteristikami svařovacího drátu jsou i mechanické vlastnosti po navaření, které jsou uvedeny v Tab. 6.

Tabulka 6- Mechanické vlastnosti po navaření OK Autrod 5087 [27]

Rm (MPa)	Re (MPa)	As (%)	KV (J)
280	130	30	35 (20 °C)

Jako základní materiál (v tomto případě podkladový plech, na nějž se vytváří návar) byl použit plech EN AW 5083 (AlMg4,5Mn0,7) o tloušťce 4 mm a rozměrech 100 x 200 mm. Tento materiál je vysoce odolný jak vůči mořské vodě, tak i proti průmyslovým chemickým prostředím. Slitina 5083 si také zachovává mimořádnou pevnost po svařování. Má nejvyšší pevnost slitin, které nejsou tepelně zpracovatelné (tzn. nevytvrditelné), ale nedoporučuje se pro použití při teplotách nad 65 °C. Tento typ plechu využívá uplatnění v široké škále průmyslových odvětví, jako jsou výroba součástek pro hydraulické systémy,

lodě a letadla. Chemické složení a mechanické vlastnosti ZM jsou uvedeny v Tab. 6 a Tab. 7. [28]

*Tabulka 7-Chemické složení EN AW 5083 [28]*

<b>Fe</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ti</b>	<b>Cu</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Al</b>
<b>&lt;0,40</b>	<b>&lt;0,40</b>	<b>0,40-1</b>	<b>0.05-0,25</b>	<b>&lt;0,15</b>	<b>&lt;0,10</b>	<b>4-4,90</b>	<b>&lt;0,25</b>	<b>zbytek</b>

*Tabulka 8-Mechanické vlastnosti EN AW 5083 [28]*

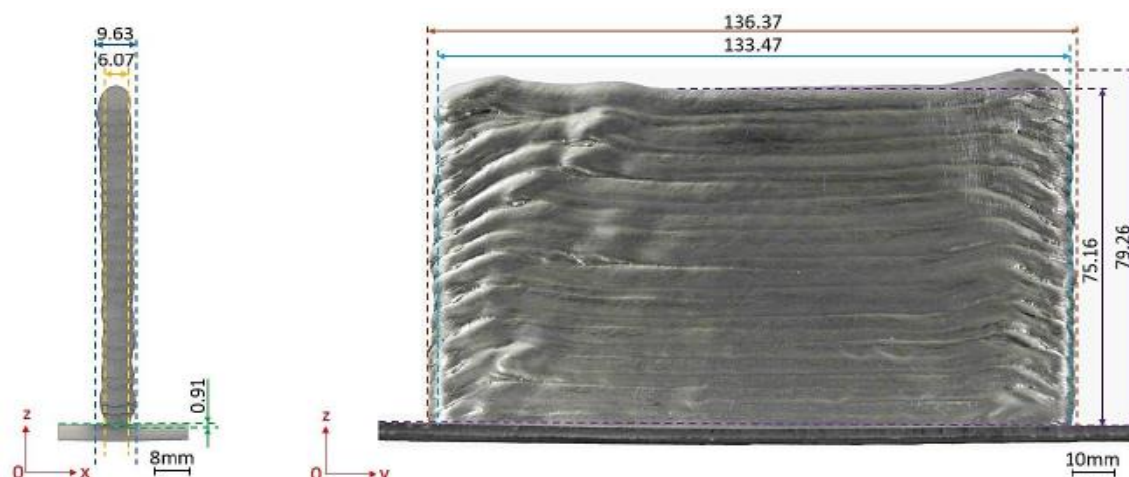
<b>Rm (MPa)</b>	<b>Re (MPa)</b>	<b>As (%)</b>	<b>Tvrđost (HBS)</b>
<b>Min. 275</b>	<b>-</b>	<b>15</b>	<b>75</b>

### **5.3 Vyhodnocení geometrického tvaru vzorků**

Posouzení geometrických parametrů součástí se obvykle opírá o parametry, jako je tloušťka stěny, velikost stěny a vlnitost povrchu. Tyto parametry jsou ovlivněny různým nastavením procesu, včetně rychlosti podávání drátu, průměru drátu a rychlosti svařování. Prvním krokem bylo vyfocení kompletních vzorků (návarů stěn) a následné vyhotovení metalografických výbrusů. Jedná se tedy o destruktivní způsob vyhodnocení, jelikož pro metalografický výbrus se musí udělat příčný řez vzorkem.

V následujících podkapitolách budou ukázány vzorky, které byly úspěšně vytvořeny v rámci této práce. Tyto vzorky budou podrobně analyzovány a budou zahrnovat také naměřené geometrické charakteristiky, které poskytnou důležité informace.

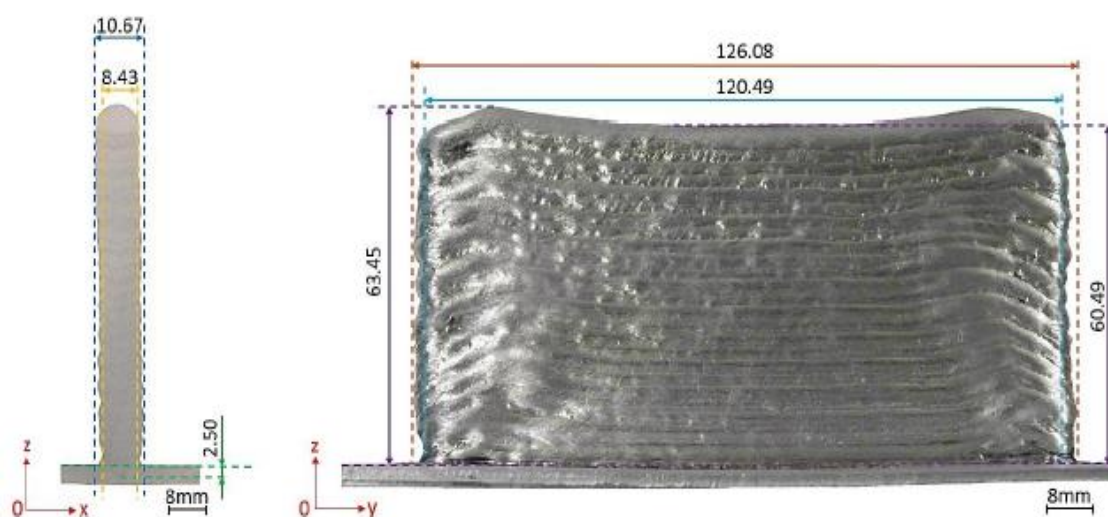
### 5.3.1 Vzorek č.1 – metoda CMT



Obrázek 18- Geometrické charakteristiky vzorku stěny, vytvořeného metodou CMT

Vzorek číslo 1 (viz Obr. 18), vytvořený metodou CMT, vykazuje rostoucí výšku nanesené vrstvy na pravé straně stěny, která dosahuje maximální hodnoty 79,3 mm. Nejnižší bod na stěně se nachází ve druhé třetině vzorku, měří 75,2 mm. Z délkového pohledu měřila stěna 136,4 mm, přičemž délka první uložené housenky byla 133,47 mm. Navíc je patrné roztékání jednotlivých vrstev v horní části na levé straně stěny. Celková šířka stěny byla 9,6 mm. Šířka první nanesené vrstvy byla 6,1 mm.

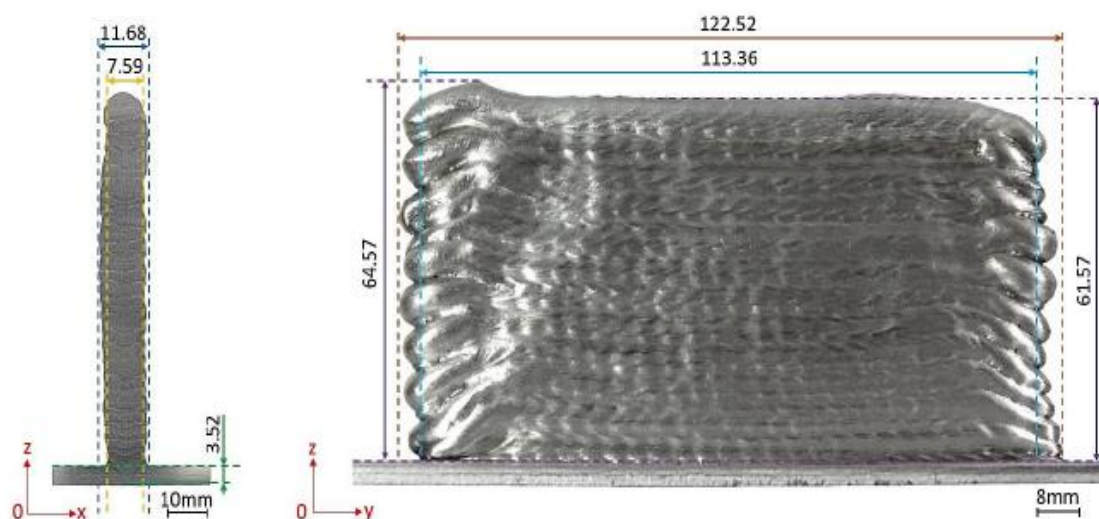
### 5.3.2 Vzorek č.2 – metoda CMT+P



Obrázek 19- Geometrické charakteristiky vzorku stěny, vytvořeného metodou CMT

Vzorek č. 2 (viz Obr. 19) byl vytvořen metodou CMT+CS. Z geometrických charakteristik vzorku číslo 2 je na první pohled patrné, že uprostřed stěny je prohlubeň (a to o velikosti 60,5 mm), přičemž okraje vykazují opačný směr. Nejvyšší bod na stěně návaru se nachází na levé straně, měří 63,4 mm. Délka stěny je 126,1 mm, přičemž první housenka je dlouhá 120,4 mm. Oproti metodě CMT je šířka stěny větší, měří 10,7 mm. Šířka první nanesené vrstvy je 8,4 mm.

