

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2020**

**RUDOLF  
SCHWARZ**



**ČVUT**  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

**FAKULTA STROJNÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

DEPARTMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV PARAMETRŮ ADITIVNÍHO PROCESU WAAM NA  
KVALITU NÁVARŮ**

The influence of parameters the WAAM additive  
process on cladding deposits quality

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR:**

Author

Rudolf Schwarz

**VEDOUCÍ PRÁCE:**

Supervisor

doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.

**STUDIJNÍ PROGRAM:**

Study programme

B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

**STUDIJNÍ OBOR:**

Field of study

2301R000 Studijní program je bezoborový

**Praha 2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Schwarz** Jméno: **Rudolf** Osobní číslo: **474989**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

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

Název bakalářské práce anglicky:

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

Pokyny pro vypracování:

Popis metody WAAM a porovnání s ostatními aditivními technologiemi  
Rozbor procesních parametrů a návrh experimentu pro ověření jejich vlivu na kvalitu  
Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolařík, L., Suchánek, J., Kolaříková, M. Navařování metodou WAAM. MM Industry spektrum. 2018, (12), 60. ISSN 1212-2572.
- [2] 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
- [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:

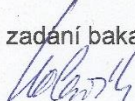
**doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

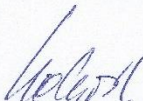
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

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

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

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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.

  
17.06.2020  
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Kolaříka Ladislava 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. za jeho čas a odborné vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Gurčíkovi za možnost častých odborných konzultací a za jeho přínos pro experimentální část bakalářské práce. Děkuji také mé rodině, která mi studium na této škole umožnila a bez které bych tuto práci nedokončil.



# Anotace

Bakalářská práce s názvem Vliv parametrů aditivního procesu WAAM na kvalitu návarů se zabývá stručným rozbohem aditivních metod výroby pro zpracování kovových materiálů a porovnáním s metodou WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), rozebráním metody WAAM a určením kvalitativních parametrů. Je vytvořen základní přehled svařovacích procesů MIG/MAG s modifikacemi použitelnými právě pro metodu WAAM včetně nejrozšířenějšího procesu CMT. V další části práce je realizován a popsán experiment, kdy je vyhodnocen vliv pracovního postupu na jednotlivé návary a zkoumána kvalita provedených návarů z geometrického a strukturního hlediska. U vzorků bylo provedeno měření geometrie, strukturní porovnání a měření tvrdosti dle Vickerse.

**Název závěrečné práce:** Vliv parametrů aditivního procesu WAAM na kvalitu návarů  
**Autor práce:** Schwarz Rudolf  
**Vedoucí práce:** doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.  
**Konzultant:** Ing. Gurčík Tomáš  
**Akademický rok:** 2019/2020  
**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní  
**Ústav:** 12133 – Ústav strojírenské technologie  
**Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.  
**Rozsah práce:** 76 stránek (včetně příloh), 8 tabulek, 43 obrázků  
**Klíčová slova:** WAAM, additive manufacturing, CMT, MIG, MAG

# Annotation

The bachelor's thesis called Influence of a WAAM additive process parameters on the quality of welds deals with a brief analysis of additive manufacturing methods for processing metal materials and comparison with the WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) method, analysis of the WAAM method and determination of qualitative parameters. A basic overview of MIG and MAG welding processes is created with modifications applicable to the WAAM method, including the most common CMT process. In the next part, an experiment is realized and described, where the influence of working method on individual welds is evaluated and the quality of the welds is examined from a geometric and structural point of view. Geometrical measurements, structural examinations and Vickers hardness test were performed on the samples.

<b>Title of the final thesis:</b>	The influence of parameters the WAAM additive process on cladding deposits quality
<b>Author:</b>	Schwarz Rudolf
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Kolařík Ladislav Ph.D.
<b>Consultant:</b>	Ing. Gurčík Tomáš
<b>Academic year:</b>	2019/2020
<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. Kolařík Ladislav Ph.D.
<b>Extent:</b>	76 pages (including attachments), 8 tables, 43 pictures
<b>Keywords:</b>	WAAM, additive manufacturing, CMT, MIG, MAG

# Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE .....	11
2. ADITIVNÍ METODY VÝROBY .....	13
2.1 Laser additive Manufacturing .....	14
2.1.1 Selective laser Sintering (SLS) .....	14
2.1.2 Selective laser Melting (SLM).....	15
2.1.3 Laser Metal Deposition (LMD).....	15
2.2 Electron beam melting .....	16
2.3 Podstata metody WAAM .....	17
3. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ .....	21
3.1 Základní skupiny.....	21
3.1.1 Tavné svařování.....	22
3.1.2 Tlakové svařování .....	23
3.2 Svařování v ochranné atmosféře MIG, MAG.....	23
3.2.1 Princip svařování metodou MIG/MAG.....	23
3.2.2 Druhy přenosu kovu pro svařování .....	25
3.2.3 Ochranné plyny při svařování MIG/MAG .....	26
3.2.4 Svařovací metoda Cold Metal Transfer (CMT) .....	27
3.2.5 Pulsní MIG.....	31
3.2.6 Tandem MIG/MAG .....	32
4. PRAKTICKÁ ČÁST – EXPERIMENT .....	35
4.1 Popis vytvářených vzorků.....	36
4.1.1 Vzorek.....	37
4.1.2 Přídavný materiál.....	39
4.1.3 Ochranný plyn.....	39
4.2 Průběh navařování a vizuální vyhodnocení vzorků.....	40



4.2.1	Vzorek č. 1 .....	40
4.2.2	Vzorek č. 2 .....	41
4.2.3	Vzorek č. 3 .....	43
4.3	Metalografická analýza vzorků .....	45
4.3.1	Struktura vzorků.....	45
4.3.2	Vyhodnocení geometrie vzorků.....	49
4.4	Měření tvrdosti podle Vickerse .....	53
5.	ZÁVĚR.....	58
	Bibliografie .....	59
	Seznam tabulek .....	62
	Seznam obrázků .....	63

## Seznam zkratek

3D	3 dimension (3 rozměrný)
Ar	Argon
CAD	Computer aided design (počítačem podporované návrhářství)
CMT	Cold Metal Transfer (přenos studeného kovu)
ČVUT	České vysoké učení technické
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (lokální sintrování kovu laserem)
EBM	Electron beam melting (tavení elektronovým paprskem)
EH	Effective height (efektivní výška stěny)
EWT	Effective wall thickness (efektivní tloušťka stěny)
FS	Fakulta strojní
HV	Tvrdomost dle Vickerse
LAM	Laser additive manufacturing (laserová aditivní výroba)
LMD	Laser Metal Deposition (laserové nanášení kovu)
MAG	Metal Active Gas (kov aktivní plyn)
MIG	Metal Inert Gas (kov inertní plyn)
MMA	Manual Metal Arc (manuální kovový oblouk)
O <sub>2</sub>	Kyslík
TIG	Tungsten Inert Gas (wolfram inertní plyn)
SLM	Selective laser Melting (selektivní tavení laserem)
SLS	Selective laser Sintering (laserové spékání)
SW	Surface waviness (vlnitost povrchu)
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing (drát a oblouk aditivní výroba)

# 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Od průmyslové revoluce již uplynulo pár staletí. Proces zdokonalování technologií se však nezastavil a probíhá i nadále. Zdokonalují se výrobky, stroje, materiály, ale v první řadě vše závisí na možnosti výroby. I v dnešní době se lidé snaží usnadnit práci, zdokonalit výrobu a ušetřit čas i materiál. Proto se v posledních letech začínají rozvíjet tzv. aditivní metody výroby.

Tyto metody mají za úkol hlavně usnadňovat výrobu tvarově složitých součástí a zároveň šetřit čas a peníze. Jedná se o výrobu známou především jako 3D tisk. Konečná součást či objekt je tvořen postupným nanášením jedné vrstvy na druhou, čímž vzniká celek. Jde o možnost výroby tvarově složitých součástí, pro které by jiné technologie byly nepoužitelné či příliš pracné. 3D tisk tedy získává velice silné postavení z hlediska výroby vůči konvenčním metodám obrábění, jako jsou nejčastěji: soustružení, frézování či jiné mechanické odebrání třísek. Není náhoda, že se 3D tisk setkává se stále zvyšující se popularitou, protože se součásti dají zhotovit z různých materiálů, především kovů a polymerů.

3D tiskárny na plasty si v dnešní době může pořídit každý, a proto se často vyskytují ve firmách a dílnách jako pomocná ruka při výrobě. Polymerové součásti však nemají takové mechanické a fyzikální vlastnosti jako kovové, a proto je třeba využívat i technologie ke zpracování kovu. Takové technologie se většinou označují jako technologie aditivní výroby, mezi které patří mimo jiné metoda navařování WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing).

U této metody dochází k navařování přídavného materiálu ve formě drátu (elektrody) pomocí obloukového svařovacího procesu (MIG, MAG nebo TIG). Pokládáním návarů na sebe stejně jako u plastových 3D tiskáren vzniká 3D objekt. Takto zhotovený výrobek má ovšem různé mechanické vlastnosti a vlivem různých navařovacích metod dosahujeme rozdílů v geometrii a struktuře po navaření.

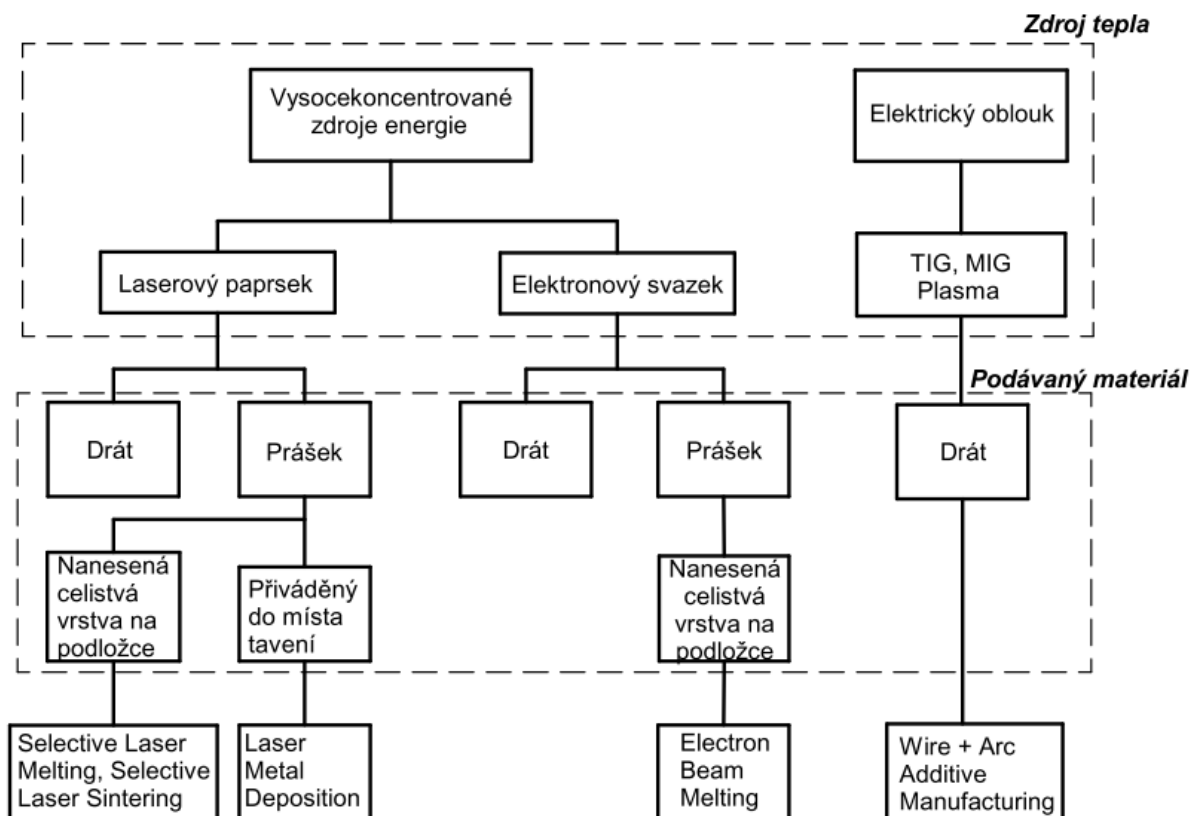
Cílem této práce je přiblížit aditivní metodu WAAM, prozkoumat její možnosti ve výrobě, zaměřit se na svařovací metody, které lze využít a poté zjistit, jaký vliv na kvalitu návarů mají pracovní postupy metody WAAM. Stanoví se tedy několik navařovacích postupů a následně se provede proces navařování. Na takto

navážených vzorcích bude provedeno vyhodnocení kvality z hlediska ovlivnění struktury materiálu a jejich mechanických vlastností (zkoušky tvrdosti) a následně i vyhodnocování z hlediska geometrických rozdílů.

Bakalářská práce byla řešena v období koronavirové pandemie, způsobující nemoc COVID-19, kdy byla v platnosti omezení ohledně pohybu osob. To se dotklo i vstupu do laboratoří FS a tím bylo značně ovlivněno i řešení praktické části práce, která tak byla částečně omezena a byly provedeny pouze základní experimenty z původně naplánovaných.

## 2. ADITIVNÍ METODY VÝROBY

WAAM je pouze jednou z různých metod aditivních technologií a je možné využívat i jiné metody. Obr. 1 zaznamenává rozdělení aditivních metod, pro zpracování kovových materiálů. Využívají se tak dva hlavní zdroje tepla – vysocekoncentrované zdroje energie nebo elektrický oblouk. Jako vysocekoncentrované zdroje energie lze využít laserový paprsek či elektronový svazek. Všechny aditivní technologie pracují na podobném principu, liší se však především tepelným zdrojem, a typem přídavného materiálu, který je ve formě prášku nebo drátu. Dalším kritériem, kterým se metody liší je způsob dodávání přídavného materiálu, tzn. zda je podáván materiál (prášek) přiváděn do místa tavení, nebo je položen ve vrstvě na podložce. Mezi takové metody patří např.: Laser Additive Manufacturing (LAM) a Electron Beam Melting (EBM). [1]



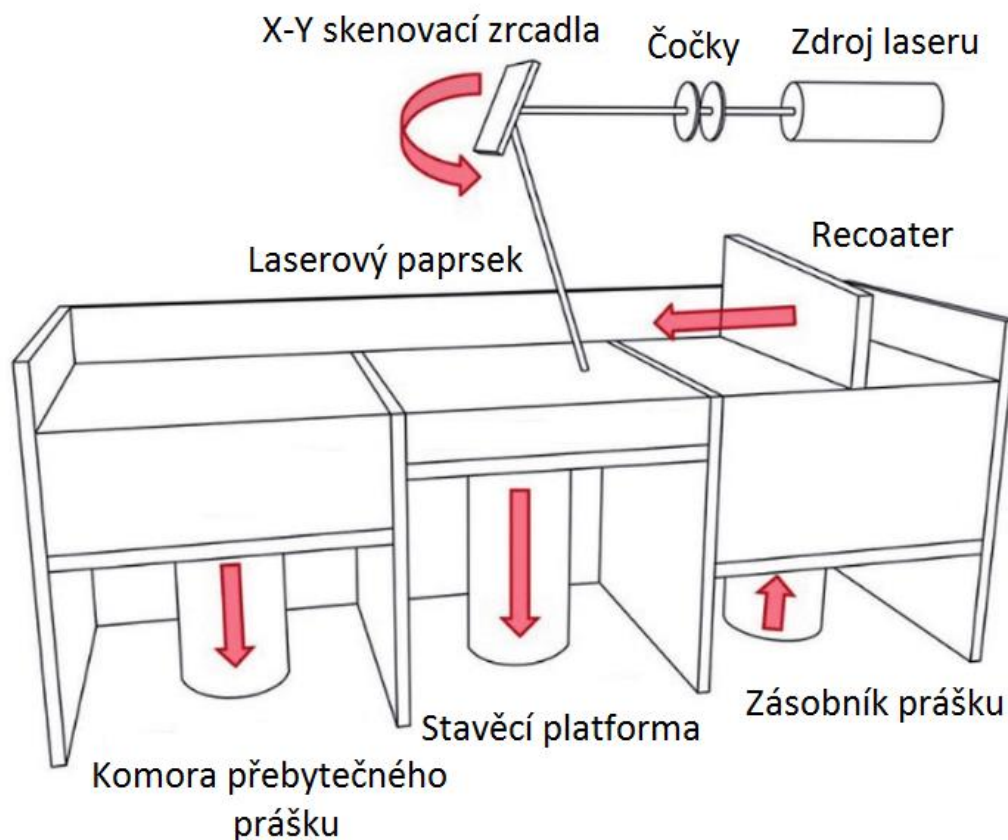
Obr. 1 - Rozdělení aditivních metod. Upraveno dle [2]

## 2.1 Laser additive Manufacturing

Tato metoda je založena na využití laserového paprsku. Dále se dělí na Selective laser Sintering (SLS), Selective laser Melting (SLM) a Laser Metal Deposition (LMD).

### 2.1.1 Selective laser Sintering (SLS)

Označení SLS, obvykle nazýváno také laserové spékání (sintrování), se využívá i pro nekovové materiály, jako jsou plasty, nylon a keramika. Proto je vhodnější označení DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Jedná se o označení pro stejný proces, ovšem používá se výhradně pro označení „3D tisku“ pro kovové materiály. Přídavný materiál ve formě jemného prášku se ohřívá na teplotu, která je pod teplotou tavení. Teplo je vytvořeno laserovým paprskem. Kvůli rizikům oxidace je přiváděn do pracovního prostoru ochranný plyn. Ten bývá převážně inertní. Nejprve se na podkladovou desku nanese vrstva prášku. Po nanesení prášek ohřívá laserový paprsek, který má teplotu pod bodem tavení prášku a tím dochází ke spékání. Laserový paprsek však tepelně ovlivňuje materiál jen v požadovaném místě vzniku součásti (výrobku). Tomu napomáhá řídicí systém, který laserový paprsek ovlivňuje. Po dokončení spékání jedné vrstvy se podkladová deska posune o tloušťku vrstvy dolů, která se pohybuje v rozmezí 10-100  $\mu\text{m}$ , ale pro dosažení vyššího rozlišení a kvality povrchu výrobku, je tloušťka vrstvy průměrně 30  $\mu\text{m}$ , a poté se proces opakuje [2]. Takto zhotovený výrobek je nutno povrchově upravit. Pro povrchovou úpravu se využívá základních dokončovacích metod, jako jsou tryskání, broušení, leštění, případně i obrábění. Hlavní výhodou je možnost vyrábět velmi složité tvary a struktury, dobrá stabilita a široké použití různých materiálů. Nevýhodami jsou malý pracovní prostor, velké investiční a provozní náklady a časté použití nutných podpůrných struktur. [1]



Obr. 2 - Princip metody SLS (DMLS). Upraveno dle [3]

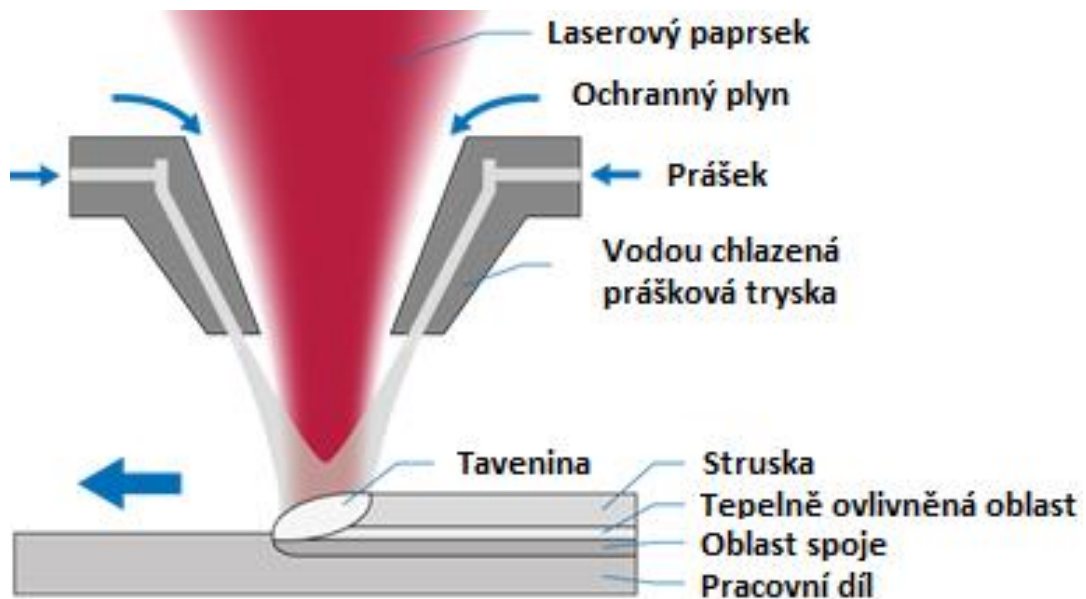
### 2.1.2 Selective laser Melting (SLM)

Aditivní technologie SLM využívá také práškovou vrstvu na podkladové desce, do níž je směřován laserový paprsek. Proces je velmi podobný předchozímu, ale využívá se především pro přídavné materiály z čistých kovů. Často se používají stejná zařízení, u nichž se liší nastavené parametry. Paprsek má oproti SLS za úkol prášek úplně roztavit. Dochází ke spojení na molekulární úrovni, kdy se materiál ohřívá těsně nad teplotu tavení. K natavení prášku je však potřeba vyšší energie paprsku. [4]

### 2.1.3 Laser Metal Deposition (LMD)

Tato metoda se liší především díky tomu, že prášek je do místa navařování unášen ochranným plynem, přes speciální hlavu, přímo do proudu paprsku. Často se označuje jako laserové navařování (Laser cladding). Pro výrobu touto technologií je vhodné použít jen čisté materiály. Z důvodu chybějícího rozměrného nanášecího zařízení, které v minulých případech nesmělo chybět, dochází nyní k úspoře prostoru. [1]





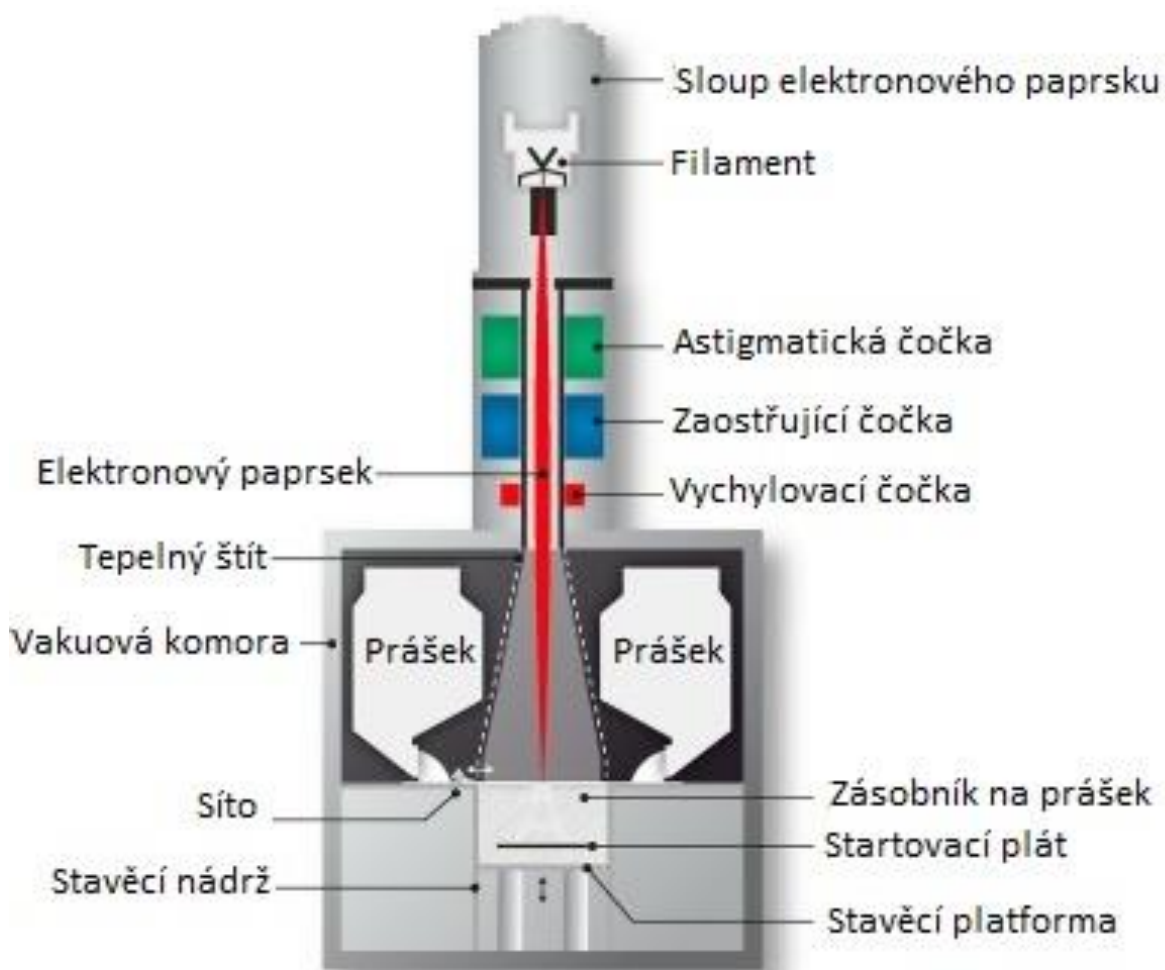
Obr. 3 - Princip metody LMD. Upraveno dle [5]

Princip metody LMD je naznačen na Obr. 3. Na podkladovou desku je navařován přídatný materiál ve formě prášku, který speciálně nadávkován již ve svařovací hlavě a proudí přímo do laserového paprsku, který ho taví. Směr navařování je naznačen šipkou. Po navaření vzniká ucelená vrstva materiálu.