### 5.3.3 Vzorek č.3 – Metoda CMT + CS



Obrázek 20- Geometrické charakteristiky vzorku stěny, vytvořeného metodou CMT

Vzorek číslo 3 byl vytvořen metodou CMT+CS. Jeho povrchová a koncová kvalita jsou nejméně jednotné a konzistentní. Délka stěny měří 122,5 mm, přičemž první uložená housenka je dlouhá pouze 113,3 mm. Nejvyšší bod na stěně dosahuje 64,5 mm, zatímco nejnižší bod měří 61,5 mm. Zajímavé je, že levá strana stěny vykazuje rostoucí tendenci ve velikosti, zatímco pravá strana vykazuje opačný trend. Šířka stěny je největší ze všech vzorků, měří 11,7 mm, ale šířka první nanesené vrstvy je pouze 7,5 mm. Velikost první nanesené vrstvy je největší ze všech tří vzorků, měří 3,5 mm.

### 5.3.4 Srovnání a vyhodnocení geometrie stěn

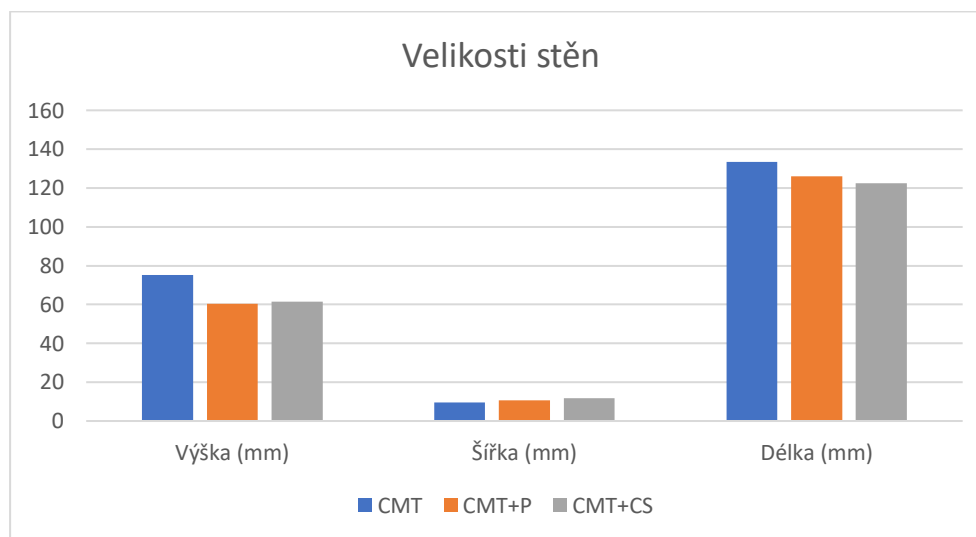
Porovnání výšky, šířky a délky stěny vyrobené metodami CMT, CMT+P a CMT+CS je na obrázku 21.

Z grafu je patrné, že metodou CMT vznikla nejvyšší stěna o rozměru 79,26 mm, zatímco nejmenší výška stěny byla zaznamenána u metody CMT+P (63,45 mm), a to i přesto, že oběma metodami byl vytvořen stejný počet housenek (24).

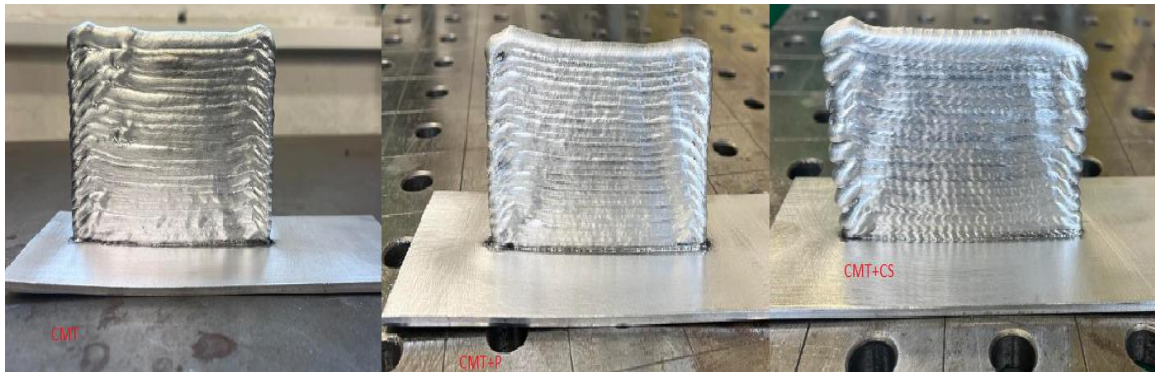
Pokud jde o šířku stěny, nejvyšší naměřenou hodnotu měla metoda CMT+CS (11,68 mm), zatímco metoda CMT měla nejmenší šířku 9,63 mm.

Nejdelší délka stěny byla pozorována u metody CMT, měřící 136,37 mm, naopak nejkratší délka byla pozorována u metody CMT+CS.

Výsledky posouzení geometrie návarů lze shrnout následovně: metoda CMT měla za následek nejvyšší a nejdelší stěny, metoda CMT+CS vytvořila nejširší stěny a metoda CMT+P měla nejmenší výšku stěny se stejným počtem housenek jako metoda CMT. Na obrázku 22 můžeme vidět reálně vypadající stěny po dokončení výroby.



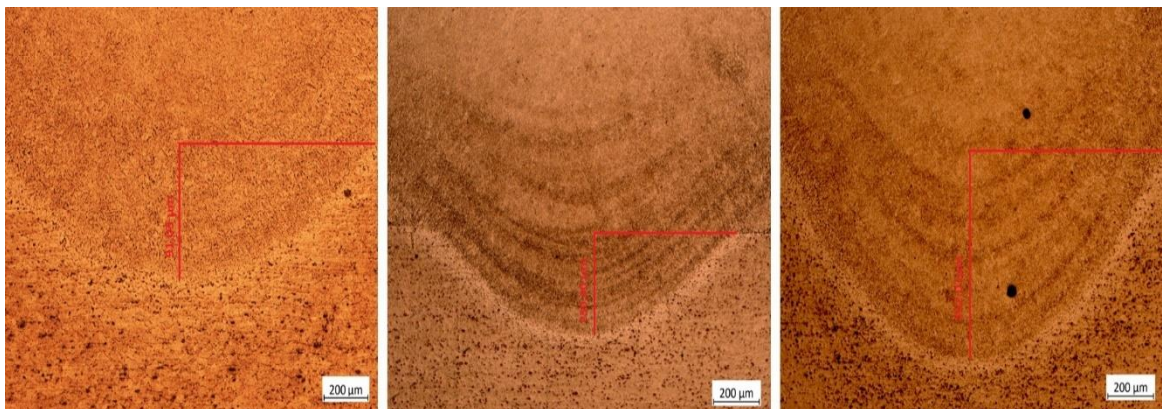
Obrázek 21 - Graf velikosti stěn



Obrázek 22-Metoda CMT vlevo, Metoda CMT+P uprostřed, metoda CMT+CS vpravo

## 5.4 Vyhodnocení z hlediska makrostruktury

Pokud jde o makrostrukturu, byl analyzován první průvar do ZM. Na obrázku 23 můžeme vidět velikosti průvaru do ZM.



Obrázek 23-Velikosti prvního průvaru do ZM (vlevo metoda CMT, uprostřed metoda CMT+P, vpravo metoda CMT+CS)

Podle naměřených výsledků je zřejmé, že nejmenší velikost průvaru do základního materiálu byla pozorována při použití metody CMT a dosáhla hodnoty 0,91 mm. Naopak metoda CMT+CS vykazovala velikost průvaru 3,52 mm, což téměř čtyřikrát větší než metoda CMT. Metoda CMT+P vykazovala hodnotu 2,50 mm. Toto zjištění poukazuje na rozdílné velikosti prvních průvarů do ZM v závislosti na použité metodě.

## 5.5 Vyhodnocení z hlediska mikrostruktury

Z hlediska mikrostrukturní analýzy bylo provedeno několik metod měření porozity, které jsou mezi sebou porovnávány. Tyto výsledky jsou následně dány do souvislosti s měřením obsahu vodíku v návarovém kovu jednotlivých vzorků, protože vodík je hlavní příčinou vzniku pórů v Al slitinách. Zpočátku byla pórovitost měřena ručně z snímků mikrostruktury a vyhodnocena pomocí softwaru ImageJ. Následně byly tyto výsledky porovnány s měřeními pórovitosti získanými pomocí počítačové tomografie pomocí přístroje Carl Zeiss Metronom 1500 ve spolupráci s ústavem obrábění, projektování a metrologie na ČVUT, Fakultě strojní v Praze, který je znázorněn na obrázku 24. Technické parametry Carl Zeiss Metronom 1500 jsou zobrazeny v Tab. 9.



Obrázek 24- Carl Zeiss Metronom 1500

Tabulka 9-Technické parametry Carl Zeiss Metronom 1500 [29]

<b>Napětí a výkon</b>	<b>225 kV 500 W</b>
<b>Typ</b>	<b>Otevřená rentgenová technologie</b>
<b>Měřicí objem</b>	<b>600 × 800 mm</b>
<b>Rozlišení detektoru</b>	<b>3072 × 3072 px</b>
<b>Materiál krytu</b>	<b>Olovo</b>
<b>Rozměry</b>	<b>3 700 × 2 440 × 1 810 mm</b>
<b>Váha</b>	<b>6 600 kg</b>

V korelaci s porozitou byl měřen obsah vodíku ve vzorcích návarů stěn. Měření vodíku bylo provedeno pomocí dospalovacího spektrometru G8 Gallileo od firmy Bruker (ve spolupráci s Ústavem materiálového inženýrství na ČVUT, Fakultě strojní v Praze) jak je znázorněno na obrázku 25.



Obrázek 25-Dosalovací spektrometr G8 Gallileo od firmy Bruker [30]

Tabulka 10- Technické parametry dospalovacího spektrometru G8 Gallileo od firmy Bruker [31]

<b>Rozsah měření</b>	<b>Vodík 0,01 – 1000 ppm</b>
	<b>Kyslík 0,1 – 250 ppm</b>
	<b>Dusík 0,1 – 0,5 %</b>
<b>Doba analýzy</b>	<b>50 s – 60 min</b>
<b>Rozlišení</b>	<b>0,01 ppm</b>
<b>Reprodukovatelnost</b>	<b>+/- 0,05 ppm</b>
<b>Napájení</b>	<b>Analyzátor 400 V, 7 KVA</b> <b>Periferní zařízení 230 V, 800 VA</b>
<b>Nosný plyn</b>	<b>Dusík, argon čistota 99,999 %</b> <b>Helium čistota 99,996 %</b>
<b>Stlačený vzduch</b>	<b>Suchý, 5 barů</b>
<b>Vodní chlazení</b>	<b>Cca 4 l/min</b>
<b>Rozměry</b>	<b>700 x 830 x 600 mm</b>



Analýza porézności materiálu je zásadní pro pochopení strukturální integrity a kvality navařovaných součástí. Mikroskopické vyšetření pomocí softwaru ImageJ umožňuje výzkumníkům vizuálně kontrolovat a ručně měřit přítomnost pórů, dutin nebo defektů ve svarech. Na druhé straně počítačová tomografie (CT) poskytuje komplexnější přístup k hodnocení porézności v celém objemu svařovaných vzorků a nabízí cenné 3D informace. Porovnáním měření pórovitosti získaných z metalografických výbrusů a počítačové tomografie lze ověřit přesnost a spolehlivost různých technik měření. To zajišťuje, že výsledky jsou konzistentní a lze je s jistotou použít pro další analýzy a závěry.

Výzkum obsahu vodíku ve svařovaných materiálech je významný, protože vodík má hlavní úlohu při vzniku pórů v hliníku a jeho slitinách. Během procesu absorpce plynů hliníkem dochází k tomu, že plyny, jsou pohlcovány a difundují jak na povrchu, tak i do vnitřní struktury tekutého nebo tuhého kovu. V případě hliníku má zvláště vodík významný vliv na tvorbu pórů. Rozpustnost vodíku v hliníku klesá s nárůstem nečistot a zvyšující se teplotou.

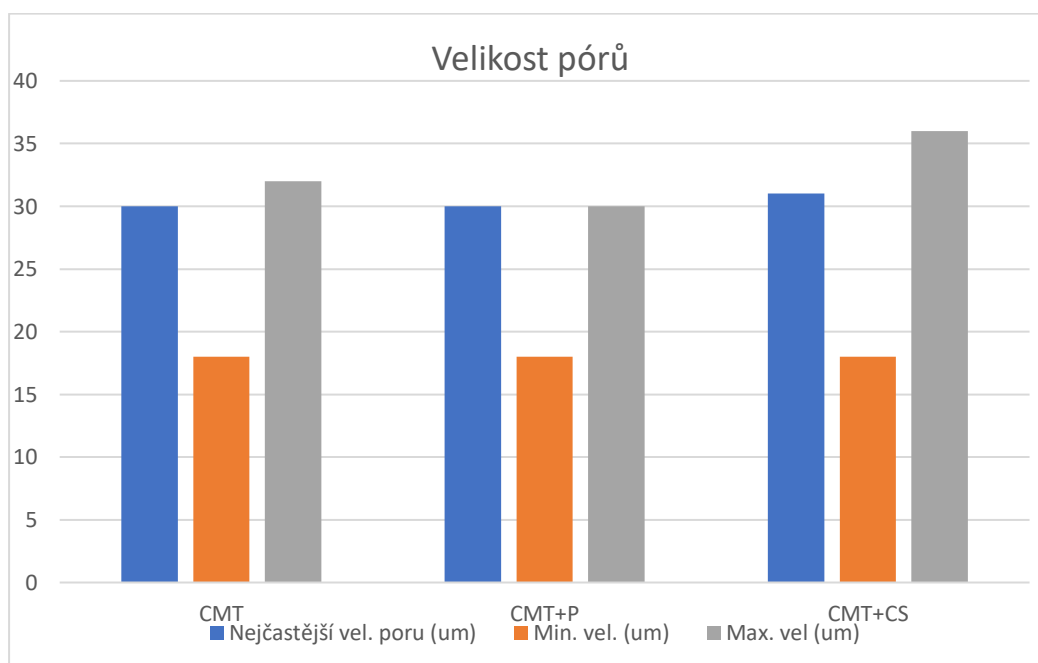
Významný vliv vodíku na tvorbu vad se projevuje zejména u svarového kovu. Během krystalizace vlivem rychlého procesu svařování dochází k prudkému poklesu rozpustnosti vodíku v hliníku, ale vodík se zcela nevydává ze svarového kovu. U hliníkových svarů, které rychle krystalizují, zůstává část vodíku zachycena během fáze krystalizace a teprve při poklesu teploty pod teplotou solidu dochází k jeho postupnému uvolnění. V případě pevného plastického svaru může tento uvolňující se vodík vést k nežádoucím důsledkům, jako je vytváření nežádoucích pórů a bublin.

### **5.5.1 Vyhodnocení porozity pomocí softwaru ImageJ**

Tabulka 11 porovnává pórovitost minimální velikost, maximální velikost a nejčastější velikost póru u snímku, pomocí metod CMT, CMT+P a CMT+CS. Ze stěn byly odebrány metalografické výbrusy pro hodnocení, pokrývající horní část stěny každého vzorku (z každého vzorku 3 snímky) zpracovány pomocí softwaru ImageJ pro výpočet průměrné hodnoty porézności přes celou výšku vzorku.