## 2.2 Electron beam melting

Tato aditivní metoda spočívá v roztavení vrstvy kovového prášku výkonným elektronovým paprskem. Dochází k úplnému roztavení materiálu. Každá vrstva je tavena podle přesné geometrie, kterou definuje model CAD. Celý proces probíhá ve vakuu, tudíž dosáhneme vysoké kvality i bez použití ochranných plynů. Stroje využívají vysoký výkon elektronového paprsku a díky tomu dochází i k vysoké produktivitě. Vzhledem k tomu, že proces probíhá ve vakuu, je možné používat i reaktivní materiály, jako je Titan a jeho slitiny. Tato metoda se vyznačuje především vyšší kvalitou výsledné struktury výtisků a menší porézností. Také je třeba dodržet vysokou čistotu materiálu a výrobek následně povrchově upravit. [4] [6]

Výhodami jsou dobrá tepelná izolace během procesu, díky vakuu lze během procesu využít i vysoké teploty bez rizika absorpce kyslíku, v současti následně vzniká menší zbytkové napětí než u laserových systémů. Vakuový systém je však výrazně dražší. [7]



Obr. 4 - Schéma metody EBM. Upraveno dle [7]

## 2.3 Podstata metody WAAM

Metoda WAAM byla vyvinuta ve Velké Británii na Cranfield University v 90. letech 20. století, která se touto problematikou i v dnešní době aktivně zabývá. První patent byl však podán již v roce 1925. Jednou z příčin vzniku bylo, že některé relativně jednoduché součásti jsou známými procesy vyrobitelné jen velmi pracně či neekonomicky. Mimo jiné byl důvodem také vývoj ostatních technologických odvětví, kdy se pracuje především s kombinací robotického svařování a jeho programováním. Programování využívá procesy klasického svařování a jejich parametrů. Proto je metoda oproti předchozím zmíněným variantám cenově dostupná a hospodárná. Při volbě výrobního postupu

usnadňuje rozhodování mezi technologiemi i skutečnost, že při tomto procesu je využití materiálu velmi vysoké a vzniká tak minimum odpadu. [1] [8] [9]

Hlavní podstatou WAAM metody je vytvoření strojní součásti pomocí přídavného materiálu ve formě svařovacího drátu, kdy se pokládá velké množství návarových housenek na sebe. Dle předlohy CAD modelu se vytváří trajektorie pro návar housenek a jejich pokládáním podle příslušné dráhy se zhotovuje konečná součást. Geometrie jednotlivých vrstev a způsob pokládání, kdy se mohou housenky překrývat, může být v konečném zhodnocení kvality povrchu a přesnosti velmi podstatné. Celý proces je však plně automatický. Robotická pracoviště pracují s velikou přesností a velikost budoucího výrobku je omezena pracovním polem. Pracovní prostory robotů jsou však na rozdíl od prostorů současných 3D tiskáren na kovové materiály výrazně větší. Robotické rameno umožňuje velkou flexibilitu až do 6 os a lze pracovní prostor robota zvyšovat i současným kombinováním více robotů ve stejném nastavení. [1] [2] [8]



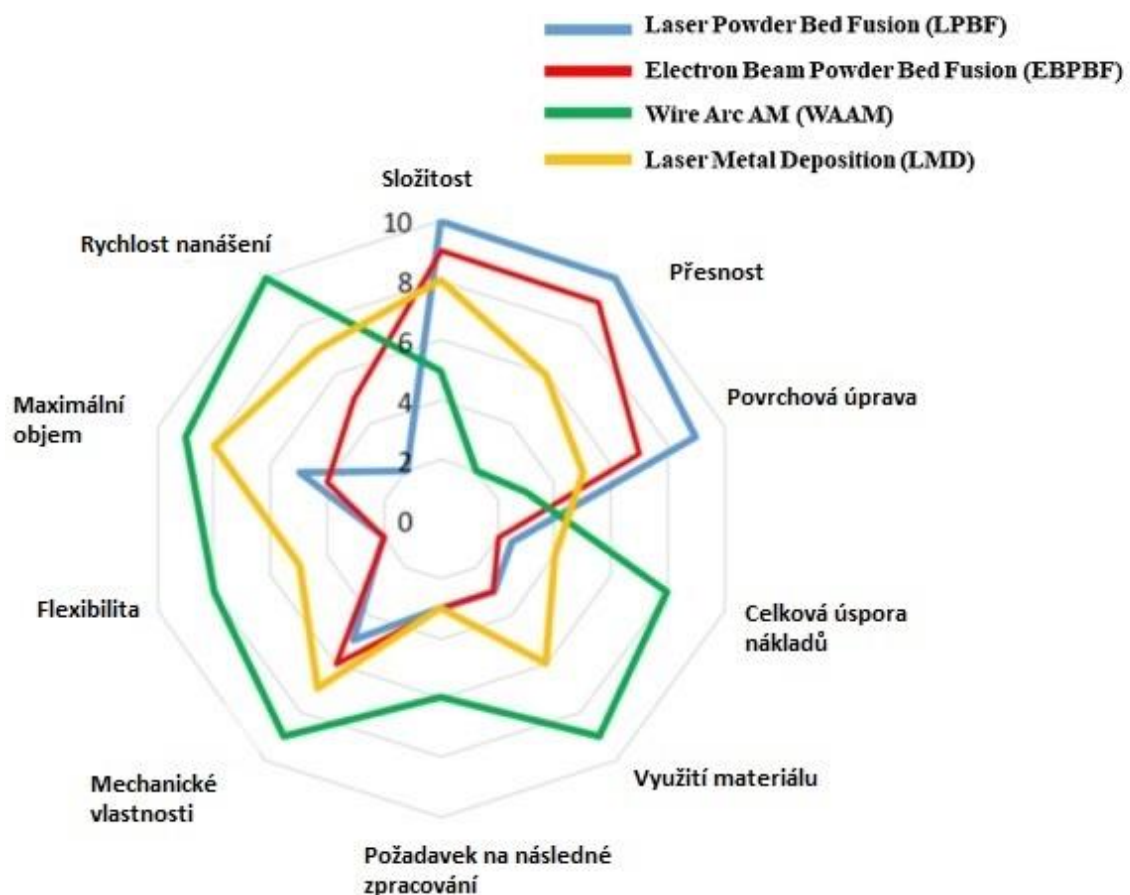
*Obr. 5 - Příklad dílů vyrobených metodou WAAM [8]*

Na Obr. 5 je možné si všimnout dílu, který je vyroben metodou WAAM. Nejprve je díl zhotoven pomocí návarových housenek. Výchozím materiálem je tedy přídavný materiál ve formě drátu. Takto vyrobený díl se upravuje pomocí dokončovacích metod obrábění na přesné rozměry a při této úpravě vzniká minimum odpadu. Tento díl po finálním obrobení návaru je vidět napravo.

K vytvoření návarové housenky je však zapotřebí elektrického oblouku, který se využívá jako tepelný zdroj vhodný k natavení přídavného kovového materiálu, nejčastěji ve formě drátu. Navařování se uskutečňuje za použití elektrického oblouku v ochranných atmosférách, tzn. metodami konvenčního svařování: MIG/MAG a TIG. Tyto metody se liší i v rychlosti navařování. MIG/MAG je schopná navařovat až 10 kilogramů za hodinu. Na rozdíl od toho metoda TIG

navazuje v rámci jednoho kilogramu za hodinu. Vhodnost způsobu navařování je pro každý materiál jiný. S vyšší rychlostí navařování se nestačí teplo tak rychle odvádět a vzniká tak vyšší riziko následné tepelné deformace. Při použití digitálně nemodifikovaných forem elektrického oblouku se nevyvarujeme jeho nestálosti, nebo rozstříku přídavného materiálu, a proto se snažíme snížit tyto nevhodné vlastnosti použitím modifikovaných svařovacích procesů MIG/MAG, které tyto rizika značně snižují. Příkladem modifikovaných metod svařování jsou metody CMT (Cold Metal Transfer), pulsní MIG, tandem MIG, TIG-DC pulsní a další. Další využitelnou metodou svařování je plasma DC pulsní. Díky této metodě můžeme do navařované součásti vnášet velmi malé množství tepla a její oblouk je mimořádně stabilní. [1] [10]

Srovnání s ostatními metodami je znázorněno na Obr. 6. Navařování metodou WAAM bezkonkurenčně poráží ostatní metody v rychlosti navařování, dosažení mechanických vlastností po navaření a v efektivním využití materiálu. Oproti ostatním také velmi šetří náklady na výrobu. Potýká se ovšem s velmi malou přesností a z důvodu navaření je nutné dokončovací opracování povrchu.



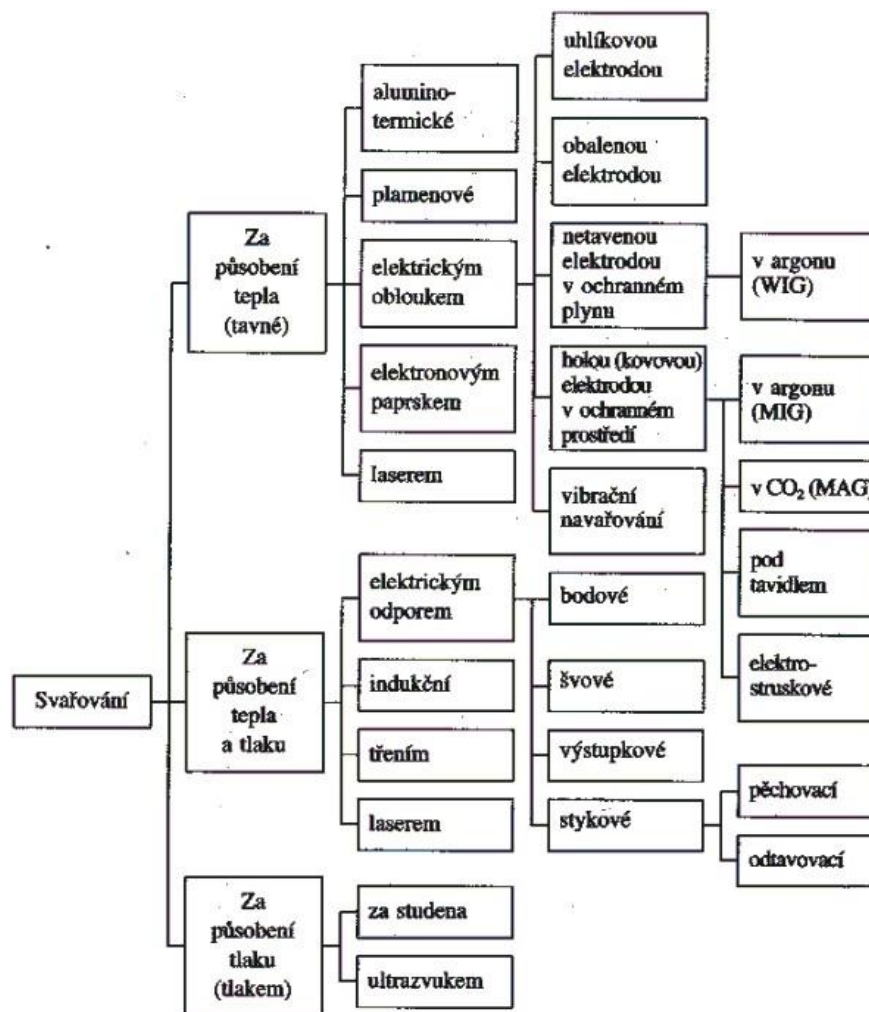
Obr. 6 - Srovnání metody WAAM s ostatními aditivními metodami. Upraveno dle [2]

WAAM metoda představuje více než 90% efektivní využití materiálu, což znamená nové možnosti především v leteckém průmyslu, a to i z pohledu, že se jedná o výrobky větších rozměrů, které jsou zhotoveny v kratším čase, než jaké jsou schopny dosáhnout laser a elektronový svazek s použitím přídavného materiálu ve formě prášku. Velké materiálové využití je velice ekonomicky přínosné, avšak tento přínos přichází i s nevýhodou, že vyráběné díly mají menší přesnost a nižší geometrickou složitost, než můžeme dosáhnout u technologií s práškovým dávkováním. Dalším charakteristickým rysem a zároveň nevýhodou je přivaření k podkladové desce. Ta slouží pro účel WAAM pouze jako podpůrný materiál a po zhotovení a obrobení součásti dochází k odříznutí od návaru. Aby výrobek dosáhl požadovaných mechanických a fyzických parametrů je třeba následně provést konvenční obrábění a tepelné zpracování. [1] [2]

### 3. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Technologií svařování se rozumí vytvoření nerozebíratelného spoje dvou a více součástí. Obecně se dá svařování rozdělit do dvou skupin – tavné nebo tlakové svařování. Prvním případem je svařování tavné. Vytvoření spoje je dosaženo působením tepelné energie do místa svaru, přičemž dochází k natavení základního a přídavného materiálu. Vytváří se tzv. svarová lázeň. Při jejím tuhnutí se vytváří nová zrna a rozhraní dvou prostředí tuhého a tekutého zaniká. Oproti prvnímu se tlakové metody charakterizují zejména působením mechanické energie. Aktivací povrchových atomů se přiblíží spojované materiály na vzdálenost působení meziatomových sil. V takovém případě vznikne nerozebíratelný spoj. [11]

#### 3.1 Základní skupiny



Obr. 7 - Rozdělení hlavních skupin svařování [12]

Na Obr. 7 je možné vidět základní rozdělení svařování do hlavních skupin a jejich dělení.

### **3.1.1 Tavné svařování**

Nejprve je vhodné přiblížit první podskupinu (viz Obr. 7), tj. tavné svařování. Jde o postup, kdy je energie přiváděná do místa svaru pouze ve formě tepla a ke spojení dvou materiálů dojde při jejich roztavení. Toto místo je nazýváno jako svarová lázeň. Svarová lázeň obsahuje roztavený kov, který snadno reaguje s prvky, jako jsou kyslík, dusík (tedy plyny vyskytující se přirozeně v okolní atmosféře) a nečistotami (u ocelí především se sírou, či fosforem, které se mohou vyskytovat v materiálu). Z tohoto důvodu je třeba zabránit styku oblouku s těmito prvky, a proto se využívají různé způsoby ochrany a řízených metalurgických reakcí. Tyto způsoby se u různých typů tavného svařování liší. Často jsou to ochranné plyny vznikající hořením obalu elektrody nebo samotné ochranné plyny dodávané přímo hořákem (ochranná atmosféra). [13]

Největší podskupinou je tavné svařování prováděné elektrickým obloukem. Využíváme jej nejčastěji ve spojení se svařováním obalenou elektrodou, tavící se elektrodou v ochranné atmosféře (MIG, MAG) a v neposlední řadě také s netavící se elektrodou v ochranné atmosféře (TIG). [13]

#### **Svařování obalenou elektrodou (MMA)**

Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou je nejstarší metoda obloukového svařování. Přesto má v současné době velice silné postavení v oblasti svařování. Její oblíbenost je dána především díky snadné dostupnosti svařovacích zdrojů, přídavného materiálu, a hlavně je možné svařovat prakticky ve všech polohách a velký sortiment základních materiálů. Hlavní nevýhodou je nízká výkonnost a potřebná velmi dobrá zručnost pracovníka (jedná se o typickou ruční metodu svařování). Elektrický oblouk hoří mezi odtavující se elektrodou a svarovou lázní. Ochrana oblouku je zajištěná obalem, který je na povrchu elektrody. Z obalu vzniká struska, která mechanicky chrání kapky roztaveného kovu a svarovou lázeň před vnikem atmosférických plynů. [13] [14]

Pro tento typ svařování se používají jak stejnosměrný, tak i střídavý proud. Záleží však na druhu elektrod. Např. pro čisté bazické elektrody není možné použití střídavého proudu. Parametry se nastavují na zdroji, kde se upravuje



pouze síla proudu. Napětí svařovacího oblouku vychází z délky svařovacího oblouku. [14]

Nejčastěji používané elektrody ve spojitosti s tímto typem svařování jsou tříděny podle obalů. Mezi základní typy obalů patří rutilový obal, kyselý obal, bazický obal a celulózový obal.

Pro účely aditivních technologií, resp. metody WAAM není tato metoda vhodná, vzhledem k tomu, že nelze automatizovat a robotizovat.

### **3.1.2 Tlakové svařování**

Princip je založen na vzájemném přiblížení dvou spojovaných součástí. Vzdálenost, na kterou se materiály přiblíží, je minimální a odpovídá přibližně parametru krystalové mřížky. Této vzdálenosti se dosáhne zpravidla velkou tlakovou silou. K dosažení požadovaného přiblížení je nutná výrazná plastická deformace, která musí být minimálně 60 %. V tu chvíli začne probíhat proces zvaný difuze. Ve stykových plochách vzniknou vazby mezi hraničními mřížkami. Sílu lze vyvodit mechanicky, nebo pomocí tlakové vlny. Pro svaření je nezbytně nutné, aby povrchy obou materiálů byly dokonale očištěny, tj. zbaveny oxidů, mastnoty a jiných nečistot. [13]

Pro metodu WAAM je technologie tlakového svařování nepodstatná, a proto se dál zaměřím především na svařování v ochranné atmosféře metodou MIG, MAG.

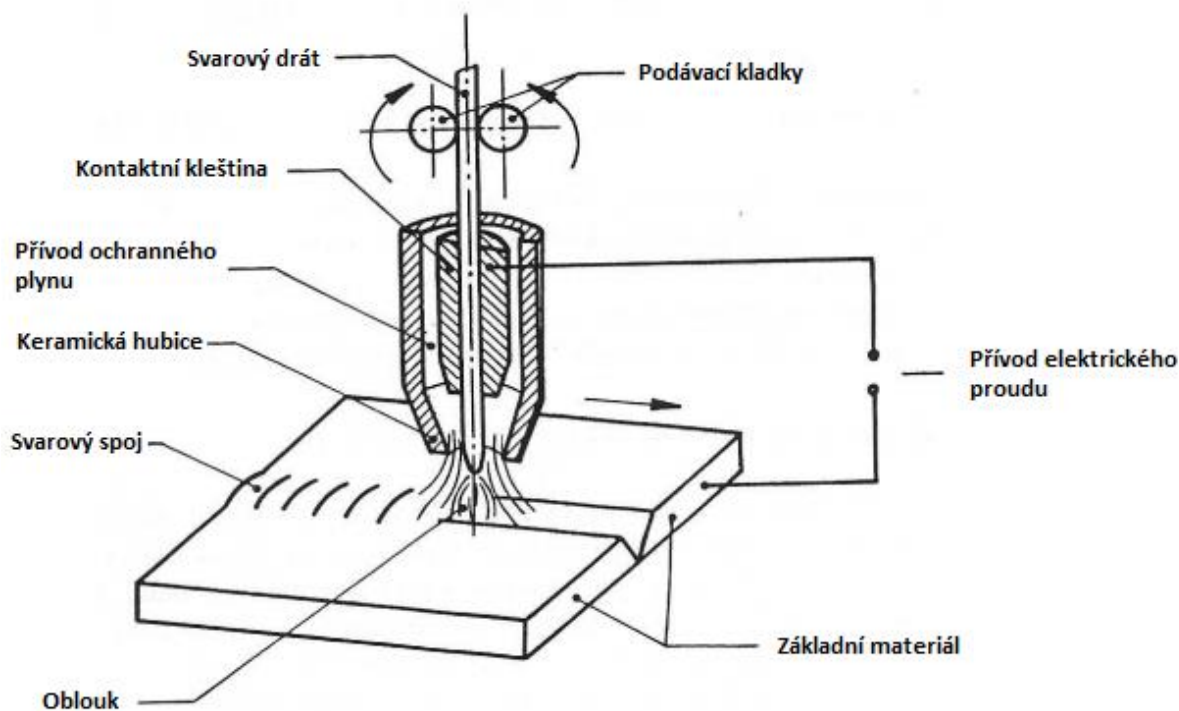
## **3.2 Svařování v ochranné atmosféře MIG, MAG**

Svařování v ochranné atmosféře patří k nejvyužívanějším metodám, které se používají při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Svarový kov je možno navařovat ve větším množství nezávisle na polohách, a proto se řadí mezi univerzální metody svařování. Pro aditivní metodu WAAM jde o nedílnou součást, kdy se využívá tohoto typu svařování a následných modifikací. [11] [15]

### **3.2.1 Princip svařování metodou MIG/MAG**

Svařovací oblouk je při tomto typu svařování navázán mezi základním materiálem a nepřetržitým svařovacím drátem (elektrodou). Svarová lázeň i oblouk jsou chráněny proudem plynu inertního (MIG) či aktivního (MAG). Jde o podstatně produktivnější metodu, než je MMA. Elektrický proud se na drát

přenáší třecím kontaktem v ústí hořáku tak, aby délka drátu pod elektrickým proudem byla co nejkratší (viz Obr. 8). Nepřetržitý drát je podáván automaticky, podávacími kladkami, z cívky umístěnými v podavači, vlastním hořáku, či kombinací obou způsobů. Ochranný plyn je přiváděn do hořáku hadicemi z externě umístěných lahví. [11] [15]



Obr. 8 - Princip svařování metodou MIG/MAG [11]