Tabulka 11-Hoednoty horní části stěny

Metoda/část	Pórovitost (%)	Minimální vel. póru (um)	Maximální vel. póru (um)	Nejčastější vel. póru (um)
CMT/spodní	0,552	18	32	30
CMT/střední	0,348	20	34	31
CMT/horní	0,297	16	30	29
CMT+P/spodní	0,194	18	30	28
CMT+P/střední	0,192	24	33	32
CMT+P/horní	0,189	20	28	30
CMT+CS/spodní	0,279	20	30	30
CMT+CS/střední	0,274	18	27	31
CMT+CS/horní	0,431	20	36	31

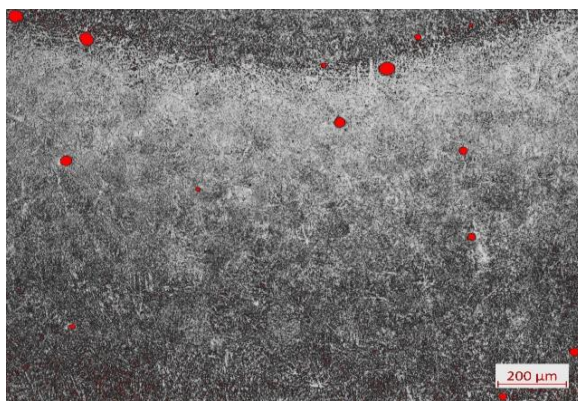


Obrázek 26- Graf nejčastější velikosti pórů, minimální velikosti pórů a maximální velikosti pórů

V tabulce č. 11 a na grafu zobrazeném na obrázku 26 jsou prezentovány výsledky analýzy provedené pomocí softwaru ImageJ. Nejvyšší zaznamenaná míra pórovitosti byla

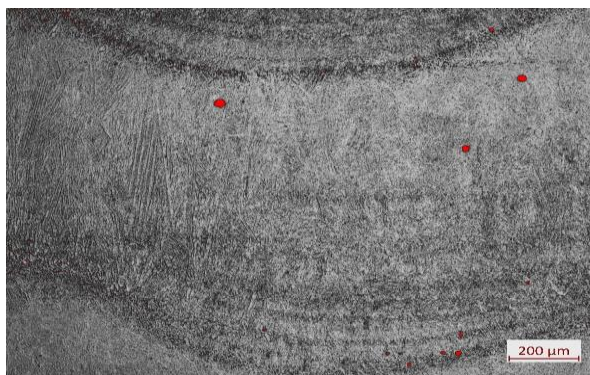
zjištěna u metody CMT a činila 0,552 %, zatímco u metod CMT+CS byla zjištěna největší pórovitost 0,431 % a CMT+P 0,194 %,

V rámci velikosti pórů byla největší velikost zaznamenána u metody CMT+CS v horní části vzorku a dosáhla hodnoty 36  $\mu\text{m}$ . Naopak nejmenší velikost pórů byla zjištěna v části vzorku metody CMT rovněž v horní části a měřila 16  $\mu\text{m}$ . Průměrná nejčastější velikost póru byla zaznamenána u metody CMT+CS a činila 30  $\mu\text{m}$ . U metod CMT a CMT+P byly výsledky pro průměrnou velikost póru shodné a dosáhly hodnoty 30  $\mu\text{m}$ .



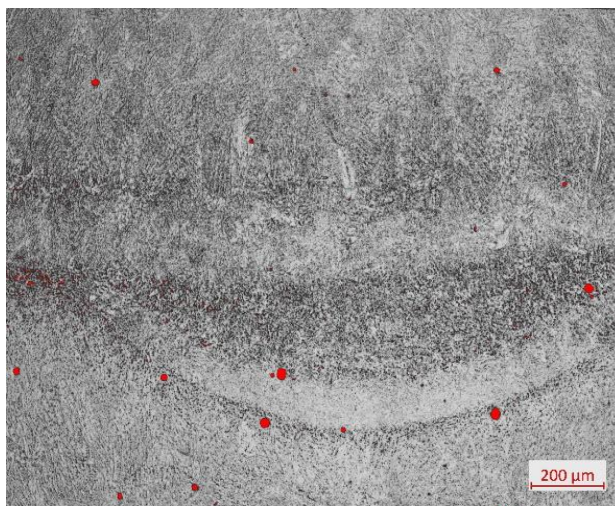
Obrázek 27- Horní část vzorku metodou CMT (snímek CMT/spodní)

Obrázek 27 ukazuje mikrostrukturu vzorku CMT (zvětšení 200x), odebraného z horní části stěny. Červené body na obrázku představují póry vytvořené během procesu svařování.



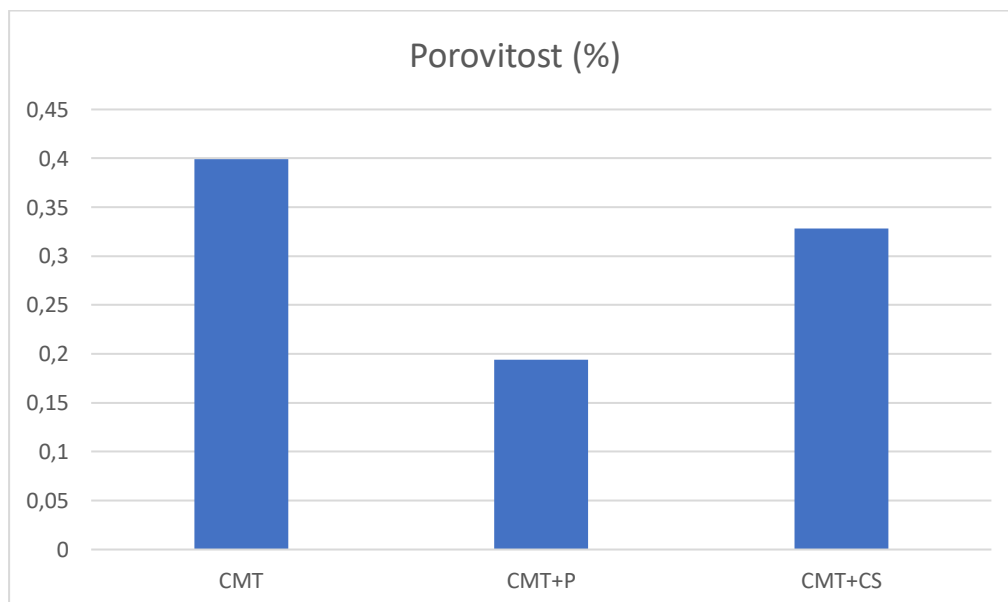
Obrázek 28-Horní část vzorku CMT+P (snímek CMT+P/spodní)

Podobně obrázek 28 zobrazuje mikrostrukturu vzorku CMT+P (zvětšení 200x), rovněž odebraného z horní části stěny.



Obrázek 29-Horní část vzorku CMT+CS (snímek CMT+CS/horní)

Konečný obrázek 29 ukazuje mikrostrukturu vzorku CMT+CS (zvětšení 200x), odebraného z horní části stěny.



Obrázek 30- Graf průměrné hodnoty pórovitosti u jednotlivých metod

Graf na obrázku 30 jasně ukazuje významné rozdíly v porézności mezi třemi metodami navařování: CMT, CMT+P a CMT+CS. Nejvyšší porézność byla zjištěna u metody CMT, která představovala 0,399 % z celkové plochy vzorku, zatímco metoda CMT+P vykazovala nejnižší porézność 0,191 %. Pórovitost je rozhodujícím faktorem ovlivňujícím kvalitu svařovaných součástí. Představuje přítomnost dutin nebo pórů v

návarovém materiálu, které mohou oslabit strukturu a zhoršit její mechanické vlastnosti. Poznatky z grafu zdůrazňují důležitost výběru vhodné metody navařování pro dosažení optimálních výsledků z hlediska kontroly porézności a kvality návaru.

Vyšší porézność metody CMT může být přisuzována specifickým parametrům procesu nebo změnám podmínek navařování, což vede ke zvýšené pravděpodobnosti tvorby pórů. Na druhé straně nižší pórovitost pozorovaná u metody CMT+P naznačuje, že zavedení pulzní svařovací techniky může mít pozitivní dopad na snížení tvorby pórů a zlepšení integrity svaru.

### 5.5.2 Vyhodnocení porozity pomocí počítačové tomografie

Počítačová tomografie (CT) je výkonná nedestruktivní zobrazovací technika, která umožňuje komplexní a detailní analýzu vnitřní struktury materiálů. Poskytuje trojrozměrné obrázky, známé jako tomogramy, které nabízejí pohled na vnitřek vzorku ve vysokém rozlišení. Využitím CT mohou výzkumníci přesně vizualizovat a kvantifikovat distribuci pórů, dutin a defektů ve svařovaných součástech.

Předchozí hodnocení porozity bylo poněkud předběžné, zatímco použití CT poskytuje výrazně přesnější metodu hodnocení. V procesu CT byly pro každý způsob svařování odebrány dva vzorky z horní části stěny. Velikost těchto vzorků byla 10 x 10 x 10 mm (viz Obr.31 vpravo). Tyto vzorky byly poté bezpečně spojeny dohromady a podrobeny CT skenování, jak je znázorněno na obrázku 31 vlevo.

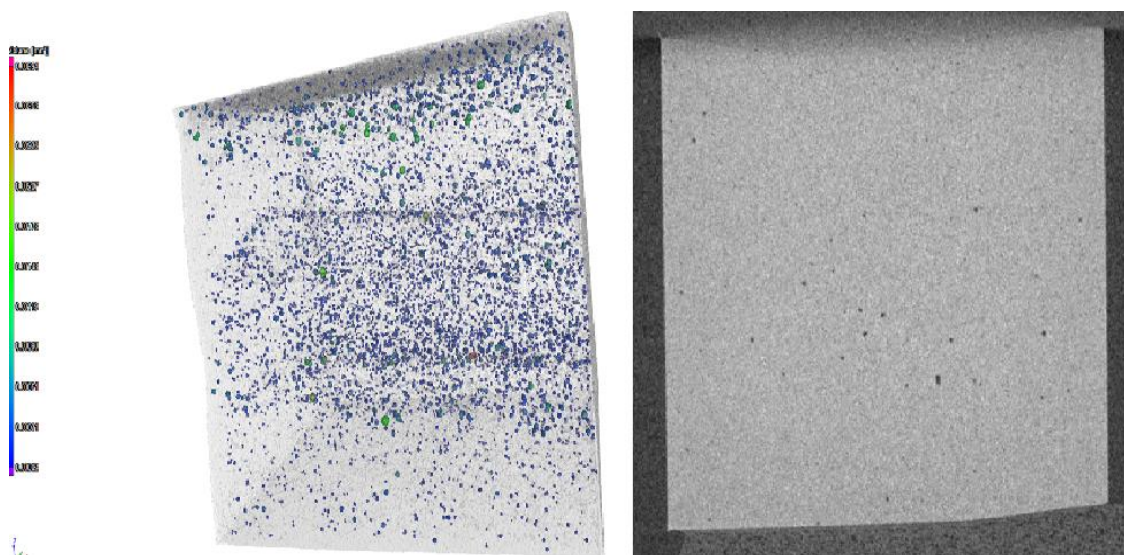


Obrázek 31-Ukázka upevnění vzorku do CT a ukázka upevnění vzorku do CT

Dva vzorky odebrané z každé metody svařování byly zkombinovány, aby se získal reprezentativnější a komplexnější pohled na pórovitost materiálu (viz Obr.31 vpravo). Tento přístup pomáhá minimalizovat případné nesrovnalosti, které by mohly vzniknout u jednotlivých vzorků. CT skenování navíc umožňuje důkladnou kontrolu makro i mikro pórovitosti a poskytuje cenné poznatky o kvalitě návarů.

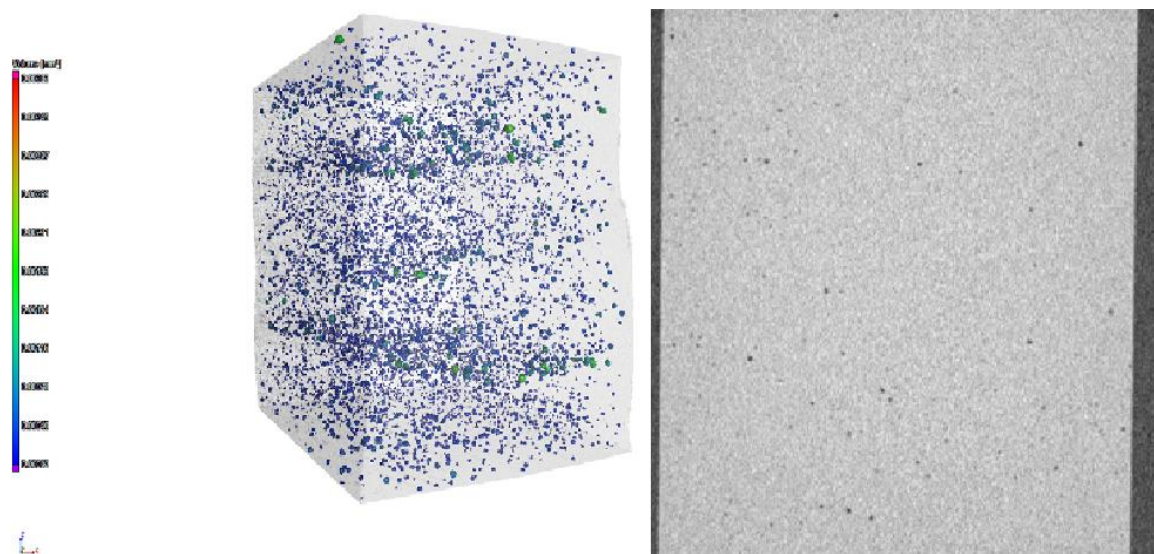
### 5.5.2.1 Výsledky z počítačové tomografie

Jak již bylo zmíněno, byly odebrány dva vzorky pro každý způsob navařování a průměrná hodnota pórovitosti byla určena kombinací dat z těchto dvou vzorků. Na následujících obrázcích je na levé straně zobrazeno mračno bodů představující póry, zatímco na pravé straně je zobrazen průřez vzorku.



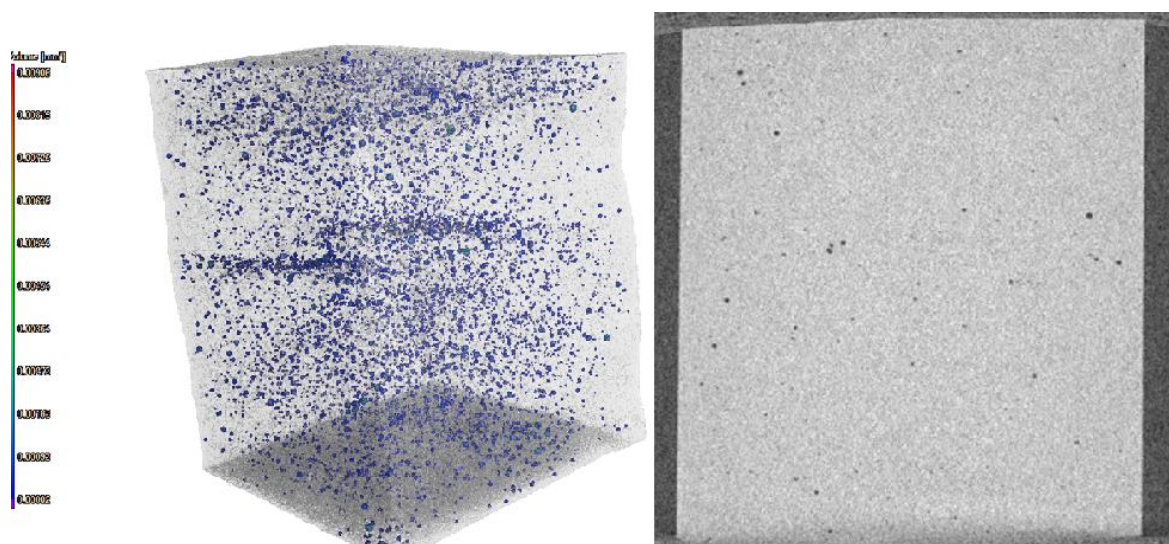
Obrázek 32-Na levé straně mrak bodů, na pravé straně průřez vzorkem u metody CMT

Mračno bodů viditelné na levé straně snímků představuje rozložení a hustotu pórů ve svařovaných vzorcích. Každý jednotlivý bod v oblaku odpovídá póru nebo dutině v materiálu a jeho poloha v prostoru odráží jeho umístění ve vzorku.



Obrázek 33-Na levé straně mrak bodů, na pravé straně průřez vzorkem u metody CMT+P

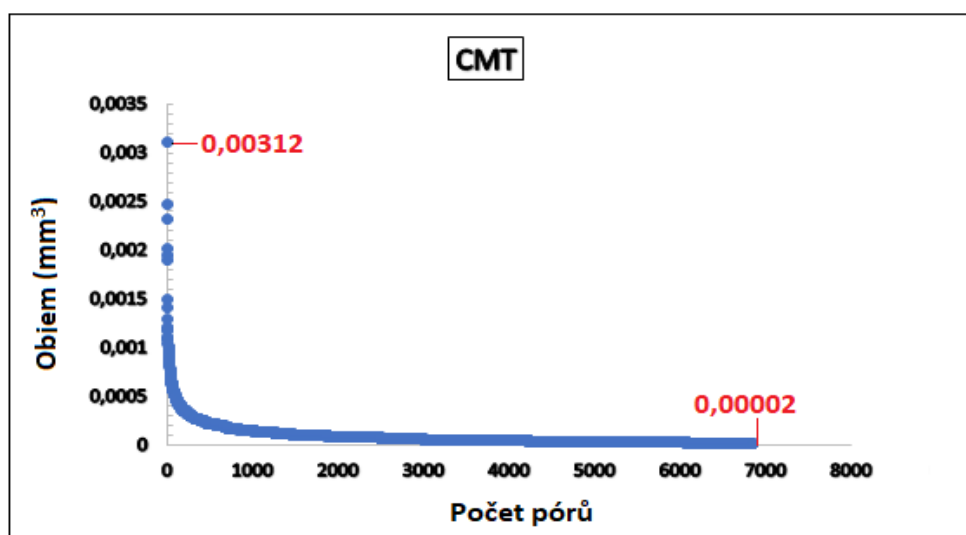
Na pravé straně snímků poskytuje pohled v řezu výřez vzorku, odhalující jeho vnitřní rysy a poréznost v určité hloubce. To umožňuje bližší zkoumání vnitřní struktury svaru a identifikaci případných vad nebo nepravidelností.