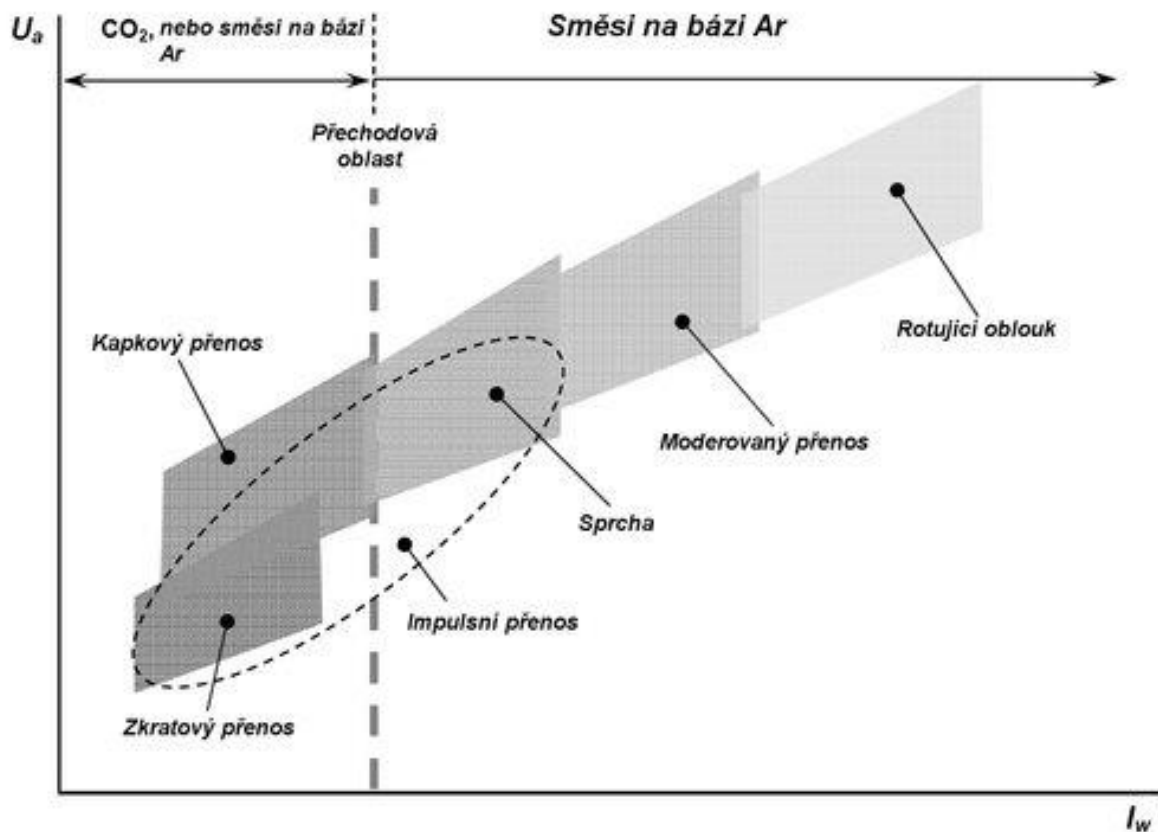
Druh přenosu kovu obloukem je dán především parametry svařování a ochranným plynem. Při svařování vzniká také velké množství tepla, které v oblouku může dosahovat rozmezí teplot 1700 až 2500 °C. Teplota svarové lázně je o trochu nižší a pohybuje se okolo 1600 až 2100 °C. Rychlost svařování se blíží 150 cm/min především díky vysokým hodnotám proudu. Podle druhu základního materiálu se volí ochranná atmosféra. Ta ovlivňuje především přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku. [11]

Metoda MIG/MAG je vhodná pro svařování ve všech polohách, její svařovací rychlost je velmi vysoká, což výrazně zvyšuje produktivitu práce. Má nižší nároky na čištění vzniklé svarové housenky (nevzniká struska) a eliminuje zplodiny oproti MMA. Je možné vnášet při zkratovém přenosu méně tepla do svařence a tím se zmenšují tepelné deformace. Mezi hlavní nevýhody této metody patří

vyšší nároky na údržbu zdroje a komponentů a relativně vysoké vyzařené teplo do okolí. [16]

### 3.2.2 Druhy přenosu kovu pro svařování

Mezi základní charakteristiky svařování elektrickým obloukem patří druh přenosu kovu, který je ovlivněn hlavně svařovacími parametry, proudem a napětím. Menším poměrem závisí také na složení ochranného plynu, druhu přídavného materiálu a také na technice svařování. Oblast přenosů je dána závislostí napětí na oblouku a rychlosti posuvu drátu (resp. svařovacím proudem) a je znázorněna na Obr. 9. [11]



Obr. 9 - Závislost druhu přenosu na nastavených parametrech [16]

Druhy přenosu:

- impulsní přenos

Impulsní přenos je udržován základním proudem, který bývá nastaven od 20 až 50 A. Jeho průběh je elektronicky řízen. Proud je časově i tvarově nastaven. Oblouk hoří po celou dobu amplitudy a k odtavení kapky dochází až v konečné části amplitudy. [17]

- zkratový přenos  
Zkratový přenos je dán napětím od 14 do 22 V a proudem od 60 do 180 A. Charakteristikou je přerušení oblouku zkratem. Tím dojde k oddělení kovu z elektrody. Výkon navařování se pohybuje v rozpětí od 1 - 3 kg/hod. [17]
- kapkový přenos  
Probíhá při nastavení proudu na 190 až 300 A a napětí se pohybuje v rozmezí 22 až 28 V. Při svařování se natavuje konec elektrody a tvoří se velká kapka. Frekvence přenosu kapek je menší, a to přibližně 5 až 40 kapek za sekundu. [17]
- sprchový přenos  
Tento přenos se nachází v rozpětí napětí 28 až 48 V a rozsahu proudu 200 až 500 A. Vlivem magnetického pole dochází k odstříhávání drobných kapiček, které směřují do svarové lázně a tím i k urychlení, kdy dochází k vysoké frekvenci 150 až 350 Hz. Proud zůstává během celého procesu konstantní. [17]
- moderovaný přenos  
Moderovaný přenos je dán výrazně vyššími parametry proudu. Hodnota proudu odpovídá rozsahu od 450 do 750 A, napětí se pohybuje od 40 do 50 V. Při vysokých parametrech dojde k větší spotřebě drátu a s tím je spojená i rychlost podávání drátu. Ta se pohybuje v rozmezí 20 až 45 m/min. Přenos utváří veliké kapky, které se odtavují ve vysoké frekvenci z konce elektrody. [17]
- rotující přenos  
Při rotujícím přenosu se využívá napětí na oblouku 65 V. Vysoká hodnota proudu a volná délka drátu, která je větší než 20 mm, způsobují předehřev drátu téměř na teplotu tavení. Rotující přenos vytváří široké a hluboké svary s miskovitým profilem. [17]

### 3.2.3 Ochranné plyny při svařování MIG/MAG

Ochranné plyny při svařování mají podstatný úkol. Brání přístupu vzduchu do oblasti svařování a tím především chrání elektrodu, oblouk i svarovou lázeň před účinky vzdušného kyslíku. Při přístupu k lázni kyslík způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků. Pro metodu MAG se používá jako

samostatný ochranný plyn: oxid uhličitý CO<sub>2</sub> nebo dnes častěji vícesložkové směsné plyny především s obsahem argonu (Ar + CO<sub>2</sub> nebo + O<sub>2</sub>). Pro metodu MIG se běžně užívají čistý plyn argon či helium anebo jejich dvousložková směs argonu a helia. [11]

Pro oceli je velmi vhodnou variantou metoda MAG. Aktivní složka plynu působí na tavnou lázeň příznivě. Kyslík reaguje s tavnou lázní a při procesu vyhořívají nežádoucí nečistoty, jako jsou fosfor a síra. Zároveň se snižuje povrchové napětí tavné lázně a tím přispívá k její tekutosti. Pro nelegované nízkouhlíkové oceli se nejčastěji volí směsné plyny označené: Argomix 4 (4 % O<sub>2</sub> v argonu), Krysal 8 (8 % CO<sub>2</sub> v argonu), Argomix D (8 % O<sub>2</sub> v argonu), Krysal 18 (18 % CO<sub>2</sub> v argonu) a Argomix 20 (15 % CO<sub>2</sub> + 5 % O<sub>2</sub> v argonu). [18]

Tyto plyny mají různý vliv na svařování a liší se především svými operativními vlastnostmi, hladkostí svarové housenky, šířkou závaru v kořeni svaru a mají i malý vliv na mechanické vlastnosti spoje. Výše zmíněný Argomix 4 napomáhá nejmenšímu rozstříku, který je přibližně 0,5 % z celkového objemu navařeného kovu. Šířka zavaření kořene je u této směsi nejmenší a čistota povrchu a hladkost kresby je nejlepší. Krysal 8 má oproti Argomixu 4 lepší operativní vlastnosti dané menší tekutostí lázně. Čistotu povrchu má srovnatelnou. Argomix D se vyznačuje jemnou kresbou, nízkým rozstříkem a podporuje větší bezpečný průvar. Tím je umožněno svařování materiálů o větší tloušťce. Krysal 18 je nejrozšířenějším plynem. Má velice dobré operativní vlastnosti, širší závar v kořeni a rozstřík dosahuje přibližně 1,9 % z vytaveného kovu. Argomix 20 je charakterizován největší šířkou závaru v kořeni a díky kyslíku dosahuje hladké kresby a nízkého rozstříku. [18]

Plynů pro svařování existuje více a lze vytvořit mnoho směsí. Zde byly uvedeny jen nejčastěji používané. [18]

### **3.2.4 Svařovací metoda Cold Metal Transfer (CMT)**

Techniky spojování materiálů musí v průmyslu splňovat spoustu požadavků, mezi které patří například hospodárnost, stabilita procesu a reprodukovatelnost. Vzhledem k co nejlepšímu využití vlastností materiálů se různé materiály kombinují. Spojování ocele a hliníku se dalo učinit pouze pomocí nýtů, šroubů či lepením. Po dlouhých výzkumech se firmě Fronius podařilo vyvinout proces s názvem CMT (Cold Metal Transfer – přenos studeného kovu),

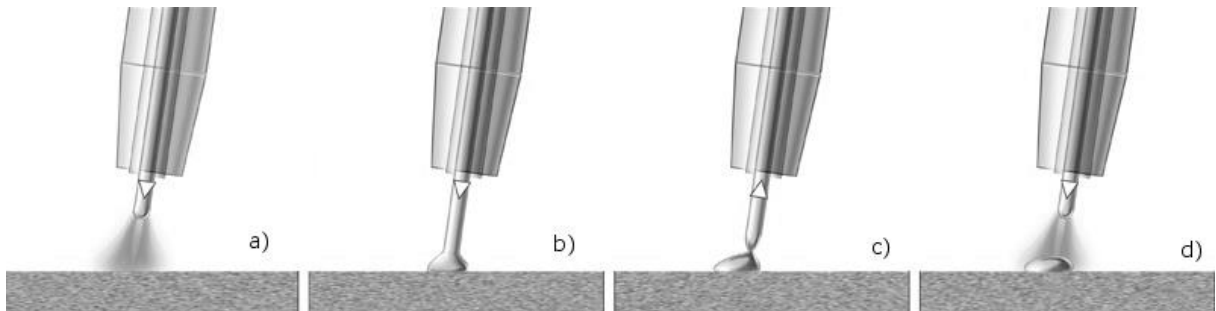
který umožňuje kromě klasického svařování běžně svažitelných materiálů a jejich kombinací i spojení oceli a hliníku termickou cestou. Počátek vývoje procesu CMT spadá do roku 1991. [19]

CMT je jednou z modifikací svařování MIG založené na procesu zkratového přenosu. CMT se od konvenčního procesu MIG/MAG liší hlavně v mechanickém ukládání kapiček svarového kovu. Při svařování mají změny teploty svarů a základního materiálu veliký vliv na mechanické vlastnosti materiálu, zbytková napětí ve svaru a také na rozměr a tvar výrobku. Technologie CMT umožňuje díky novému, vysokorychlostně digitálně řízenému, podávání drátu řídit ukládání přídavného materiálu při nízkém tepelném výkonu. Systém musí umožnit dodat do spoje dostatečnou energii pro natavení základního materiálu a vytvoření kapičky na elektrodě, a proto ovlivňuje především parametry, jako je rychlost posuvu drátu a dobu fáze oblouku. Při svařování metodou CMT můžeme pozorovat především dvě hlavní charakteristiky. V prvním případě prochází místem zkratu nízký zkratový proud, který přivádí nízký tepelný příkon. Druhou charakteristikou je vytvoření zkratu kontrolovaným a řízeným způsobem. [20]

CMT proces je vhodný především pro spojování tenkých hliníkových plechů, a to díky nízkému tepelnému příkonu a s tím související malé deformace. Pro vybrání vhodných svařovacích parametrů CMT pro požadovanou aplikaci bylo vyvinuto grafické rozhraní pomocí interpolace a neuronové sítě společností Sónia Meco. Vybrání vhodných svařovacích parametrů může vést k úspoře času, materiálu a s tím i souvisejících nákladů. [20]

Odtavování kapek svařovacího drátu využívá střídavého dopředného a zpětného pohybu drátu, kdy se drát vysouvá směrem k obrobku, avšak dochází opakovaně i k jeho zatahování zpět. Zpětný pohyb drátu je vyvolán pomocným podavačem umístěným přímo v hořáku, který je realizován s frekvencí až 70 Hz. Drát se posouvá směrem ke svařovanému materiálu, než se dostane do kontaktu se svarovou lázní. Jakmile se tak stane, je zatahován zpět pomocí servomotoru ve svařovacím hořáku, kdy kladky podavače začnou konat krátkodobý pohyb v opačném směru. Zpětný pohyb drátu podporuje přenos kapiček roztaveného kovu. Při přenosu kovu se proud snižuje a klesá k nulové hodnotě, čímž se zabrání vytváření rozstříku. Tím se snižuje i tepelné zatížení vnesené do spoje. Princip metody je zachycen na Obr. 10. Když dojde k přerušení zkratu, posuv drátu

je znovu otočen a vysouvá se vpřed. Takto se celý mechanismus opakuje. Směr pohybu a rychlost vysouvání je určována dobou vzniku a přerušení zkratu. Proces je nutno automatizovat. Důležitou částí je procesor. Ten udržuje díky zpětné vazbě stejnou vzdálenost a stálý rozměr housenky. [19] [20]



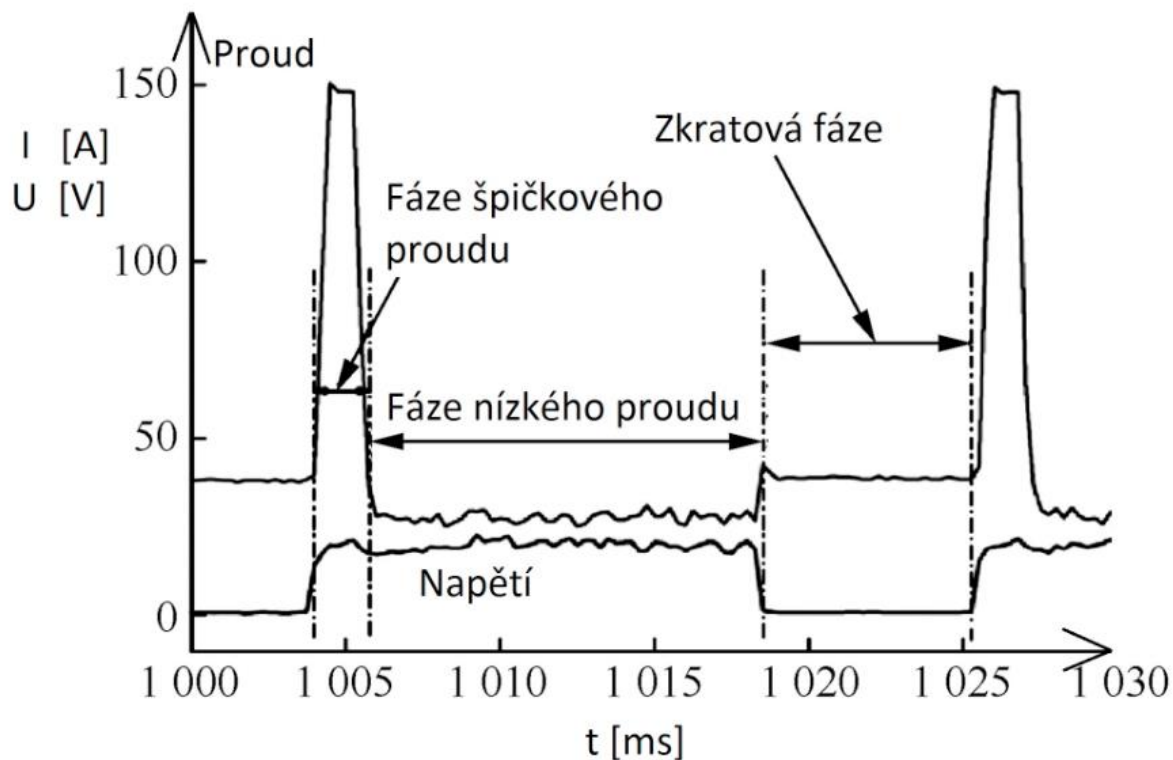
Obr. 10 - Princip metody CMT [21]

Dobu elektrického signálu typickou pro CMT lze označit za periodu, kterou je potřeba pro uložení roztavené kapičky přídavného materiálu do svarové lázně. [20]

Cyklus je možné rozdělit do tří fází, které jsou vyznačeny na Obr. 11:

- 1) Fáze špičkového proudu – při této fázi je napětí oblouku konstantní, odpovídá vysokému pulzu proudu, díky čemuž je zapálení oblouku snadné a poté ohřívá elektrodu až na teplotu, kdy vznikají kapky kovu.
- 2) Fáze nízkého proudu – proud je snižován, aby se zabránilo globulárnímu přenosu malé kapky kovu vytvořené na špičce drátu. Fáze pokračuje, dokud nedojde ke zkratu.
- 3) Zkratová fáze – v této fázi je napětí oblouku nulové. Současně se zapne zpětný chod drátu. Díky této fázi je napomáháno přenosu kapaliny do svařovací lázně. [20]





Obr. 11 - Proudový a napěťový průběh procesu CMT. Upraveno dle [20]

Při dokonalém nastavení délky oblouku a s vysokými tolerancemi spojování hran může být proces CMT do budoucna velmi atraktivní technologií, která může být využita v mnoha strojírenských podnicích jako řešení k překonání všech nevýhod současných svařovacích technologií. [20]

V dnešní době je možné použít i druhou generaci procesu CMT tzv. CMT advanced. Díky této technologii je možné přesně nastavit odtavný výkon pomocí kladných a záporných procesních cyklů. Vysokou stabilitu studeného svařování obvykle tento proces zaručuje z důvodu změny polarity cyklů ve fázi. Velké výhody proces CMT advanced přináší v cíleném vnesení tepla, vyšším odtavným výkonem při neměnném tepelném zisku a vznikají jen malé deformace. Spolu s tím vzniká při svařování i velmi málo svařovacích zplodin. [22]

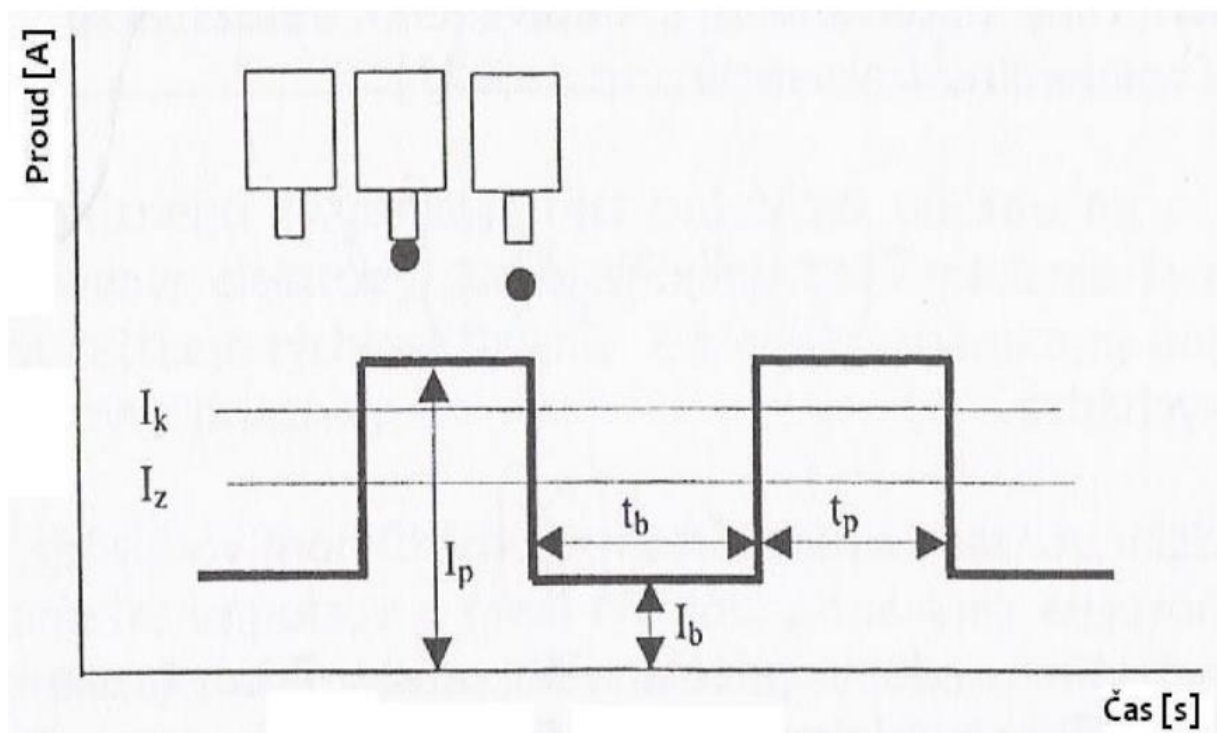
Svařovací proces kombinuje oblouk s kladně a záporně polarizovanými cykly CMT. Ve fázi zkratu nastává přepólování a tím zůstává oblouk stabilní. Při fázi se zápornou polaritou dosahuje svařování lepšího přemostění spár a také vyššího odtavného výkonu. Při kladném cyklu je do součásti vneseno cíleně vyšší teplo. Pohyb drátu zůstává stejný jako při CMT. [22]

Díky této druhé generaci lze spojovat tenké plechy při velké přemostitelnosti spár a při svařování vysokopevnostních ocelí je do nich vneseno

nepatrné množství tepla. Je vhodná také pro svařování různých materiálů, jako jsou chromnikl či hliník. [22]

### 3.2.5 Pulsní MIG

Další možnou variantou modifikovaného svařování je metoda pulsní MIG resp. MAG. Svařování využívá průběh pulsního proudu. Při tomto je precizně kontrolován přenos kovu během svařování. Tento způsob svařování má nízký rozstřík a vysokou efektivitu práce. Pulsní režim představuje několik nových svařovacích parametrů, jako jsou základní a špičkové proudy a doba trvání svařovacího pulzu. Celý svařovací proces se provádí pomocí nízkého základního proudu, který udržuje základní oblouk a vysoké hodnoty špičkového proudu pro tavení elektrody. Při pulzním procesu se proud neustále mění mezi dvěma nastavenými hladinami svařovacího proudu. Správné nastavení přenosu kovu je takové, kdy dochází k odtavení jedné kapky tekutého kovu při jednom pulzu. Dalšími parametry je frekvence a základní a špičkový proud pro dosažení správného přenosu kovu. Požadované chování přenosu kovu je dosaženo pulsním MIG, ale existuje veliký rozdíl v chování oblouku a přenosu kapek kovu pro svařované spoje s téměř stejným nastavením parametrů pro různé svařovací zařízení. V současné době se proto využívají synergické zdroje energie, které umí na základě rychlosti posuvu drátu automaticky nastavit napětí. [23]



Obr. 12 - Obecný průběh svařovacího proudu při pulsním svařování [24]

Vyznačené parametry charakterizují pulzní proud.  $I_b$  je označení pro základní proud a  $t_b$  je čas, po který základní proud působí,  $I_p$  pro špičkový proud a  $t_p$  je čas působení špičkového proudu,  $I_z$  je střední hodnota proudu a  $I_k$  je kritická hodnota proudu.