Obrázek 34-Na levé straně mrak bodů, na pravé straně průřez vzorkem u metody CMT+CS

U vzorku s rozměry přibližně 10x10x10 mm byla použita metoda CT pro metody navařování CMT, CMT+P a CMT+CS. Tato metoda má velkou rozlišovací schopnost, takže bylo naměřeno obrovské množství pórů (čemuž odpovídají obrázky vlevo – obr. 32-34), ale póry byly velmi malých objemů.

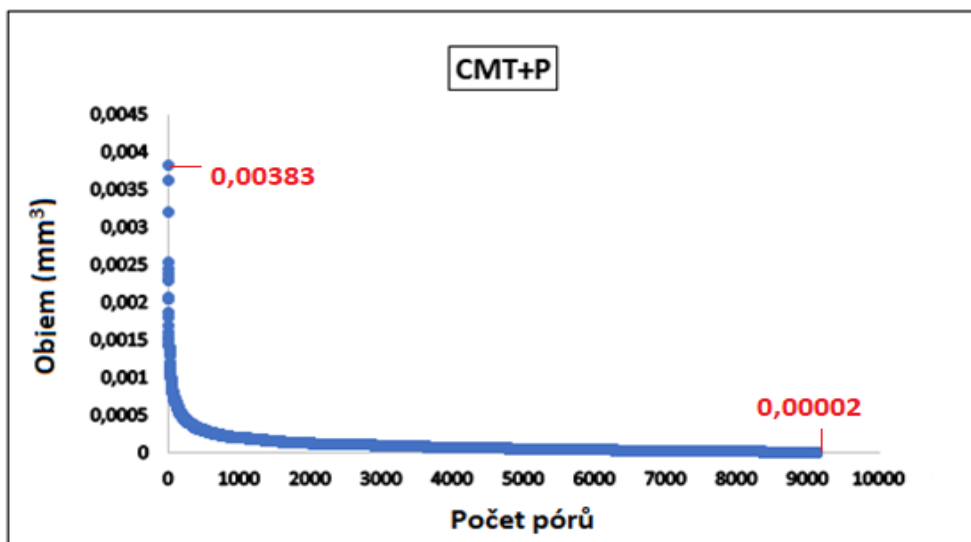
Na obrázku 35-37 níže je vidět nejmenší a největší objem naměřeného póru.



Obrázek 35-Graf počtu a velikostí pórů

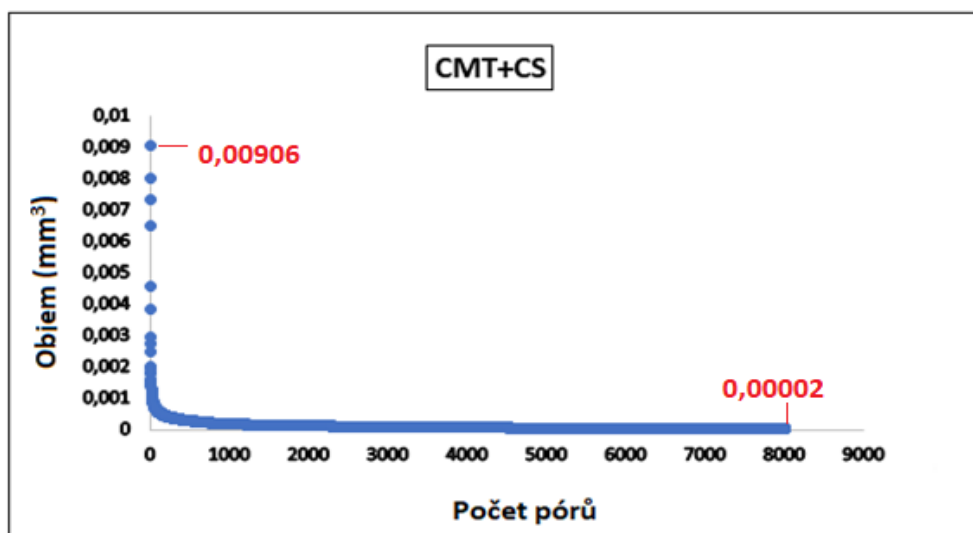
Obrázek 35 jednoznačně ukazuje, že při využití metody CMT byl zjištěn největší objem póru dosahující hodnoty 0,00312 mm<sup>3</sup>, zatímco nejmenší zaznamenaný objem póru činil 0,00002 mm<sup>3</sup>. Celkový počet identifikovaných pórů ve zkoumaném vzorku dosáhl 6843.





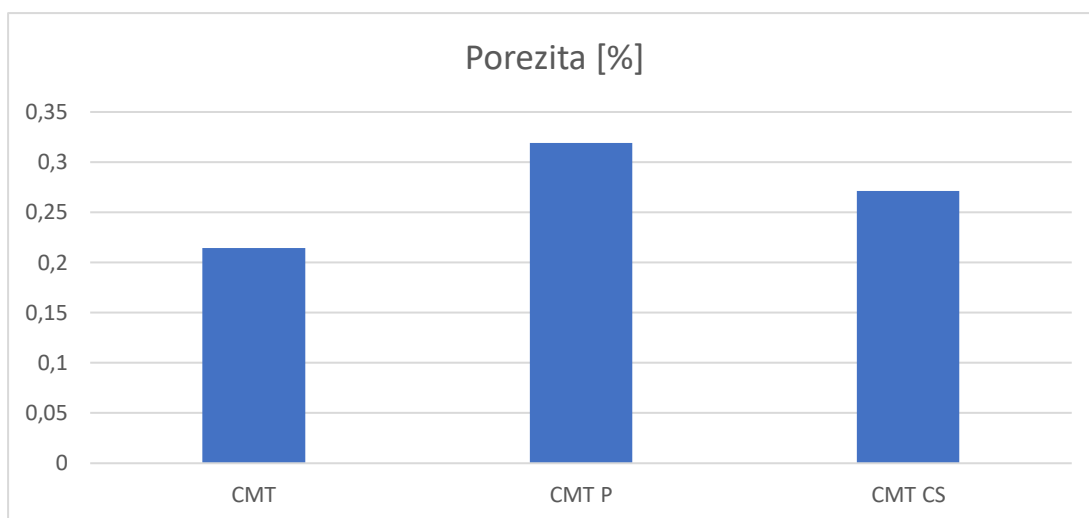
Obrázek 36- Graf počtu a velikostí pórů

Na základě obrázku 36 je zřejmé, že při využití metody CMT+P byl zjištěn největší objem póru dosahující hodnoty  $0,00383 \text{ mm}^3$ , přičemž nejmenší zjištěný objem póru byl opět  $0,00002 \text{ mm}^3$ . Celkový počet nalezených pórů ve zkoumaném vzorku činil 9115.



Obrázek 37- Graf počtu a velikostí pórů

Z obrázku 37 vyplývá, že pomocí metody CMT+CS byl zaznamenán největší objem póru dosahující hodnoty  $0,00906 \text{ mm}^3$ , a nejmenší objem póru byl opět  $0,00002 \text{ mm}^3$ . Celkový počet identifikovaných pórů ve zkoumaném vzorku činil 8007.