Kromě CMT a pulsního MIG existuje i řada dalších metod, které snižují vnesené teplo. Metody jsou vyvíjené i jinými výrobci než metoda CMT například výrobci Kemppi, EWM, CLOOS a další.

Mezi takové metody můžeme zařadit např. proces Cold Arc a Force Arc od firmy EWM, Intelligent Arc Control od firmy migatronic, Aristo Super Pulse od výrobce značky ESAB a WiseRoot od firmy Kemppi.

### 3.2.6 Tandem MIG/MAG

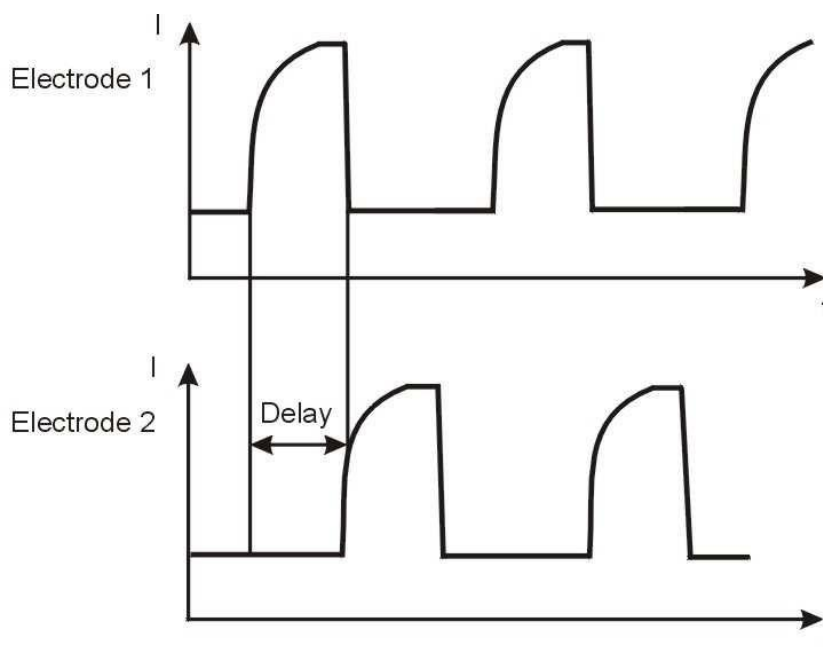
Mezi modifikované metody svařování patří i tandemové svařování, které využívá dvě drátové elektrody. Tandemové svařování je stále oblíbenější vzhledem k tomu, že je bráno jako prostředek ke zvýšení produktivity automatizované výroby. Výkonné zdroje pro tandemové svařování a technologie Waveform Control Technology umožňují svařování se dvěma elektrodami (svařovacími dráty) při použití procesoru MIG. Tento systém, který využívá dvě drátové elektrody, je zaváděn do firem od počátku 90. let. [25]



*Obr. 13 - Svařovací hubice pro tandemové MIG/MAG svařování [25]*

Při tandemovém svařování jsou používány dvě elektrody, které jsou izolované a ve směru svařování jsou umístěny v plynové hubici za sebou. Svařovací hubice i se dvěma elektrodami je vidět na Obr. 13 [18].

Rozestup mezi dráty je obvykle menší než 12 mm, čímž oba oblouky dodávají kov do jedné svarové lázně. Každá z drátových elektrod je napájena vlastním svařovacím zdrojem s jedním řídicím systémem, a proto jsou vzájemně izolované. Jako druh proudu pro tandemové svařování se využívá impulsní proud s tím, že jedna elektroda má časově posunutý začátek nárůstu proudu v pulsu. Kapka se odtavuje tedy nejprve na jedné elektrodě v momentě, kdy na druhé je proud na základní úrovni.

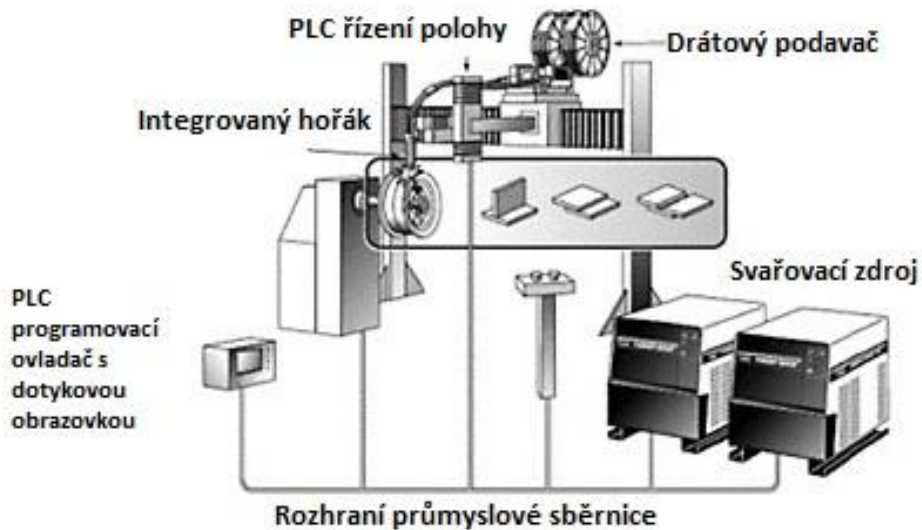


Obr. 14 - Obecný posunutý průběh proudu v závislosti na čase obou elektrod [26]

Často je na přední elektrodě nastaven vyšší výkon, díky kterému je dosaženo dokonalé natavení základního materiálu a poté i provaření kořene. Druhá elektroda slouží k prodloužení svařovacího oblouku, tím pádem prodlouží i dobu krystalizace kovu ve svarové lázni. Zároveň přídatný materiál z druhé elektrody lázeň vyplní. Prodloužená doba tuhnutí výrazně napomáhá lepšímu odplynění tavné lázně a zajistí nižší sklon k trhlinám. Proud potřebný pro svařování pro obě elektrody dosahuje až 900 A. Rychlost svařování tímto modifikovaným způsobem se udává přibližně 70 až 200 cm za minutu. [11]

Zařízení pro tandemové svařování musí umožňovat individuální nastavení parametrů pro každou ze dvou izolovaných elektrod. Z tohoto důvodu musí obsahovat dva svařovací zdroje. Svařovací zdroje použité pro tento druh svařování musí mít rychlé digitální ovládání a specifický řídicí software. Svařovací parametry se nastavují přímo na zdroji. Celé takové zařízení je znázorněno na

Obr. 15. Poloha je řízena pomocí programovatelného průmyslového počítače. Dva drátové podavače podávají každou drátovou elektrodu zvlášť do hořáku. Všechny důležité komponenty včetně svařovacích zdrojů mají odezvu přes průmyslovou sběrnici do řídicího programovacího ovladače. [25]



Obr. 15 - Zařízení pro tandemové svařování. Upraveno dle [25]

Tandemové svařování se pro účely WAAM moc nehodí hlavně kvůli vyššímu vnesenému teplu do součásti. Je však využitelné především pro svařování vysokými rychlostmi a pro svařování konstrukcí dopravních prostředků, jakými jsou například trupy lodí, skříně kolejových vozidel atd. [11]

## 4. PRAKTICKÁ ČÁST – EXPERIMENT

Experiment byl realizován na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze, v Laboratoři výuky svářečských technologií (LVST) V této laboratoři se nachází kromě ostatních svařovacích pomůcek i specializované robotické pracoviště pro obloukové svařování. Součástí tohoto pracoviště je univerzální 6ti-osý robot FANUC ArcMate 100iC s maximálním dosahem ramena 1420 mm, s řídicí jednotkou R-J3iC, jednoosým polohovadlem FANUC P250. Pro vlastní navařování metodou WAAM byla použita svařovací metoda MIG/MAG, s pomocí svařovacího zdroje Fronius Trans Puls Synergic 3200 CMT (pro experiment byl využit proces CMT, popsáný v kapitole 3.2.4). Pracoviště je dále vybaveno lahvemi s ochranným plynem, podavači přídavného materiálu a zásobníky svařovacího drátu viz Obr. 16. V laboratoři je instalováno centrální odsávání škodlivých plynů, tvořících se při svařování. Z důvodu bezpečnosti jsou kolem pracoviště robota nainstalovány bezpečnostní prvky, jako jsou světelné závory či koncové spínače na dveřích ohraničujících servisní oblast robota.



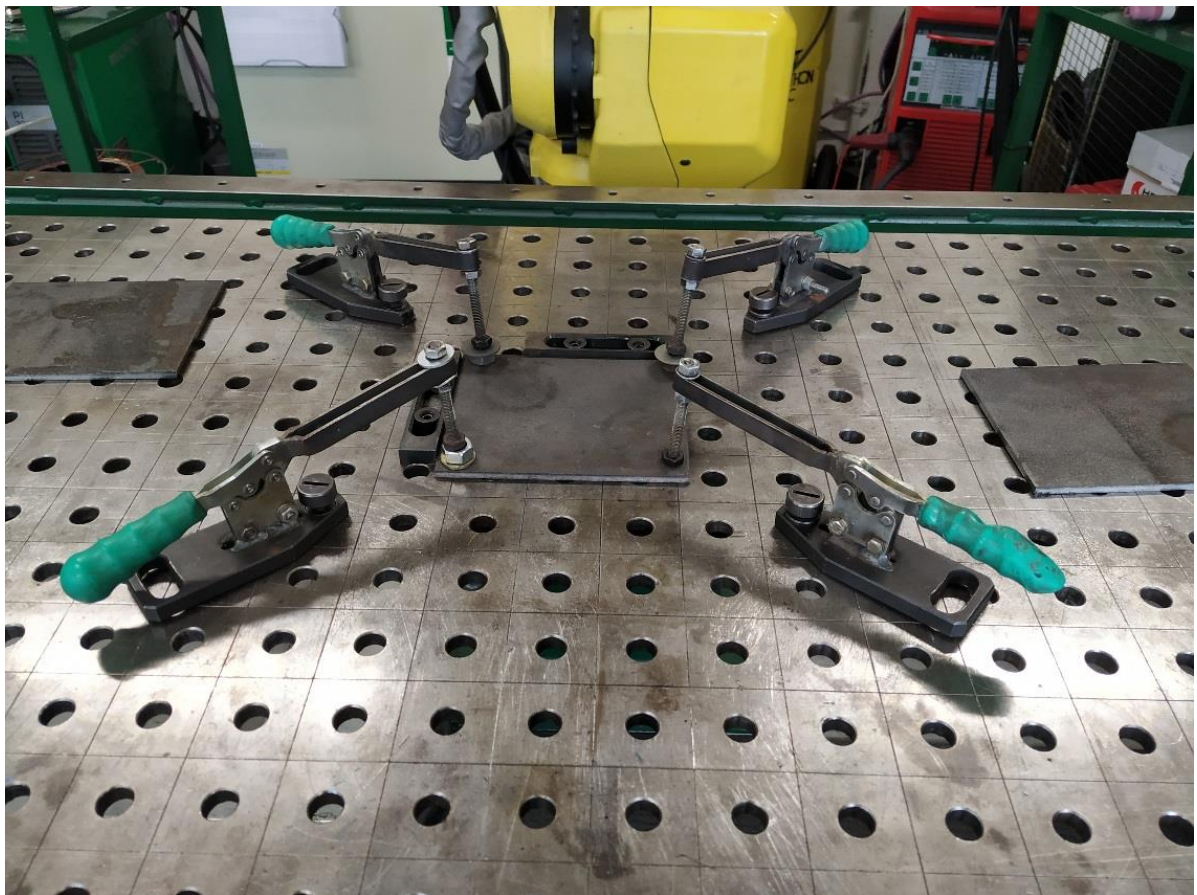
Obr. 16 - Robotizované pracoviště v laboratoři Fakulty strojní ČVUT v Praze



## 4.1 Popis vytvářených vzorků

Hlavním účelem experimentu je využít metodu WAAM společně s modifikovaným procesem svařování CMT a zjistit, jaký vzorek s daným postupem navařování bude vykazovat nejvýhodnější a nejlepší geometrické a strukturní parametry návaru.

Experimentální vzorky návaru byly vytvořeny na podkladovou desku z konstrukční oceli S235 (o tloušťce 6 mm a rozměrech 150 x 200 mm) podle EN ISO 6947. Na jednoosé polohovadlo, které je součástí robotického pracoviště, byla deska připevněna pomocí čtyř upínek rozmístěných do rohů podkladového materiálu. Přesnou polohu vymezovaly dorazy. Dorazy zamezovaly posunutí ve vodorovných směrech. Spolu s upínkami ukotvily základovou desku na přesné pozici, která odpovídala dráze navařování robotického ramena. Ta byla předem naprogramována.



*Obr. 17 - Ukotvení základové desky na jednoosém polohovadle pomocí rychloupínek*

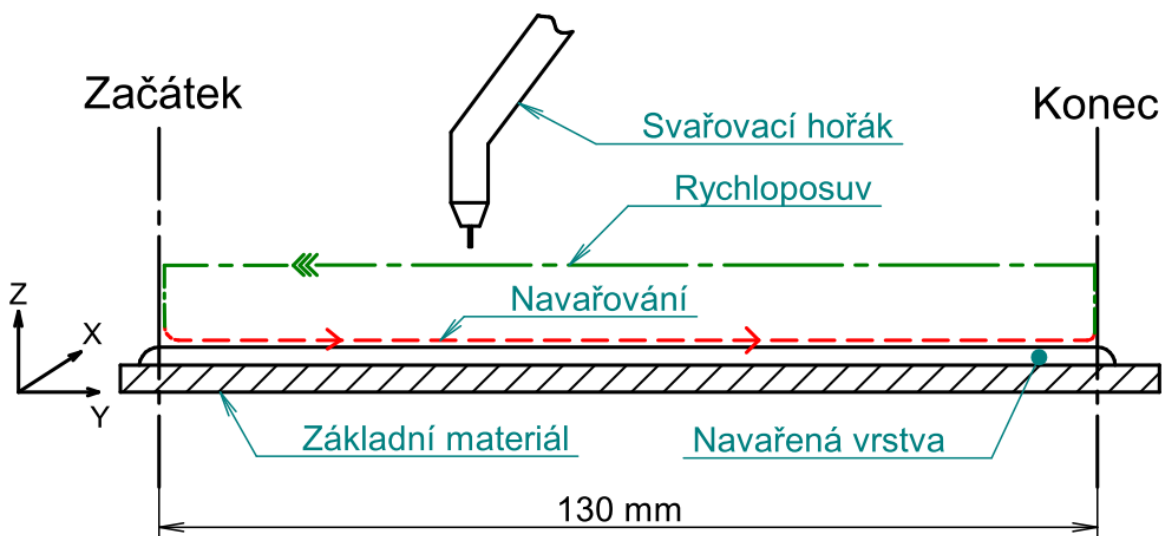


### 4.1.1 Vzorek

Dráha robota se při provedení všech vzorků nelišila. Hlavní trajektorie pohybu je znázorněna na Obr. 18 níže. Program byl vytvořen tak, aby svařovací hořák instalovaný na robotu najel rychloposuvem na začátek svařovaného úseku. Přiblížil se k podkladovému materiálu a zapálil elektrický oblouk. V době zažehnutí oblouku se hořák pohyboval po přímočaré dráze pracovní rychlostí, a to v délce 130 mm. Po navaření této vzdálenosti (přímka označená ve schématu jako konec) el. oblouk zhasl a hořák byl oddálen od podkladového materiálu a posunut o velikost jedné vrstvy směrem od podkladového materiálu (směr osy Z). Následně se hořák vracel rychloposuvem opět na začátek, a celý postup byl opakován při navařování další vrstvy (všechny vrstvy byly tedy navařovány vždy stejným směrem). Celý návar je tvořen 30 návarovými housenkami vrstvenými na sebe.

Celkem byly navařeny 3 vzorky, které se od sebe liší pracovním postupem.

- První vzorek byl navařen kontinuálně (bez úpravy tepelného cyklu navařování)
- Druhý vzorek byl navařen stejným způsobem, ale mezi jednotlivými vrstvami byla dodržena teplota interpass 50 °C
- Třetí vzorek byl navařen stejným způsobem jako vzorek č. 2 (tedy s teplotou interpass 50 °C) a navíc s úpravou návarové plochy (broušením), vždy před navařením další vrstvy.



Obr. 18 - Znázornění trajektorie navařování experimentálních vzorků

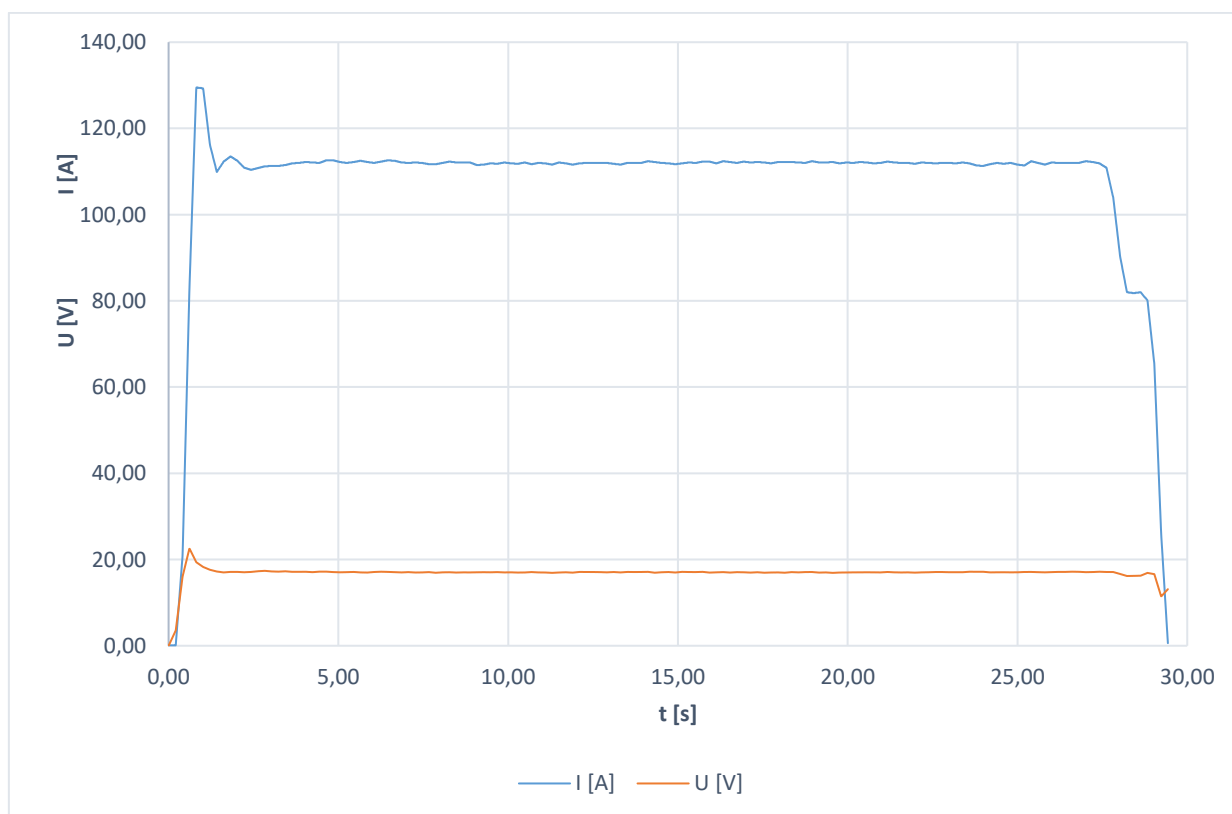
Před navařením byly nastaveny základní parametry svařování metodou CMT. Bylo nutné nastavit na jednotce dálkového ovládání RCU 5000i pracovní proud, pracovní napětí, posuv drátu, korekci délky oblouku, režim hořáku a postup. Přesné hodnoty svařovacích parametrů jsou uvedeny v Tab. 1. Pro nastavení postupu se zaváděly hodnoty, jako jsou předfuk a dofuk plynu, korekce odhoření, zaváděcí rychlost a průtok plynu. Data k nastavení postupu je možné vidět v Tab. 2. Časový průběh proudu a napětí při navařování jedné vrstvy, zaznamenaný systémem Weldmonitor, je vyznačen na Obr. 19.

Tab. 1: Základní parametry svařování

Proud [A]	Napětí [V]	Posuv drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [%]	Režim hořáku
104	10,4	3,0	20 %	S2- takt

Tab. 2: Parametry nastavení postupu svařování

Předfuk plynu [s]	0,5	Zaváděcí rychlost [m/min]	5
Dofuk plynu [s]	0,2	Korekce hoření [s]	0,1
Přibližovací rychlost [m/min]	Auto	Nastavená hodnota plynu [l/min]	15



Obr. 19 - Časový průběh proudu a napětí při navařování jedné vrstvy

### 4.1.2 Přídavný materiál

Nedílnou součástí experimentu je vybrání přídavného materiálu. Vzhledem k navařování součásti z přídavného materiálu, je nutné tento materiál plně charakterizovat. Mechanické vlastnosti vyrobené součásti budou odpovídat mechanickým vlastnostem svařovacího drátu (PM). Proto je třeba se zaměřit na požadované mechanické vlastnosti konečné součásti a dle toho zvolit správný přídavný materiál.

Jako přídavný materiál byl použit svařovací nízkolegovaný drát OK Aristorod 69 od firmy ESAB o průměru 1 mm, který je vhodný především pro svařování nízkolegovaných vysokopevných ocelí. Tento přídavný materiál má dobrou vrubovou houževnatost při nízkých teplotách. Obsah hlavních legur, které udává výrobce je uvedeno v Tab. 3 v hmotnostních procentech (%).

Tab. 3: Obsah hlavních legujících prvků OK Aristorod 69 v hm. %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0,06	0,6	1,6	0,3	1,4	0,25	0,07

Dalšími důležitými parametry jsou i mechanické vlastnosti svařovacího drátu. Nejdůležitější hodnoty mechanických vlastností jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Mechanické vlastnosti přídavného materiálu

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	KV [J]
750	690	20	60 (-30 °C)

### 4.1.3 Ochranný plyn

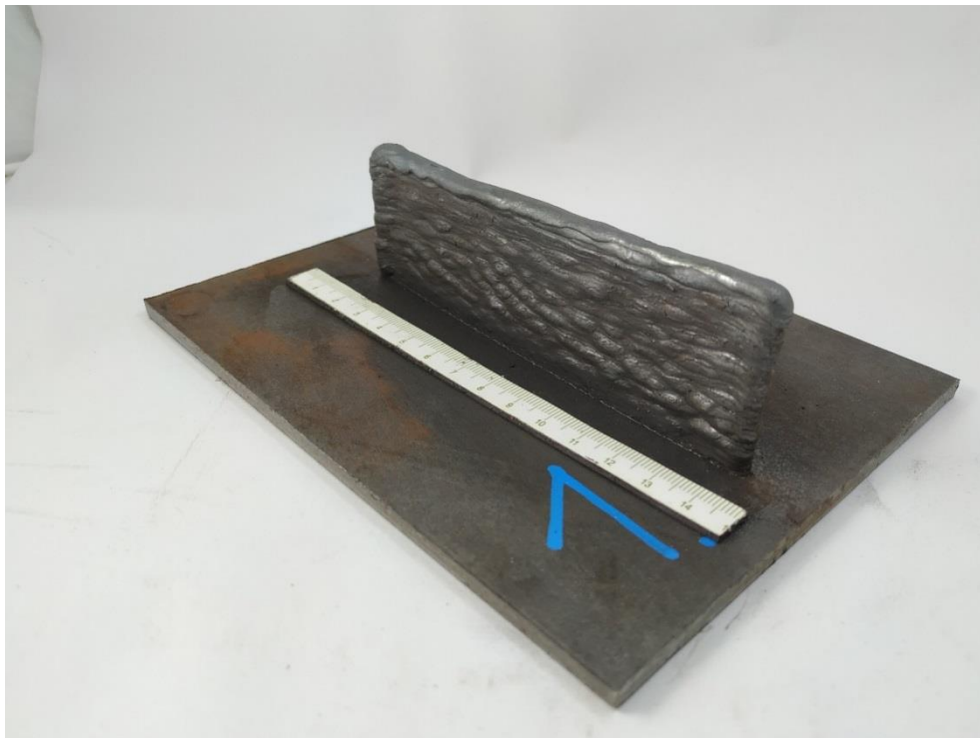
Vzhledem k ochraně návarů před okolními vzdušnými plyny a zaručení kvalitního návaru je nutné využití ochranného plynu. Jako ochranný plyn k navařování byla použita směs, která obsahuje 82 % argonu a 18 % oxidu uhličitého (M21 podle ČSN EN ISO 14175). Jde o směs s obchodním názvem Corgon 18 od firmy Linde gas. Tento ochranný plyn vytváří svary s velmi dobrým průnikem a spojí bočních stěn. Dále rapidně snižuje vadnost svarů. Díky vysokému obsahu CO<sub>2</sub> zabraňuje kontaminaci povrchu vlhkostí a tím i korozi. Vhodnost použití k robotizovanému svařování napomáhá i fakt, že snižuje potřebu čištění povrchu materiálu před svařováním. Ochranný plyn Corgon 18 je vhodný především pro svařování uhlíkových ocelí a ocelových slitin. Lze jej bez

problémů využít jak pro ruční svařování, tak i v automatizovaném procesu pro metodu MAG. [27]

## 4.2 Průběh navařování a vizuální vyhodnocení vzorků

### 4.2.1 Vzorek č. 1

První návar na podkladové desce byl vytvořen tak, že nejprve byla upevněna podkladová deska na pracovní stůl. Poté dle zadaného programu byly na sebe kontinuálně (tj. nepřetržitě) navařeny jednotlivé návarové housenky, postupně ve 30-ti vrstvách. Kvůli nepřetržitému vnášení tepla do návaru se součást ohřála na maximální teplotu 272,3 °C. Celý návar byl zhotoven za 18 minut. V celém procesu navařování se zaznamenávaly pracovní parametry pro každou housenku zvlášť.



*Obr. 20 - Vzorek č. 1, navařený kontinuálně*

Vzorek po dokončení navařování má délku 130 mm a jeho výška klesá z 46 na 40 mm. Na začátku navařování byl větší přísun materiálu, a proto je v tomto místě vzorek širší a vyšší. Je možné si všimnout na bocích velkých výtoků přebytku materiálu. Struktura je velmi hrubá. V důsledku teplotní roztažnosti došlo k prohnutí základního materiálu při rozdílné rychlosti chladnutí v celém návaru.

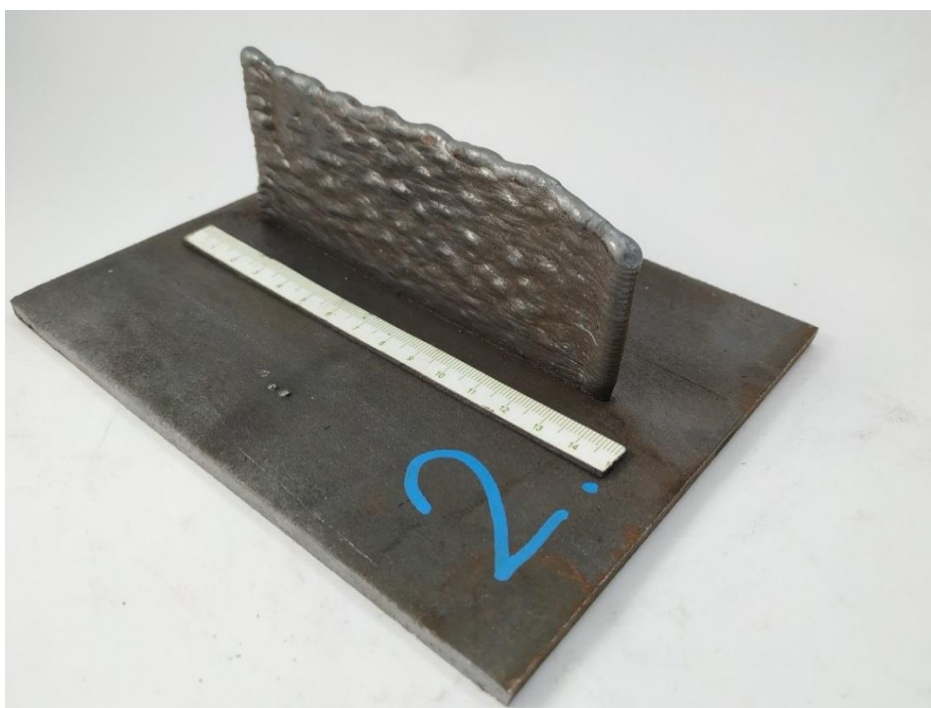
## 4.2.2 Vzorek č. 2

Oproti prvnímu vzorku je hlavní rozdíl v postupu navařování. Základní materiál podkladové desky, přídatný materiál (ani jejich rozměry), použitý plyn a zadané základní svařovací parametry se nelišily. Rozdíl spočíval v navařování jednotlivých vrstev s časovým prodloužením, kdy mezi jednotlivými vrstvami návaru byla dodržena teplota interpass 50 °C. Nejprve byla navařena první vrstva. Po navaření housenky se robot s naprogramovaným rychloposuvem vracel na začátek svařovaného úseku. V této dráze byl posuv robota manuálně přerušeno. Přerušeno cyklu vedlo k časové prodlevě, která zaručovala dodržení teploty interpass 50 °C. To znamenalo přerušit navařovací cyklus, ručním digitálním teploměrem Voltcraft 300K snímat povrchovou teplotu navařené vrstvy a čekat na dosažení 50 °C na povrchu poslední vrstvy. Vzorek při přerušeno navařování a měření teploty interpass je zachyceno na Obr. 21. Jakmile došlo ke snížení teploty na 50 °C, byl robot spuštěn a následovalo pokračování automatického navařovacího programu. Tento postup se opakoval do navařeno poslední – 30. vrstvy. Zhotovení vzorku č. 2 trvalo 165 minut.



*Obr. 21 - Vzorek upevněný na pracovním stole při časové prodlevě po navařeno 19. vrstvy*

Vzorek č.2 je opět navařený v délce 130 mm. Výška vzorku je proměnlivá. Hodnota se pohybuje v rozmezí  $51 \pm 2$  mm. Z počátku, kde navařování začínalo, byl větší přísun materiálu, kvůli čemuž je v této části vzorek širší. Veškeré chyby z předchozích vrstev se s každou následující vrstvou kopírovaly. Proto je vrchní vrstva nerovnoměrná. Při konci navařování docházelo k sesunu vrstvy a k dodání méně materiálu a tím pádem se výška snižuje. Struktura navaření je velmi hrubá. Ke zhotovení požadované součásti bude potřeba odebrání většího množství přebytečného materiálu než při navaření vzorku č.1. Ukázka vzorku po dokončení navařování je vyfotografována na Obr. 22.



*Obr. 22 - Vzorek č.2 navařený s teplotou interpass 50 °C*

Z důvodu nízkého provaření první základní vrstvy se na tomto vzorku objevila navařovací vada. Návar se vlivem teplotních pnutí a nedostatečného provaření začal oddělovat od základního materiálu. Chyba je vidět v detailu na Obr. 23.

Pro předcházení nedostatečnému provaření je vhodné upravit navařovací parametry první vrstvy. Zvýšením napětí a proudu navařování se může zamezit nechtěnému oddělování od základního materiálu.

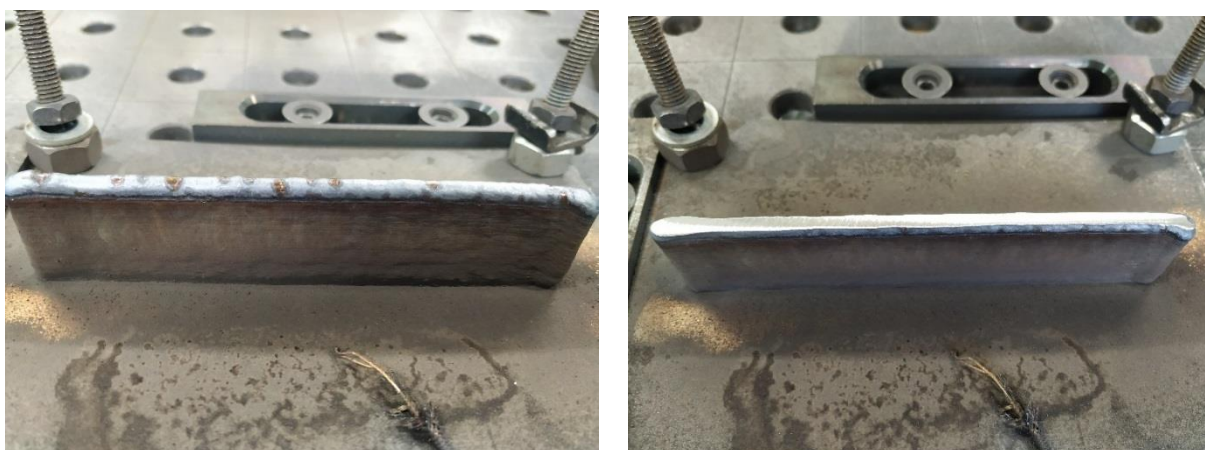




Obr. 23 - Detail vady navaření vzorku č. 2

### 4.2.3 Vzorek č. 3

Navaření třetího vzorku téměř kopírovalo postup navaření druhého vzorku. Nejprve proběhlo umístění podkladového materiálu na pracovní stůl. Poté bylo spuštěno robotické navařování. Po navaření každé vrstvy byl cyklus přerušeno. Při přerušení cyklu bylo pomocí manuálního ovládání s ramenem robota posunuto do základní polohy. Tím byl vytvořen pracovní prostor pro úpravu návarové plochy. Vrchní navařená vrstva byla upravena pomocí ruční úhlové brusky s lamelovým brusným kotoučem. Úprava návarové plochy před dalším navařením je zřetelná na Obr. 24.



Obr. 24 - Porovnání navařené vrstvy před a po úpravě návarové plochy

V levé části Obr. 24 je povrch zachycen bez úpravy těsně po dokončení navaření. V pravé části Obr. 24 je možné vidět a porovnat povrch po přebroušení. Po provedení úpravy povrchu housenky přišla na řadu časová prodleva, ve které vzorek chladnul, aby mohla být dodržena teplota interpass. Teplota byla snímána

ručně pomocí ručního digitálního teploměru Voltcraft 300K a čekalo se, než navařená vrstva vychladne na povrchu poslední housenky na teplotu 50 °C. Když povrchová teplota klesla na hodnotu 50 °C, opět byl spuštěn automatický cyklus, robot se vrátil do původní konečné polohy a pokračoval v navařovacím programu. Navařování bylo dokončeno, když návar obsahoval 30 vrstev. Vzhledem k broušení návarové plochy se prodloužil čas zhotovení návaru, protože broušením je vneseno do návaru malé množství tepla. Čas, za který byl vzorek vytvořen, je 185 minut.



*Obr. 25 - Vzorek č. 3 navařen s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy*

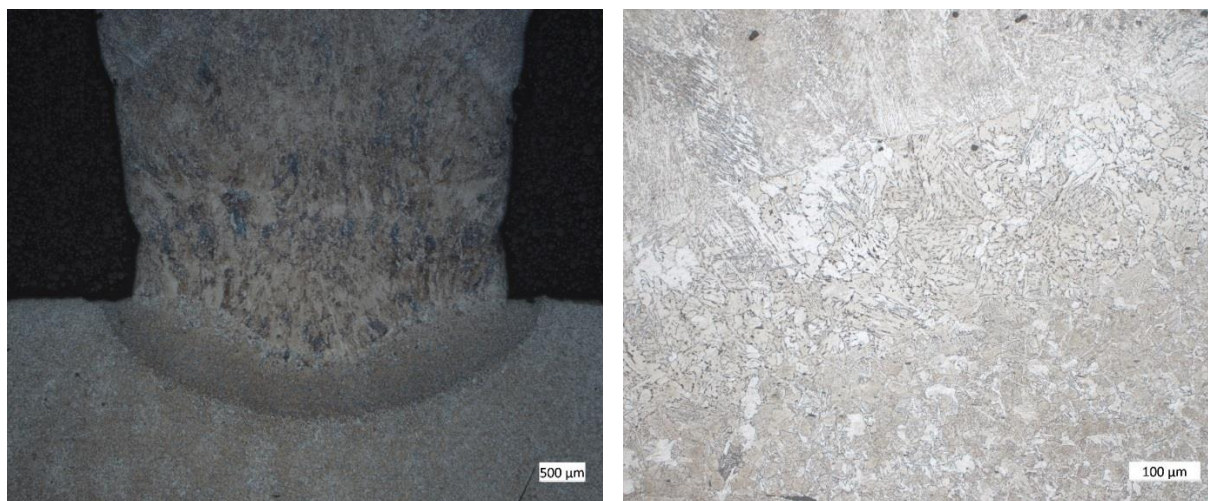
Délka návaru se shoduje s předchozími. Její rozměr je 130 mm. Vizuálně lze říci, že návar s upravenou plochou před nanesením další vrstvy je nejpřesnější a má nejstabilnější rozměry. Z důvodu odebrání určitého množství materiálu při broušení nedosahuje takové výšky jako u předchozích vzorků. Struktura je velmi hladká vzhledem k tomu, že se jedná o metodu WAAM. Náročnost provedení takového vzorku je vyšší než u zbylých dvou. To se dá určit i z časových údajů při provedení vzorků. Vzorek č. 3 byl zhotoven v nejdelším časovém intervalu, který byl 185 minut, tedy vyšší oproti předchozím vzorkům. Vzorek č.1 byl zhotoven za 18 minut a vzorek č. 2 za 165 minut.



## 4.3 Metalografická analýza vzorků

### 4.3.1 Struktura vzorků

Přestože bakalářská práce není zaměřena na materiálový rozbor výbrusů, je vhodné alespoň jejich orientační uvedení a porovnání základních strukturních rozdílů mezi vzorky vyrobenými různými postupy v kontextu celé práce.



*Obr. 26 - Kořen vzorku č. 1 navařeného kontinuálně.*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura přechodové oblasti mezi základním podkladovým materiálem a návarem (zvětšení 200x).

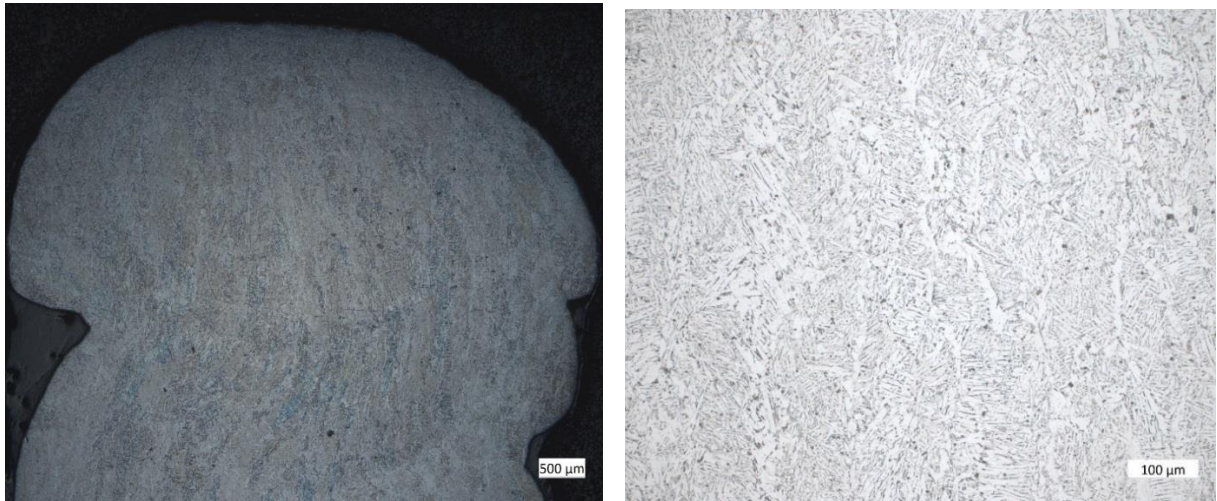


*Obr. 27 - Střední část vzorku č. 1 navařeného kontinuálně.*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura návaru (zvětšení 200x).

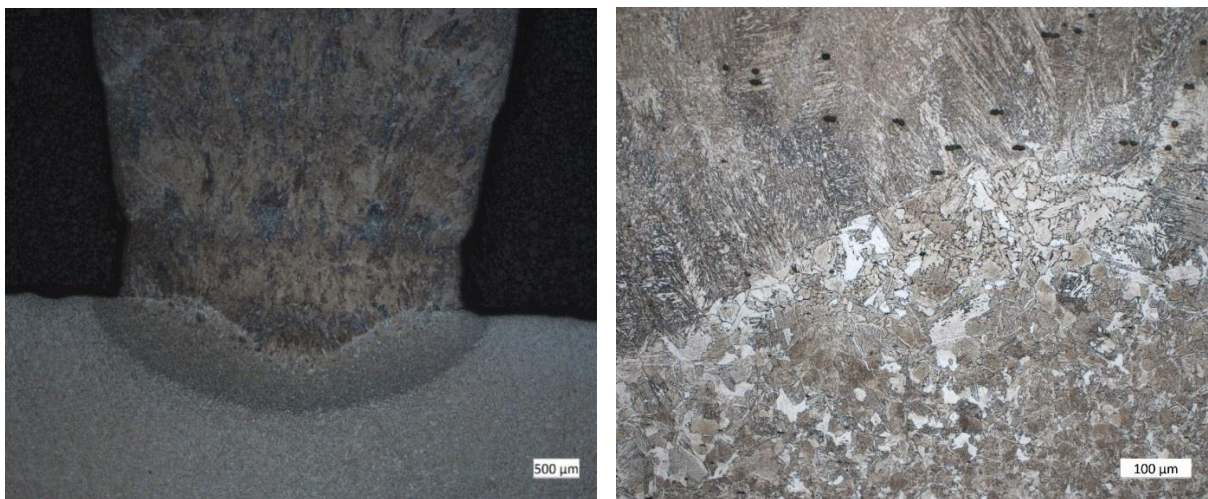


Mikrostruktura vzorku navařeného kontinuálně je tvořena feriticko-perlitickou strukturou. Ve svarovém kovu jsou vidět charakteristicky protažená zrna, po jejichž hranicích je převážně ferit, jsou orientovaná ve směru gradientu teploty při tuhnutí. V tepelně ovlivněné oblasti se vyskytují zhrublá okrouhlá zrna, v horní části návaru je struktura naopak jemnější. Porovnání částí kořenu, středu návaru a horní části návaru můžeme určit podle Obr. 26, Obr. 27, Obr. 28.



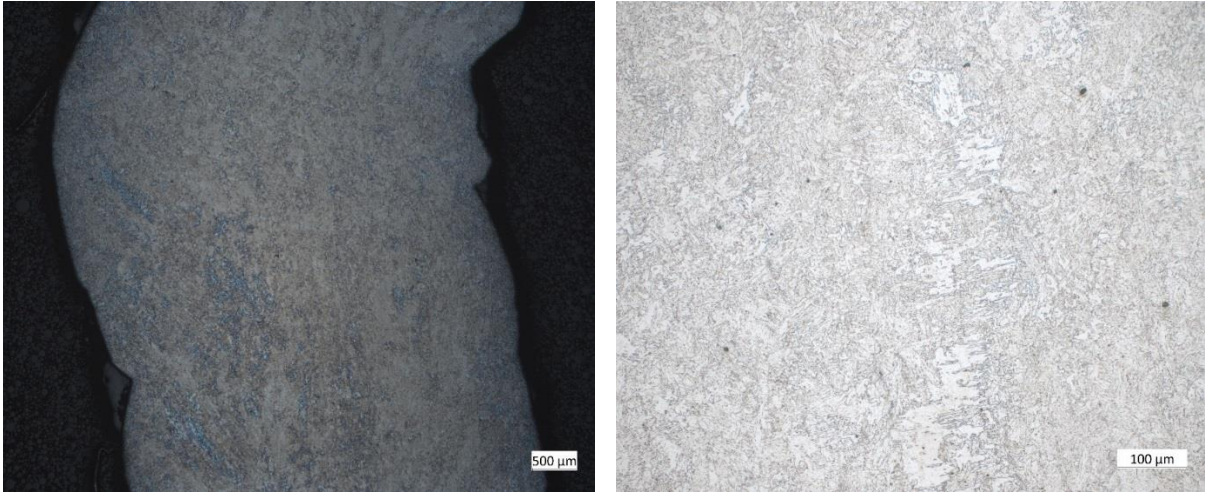
*Obr. 28 - Horní část vzorku č. 1 navařeného kontinuálně*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura (zvětšení 200x).



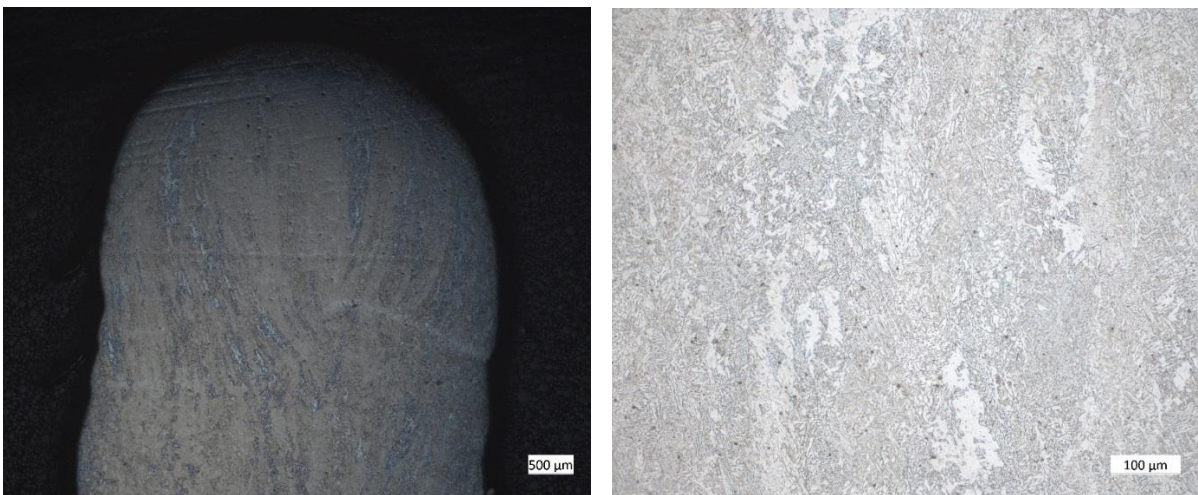
*Obr. 29 - Kořen vzorku č. 2 navařeného s teplotou interpass 50 °C*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura přechodové oblasti mezi základním podkladovým materiálem a návarem (zvětšení 200x).



*Obr. 30 - Střední část vzorku č. 2 navařeného s teplotou interpass 50 °C*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura návaru (zvětšení 200x).