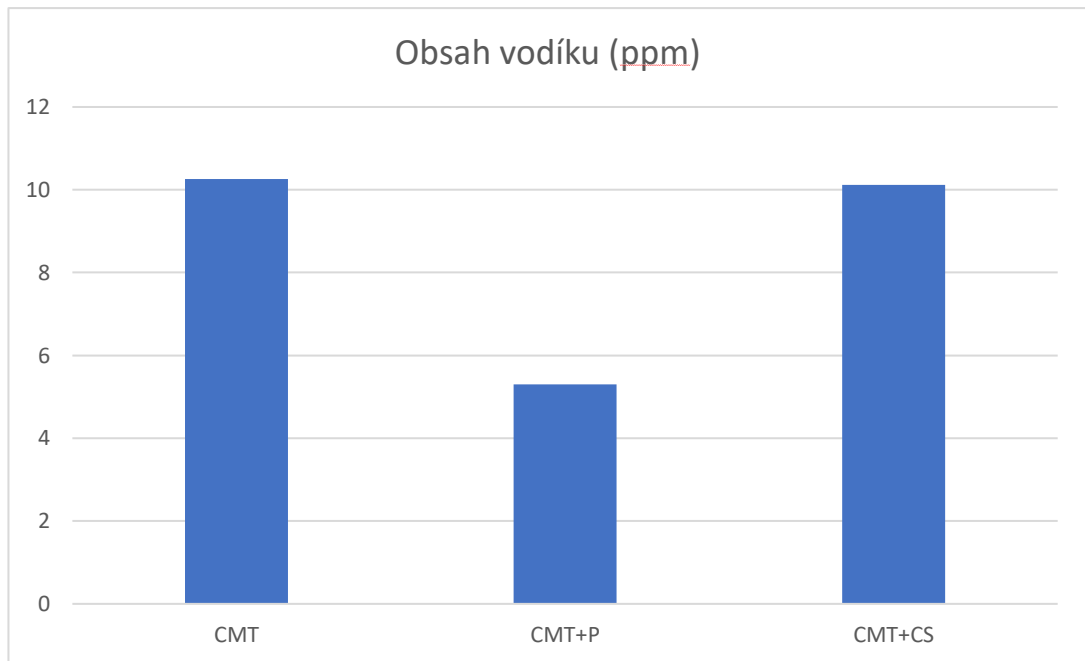
Obrázek 38-Graf pórovitosti CT

Graf na obrázku 38 ukazuje, že jednotlivé metody CMT, CMT+P a CMT+CS prokazují různé úrovně poréznosti ve zkoumaném materiálu. Metoda CMT+P dosáhla nejvyššího porézního obsahu, a to 0,318 %, zatímco metoda CMT vykazovala nejnižší poréznost, konkrétně 0,214 %.

Podrobnější analýza výsledků z obrázků 35, 36 a 37 odhaluje objemů pórů pro jednotlivé metody. Při použití metody CMT byl zaznamenán objem póru 0,00312 mm<sup>3</sup> a nejmenší objem byl 0,00002 mm<sup>3</sup>. Metoda CMT+P vykazovala objem póru 0,00383 mm<sup>3</sup> a nejmenší objem zůstal na hodnotě 0,00002 mm<sup>3</sup>. Na druhou stranu metoda CMT+CS zaznamenala největší objem póru 0,00906 mm<sup>3</sup> a opět nejmenší objem byl 0,00002 mm<sup>3</sup>. Jelikož má metoda CT velkou rozlišovací schopnost (jak již bylo řečeno výše), tak výsledky z předchozího měření pomocí softwaru ImageJ jsou přibližně shodné jako z CT.

### 5.5.3 Vyhodnocení obsahu vodíku

Analýza obsahu vodíku poskytuje zásadní pohled na kvalitu svařovaných materiálů, zejména pokud jde o poréznost, která může být způsobena uvolňovanými během procesu navařování. Vyšší obsah vodíku může indikovat větší pórovitost. Větší množství pórů by teoreticky mohlo potenciálně ovlivnit mechanické vlastnosti a pevnost návaru. Hodnocení bylo provedeno v jednotkách "pars per milion" (ppm). Obrázek 39 ukazuje výsledky získané ze spalovacího spektrometru G8 Galileo od Bruker.



Obrázek 39- Diagram obsahu vodíku pro vzorky vytvořené různými metodami navařování

Na grafu (Obr. 39) můžeme vidět, že nejvyšší objem vodíku byla pozorována u vzorků vyrobených metodou CMT s hodnotou 10,2646 ppm, zatímco nejnižší objem vodíku byl zjištěn u vzorků vyrobených metodou CMT+P s hodnotou 5,2954 ppm, což je celkem ve shodě s prvním měřením. Vztah mezi obsahem vodíku a pórovitostí materiálu je komplexní jev ve svařovacích procesech a výsledky mohou být ovlivněny různými faktory. Zatímco vyšší obsah vodíku ve svařovém kovu může potenciálně vést ke zvýšené porézności v důsledku zachycení plynu, není jediným určujícím faktorem. Konečná pórovitost ve svařovaném materiálu závisí i na dalších proměnných, jako jsou např.: parametry navařování, rychlosti chlazení, čistota materiálu a jeho způsob skladování atd.

## 6 Závěr

V rámci DP byla realizována srovnávací studii tří metod navařování, CMT, CMT+P a CMT+CS, se objevilo několik zjištění, která zdůrazňují výrazné rozdíly a důsledky pro navařované součásti, vytvořené metodou WAAM.

Pokud jde o geometrii stěn, každá varianta navařovací metody prokázala jedinečné vlastnosti. Metoda CMT produkovala nejvyšší a nejdelší stěny, zatímco metoda CMT+CS vedla k nejširším stěnám. Překvapivě metoda CMT+P, i přes použití stejného počtu housenek jako metoda CMT, měla nejmenší výšku stěny. Navíc velikost průvaru první navařené housenky byla významně menší u metody CMT ve srovnání s metodou CMT+CS.

Pórovitost hraje zásadní roli při posuzování kvality svařovaných spojů. Na první pohled se může zdát, že výsledky dvou metod vyhodnocení jsou rozdílné, ale není tomu tak. Metody CT poskytuje informace o obsahu pórů v celém objemu vzorku, zatím co u metody vyhodnocení pomocí softwaru ImageJ se vyhodnocuje mikrovýbrus, který poskytuje informace jen v konkrétním řezu. Tudiž když se nad tím zamyslíme jsou výsledky celkem srovnatelné jak z CT, tak pomocí softwaru ImageJ.

Výsledky analýzy obsahu vodíku přinesly zajímavé poznatky. Metoda CMT ukázala nejvyšší obsah vodíku, zatímco metoda CMT+P dosáhla nejnižšího obsahu. Tato shoda s předchozími měřeními potvrzuje hlavní cíl této diplomové práce. Zdůrazňuje se tak složitá povaha vztahu mezi obsahem vodíku a pórovitostí během svařovacích procesů, která je ovlivněna mnoha faktory, včetně parametrů svařování, rychlosti chlazení a složení materiálu.

Tato studie poskytuje cenné informace pro výběr vhodné metody navařování na základě konkrétních požadavků. Metoda CMT vynikala při výrobě vysokých a dlouhých stěn, zatímco metoda CMT+CS byla lepší při vytváření širokých stěn. Metoda CMT+P prokázala příznivé výsledky z hlediska kontroly porézности, což vedlo ke zlepšení kvality svaru. Hodnocení pórovitosti pomocí různých technik však vyžaduje pečlivou standardizaci, aby byly zajištěny přesné a konzistentní výsledky. Komplexní vliv obsahu vodíku na porézность navíc zdůrazňuje potřebu komplexního pochopení parametrů svařování a vlastností materiálů pro optimalizaci kvality svaru.

Tato diplomová práce se především zaměřovala na geometrii stěn, makrostrukturu a mikrostrukturu. Bylo by ale vhodné metody porovnat i z hlediska mechanických vlastností, nicméně to nebylo hlavním cílem této diplomové práce. Budoucí srovnání mechanických vlastností a vlastností mikrostruktury by do budoucna mohlo otevřít nové perspektivy.

## Bibliografie

- [1] KOLAŘÍK, Ladislav, Karel KOVANDA a Tomáš GURČÍK. Robotické navařování metodou WAAM jako alternativa k 3D tisku kovových materiálů. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, , 17.
- [2] GONG, Guanghao, et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 855-884.
- [3] D. NEIKOV, Oleg, Stanislav S. NABOYCHENKO a Nikolav A. YEFIMOV. Powders for Additive Manufacturing Processing. D. NEIKOV, Oleg, Stanislav S. NABOYCHENKO a Nikolav A. YEFIMOV. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*. Druhé vydání. 2019, s. 373-399. ISBN 978-0-08-100543-9.
- [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] 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 60 Technology* [online]. 2020, 2020(111), 149-198 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05966-8>
- [6] 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
- [7] Kolařík, Ladislav, Jan Suchánek a Marie Kolaříková. Navařování metodou WAAM. *MM Industry spektrum*. 2018, (12), 60. ISSN 1212-2572.
- [8] McAndrew, Anthony R., Marta ALVAREZ ROSALES, Paul A. COLEGROVE et al. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 21, 340-349 [cit. 2018-06-04]. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.006. ISSN 22148604. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860417306085>

[9] Přehled svařování, staženo dne 2.8.2023, dostupné na webu: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf)

[10] TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ. Brno, 1994. Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K ÚST, odbor svařování a PÚ. Fakulta strojního inženýrství Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce J.Kubíček.