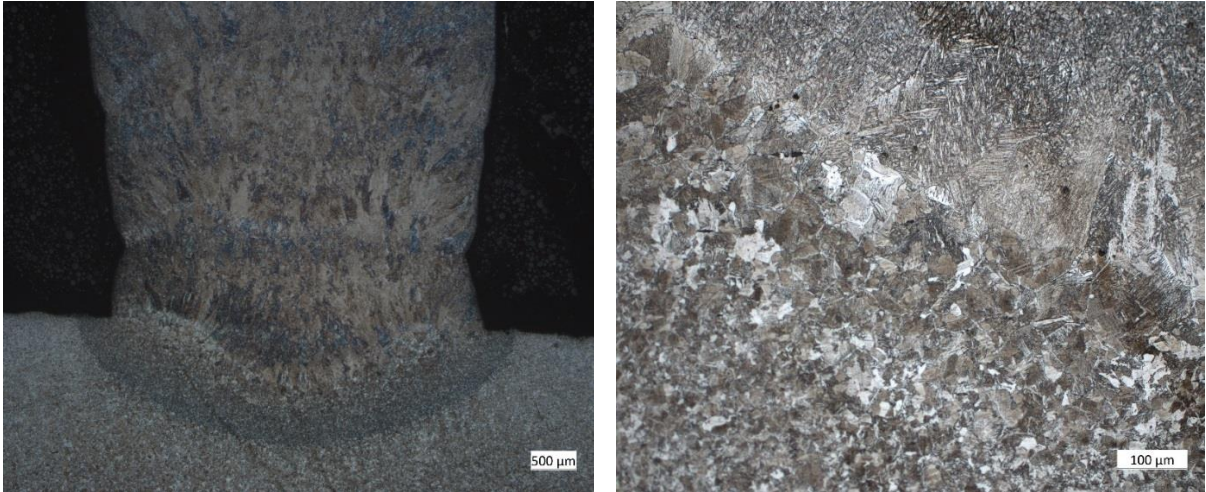


*Obr. 31 - Horní část vzorku č. 2 navařeného s teplotou interpass 50 °C*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura návaru (zvětšení 200x).

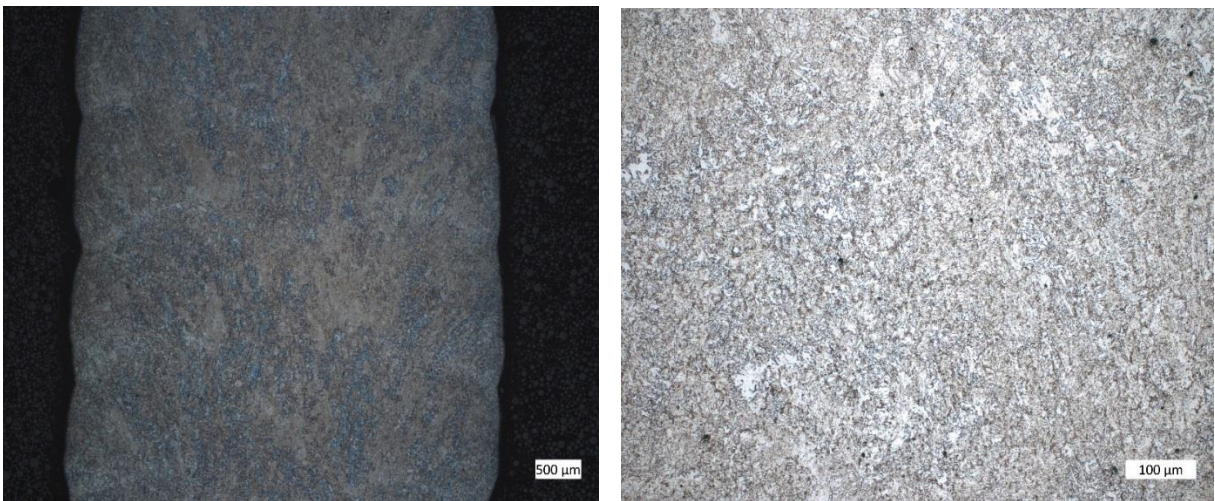
Porovnáním Obr. 29, Obr. 30 a Obr. 31 můžeme určit strukturu materiálu. Vzorek č.2 je tvořen opět feriticko-perlitickou strukturou stejně jako vzorek č.1. Svarový kov je tvořen zrní protaženými ve směru gradientu teploty s tím rozdílem, že feritu je po hranicích zrn mnohem méně. V tepelně ovlivněné oblasti je hrubozrnná přehřátá struktura.





*Obr. 32 - Kořen vzorku č. 3 navařeného s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura přechodové oblasti mezi základním podkladovým materiálem a návarem (zvětšení 200x).



*Obr. 33 - Střední část vzorku č. 3 navařeného s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura návaru (zvětšení 200x)



*Obr. 34 - Horní část vzorku č. 3 navařeného s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením*

Nalevo je makrostruktura (zvětšení 25x), napravo mikrostruktura návaru (zvětšení 200x)

V posledním vzorku navařeného s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy se vyskytuje feriticko-prelitická struktura. Svarový kov je tvořen zrní protaženými ve směru gradientu teploty a feritu je po hranicích zrn mnohem méně než u vzorku č.1. V tepelně ovlivněné oblasti je hrubozrnná přehřátá struktura.

U všech tří vzorků lze z tepelně ovlivněné oblasti vyčíst, že došlo k malému provaření do základního materiálu a první vrstva je tenčí než následné. Ideálním řešením pro zvýšení efektivity navařování je upravení svařovacích parametrů.

### 4.3.2 Vyhodnocení geometrie vzorků

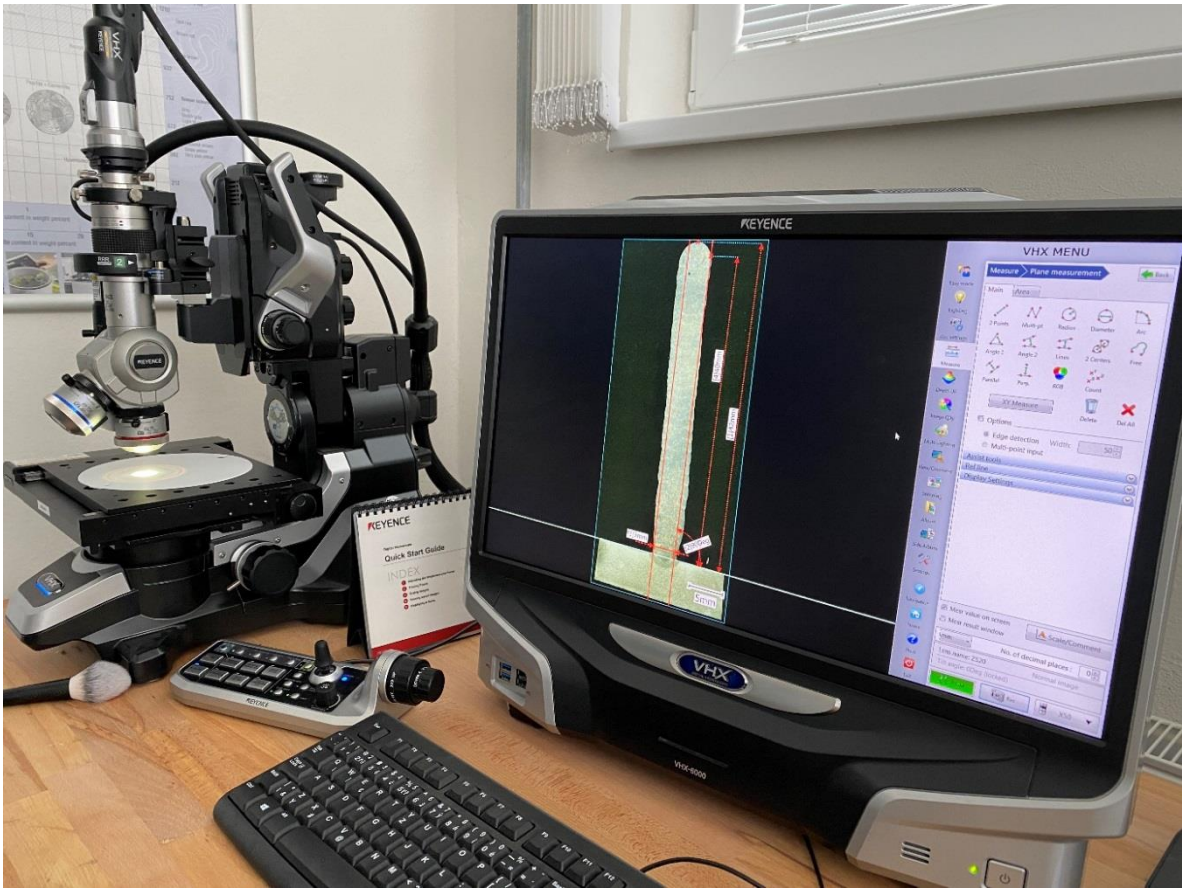
Vyhodnocení vzorků z hlediska geometrie spočívá především v určení efektivních rozměrů na výbrusu jednotlivých vzorků. Tyto hodnoty určují, kolik materiálu je přebytečného a jaká část se dá maximálně využít pro konečnou součást. Obráběním, nebo jinými dokončovacími metodami, se veškerý přebytečný materiál odstraní. Proto se určuje nejčastěji efektivní tloušťka stěny EWT (effective wall thickness), vlnitost povrchu SW (surface waviness) a efektivní výška návaru EH (effective height).



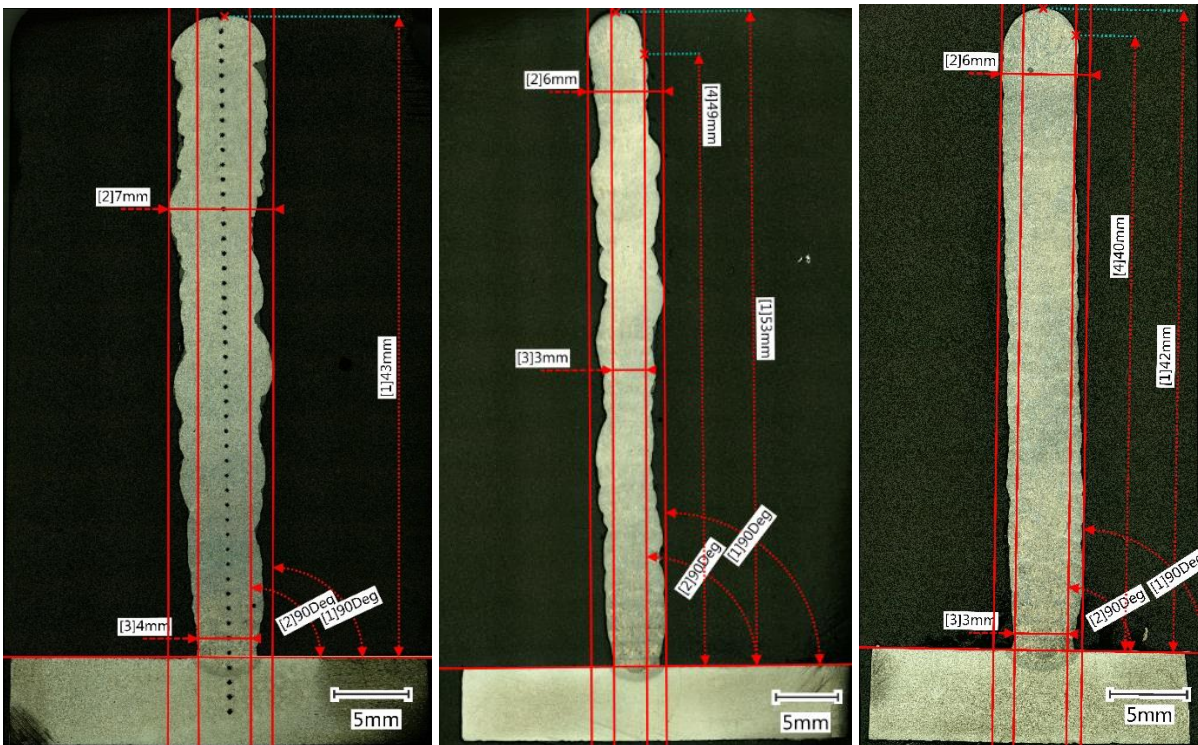


*Obr. 35 - Způsob odečítání měřených parametrů [28]*

Pro určení geometrických parametrů vytvořených vzorků byl použit digitální mikroskop KEYENCE VHX 6000 (viz Obr. 36) snímající povrch výbrusu metalografického vzorku. Výbrus byl nejprve nasnímán do digitální podoby a následně se v SW VHX-H2M2 zakreslila základna – rovnoběžka s povrchem základního materiálu. Od ní se odvíjely všechny měřené veličiny. Vynesené čáry jsou zakresleny od základny pod úhlem 90°.



Obr. 36 - Měřicí zařízení – digitální mikroskop VHX 6000 a ukázka měření ve vyhodnocovacím SW



Obr. 37 - Hodnocení vzorků dle geometrických parametrů

Nalevo vzorek č.1 navařený kontinuálně, uprostřed vzorek č.2 s teplotou interpass 50 °C, napravo vzorek č.3 s teplotou interpass 50 °C s upravením návarové plochy před dalším navařením

Vynesené rozměry na obrázcích jsou číselně označené. Veškeré naměřené rozměry jsou vyneseny číselně do Tab. 5. Označené délkové rozměry znamenají:

- [1] – výška návaru (H) [mm]
- [2] – největší tloušťka stěny ( $S_{max}$ )[mm]
- [3] – efektivní tloušťka stěny (EWT) [mm]
- [4] – efektivní výška návaru (EH) [mm]

$$\text{Vlnitost povrchu (SW) [mm]} = \text{největší tloušťka stěny} - \text{efektivní tloušťka stěny (EWT)}$$

Tab. 5: Výsledky naměřených charakteristických rozměrů

Vzorek	Rozměr				
	H [mm]	EH [mm]	$S_{max}$ [mm]	EWT [mm]	SW [mm]
č. 1	43	42	7	4	3
č. 2	53	49	6	3	3
č. 3	42	40	6	3	3

Na vzorku č. 1 (navářeném kontinuálně) – viz Obr. 37 nalevo, je vidět veliká vlnitost povrchu. Materiál se při kontinuálním navařování roztékal do stran. Právě z toho důvodu je efektivní výška jen 43 mm. Je možné si všimnout, že na rozdíl od ostatních vzorků zde můžeme říci, že výška návaru téměř odpovídá efektivní výšce. Efektivní tloušťka stěny je široká 4 mm. Rozdíl největší tloušťky stěny a efektivní tloušťky stěny udává vlnitost povrchu, která je v tomto případě 3 mm.

Na vzorku č. 2 (navářeném s teplotou interpass 50 °C) – viz Obr. 37 uprostřed, je vidět opět veliká vlnitost povrchu, která je 3 mm. Číselně je tedy stejná jako u předchozího vzorku. Celková výška návaru dosáhla 53 mm, ale použitelná je pro konečný výrobek pouze efektivní výška. Ta činí 49 mm. Efektivní tloušťka stěny je oproti prvnímu návarku pouze 3 mm.

Na vzorku č. 3 (navářeném s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy) je možné si všimnout nejkvalitnějšího a nejrovnějšího povrchu oproti předchozím vzorkům. Výška návaru je 42 mm, z toho efektivní výška je 40 mm. Nejmenší výška je dána úběrem materiálu při



každém přebroušení jednotlivé vrstvy při navařování. Přestože efektivní tloušťka stěny je 3 mm a vlnitost povrchu vychází také 3 mm jako u ostatních, je nutné zmínit, že se rozměrově liší. Hlavním důvodem, proč se od ostatních liší, je zaokrouhlení měřícího přístroje na celé milimetry. Tím jsou hodnoty zkresleny.

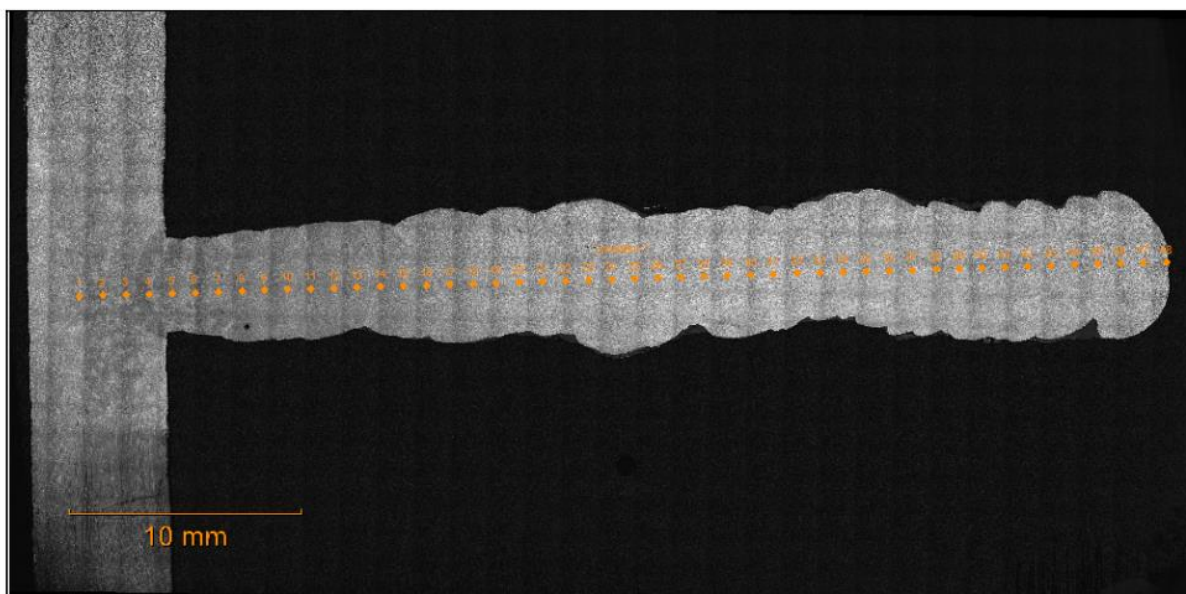
Z Obr. 37 je také vidět, že všechny tři kořenové části návarů jsou hubené a základní materiál podkladové desky je málo provařen (málo promíšení PM se ZM). To může způsobovat vady v přilnavosti k základnímu materiálu. U prvních dvou vzorků úzký kořen efektivní hodnoty nijak výrazně neovlivňuje. Vlnitost povrchu je tak velká, že po vynesení kót by se hodnota jinak nelišila. Opak nastává u vzorku č. 3 (napravo). Úzký kořen rapidně snižuje efektivní tloušťku stěny a tím pádem zvyšuje i množství odpadu nastávající po obrábění návaru. Pokud kořenová vrstva vykazuje jiné geometrické charakteristiky (jako zde), je možné návar odříznout v určité vzdálenosti od podkladové desky a odříznutou část hodnotit jako odpad. Vzhledem k odstranění vad v provaření a zvýšení i efektivní tloušťky stěny u vzorku č.3 je vhodné upravit svařovací parametry prvních vrstev tím, že zvýšíme především probíhající proud a napětí.

#### **4.4 Měření tvrdosti podle Vickerse**

Měření tvrdosti bylo realizováno ve spolupráci s Tréninkovým a realizačním centrem skupiny ČEZ v materiálové laboratoři JE Temelín. K vyhodnocení tvrdosti byla zvolena metoda měření podle Vickerse. Pro měření byl využit automatizovaný tvrdoměr Wilson VH3100. Nejprve byl vzorek připevněn na pracovní podložku. Pomocí optiky byl výbrus vzorků naskenován po řádkách do počítače. Po naskenování výbrusu se zvolila strategie měření. Z důvodu co nejpřesnějšího měření tvrdosti bylo zvoleno uspořádání měřených bodů v ose návaru, po celé jeho délce. Podle zanesených bodů v počítači bylo provedeno měření. V každém bodě zvlášť byla změřena a zaznamenána tvrdost dle Vickerse při HV10, tzn. při zatížení 98,1 N.

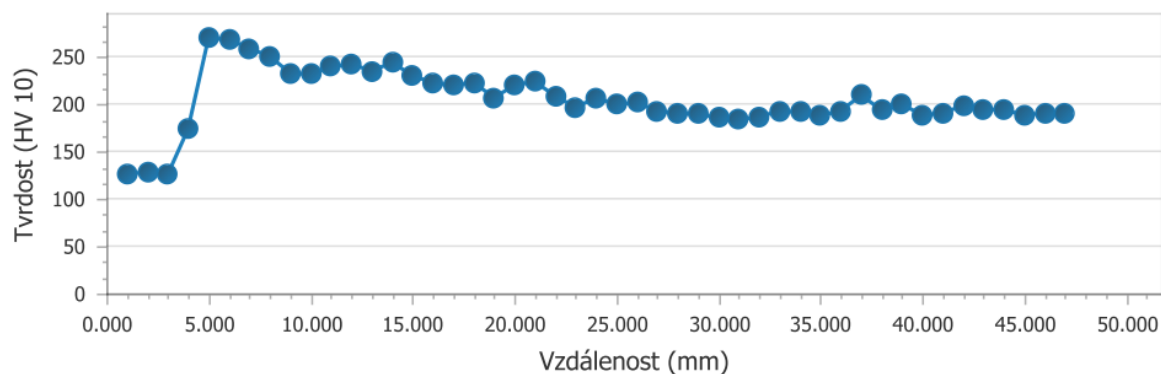
Tab. 6: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 1

Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tvrдост HV	126	129	126	174	270	269	259	251	233	232	240	243	236	244	231
Měření	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tvrдост HV	222	220	223	207	220	224	209	297	207	200	202	193	191	190	186
Měření	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Tvrдост HV	184	187	193	192	188	193	210	194	200	189	191	199	195	194	189
Měření	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Tvrдост HV	191	190	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Obr. 38 - Označení míst jednotlivých vpichů při měření tvrdosti na vzorku č. 1 (navářeném kontinuálně)

Na Obr. 38 je vyznačeno uspořádání a počet měření. První tři měření byly v základním materiálu. Proto je hodnota nízká. Průměrná tvrdost základního materiálu je 127 HV10. Při měření v tepelně ovlivněné oblasti (mezi ZM a návarem) tvrdost rapidně stoupla a dosáhla svého maxima 270 HV10. S každou další navařenou vrstvou tvrdost postupně klesala, a to až na hodnotu 190 HV10. To je dané tím, že vnášíme více kumulativního tepla, čímž se návar s přibývajícimi vrstvami více tepelně ovlivňuje a návar se postupně vyžihává předchozími vrstvami. Pro experiment jsou hodnoty tvrdosti základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti zcela nepodstatné. Nejdůležitější část tvoří samotný návar, u kterého je třeba určit tvrdost. Celý průběh měření tvrdosti je zobrazen na Obr. 39. Střední hodnota tvrdosti návaru vyšla 205 HV.

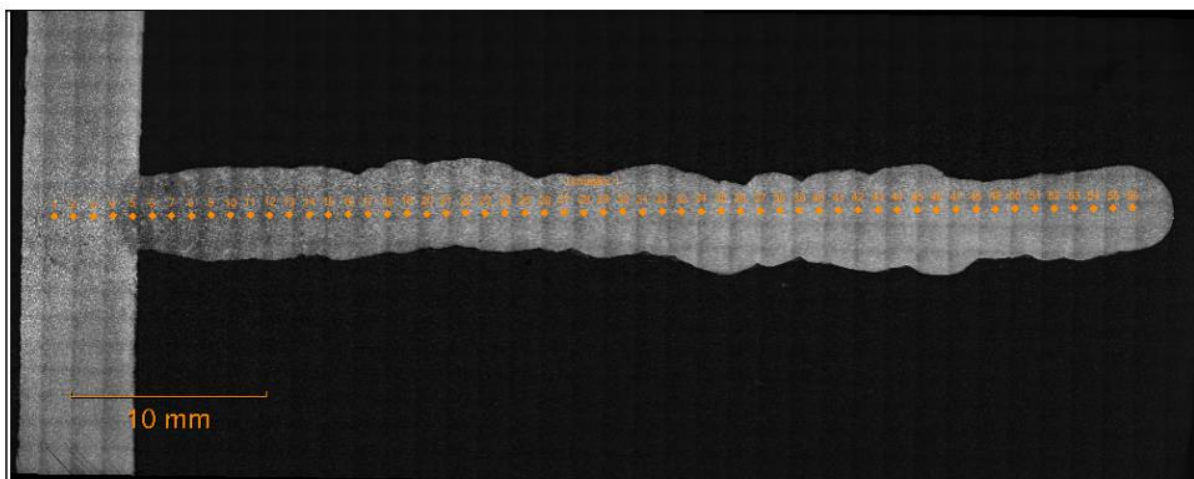


Obr. 39 - Průběh naměřených tvrdostí HV10 na vzorku č. 1 (navářeném kontinuálně)

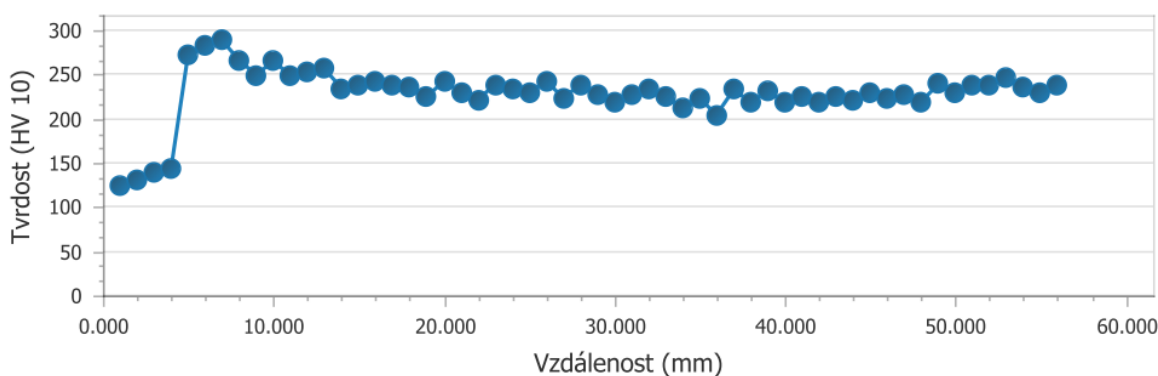
Měření vzorku s teplotou interpass 50 °C probíhalo stejně. Uspořádání a počet měření je vyznačeno na Obr. 40. Základní materiál má průměrnou tvrdost 132 HV10. V tepelně ovlivněné oblasti je hodnota ale vyšší než kontinuálně navářený vzorek. Ve zbytku návaru je v podstatě konstantní hodnota. Maximální hodnota se vyšplhala na 289 HV10 a střední hodnota tvrdosti návaru je 231 HV10. Celý průběh je zaznamenán na Obr. 41. Celkem je zaznamenáno 56 naměřených hodnot.

Tab. 7: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 2

Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tvrdość HV	126	131	139	144	273	283	289	266	250	266	249	254	257	235	238
Měření	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tvrdość HV	243	238	237	225	243	230	222	239	233	229	243	224	239	227	220
Měření	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Tvrdość HV	227	233	226	212	223	205	233	219	231	218	226	219	226	220	230
Měření	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Tvrdość HV	224	227	219	239	230	238	239	246	237	231	244	-	-	-	-



Obr. 40 - Označení míst jednotlivých vpichů při měření tvrdosti na vzorku č. 2 (navařeném s teplotou interpass 50 °C)

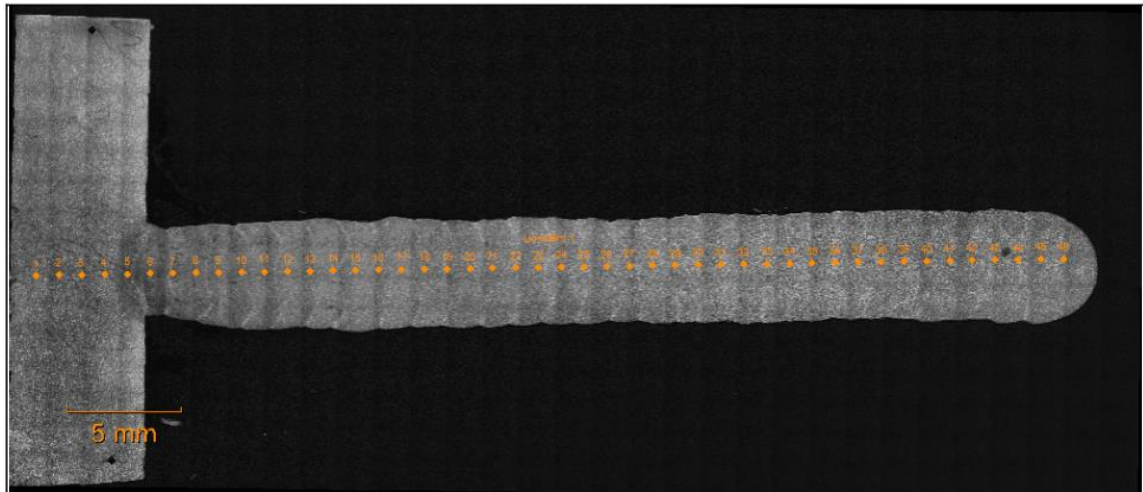


Obr. 41 - Průběh naměřených tvrdostí HV10 na vzorku č. 2 (navařeném s teplotou interpass 50 °C)

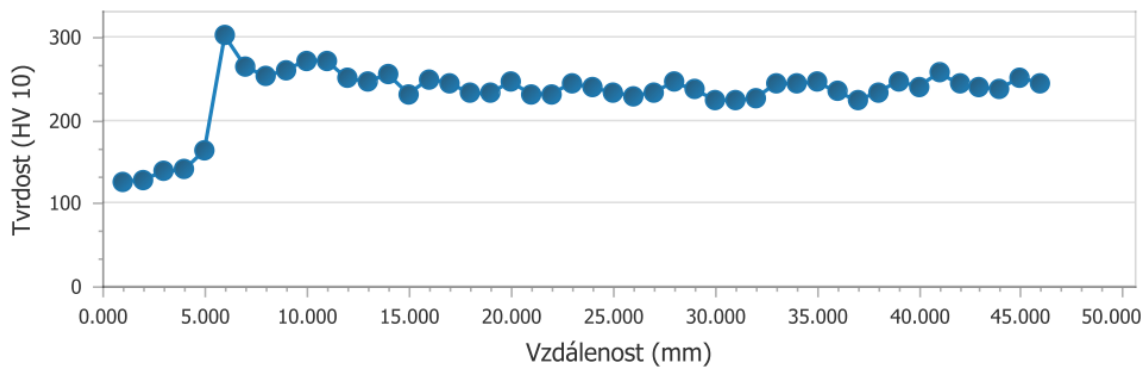
Měření vzorku navařeného s teplotou interpass 50 °C a úpravou návarové plochy před navařením další vrstvy proběhlo obdobně. Uspořádání a počet měření je vyznačeno na Obr. 42. Bylo provedeno 46 měření. Měření začínalo na základním materiálu, jehož průměrná tvrdost je 131 HV10. V tepelně ovlivněné oblasti a v oblasti prvních vrstev byl vysoký nárůst s maximem 302 HV10. Střední hodnota tvrdosti návaru je stanovena na 244 HV10. Průběh je zaznamenán na Obr. 43.

Tab. 8: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 3

Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tvrdost HV	126	129	138	140	163	302	265	253	261	272	272	250	247	255	232
Měření	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tvrdost HV	249	245	232	233	246	232	232	245	239	234	229	234	246	237	225
Měření	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Tvrdost HV	224	226	244	244	246	234	224	234	247	241	257	244	239	238	252
Měření	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Tvrdost HV	244	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Obr. 42 - Označení míst jednotlivých vpichů při měření tvrdosti na vzorku č. 3 (navářeném s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy)



Obr. 43 - Průběh naměřených tvrdostí HV10 na vzorku č. 3 (navářeném s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy)

U vzorku č. 1 byla naměřena nejvyšší hodnota 270 HV10 a nejnižší hodnota 184 HV10. Střední hodnota návaru vycházela 205 HV10. Vzorek č. 2 měl v porovnání s prvním vyšší hodnoty. Maximální hodnota byla naměřena 289 HV10 a minimální hodnota návaru byla 205 HV10. Střední hodnota vzorku č. 2 vyšla 231 HV10 a byla vyšší než u vzorku č. 1. U vzorku č. 3 byla naměřena maximální hodnota tvrdosti 302 HV10 a minimální hodnota tvrdosti návaru 224 HV10. Střední hodnota byla 244 HV10. Průběh naměřených tvrdostí vzorku č. 2 a vzorku č. 3 jsou stabilnější oproti vzorku č. 1 především kvůli dodržení teploty interpass 50 °C.

Vzhledem k porovnání naměřených průběhů tvrdostí všech tří vzorků můžeme říct, že nejstálější tvrdosti okolo 240 HV10 dosahuje vzorek navářený s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před obráběním. U tohoto vzorku je také dosaženo nejvyšší tvrdosti 302 HV.

## 5. ZÁVĚR

Bakalářská práce je psaná na téma Vliv parametrů aditivního procesu WAAM na kvalitu návarů a v teoretické části této bakalářské práce je rozebrána metoda WAAM včetně používaných svařovacích metod a uvedeno porovnání s ostatními aditivními technologiemi zpracovávající kovové materiály.

V praktické části bakalářské práce je realizován jednoduchý experiment, věnující se vlivu jednotlivých postupů navařování na výslednou kvalitu návaru. Celkem byly navařeny tři vzorky s různými postupy, které jsou detailně uvedeny. Jeden vzorek byl navařen kontinuálně, druhý s teplotou interpass 50 °C a třetí s teplotou interpass 50 °C společně s upravením návarové plochy před dalším navařováním. K navařování byla využita metoda CMT.

Kvalita provedených návarů byla hodnocena podle geometrických charakteristik, dále bylo porovnáno strukturní ovlivnění vzorků a vliv postupu na změnu průběhu tvrdosti návarem (realizováno zkouškou tvrdosti podle Vickerse). Nejlepší geometrické charakteristiky měl vzorek č. 3 navařený s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením.

Ze zadaných kritérií lze vyhodnotit, že největší efektivitu, ale zároveň i nejnižší produktivitu navařování a nejvyšší kvalitu má metoda s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením. Vzorek č. 3 vyrobený tímto postupem měl nejdelší dobu zhotovení vyčíslenou ve 185 minutách. Vzorek č. 2 navařený jen s teplotou interpass 50°C byl zhotoven za 165 minut a nejrychleji byl navařený vzorek č. 1 za 18 minut. Navařovací postup vzorku č. 3 je sice nejpracnější, ovšem návar má nejnižší vlnitost povrchu, je zde daleko větší využití materiálu a vzorek má v celém návareu téměř totožnou strukturu. Takto navařený vzorek dosahuje i nejvyšší tvrdosti okolo 240 HV.

Pro další experimenty je vhodné předcházet nedostatečnému provaření a je na místě upravit navařovací parametry první vrstvy. Zvýšením napětí a proudu navařování se může zamezit nechtěnému oddělování od základního materiálu.

## 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] GISARIO, Annamaria, Michele KAZARIAN a Filomeno MARTINA. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2019, **2019**(53), 124-149. ISSN 0278-6125.
- [3] ERSOY, Kivılcım a Berk BARIŞ ÇELİK. Utilization of Additive Manufacturing to Produce Tools. *Design and Manufacturing*. IntechOpen, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.89804. ISBN 978-1-78985-865-5. Dostupné také z: <https://www.intechopen.com/books/design-and-manufacturing/utilization-of-additive-manufacturing-to-produce-tools>
- [4] 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.
- [5] Laser additive manufacturing of metal. In: *Laserline* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/en-int/laser-additive-manufacturing/>
- [6] EBM (Electron Beam Melting). *Cotu* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/122/ebm-electron-beam-melting>
- [7] GALATI, Manuela a Luca IULIANO. A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. *Additive manufacturing*. 2018, **2018**(19), 1-20. ISSN 2214-8604.
- [8] KOLAŘÍK, Ladislav, Jan SUCHÁNEK a Marie KOLAŘÍKOVÁ. Navařování metodou WAAM. *MM spektrum* [online]. 2018, **2018**(1) [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>
- [9] WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING. *WAAMMat* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://waammat.com/about/waam>

- [10] CMT - Svařovací procesy. *Svařovací technika - Fronius* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt>
- [11] KUBÍČEK, J. *Technologie svařování*. Brno, b.r.. Studijní opory pro výuku v kurzech. ÚST, odbor svařování a PÚ, VUT Brno.
- [12] Přehled a rozdělení svařování. In: *Použití laseru při spojování autokaroserií* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://dp.bajaja.net/pril1.html>
- [13] Svařovací metody. *Svářecí technika Schinkmann* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/svarovaci-metody>
- [14] Ruční svařování obalenou elektrodou. *Svařovací přístroje, svařovací technika* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/e-hand-grundlagen.html>
- [15] Svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování, svařování plněnou elektrodou. *Svářecí technika Schinkmann* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
- [16] MIG/MAG (CO<sub>2</sub>). *Automig internetový magazín* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
- [17] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vydání. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [18] HÁJEK, Jaroslav. Technické plyny pro svařování a dělení materiálů. *MM Spektrum* [online]. 2004, **20045**(040539), 63 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technicke-plyny-pro-svarovani-a-deleni-materialu.html>
- [19] Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer). *Technický týdeník* [online]. 2006 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer\\_10667.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html)
- [20] SELVI, S., A. VISHVAKSENANA a E. RAJASEKARB. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. *Defence Technology*. První vydání. KeAi, 2018, **14**, s. 28-44.



- [21] WESLING, Volker, Antonia SCHRAM a Mirjam KESSLER. Low Heat Joining – Manufacturing and Fatigue Strength of Brazed, Locally Hardened Structures. *Advanced Materials Research* [online]. 2010, **137**, 347-374 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.137.347. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.137.347>
- [22] CMT ADVANCED: VYŠŠÍ ODTAVNÝ VÝKON, LEPŠÍ PŘEMOSTĚNÍ SPÁR A VYŠŠÍ STABILITA [online]. Fronius, b.r. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt-advanced>
- [23] Effect of arc length trim and adaptive pulsed-MIG process parameters on bead profile of stainless steel with synergic power source. JAYPURIA, Sanjib, Trupti RANJAN MAHAPATRA, Sanjukta SAHOO a Omkar JAYPURIA. *Materia Is Today: Proceedings*. 2020, , 9. ISSN 2214-7853.
- [24] ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov: tavící sa elektródou*. 1. vydání. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003. ISBN 80-968359-5-5.
- [25] Tandem MIG process. *Lincoln Electric* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/fr-fr/support/process-and-theory/Pages/tandem-mig-detail.aspx>
- [26] ROSADO, Tobias, Pedro ALMEIDA a Pires INES. *Innovations in arc welding*: [https://www.researchgate.net/figure/Current-diagram-for-Tandem-pulsed-welding\\_fig1\\_228908389](https://www.researchgate.net/figure/Current-diagram-for-Tandem-pulsed-welding_fig1_228908389). b.r., 2011.
- [27] CORGON 18. *Linde Gas: Technické plyny Česká republika* [online]. b.r. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: [https://www.linde-gas.cz/cs/produkty\\_and\\_zasobovani/shielding\\_gases/corgon\\_18.html](https://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/shielding_gases/corgon_18.html)
- [28] ROHAN, Pavel a Tomáš GURČÍK. Vliv složek ochranných atmosfér na WAAM. *MM Spektrum* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2020, 2020 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/vliv-slozek-ochrannych-atmosfer-na-waam.html>

## Seznam tabulek

Tab. 1: Základní parametry svařování .....	38
Tab. 2: Parametry nastavení postupu svařování .....	38
Tab. 3: Obsah hlavních legujících prvků OK Aristorod 69 v hm. % .....	39
Tab. 4: Mechanické vlastnosti přídatného materiálu.....	39
Tab. 5: Výsledky naměřených charakteristických rozměrů.....	52
Tab. 6: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 1 .....	54
Tab. 7: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 2 .....	55
Tab. 8: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 3 .....	56

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Rozdělení aditivních metod. Upraveno dle [2].....	13
Obr. 2 - Princip metody SLS (DMLS). Upraveno dle [3].....	15
Obr. 3 - Princip metody LMD. Upraveno dle [5].....	16
Obr. 4 - Schéma metody EBM. Upraveno dle [7] .....	17
Obr. 5 - Příklad dílů vyrobených metodou WAAM [8] .....	18
Obr. 6 - Srovnání metody WAAM s ostatními aditivními metodami. Upraveno dle [2].....	19
Obr. 7 - Rozdělení hlavních skupin svařování [12] .....	21
Obr. 8 - Princip svařování metodou MIG/MAG [11].....	24
Obr. 9 - Závislost druhu přenosu na nastavených parametrech [16] .....	25
Obr. 10 - Princip metody CMT [21] .....	29
Obr. 11 - Proudový a napěťový průběh procesu CMT. Upraveno dle [20] .....	30
Obr. 12 - Obecný průběh svařovacího proudu při pulsním svařování [24].....	31
Obr. 13 - Svařovací hubice pro tandemové MIG/MAG svařování [25].....	32
Obr. 14 - Obecný posunutý průběh proudu v závislosti na čase obou elektrod [26].....	33
Obr. 15 - Zařízení pro tandemové svařování. Upraveno dle [25].....	34
Obr. 16 - Robotizované pracoviště v laboratoři Fakulty strojní ČVUT v Praze.....	35
Obr. 17 - Ukotvení základové desky na jednoosém polohovadle pomocí rychloupínek .....	36
Obr. 18 - Znázornění trajektorie navařování experimentálních vzorků .....	37
Obr. 19 - Časový průběh proudu a napětí při navařování jedné vrstvy .....	38
Obr. 20 - Vzorek č. 1, navařený kontinuálně.....	40
Obr. 21 - Vzorek upevněný na pracovním stole při časové prodlevě po navaření 19. vrstvy .....	41
Obr. 22 - Vzorek č.2 navařený s teplotou interpass 50 °C.....	42
Obr. 23 - Detail vady navaření vzorku č. 2.....	43
Obr. 24 - Porovnání navařené vrstvy před a po úpravě návarové plochy.....	43
Obr. 25 - Vzorek č. 3 navařen s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy.....	44
Obr. 26 - Kořen vzorku č. 1 navařeného kontinuálně. ....	45

Obr. 27 - Střední část vzorku č. 1 navařeného kontinuálně. ....	45
Obr. 28 - Horní část vzorku č. 1 navařeného kontinuálně .....	46
Obr. 29 - Kořen vzorku č. 2 navařeného s teplotou interpass 50 °C .....	46
Obr. 30 - Střední část vzorku č. 2 navařeného s teplotou interpass 50 °C.....	47
Obr. 31 - Horní část vzorku č. 2 navařeného s teplotou interpass 50 °C .....	47
Obr. 32 - Kořen vzorku č. 3 navařeného s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením .....	48
Obr. 33 - Střední část vzorku č. 3 navařeného s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením.....	48
Obr. 34 - Horní část vzorku č. 3 navařeného s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před dalším navařením .....	49
Obr. 35 - Způsob odečítání měřených parametrů [28] .....	50
Obr. 36 - Měřicí zařízení – digitální mikroskop VHX 6000 a ukázka měření ve vyhodnocovacím SW .....	51
Obr. 37 - Hodnocení vzorků dle geometrických parametrů. ....	51
Obr. 38 - Označení míst jednotlivých vpichů při měření tvrdosti na vzorku č. 1 (navářeném kontinuálně) .....	54
Obr. 39 - Průběh naměřených tvrdostí HV10 na vzorku č. 1 (navářeném kontinuálně).....	55
Obr. 40 - Označení míst jednotlivých vpichů při měření tvrdosti na vzorku č. 2 (navářeném s teplotou interpass 50 °C).....	56
Obr. 41 - Průběh naměřených tvrdostí HV10 na vzorku č. 2 (navářeném s teplotou interpass 50 °C) .....	56
Obr. 42 - Označení míst jednotlivých vpichů při měření tvrdosti na vzorku č. 3 (navářeném s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy).....	57
Obr. 43 - Průběh naměřených tvrdostí HV10 na vzorku č. 3 (navářeném s teplotou interpass 50 °C a s úpravou návarové plochy před nanesením další vrstvy) .....	57

## Přílohy



# Prvotní záznam

Měření tvrdosti podle Vickerse

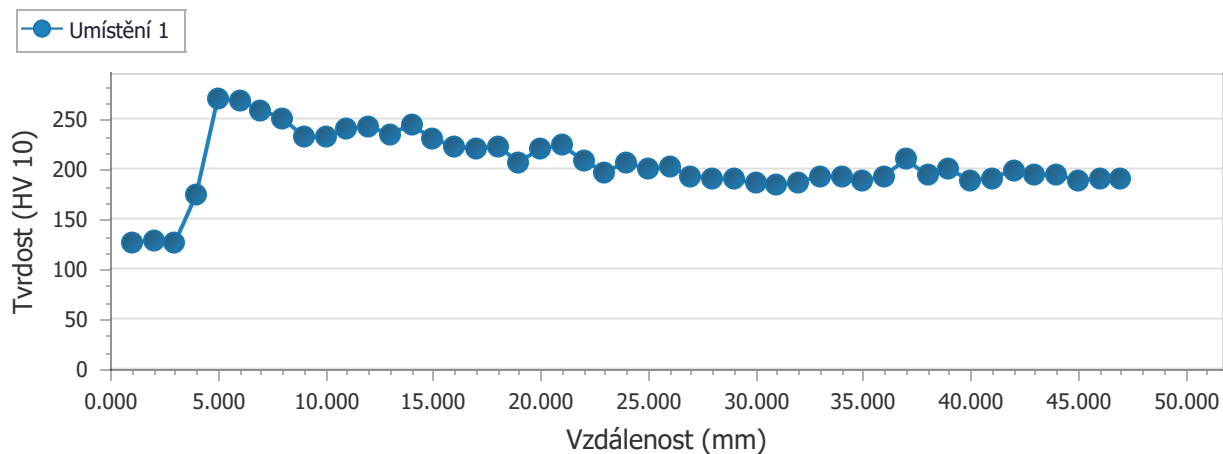
ČEZ, a.s.

Materiálová laboratoř

Treninkové a realizační centrum

JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ....  
Číslo vzorku: 1.  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10  
Poznámka: ...