[11] TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A ZAŘÍZENÍ: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT) [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=173174>

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

[13] Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu – metody MIG/MAG [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Flearning.tul.cz%2Fpluginfile.php%2F297066%2Fmod\\_folder%2Fcontent%2F0%2FB12%2520Sva%25C5%2599ov%25C3%25A1n%25C3%25AD%2520metodou%2520MIG\\_MAG.pdf%3Fforcedownload%3D1&psig=AOvVaw25ekQoEnR7isiL5M21C0fj&ust=1691527162522000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBMQjhxqFwoTCNDW4e-zy4ADFQAAAAAdAAAAABAe](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Flearning.tul.cz%2Fpluginfile.php%2F297066%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2FB12%2520Sva%25C5%2599ov%25C3%25A1n%25C3%25AD%2520metodou%2520MIG_MAG.pdf%3Fforcedownload%3D1&psig=AOvVaw25ekQoEnR7isiL5M21C0fj&ust=1691527162522000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBMQjhxqFwoTCNDW4e-zy4ADFQAAAAAdAAAAABAe)

[14] Svařování metodou MIG a MAG [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fstaryweb.ivohlavaty.cz%2F2009Svarovani%2F07-08-131-135.pdf&psig=AOvVaw25ekQoEnR7isiL5M21C0fj&ust=1691527162522000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBMQjhxqFwoTCNDW4e-zy4ADFQAAAAAdAAAAABAI>

[15] Co je vlastně... svařování MIG/MAG? [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-svarovani-mig-mag/>

[16] KUBÍČEK, J. Technologie svařování. Brno, b.r.. Studijní opory pro výuku v kurzech. ÚST, odbor svařování a PÚ, VUT Brno

- [17] SRINIVASAN, D., et al. A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 64: 108-115.
- [18] CMT PULSE: ATRAKTIVNÍ SYNERGICKÉ EFEKTY. *Www.fronius.com* [online]. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/fronius-welding-processes/cmt-pulse>
- [19] DOKONALÁ PRECIZNOSTNOVÁ VARIANTA SVAŘOVACÍHO PROCESU CMT CYCLE STEP. *Www.fronius.com* [online]. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/informacni-centrum/casopis/2019/cmt-cycle-step>
- [20] Fronius develops CMT Cycle Step for improved welding control. *Www.thefabricator.com* [online]. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/product/assembly/fronius-develops-cmt-cycle-step-for-improved-welding-control>
- [21] 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. 2023-08-03]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1080/02670836.2018.1455012
- [22]. KOLAŘÍK, Ladislav. Konstrukce a navrhování svarových spojů: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017.
- [23]. Davis, Joseph R. *Aluminum and Aluminum Alloys (Asm Speciality Handbook)*. místo neznámé : ASM International, 1993. ISBN-10: 087170496X.
- [24.] Luijendijk, T. Welding of dissimilar aluminium alloys. [Volume 103, Issue 1] *Delft : Journal of Materials Processing Technology*, 2000. ISSN: 0924-0136.
- [25] FANUC Robot ARC Mate 100iC [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: [https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/robot/ARCMate100iC\(E\)-02b.pdf](https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/robot/ARCMate100iC(E)-02b.pdf)
- [26] TransPuls Synergic 3200 CMT [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://hbt-weld.cz/produkty/transpuls-synergic-3200-cmt/>



[27]. OK Autrod 5087. Esab.com [online]. [cit. 2023-08-04]. Dostupné z: [https://esab.com/cz/eur\\_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/aluminum-wires/ok-autrod-5087/](https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/product/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/aluminum-wires/ok-autrod-5087/)

[28]. EN AW-5083 (AlMg4.5Mn0.7). Proal.cz [online]. [cit. 2023-08-04]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-5083/>

[28]. Mechanické vlastnosti podle EN 573 – 3 (DIN 1725). Www.aluminiumcentrum.com [online]. [cit. 2023-08-04]. Dostupné z: <http://www.aluminiumcentrum.com/index.php/mechanicke-vlastnosti-al-slitin/>

[29] Zeiss Metrotom 1500 [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/zeiss-metrotom-1500/>

Zkopírovat citaci

[30] G8 GALILEO [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/cs-onh-analyzers/g8-galileo.html>

[31] ELEMENTÁRNÍ ANALYZÁTOR G8 GALILEO [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: [https://www.bas.cz/bruker-quantron/elementarni\\_analyzator\\_o\\_n\\_h\\_g8\\_galileo\\_bruker.php](https://www.bas.cz/bruker-quantron/elementarni_analyzator_o_n_h_g8_galileo_bruker.php)

## Seznam obrázků

Obrázek 1-Rozdělení metod aditivní výroby pro kovové materiály [1] .....	13
Obrázek 2-Schéma zařízení pro technologii SLS [2] .....	15
Obrázek 3 - Schéma zařízení pro technologii LMD [1] .....	16
Obrázek 4 - Schéma technologie EBM. Upraveno dle [29] .....	17
Obrázek 5-Princip metody WAAM (s pomocí TIG navařování) [8] .....	18
Obrázek 6-Ukázka pracoviště pro metodu WAAM (Robotické svařovací pracoviště na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze – šestiosý univerzální robotu Fanuc ArcMate 100iC s rotačním polohovadlem) .....	20
Obrázek 7-Přehled a rozdělení svařování [9] .....	22
Obrázek 8-Základní typy přenosu svarového kovu [14] .....	24
Obrázek 9-Princip metody CMT [17] .....	27
Obrázek 10-Průběhy proudu a napětí pro metodu CMT +P [30] .....	29
Obrázek 11-Schematické znázornění svařovací techniky CMT + P [17] .....	29
Obrázek 12-Ukázka svaru procesu CMT+CS [20] .....	30
Obrázek 13-Závislost rozpustnosti H <sub>2</sub> v Al v závislosti na teplotě (a porovnání s rozpustností v Fe) [22] .....	34
Obrázek 14- Ukotvení základové desky na jednoosém polohovadle pomocí rychloupínek .....	35
Obrázek 15-Robotizované pracoviště v laboratoři Fakulty strojní ČVUT v Praze .....	36
Obrázek 16- ručního teachpendantu .....	39
Obrázek 17-Směr navařování .....	40
Obrázek 18- Geometrické charakteristiky vzorku stěny, vytvořeného metodou CMT .....	43
Obrázek 19- Geometrické charakteristiky vzorku stěny, vytvořeného metodou CMT .....	43
Obrázek 20- Geometrické charakteristiky vzorku stěny, vytvořeného metodou CMT .....	44
Obrázek 21-Graf velikosti stěn .....	45
Obrázek 22-Metoda CMT vlevo, Metoda CMT+P uprostřed, metoda CMT+CS vpravo .....	46
Obrázek 23-Velikosti prvního průvaru do ZM (vlevo metoda CMT, uprostřed metoda CMT+P, vpravo metoda CMT+CS .....	46
Obrázek 24- Carl Zeiss Metronom 1500 .....	47
Obrázek 25-Dosalovací spektrometr G8 Gallileo od firmy Burket [30] .....	48
Obrázek 26- Graf nejčastější velikosti pórů, minimální velikosti pórů a maximální velikosti pórů .....	50
Obrázek 27- Horní část vzorku metodou CMT (snímek CMT/spodní) .....	51
Obrázek 28-Horní část vzorku CMT+P (snímek CMT+P/spodní) .....	51
Obrázek 29-Horní část vzorku CMT+CS (snímek CMT+CS/horní) .....	52
Obrázek 30- Graf průměrné hodnoty pórovitosti u jednotlivých metod .....	52
Obrázek 31-Ukázka upevnění vzorku do CT a ukázka upevnění vzorku do CT .....	53
Obrázek 32-Na levé straně mrak bodů, na pravé straně průřez vzorkem u metody CMT .....	54
Obrázek 33-Na levé straně mrak bodů, na pravé straně průřez vzorkem u metody CMT+P .....	55
Obrázek 34-Na levé straně mrak bodů, na pravé straně průřez vzorkem u metody CMT+CS .....	55
Obrázek 35-Graf počtu a velikostí pórů .....	56
Obrázek 36- Graf počtu a velikostí pórů .....	57
Obrázek 37- Graf počtu a velikostí pórů .....	57
Obrázek 38-Graf pórovitosti CT .....	58
Obrázek 39- Diagram obsahu vodíku pro vzorky vytvořené různými metodami navařování .....	59

## Seznam tabulek

Tabulka 1- Kovy s jejich oblastmi použití s využitím WAAM [21] .....	31
Tabulka 2-Tehnické parametry FANUC Robot ARC Mate 100iC [25] .....	37
Tabulka 3-Technické parametry svařovacího zdroje TransPuls Synergic 3200 CMT [26] .....	38
Tabulka 4-Základní parametry svařování .....	40
Tabulka 5-Obsah hlavních legujících prvků OK Autrod 5087 [27] .....	41
Tabulka 6-Mechanické vlastnosti po navaření OK Autrod 5087 [27].....	41
Tabulka 7-Chemické složení EN AW 5083 [28] .....	42
Tabulka 8-Mechanické vlastnosti EN AW 5083 [28] .....	42
Tabulka 9-Technické parametry Carl Zeiss Metronom 1500 [29].....	47
Tabulka 10- Technické parametry dospalovacího spektrometru G8 Gallileo od firmy Burket [31] .....	48
Tabulka 11-Hoednoty horní části stěny .....	50