## Umístění 1

Střední	Minimum	Maximum	Rozsah	Std. odchylka
205	126	270	144	31

2 \* std. odchylka

63

Bod	Vzdálenos t	Tvrdost	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
1	1.000 mm	126 HV 10	388.4 μm	378.7 μm	
2	2.000 mm	129 HV 10	385.0 μm	373.9 μm	
3	3.000 mm	126 HV 10	383.4 μm	385.0 μm	
4	4.000 mm	174 HV 10	321.9 μm	331.3 μm	
5	5.000 mm	270 HV 10	263.2 μm	261.1 μm	
6	6.000 mm	269 HV 10	264.3 μm	261.2 μm	
7	7.000 mm	259 HV 10	269.0 μm	265.9 μm	

ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

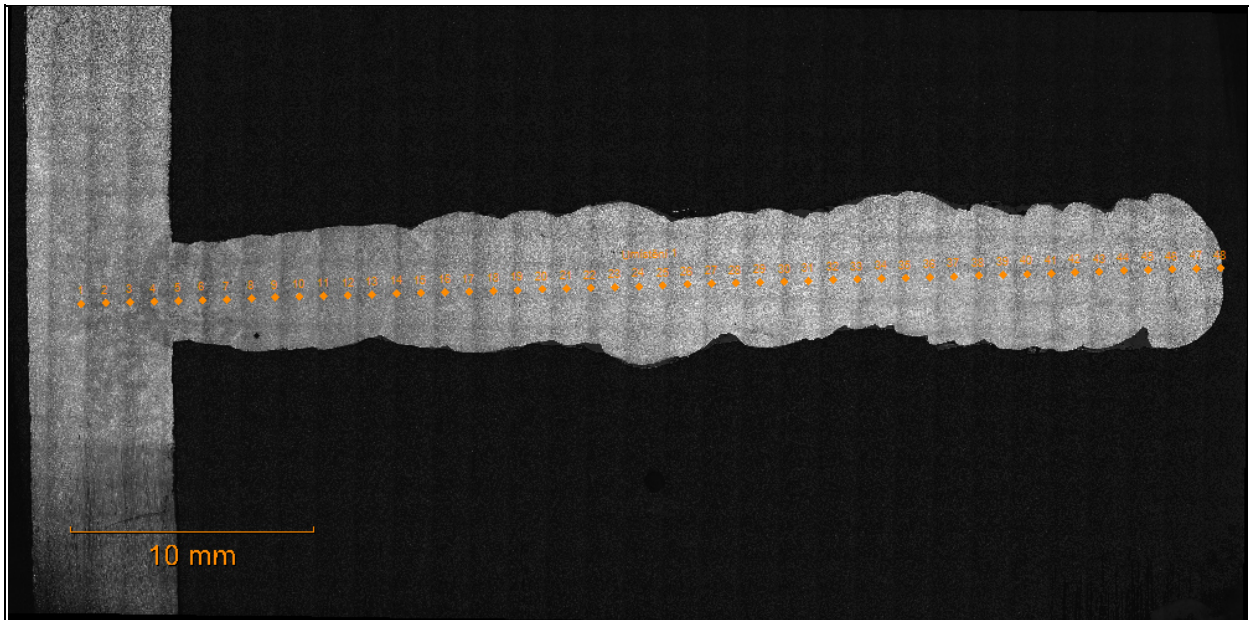
Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ....  
Číslo vzorku: 1.  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10  
Poznámka: ...

Bod	Vzdálenos t	Tvrđost	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
8	8.000 mm	251 HV 10	272.2 μm	271.4 μm	
9	9.000 mm	233 HV 10	283.2 μm	280.8 μm	
10	10.000 mm	232 HV 10	281.6 μm	284.0 μm	
11	11.000 mm	240 HV 10	277.7 μm	278.4 μm	
12	12.000 mm	243 HV 10	276.1 μm	276.9 μm	
13	13.000 mm	236 HV 10	281.6 μm	279.6 μm	
14	14.000 mm	244 HV 10	277.4 μm	273.9 μm	
15	15.000 mm	231 HV 10	284.0 μm	282.9 μm	
16	16.000 mm	222 HV 10	291.1 μm	286.3 μm	
17	17.000 mm	220 HV 10	289.5 μm	291.1 μm	
18	18.000 mm	223 HV 10	287.1 μm	289.2 μm	
19	19.000 mm	207 HV 10	301.2 μm	297.3 μm	
20	20.000 mm	220 HV 10	291.7 μm	288.6 μm	
21	21.000 mm	224 HV 10	288.7 μm	286.7 μm	
22	22.000 mm	209 HV 10	298.5 μm	297.4 μm	
23	23.000 mm	197 HV 10	305.8 μm	307.9 μm	
24	24.000 mm	207 HV 10	299.0 μm	299.8 μm	
25	25.000 mm	200 HV 10	302.1 μm	306.9 μm	
26	26.000 mm	202 HV 10	303.2 μm	302.8 μm	
27	27.000 mm	193 HV 10	310.1 μm	309.5 μm	
28	28.000 mm	191 HV 10	312.4 μm	311.6 μm	
29	29.000 mm	190 HV 10	310.5 μm	314.9 μm	
30	30.000 mm	186 HV 10	317.1 μm	314.8 μm	
31	31.000 mm	184 HV 10	317.0 μm	318.3 μm	
32	32.000 mm	187 HV 10	313.2 μm	317.1 μm	
33	33.000 mm	193 HV 10	308.4 μm	310.8 μm	
34	34.000 mm	192 HV 10	312.4 μm	309.8 μm	
35	35.000 mm	188 HV 10	313.2 μm	314.8 μm	
36	36.000 mm	193 HV 10	311.6 μm	307.7 μm	

ČEZ, a.s.  
 Materiálová laboratoř  
 Treninkové a realizační centrum  
 JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
 Tester: Tomáš Kramár  
 Program: HV10 linie  
 Protokl č.: ....  
 Číslo vzorku: 1.  
 Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
 Použitá destička: 256 HV 10  
 Poznámka: ...

Bod	Vzdálenos t	Tvrдост	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
37	37.000 mm	210 HV 10	295.8 μm	299.0 μm	
38	38.000 mm	194 HV 10	306.1 μm	312.4 μm	
39	39.000 mm	200 HV 10	303.5 μm	306.1 μm	
40	40.000 mm	189 HV 10	314.7 μm	311.7 μm	
41	41.000 mm	191 HV 10	307.2 μm	316.7 μm	
42	42.000 mm	199 HV 10	305.4 μm	304.9 μm	
43	43.000 mm	195 HV 10	309.2 μm	307.7 μm	
44	44.000 mm	194 HV 10	310.9 μm	307.7 μm	
45	45.000 mm	189 HV 10	314.0 μm	312.4 μm	
46	46.000 mm	191 HV 10	314.8 μm	309.2 μm	
47	47.000 mm	190 HV 10	315.5 μm	310.0 μm	
48	48.000 mm	Odmítnuto	-	-	





ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ....  
Číslo vzorku: 1.  
Měřící zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10  
Poznámka: ...

Podpis:

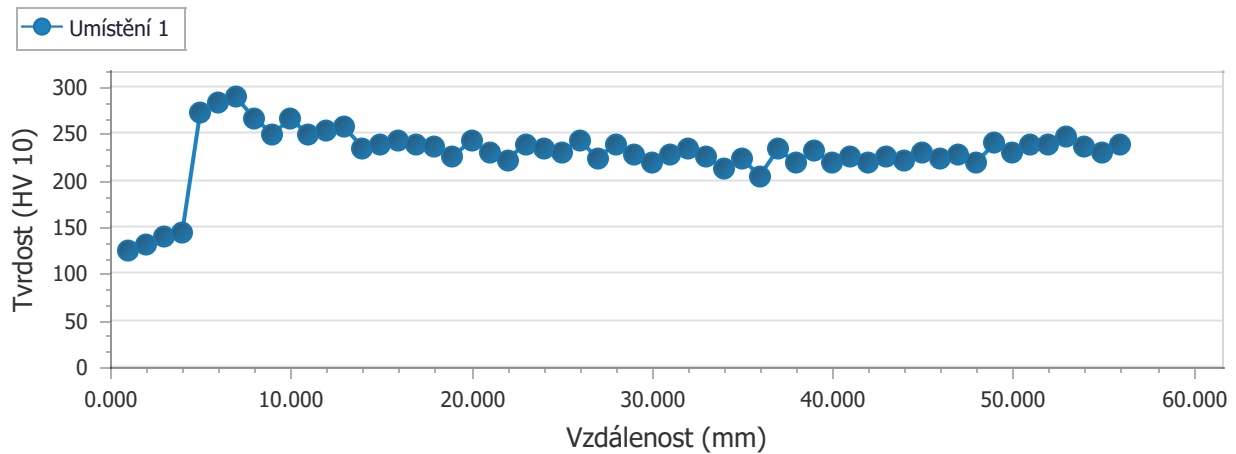


# Prvotní záznam

Měření tvrdosti podle Vickerse

ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ...  
Číslo vzorku: 2  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10



## Umístění 1

Sřřední	Minimum	Maximum	Rozsah	Std. odchylka
229	126	289	163	31

2 \* std. odchylka

62

Bod	Vzdálenosť	Tvrdość	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
1	1.000 mm	126 HV 10	386.9 $\mu$ m	381.8 $\mu$ m	
2	2.000 mm	131 HV 10	375.5 $\mu$ m	375.6 $\mu$ m	
3	3.000 mm	139 HV 10	363.6 $\mu$ m	367.6 $\mu$ m	
4	4.000 mm	144 HV 10	359.7 $\mu$ m	358.1 $\mu$ m	
5	5.000 mm	273 HV 10	260.1 $\mu$ m	261.1 $\mu$ m	
6	6.000 mm	283 HV 10	256.2 $\mu$ m	255.5 $\mu$ m	
7	7.000 mm	289 HV 10	253.7 $\mu$ m	253.2 $\mu$ m	

ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ...  
Číslo vzorku: 2  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10

Bod	Vzdálenos t	Tvrдост	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
8	8.000 mm	266 HV 10	266.0 μm	261.8 μm	
9	9.000 mm	250 HV 10	273.8 μm	271.0 μm	
10	10.000 mm	266 HV 10	266.0 μm	262.5 μm	
11	11.000 mm	249 HV 10	274.7 μm	270.8 μm	
12	12.000 mm	254 HV 10	273.9 μm	266.8 μm	
13	13.000 mm	257 HV 10	265.2 μm	272.5 μm	
14	14.000 mm	235 HV 10	280.2 μm	281.8 μm	
15	15.000 mm	238 HV 10	280.5 μm	277.7 μm	
16	16.000 mm	243 HV 10	277.5 μm	275.1 μm	
17	17.000 mm	238 HV 10	282.4 μm	275.3 μm	
18	18.000 mm	237 HV 10	283.2 μm	276.1 μm	
19	19.000 mm	225 HV 10	291.0 μm	282.7 μm	
20	20.000 mm	243 HV 10	282.9 μm	270.0 μm	
21	21.000 mm	230 HV 10	287.1 μm	281.1 μm	
22	22.000 mm	222 HV 10	286.3 μm	291.9 μm	
23	23.000 mm	239 HV 10	280.1 μm	276.9 μm	
24	24.000 mm	233 HV 10	284.2 μm	279.5 μm	
25	25.000 mm	229 HV 10	285.1 μm	283.4 μm	
26	26.000 mm	243 HV 10	276.9 μm	275.5 μm	
27	27.000 mm	224 HV 10	291.6 μm	284.1 μm	
28	28.000 mm	239 HV 10	279.6 μm	277.9 μm	
29	29.000 mm	227 HV 10	287.9 μm	284.0 μm	
30	30.000 mm	220 HV 10	287.1 μm	293.9 μm	
31	31.000 mm	227 HV 10	284.0 μm	287.1 μm	
32	32.000 mm	233 HV 10	285.5 μm	278.5 μm	
33	33.000 mm	226 HV 10	282.1 μm	291.1 μm	
34	34.000 mm	212 HV 10	295.8 μm	295.8 μm	
35	35.000 mm	223 HV 10	288.1 μm	288.6 μm	
36	36.000 mm	205 HV 10	301.4 μm	300.3 μm	

ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

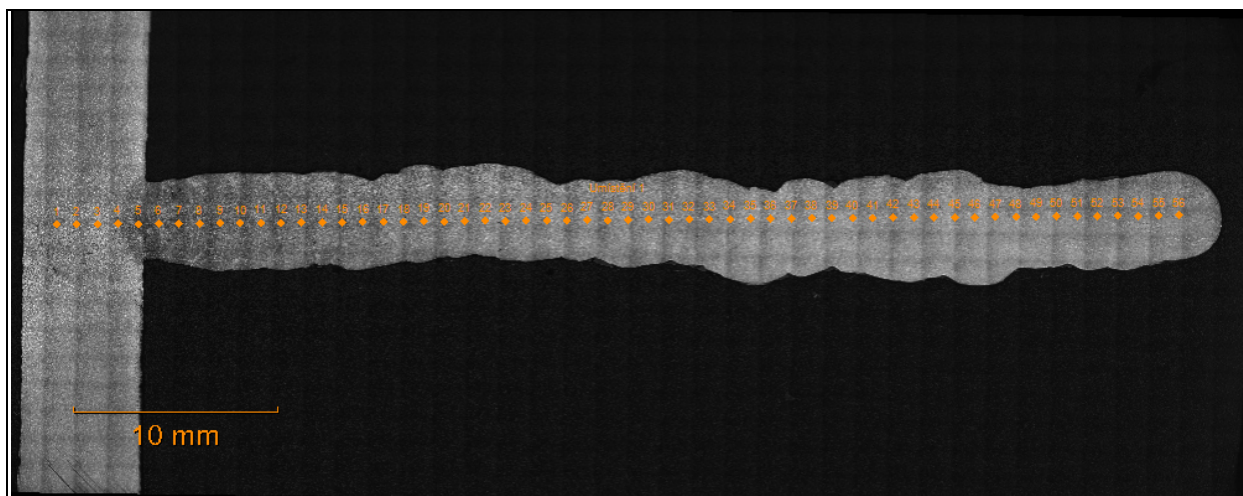
Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ...  
Číslo vzorku: 2  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10

Bod	Vzdálenos t	Tvrđost	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
37	37.000 mm	233 HV 10	282.0 μm	282.1 μm	
38	38.000 mm	219 HV 10	290.3 μm	291.9 μm	
39	39.000 mm	231 HV 10	281.4 μm	284.8 μm	
40	40.000 mm	218 HV 10	291.9 μm	290.7 μm	
41	41.000 mm	226 HV 10	288.8 μm	284.2 μm	
42	42.000 mm	219 HV 10	288.7 μm	293.0 μm	
43	43.000 mm	226 HV 10	288.7 μm	283.9 μm	
44	44.000 mm	220 HV 10	290.3 μm	290.1 μm	
45	45.000 mm	230 HV 10	282.1 μm	285.8 μm	
46	46.000 mm	224 HV 10	286.3 μm	288.9 μm	
47	47.000 mm	227 HV 10	288.7 μm	283.2 μm	
48	48.000 mm	219 HV 10	289.3 μm	292.1 μm	
49	49.000 mm	239 HV 10	276.1 μm	280.6 μm	
50	50.000 mm	230 HV 10	284.8 μm	283.6 μm	
51	51.000 mm	238 HV 10	277.6 μm	280.9 μm	
52	52.000 mm	239 HV 10	276.7 μm	280.2 μm	
53	53.000 mm	246 HV 10	272.8 μm	276.5 μm	
54	54.000 mm	237 HV 10	278.2 μm	281.6 μm	
55	55.000 mm	231 HV 10	280.8 μm	286.4 μm	

ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ...  
Číslo vzorku: 2  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10

Bod	Vzdálenos t	Tvrđost	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
56	56.000 mm	238 HV 10	279.3 μm	279.3 μm	



Podpis:

Teplota měření:

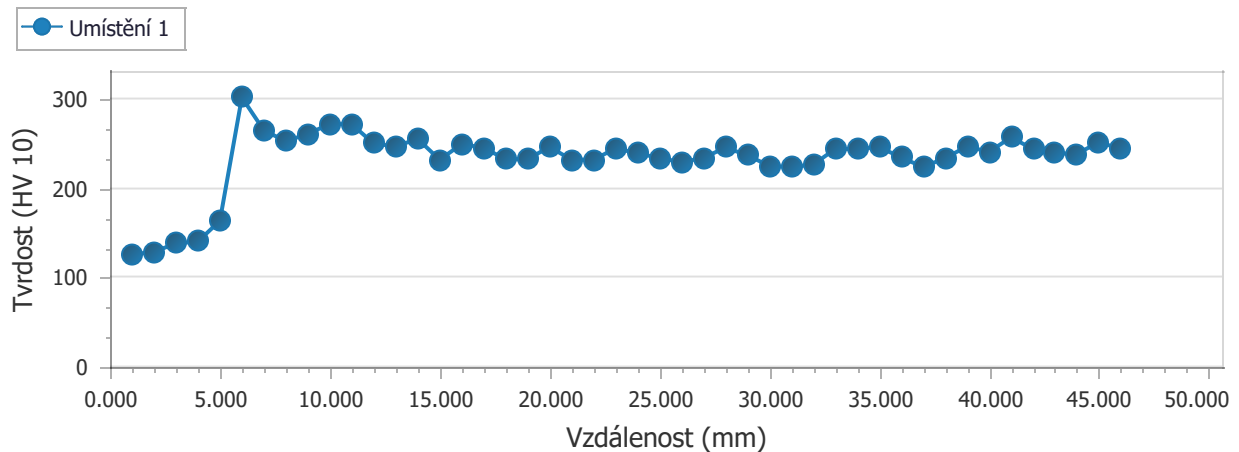


# Prvotní záznam

Měření tvrdosti podle Vickerse

ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ...  
Číslo vzorku: 3  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10



## Umístění 1

Sřřední	Minimum	Maximum	Rozsah	Std. odchylka
233	126	302	176	36

2 \* std. odchylka

72

Bod	Vzdálenosť	Tvrdość	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
1	1.000 mm	126 HV 10	381.9 $\mu$ m	386.1 $\mu$ m	
2	2.000 mm	129 HV 10	383.5 $\mu$ m	376.1 $\mu$ m	
3	3.000 mm	138 HV 10	368.3 $\mu$ m	364.5 $\mu$ m	
4	4.000 mm	140 HV 10	366.0 $\mu$ m	361.5 $\mu$ m	
5	5.000 mm	163 HV 10	338.1 $\mu$ m	335.7 $\mu$ m	
6	6.000 mm	302 HV 10	248.0 $\mu$ m	247.9 $\mu$ m	
7	7.000 mm	265 HV 10	272.2 $\mu$ m	257.0 $\mu$ m	

ČEZ, a.s.  
 Materiálová laboratoř  
 Treninkové a realizační centrum  
 JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
 Tester: Tomáš Kramár  
 Program: HV10 linie  
 Protokl č.: ...  
 Číslo vzorku: 3  
 Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
 Použitá destička: 256 HV 10

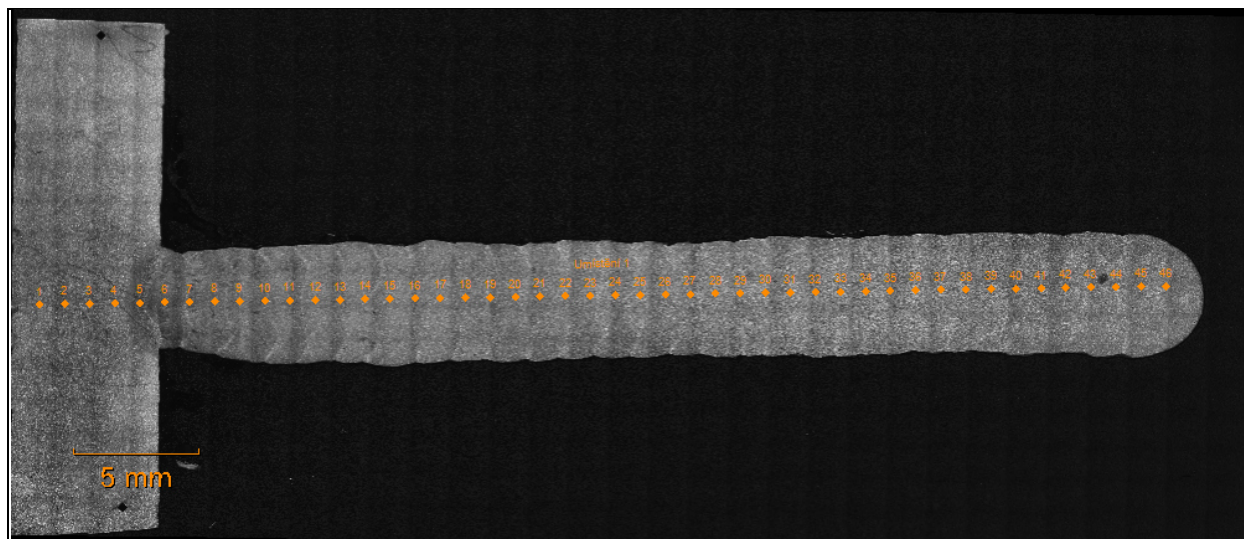
Bod	Vzdálenos t	Tvrдост	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
8	8.000 mm	253 HV 10	274.4 μm	267.5 μm	
9	9.000 mm	261 HV 10	266.6 μm	266.6 μm	
10	10.000 mm	272 HV 10	264.2 μm	258.0 μm	
11	11.000 mm	272 HV 10	264.8 μm	257.8 μm	
12	12.000 mm	250 HV 10	273.7 μm	270.9 μm	
13	13.000 mm	247 HV 10	273.7 μm	274.5 μm	
14	14.000 mm	255 HV 10	269.8 μm	269.2 μm	
15	15.000 mm	232 HV 10	284.0 μm	281.6 μm	
16	16.000 mm	249 HV 10	274.7 μm	270.6 μm	
17	17.000 mm	245 HV 10	279.1 μm	270.6 μm	
18	18.000 mm	232 HV 10	285.8 μm	279.3 μm	
19	19.000 mm	233 HV 10	282.4 μm	282.4 μm	
20	20.000 mm	246 HV 10	275.3 μm	273.5 μm	
21	21.000 mm	232 HV 10	283.2 μm	282.4 μm	
22	22.000 mm	232 HV 10	284.0 μm	281.6 μm	
23	23.000 mm	245 HV 10	276.1 μm	274.6 μm	
24	24.000 mm	239 HV 10	281.6 μm	275.3 μm	
25	25.000 mm	234 HV 10	283.2 μm	280.0 μm	
26	26.000 mm	229 HV 10	288.7 μm	280.0 μm	
27	27.000 mm	234 HV 10	284.0 μm	279.3 μm	
28	28.000 mm	246 HV 10	276.9 μm	272.7 μm	
29	29.000 mm	237 HV 10	276.9 μm	282.6 μm	
30	30.000 mm	225 HV 10	287.9 μm	286.3 μm	
31	31.000 mm	224 HV 10	288.7 μm	287.1 μm	
32	32.000 mm	226 HV 10	287.1 μm	285.2 μm	
33	33.000 mm	244 HV 10	276.1 μm	275.3 μm	
34	34.000 mm	244 HV 10	276.9 μm	274.5 μm	
35	35.000 mm	246 HV 10	275.3 μm	273.7 μm	
36	36.000 mm	234 HV 10	284.0 μm	278.5 μm	



ČEZ, a.s.  
Materiálová laboratoř  
Treninkové a realizační centrum  
JE Temelín

Datum: 16-07-2020  
Tester: Tomáš Kramár  
Program: HV10 linie  
Protokl č.: ...  
Číslo vzorku: 3  
Měřicí zařízení: Wilson VH3100  
Použitá destička: 256 HV 10

Bod	Vzdálenos t	Tvrдост	Diagonálně X	Diagonálně Y	Komentář
37	37.000 mm	224 HV 10	287.1 $\mu\text{m}$	288.7 $\mu\text{m}$	
38	38.000 mm	234 HV 10	280.0 $\mu\text{m}$	283.2 $\mu\text{m}$	
39	39.000 mm	247 HV 10	276.1 $\mu\text{m}$	272.2 $\mu\text{m}$	
40	40.000 mm	241 HV 10	278.3 $\mu\text{m}$	276.9 $\mu\text{m}$	
41	41.000 mm	257 HV 10	270.6 $\mu\text{m}$	266.6 $\mu\text{m}$	
42	42.000 mm	244 HV 10	278.7 $\mu\text{m}$	272.9 $\mu\text{m}$	
43	43.000 mm	239 HV 10	280.0 $\mu\text{m}$	276.9 $\mu\text{m}$	
44	44.000 mm	238 HV 10	280.0 $\mu\text{m}$	277.7 $\mu\text{m}$	
45	45.000 mm	252 HV 10	270.9 $\mu\text{m}$	272.1 $\mu\text{m}$	
46	46.000 mm	244 HV 10	283.2 $\mu\text{m}$	268.2 $\mu\text{m}$	



Podpis:

Teplota měření: