



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní  
Ústav strojírenské technologie**

**SVAŘOVÁNÍ PŘENOSNÝCH KONSTRUKCÍ  
Z HLINÍKOVÝCH SLITIN**

**WELDING OF PORTABLE STRUCTURES MADE OF  
ALUMINIUM ALLOYS**

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství  
Vedoucí práce: Ing. Karel Kovanda Ph.D., IWE

**Bc. Tomáš Langer**

ČVUT v Praze, Fakulta strojní  
Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2018/2019

---

Praha 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Langer** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **419921**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Svařování přenosných konstrukcí z hliníkových slitin**

Název diplomové práce anglicky:

**Welding of portable structures made of aluminum alloys.**

Pokyny pro vypracování:

1. Metody svařování hliníkových slitin pomocí elektrického oblouku (MIG, TIG, CMT).
2. Svařitelnost vybraných hliníkových slitin.
3. Technologičnost konstrukce trubkových spojení.
4. Návrh experimentu - volba svařovacího cyklu (zapalování el. oblouku, ukončování svaru).
5. Vyhodnocení experimentální činnosti.
6. Závěrečné shrnutí dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

Hrivňák, I.: Zváranie a svařitelnosť materiálův.  
Országh, P.: Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovů.  
Příklad norem: ČSN EN ISO 10042, ČSN EN ISO 4063 apod.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Karel Kovanda, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**



Ing. Karel Kovanda, 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

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

**2.5.2019**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

### **Prohlášení o autorství:**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr navazujícího magisterského studia Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Praha dne:

.....

Podpis studenta

### **Prohlášení o udělení souhlasu s užitím:**

Podle § 60 zákona č.121/2000 Sb., O právu autorském a právu souvisejícím s právem autorským, O studiu na vysokých školách a zákona o závěrečných zkouškách, je diplomová práce duševním spoluvlastnictvím autora, vedoucího diplomové práce a Fakulty strojní ČVUT. Citace povoluje fakulta. Podmínkou externího použití je smlouva s řešiteli.

**Poděkování:**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Karlu Kovandovi, Ph.D., IWE za cenné rady a čas strávený při tvorbě mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE a Bc. Kristýně Adámkové za pomoc při přípravě vzorků v laboratořích a v neposlední řadě Ing. Vladimíru Zemanovi z firmy MILOS s.r.o. Roudnice nad Labem za spolupráci při zajišťování vzorků pro svařování.

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

Obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

Název diplomové práce: **Svařování přenosných konstrukcí z hliníkových slitin**

Autor diplomové práce: **Bc. Tomáš Langer**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Kovanda, Ph.D. IWE**

Rozsah diplomové práce:	Počet stran:	101
	Počet obrázků:	78
	Počet grafů:	9
	Počet tabulek:	21
	Počet příloh:	4

**Anotace:**

Diplomová práce se zabývá svařováním přenosných konstrukcí z hliníkových slitin. Teoretická část práce popisuje metody svařování TIG, MIG a CMT vhodné pro robotizované svařování. Dále se věnuje rozboru problematiky svařitelnosti hliníkových slitin. V praktické části řeší nastavení vhodných parametrů pro robotizované svařování metodou MIG, včetně řešení procesů zapalování oblouku a ukončování svaru. V závěru jsou vzájemně porovnány výsledky svařování metodami TIG a MIG, i ochranné atmosféry čistého argonu a směsi s příměsí helia. Následuje porovnání mechanických vlastností prostřednictvím měření tvrdosti.

**Klíčová slova:** TIG, MIG, CMT, hliníkové slitiny, robotizované svařování, přenosné konstrukce, tvrdost dle Vickerse, mikrostruktura, makrostruktura, Milos s.r.o Roudnice nad Labem.

**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE**  
**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Field of study:           **Manufacturing and material engineering**  
Diploma thesis:         **Welding of portable structures made of aluminium alloys**  
Author:                   **Bc. Tomáš Langer**  
Supervisor:             **Ing. Karel Kovanda, Ph.D. IWE**

Extent of diploma thesis:	Number of pages:	101
	Number of pictures:	78
	Number of graphs:	9
	Number of tables:	21
	Number of attachments:	4

**Abstract:**

The diploma thesis deals with welding of portable aluminum structures. The theoretical part describes TIG, MIG, and CMT welding methods, suitable for robotic welding. It also focuses on problematics of welding of aluminum alloys. The practical part handles the setting of appropriate parameters for welding with MIG method, including the solution of arc ignition and weld ending. The conclusion compares the results of welding with TIG and MIG methods, as well as welding in a controlled atmosphere of pure argon and gas mixture with added helium, followed by the comparison of mechanical properties through hardness measurement.

**Keywords:** TIG, MIG, CMT, aluminium alloys, robotic welding, portable structures, Vickers hardness, microstructure, macrostructure, Milos s.r.o Roudnice nad Labem.

# OBSAH

ÚVOD .....	10
CÍLE PRÁCE .....	10
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Metoda TIG .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Způsoby svařování metodou TIG .....</b>	<b>12</b>
1.1.1 Svařování stejnosměrným proudem .....	12
1.1.2 Svařování střídavým proudem .....	13
1.1.3 Svařování impulsním proudem .....	14
<b>1.2 Volba ochranného plynu .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Elektrody a doporučené parametry svařování .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Svařovací zdroje a hořáky TIG .....</b>	<b>18</b>
<b>2 Metoda MIG .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Přenos kovu u MIG svařování .....</b>	<b>21</b>
2.1.1 Sprchový přenos .....	22
2.1.2 Zkratový přenos .....	23
2.1.3 Impulsní přenos .....	23
<b>2.2 Ochranné plyny pro svařování MIG .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3 Přídavné materiály pro metodu MIG .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 Svařovací zdroje a hořáky MIG .....</b>	<b>26</b>
<b>3 Metoda CMT .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Přenos kovu procesem CMT .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Svařovací režimy CMT .....</b>	<b>30</b>
3.2.1 CMT PULSE .....	30
3.2.2 CMT ADVANCED .....	31
3.2.3 CMT PULSE ADVANCED .....	32
3.2.4 CMT TWIN .....	32
<b>3.3 Sestava CMT .....</b>	<b>33</b>
<b>4 Robotizované svařování .....</b>	<b>35</b>

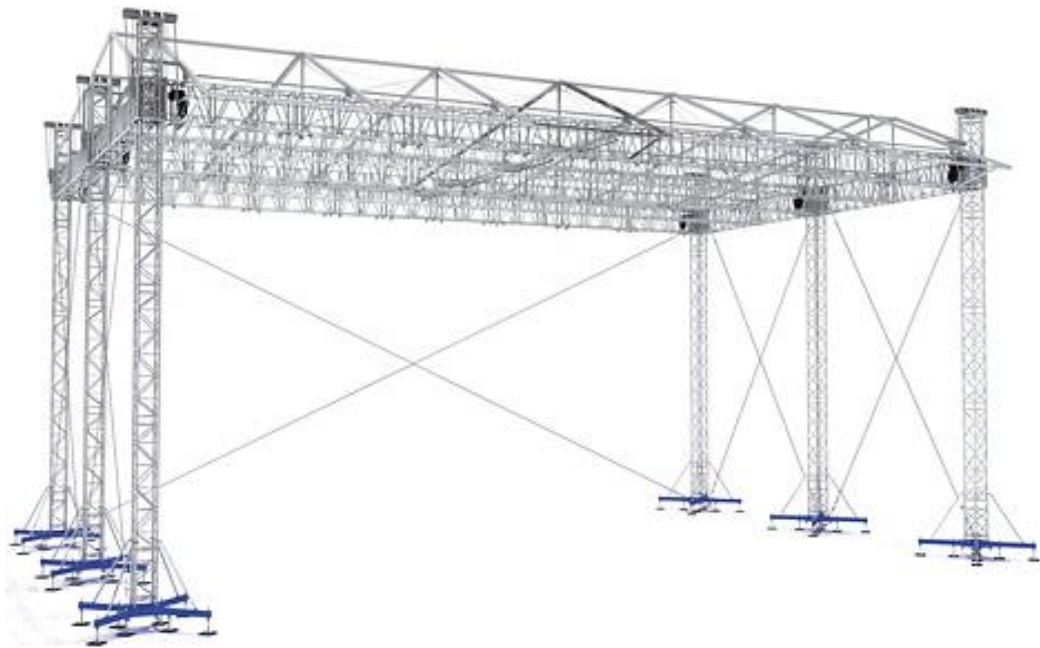
4.1	Popis kinematiky robota .....	36
4.2	Souřadnicové systémy robotů .....	37
5	Hliník a slitiny hliníku .....	38
5.1	Slitiny hliníku pro odlitky.....	39
5.2	Slitiny hliníku pro tváření .....	41
5.3	Svařitelnost hliníkových slitin .....	42
5.4	Přídavné materiály pro svařování hliníku a hliníkových slitin .....	44
6	Technologičnost konstrukce trubkových spojení.....	46
<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>		<b>48</b>
7	Experimentální pracoviště .....	48
7.1	Svařovací robot Arc Mate 100iC.....	48
7.2	Polohovadlo Fanuc P250 .....	49
7.3	Řídící jednotka R-J3i C .....	50
7.4	Svařovací zdroj Sigma Galaxy 400 .....	50
7.5	Podavač drátu RWF Multi.....	51
7.6	Svařovací hořák MIG .....	52
8	Realizace experimentu .....	52
8.1	Vliv parametrů zapalování a ukončování elektrického oblouku .....	53
8.1.1	Upínací přípravek plechu .....	53
8.1.2	Zapalování elektrického oblouku .....	54
8.1.3	Ukončování svaru.....	59
8.2	Svařování hliníkové konstrukce .....	62
8.2.1	Navržení přídavného materiálu .....	63
8.2.2	Upnutí hliníkové konstrukce .....	63
8.2.3	Robotické svařování metodou MIG hliníkové konstrukce .....	64
8.3	Vyhodnocování provedených svarových spojů .....	73
8.3.1	Porovnání makrostruktur svarových spojů .....	73
8.3.2	Porovnání mikrostruktur svarových spojů .....	75
8.3.3	Porovnání tvrdosti svarových spojů .....	80
9	Závěrečné shrnutí.....	84



SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY.....	86
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	90
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	92
SEZNAM TABULEK .....	95
SEZNAM GRAFŮ.....	96
SEZNAM PŘÍLOH .....	96

# ÚVOD

Diplomová práce se zabývá problematikou svařování přenosných hliníkových konstrukcí, se kterými se můžeme v dnešní době stále častěji setkat. Využití hliníkových slitin, jako velice perspektivního materiálu pro výrobu přenosných konstrukcí, kde je kladen důraz na lehkost a pevnost, je velmi aktuální. Část konstrukce svařovaná v této práci se skládá z více dílů, které jsou zčásti tvořeny odlitkem ze slitiny hliníku  $AlSi7Mg0,6$  a dále pak tvářených trubek z hliníkové slitiny  $AlMgSi0,5$ . Jedná se o propojovací člen potřebný ke spojení dalších prvků velkých konstrukcí, jako jsou např. pódia.



Obrázek 1 - Příhradová konstrukce pódia [1]

## CÍLE PRÁCE

Cílem teoretické části práce je provést rozbor problematiky obloukového svařování hliníkových slitin. Diplomová práce by se měla věnovat metodám svařování TIG, MIG a CMT, které je možné využít pro robotizované svařování hliníkových slitin. Dále pak popsat problematiku hliníku a slitin hliníku nebo uvést základy robotizovaného svařování.

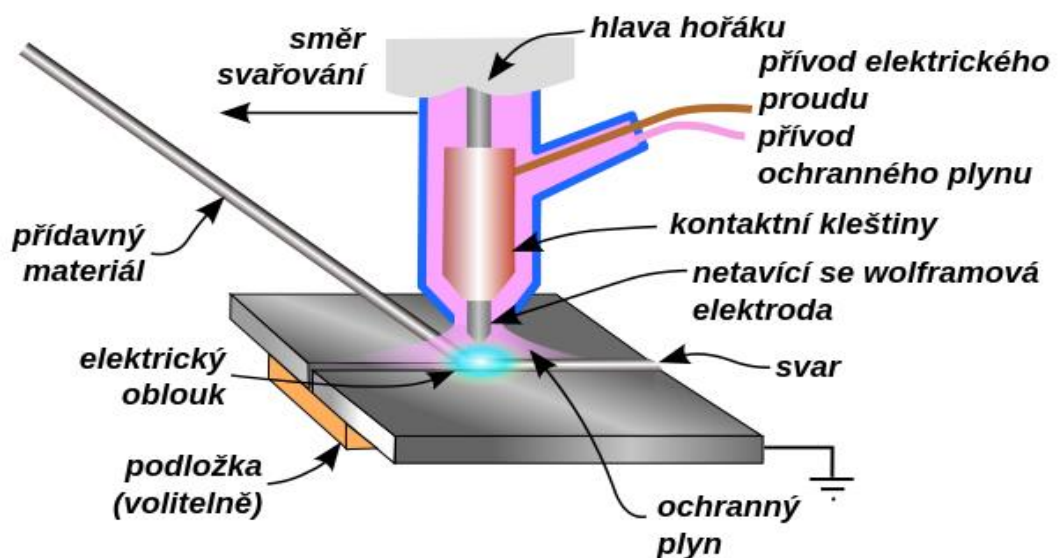
Cílem experimentální části práce je s využitím robotického svařování metodou MIG nalézt optimální parametry svařování, se kterými bude dosaženo svaru požadované jakosti. Následně provést srovnání svařených konstrukcí uvedenou metodou s ručně svařovanou konstrukcí metodou TIG od firmy MILOS s.r.o. Roudnice nad Labem.

# I. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část práce bude zaměřena především na seznámení s problematikou týkající se metod svařování, které budou následně využity v praktické části práce. Největší pozornost zde bude věnována metodám svařování TIG, MIG, CMT využívaných pro svařování hliníku a slitin hliníku. Dále bude proveden rozbor hliníku a slitin hliníku včetně problémů, které mohou vznikat při jejich svařování.

## 1 Metoda TIG

Svařovací metoda TIG (Tungsten Inert Gas) může být někdy v německé terminologii označována také jako WIG (Wolfram Inert Gas). Princip je založen na svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (Ar, He aj.), který zajišťuje ochranu elektrody a svarové lázně před okolní atmosférou (viz obrázek 2). Wolframová elektroda je umístěna ve svařovacím hořáku, který je vhodně uzpůsoben k přenosu svařovacího proudu, a zakončena keramickou hubicí odolávající vysokým teplotám, ze které vychází ochranný plyn. Elektrický oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem zajišťuje natavení spojovaných dílů. Přídavný materiál ve formě drátu může být přiváděn ručně, nebo při realizaci automatického svařování pomocí podavače s proměnnou rychlostí podávání drátu v závislosti na postupu svařování. [2, 3]



Obrázek 2 - Princip metody TIG [4]

Všeobecně rozeznáváme podle použitého proudu dva způsoby svařování metodou TIG. První způsob založený na svařování pomocí střídavého proudu je využíván pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Druhou možností, jak svařovat metodou, TIG je s využitím stejnosměrného proudu. Stejnosměrným proudem svařujeme především střednělegované a vysokolegované oceli, měď, titan, nikl, zirkon, molybden a další. [5]

Svařování metodou TIG s sebou nese řadu výhod, pro které se často využívá při svařování tenkých materiálů. Umožňuje použití i velmi nízkých proudů (od jednotek ampér), díky čemuž můžeme svařovat velice tenké materiály. Při použití speciálních zdrojů a hořáků lze svařovat i kovové fólie nebo šperky s nastaveným proudem, který je nižší než 1 A. Dalšími oblastmi využití, kde se můžeme s touto metodou svařování setkat jsou svařování žárupevných a žáruvzdorných ocelí pro stavbu kotlů nebo tepelných výměníků, svařování titanových a speciálních slitin v oblasti letecké a kosmické techniky apod. Mezi nejvýznamnější výhody této metody, kvůli kterým je upřednostňována před jinými metodami svařování patří [5, 6]:

- Výborná ochrana zajištěna inertním plynem: ochrana svarové lázně a přehřáté oblasti základního materiálu před účinky vzdušných plynů, zamezení propalům a tím i vzniku strusky (čistý povrch).
- Dobré formování svarové housenky na povrchu i v kořenové části svaru.
- Vysoká stabilita elektrického oblouku a široký rozsah svařovacích proudů.
- Vyhotovené svary zajišťují vysokou citlivost i u materiálů náchylných na naplynění a oxidaci při zvýšených teplotách.
- Minimální TOO a deformace, díky přesnému dávkování tepla vneseného do svaru.

Přes celou řadu výhod je zapotřebí zmínit i některé nevýhody. Za určitou nevýhodu můžeme uvést fakt, že pro různé materiály je nutné správně volit používaný plyn, který může být cenově náročný (He). Nejzásadnějším problémem je však malá produktivita, se kterou se setkáváme především u ručního svařování. Nehodí se příliš ani pro velkosériovou výrobu jednoduchých dílů, ale spíše pro svařování tvarově složitých konstrukcí z ušlechtilých materiálů. Nízkou produktivitu lze považovat jako určitou daň za vysokou kvalitu vyhotovených svarů. [2, 6]

## **1.1 Způsoby svařování metodou TIG**

Metodou TIG lze svařovat proudem střídavým (TIG AC), nebo stejnosměrným (TIG DC), kde elektrický oblouk hoří mezi základním materiálem a netavící se elektrodou. Zapalování oblouku je realizováno pomocí startovacího ionizátoru (vysokonapěťový zdroj, až 5000 V), jenž je součástí zařízení TIG a současně zajišťuje klidné hoření oblouku. [4, 7, 8]

### **1.1.1 Svařování stejnosměrným proudem**

Svařování stejnosměrným proudem nabízí dvě možné varianty polarit, přímou a nepřímou.

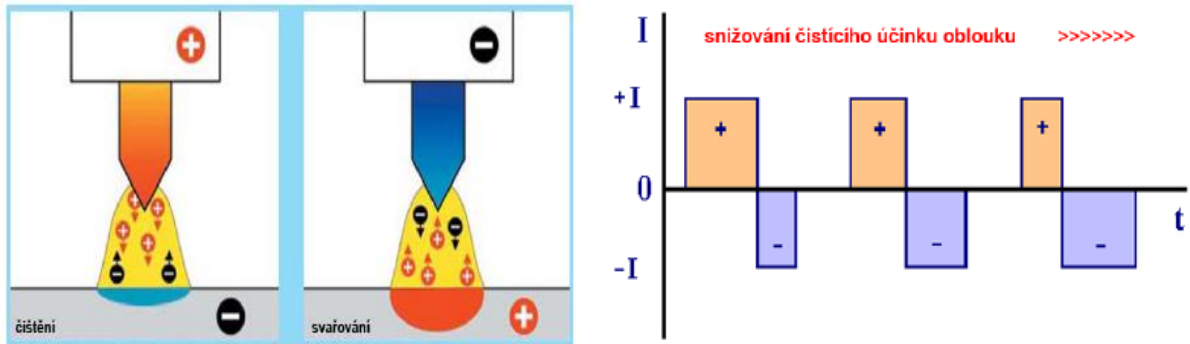
U přímé polarit (TIG DC-) je netavící se wolframová elektroda v hořáku zapojena jako minus pól a svařovaný materiál jako plus pól (viz obrázek 3- pravá část). Využívá se v drtivé většině případů při svařování TIG. Až 2/3 vzniklého tepla oblouku se utváří na základním materiálu, což vede k snazšímu a lepšímu tavení materiálu. Vzniklé svary jsou potom úzké a mají velkou hloubku průvaru. Uvedené

rozložení je výhodné i pro životnost wolframové elektrody, neboť na ni připadá menší množství tepla a zabraňuje se případnému přetížení. Nevýhodou svařování stejnosměrným proudem s přímou polaritou je absence tzv. čistícího efektu oblouku. Zmíněný problém znevýhodňuje tento způsob především při svařování materiálů s odolnou oxidickou vrstvou na povrchu, jako jsou hliníkové a hořčíkové slitiny. V případě, že bychom chtěli svařovat např. hliník, řešíme problém s rozdílnou teplotou tavení oxidické vrstvy hliníku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2 050 °C) a samotného hliníku (650 °C). Nejprve tedy musí dojít k odstranění (mechanické očištění, chemické očištění aj.) vrstvy z povrchu a poté můžeme natavit základní materiál (hliník) teplotou potřebnou k natavení. Řešením je využití střídavého proudu, kde svařování těchto materiálů probíhá téměř bez problémů. Z uvedených důvodů se svařování TIG DC- využívá při svařování nelegovaných i vysokolegovaných ocelí, materiálů na bázi niklu, mědi, titanu a pro navařování tvrdých vrstev. [7, 9]

Svařování stejnosměrným proudem s nepřímou polaritou (TIG DC+) má zapojení takové, že základní materiál je připojen na minus pól a elektroda na plus pól (viz obrázek 3- levá část). Problémem je zde vysoké tepelné namáhání wolframové elektrody, na kterou připadají až 2/3 veškerého tepla, a je nutné intenzivní chlazení. Tento problém částečně řeší moderní hořáky se sofistikovaným kapalinovým systémem, který chrání elektrodu a tím i zvyšuje její životnost a umožňuje použití vyšších proudů. Naopak oproti přímé polaritě disponuje čistícím efektem, který může být využit ke svařování materiálů se silnou oxidickou vrstvou. Kladné ionty ionizovaného argonu se pohybují od elektrody k základnímu materiálu a bombardují jeho povrch. Kinetickou energií, kterou disponují, narušují oxidickou vrstvu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a čistí povrch. Z důvodu menšího tepla přivedeného do základního materiálu je charakteristický malý průvar ve srovnání s přímou polaritou. Dále se již využívá jen pro svařování malých tlouštěk materiálů za nízkých proudů a intenzivního chlazení wolframové elektrody. [7, 8, 10]

### **1.1.2 Svařování střídavým proudem**

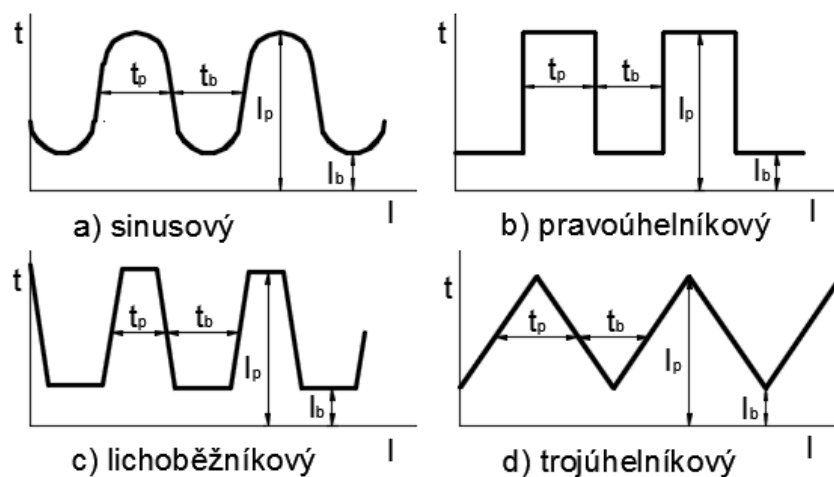
Při svařování střídavým proudem dochází ke střídání polarit v pravidelných intervalech a tím lze využít výhod přímé i nepřímé polarity. Připojením wolframové elektrody na plus odstraňujeme ze svařovaného materiálu oxidy za cenu vyššího tepelného namáhání elektrody. V další fázi dochází k obrácení polarity (wolframová elektroda zapojena na minus) a většímu natavení základního materiálu a částečnému ochlazení elektrody. Současné svařovací zdroje TIG AC mohou mít obdélníkový průběh aj. tvary výstupního proudu (viz obrázek 3) ve srovnání se staršími typy, které měly výstupní průběh proudu sinusový. Současně je zde možné nastavit frekvenci střídání polarity i poměr jednotlivých fází (čištění/svařování) v rozsahu cca 20 až 60 %. [7]



Obrázek 3 - TIG AC [5]

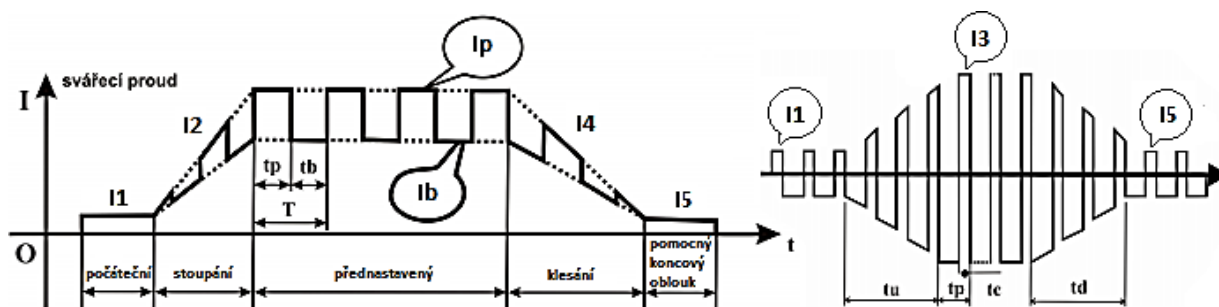
### 1.1.3 Svařování impulsním proudem

Impulsní metoda TIG se využívá zejména při svařování tenkých plechů o tloušťkách do 1 mm, protože snižuje riziko propálení a deformací. Ve srovnání s konstantním proudem, kde svářeč z počátku nastaví hodnotu proudu, která se v průběhu svařování nemění u impulsního svařování se intenzita proudu s časem mění mezi dvěma proudovými hladinami. Jmenovitě se jedná o proud základní  $I_b$  a proud pulsní  $I_p$ , jejichž tvar průběhu se může lišit podle použitého zdroje (viz obrázek 4). Pulsní proud zajišťuje kvalitní průvar a je nastavován manuálně svářečem. Základní proud je možné taktéž nastavovat manuálně, nebo může být nastavován automaticky zdrojem v procentuální závislosti na  $I_p$ , jedná o cca 20 až 50 %  $I_p$ . Základní proud tedy nedosahuje takových hodnot, aby byl schopen vytvořit svarovou lázeň a zajišťuje především ionizaci prostředí, ze které plyne menší TOO základního materiálu. Dosáhneme tak přesné regulace svařovacího režimu a tím i velikostí dávek vneseného tepla do svaru, tvarování svarové lázně, dobrou hloubku závaru a šířku svaru. Z hlediska frekvence střídání fází  $I_b$  a  $I_p$  rozeznáváme impulsní svařování při běžném pulsu 0,25 až 25 Hz, se kterým se setkáváme např. při svařování tenkých plechů, a při vysokorychlostním pulsu (20 až 600 Hz), který se vyznačuje koncentrovanějším (zúženým) obloukem s menší TOO. [3, 5, 7]



Obrázek 4 - Příklady průběhu pulsního proudu [5]

Srovnání průběhů proudu pro pulsní TIG svařování a TIG AC skutečného zdroje můžeme vidět na obrázku 5, kde jsou uvedeny nastavované parametry ovlivňující svařovací proces.



Obrázek 5 - Změna proudu při režimu TIG pulsní (vlevo) a svařování TIG AC (vpravo) zdroje TIG 200L/P [11]

Počáteční proud I1 slouží k předehřátí oblouku a jeho velikost je ovlivněna tloušťkou materiálu. Nastavením větší hodnoty dochází k snadnějšímu zapálení, avšak u tenčích materiálů může dojít k propálení. V další fázi dochází k nárůstu proudu až na hodnotu pulsního proudu, který následně pulsuje mezi proudovými hladinami Ip a Ib. Četnost těchto pulsů je dána nastavením pulsní frekvence ( $1/T$ ), kde  $T = T_p + T_b$ . V některých režimech oblouk nezhasíná a poklesne na hodnotu I5 (proud pomocného/koncového oblouku) a pomáhá lepšímu tvarování konce svaru. [11]

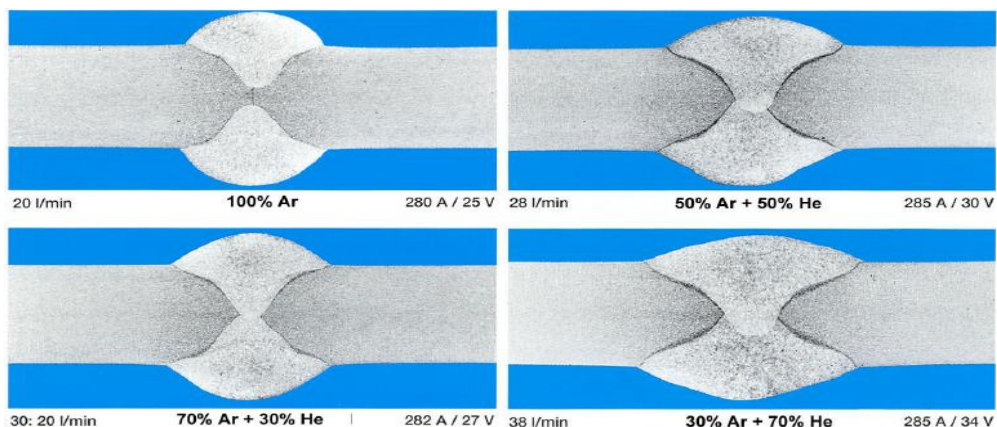
Proudy I1, I3 (svařovací proud) a I5 jsou jako v předchozím případě nastavovány uživatelem a odpovídají cca absolutnímu průměru praktického svařovacího proudu. Rychlost vzrůstu I1 a poklesu I5 je možné ovlivnit nastavením  $t_u$  (čas zvyšování proudu) a  $t_d$  (čas snižování proudu). Parametry  $t_p$  (perioda AC) a  $t_c$  (čas čištění) ovlivňují časové působení kladné a záporné půlvlny, a tedy i velikost čistícího efektu. Intenzitu čištění lze vyjádřit jako  $T_c/T_p \cdot 100\%$ . Při menší hodnotě je oblouk koncentrovaný a svarová lázeň je úzká a hluboká, naopak při větší hodnotě je oblouk disperzní, svarová lázeň je široká a mělká. [11]

## 1.2 Volba ochranného plynu

Primární funkcí ochranných plynů je ochrana elektrody, oblouku, svarové lázně a jejího okolí i kořene svaru před působením vzdušných plynů, který zpřičiňuje oxidaci, naplynění, propaly prvků a pórovitost. Dále ovlivňují typ přenosu kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, chování svarové lázně, hloubku závaru, rychlost svařování a další parametry. [5]

Nejčastěji se jako ochranné plyny využívají inertní plyny, které nereagují se svarovou lázní, jako je He, Ar, H a jejich směsi (viz tabulka 1). Vlastnosti těchto plynů jsou různé, liší se v jejich tepelné vodivosti, ionizačním potenciálu a také v ceně. V důsledku toho je nutné vždy správně zvolit plyn s vyváženým poměrem vlastností a pořizovací ceny. Nesprávná volba plynu může negativně ovlivnit tvar a rozměry

svaru, kvalitu, celistvost a mechanické vlastnosti svarového spoje, jako to můžeme vidět na obrázku 6. [5, 12]



Obrázek 6 - Důsledky záměny plynů u metody TIG [13]

Tabulka 1 - Používané ochranné plyny pro TIG [3]

Ochranná atmosféra	Použití
Čistý argon (4.8)	Všechny běžné kovové materiály.
Argon 70 % + helium 30 % (Alumaxx® Plus)	Hliník a jeho slitiny, měď a její slitiny, nikl a jeho slitiny, nerezavějící oceli. Umožňuje vyšší rychlosti svařování. Vhodný pro ruční, automatizované, orbitální či robotické svařování.
Argon + 50 % až 75 % helia	Větší tloušťky u hliníku a jeho slitin, mědi a jejich slitin.
Argon 98 % + vodík 2 % (Hytec 2)	Austenitické antikorozní oceli, nikl a jeho slitiny. Vhodný pro ruční, automatizované, orbitální či robotizované svařování.
Argon + 5 % až 7,5 % vodíku	Automatizované či orbitální svařování austenitických nerezavějících ocelí, niklu, mědi a jejich slitin.

### 1.3 Elektrody a doporučené parametry svařování

Základním materiálem pro výrobu elektrod využívaných při svařování metodou TIG je wolfram. Čistý wolfram má teplotu tavení přibližně 3380 °C, která ho předurčuje snášet vysoké teploty, které při svařování vznikají. Kromě elektrod z čistého wolframu se využívá elektrod s příměsí oxidů některých prvků, které zlepšují odolnost proti vyššímu proudovému zatížení a tím zvyšují životnost elektrody nebo i lepší zapalování oblouku a s tím související lepší stabilitu oblouku. Nejčastěji využívanými oxidy jsou oxid thoričitý (ThO<sub>2</sub>), oxid zirkoničitý (ZrO<sub>2</sub>), oxid lanthanitý (LaO<sub>2</sub>) nebo oxid ceričitý (CeO<sub>2</sub>). V tabulce 2 můžeme vidět přehled používaných elektrod, jak je uvádí norma ČSN EN ISO 6848 včetně přesného procentuálního vyjádření obsahu legujících prvků a jejich barevného označení. Barevné označení můžeme vidět na posledních 10 mm konce elektrody. [3, 14]



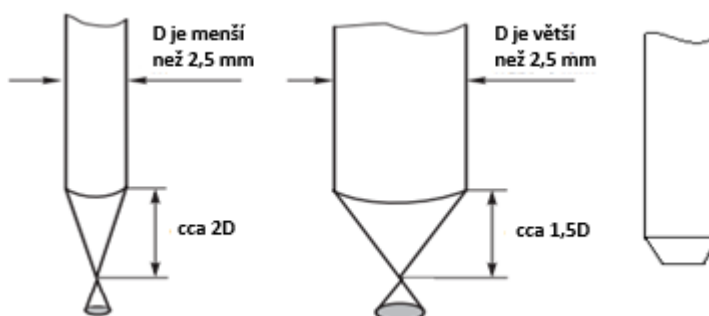
Tabulka 2 - Značení jednotlivých druhů elektrod dle ČSN EN ISO 6848 [15]

Značení elektrody	Legování	Barevné označení	Značení elektrody	Legování	Barevné označení
WP	-	Zelená	WLa10	0,8-1,2 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Černá
WTh10	0,8-1,2 % ThO <sub>2</sub>	Žlutá	WLa15	1,3-1,7 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zlatá
WTh20	1,7-2,2 % ThO <sub>2</sub>	Červená	WLa20	1,8-2,2 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Modrá
WTh30	2,8-3,2 % ThO <sub>2</sub>	Fialová	WZr3	0,15-0,5 % ZrO <sub>2</sub>	Hnědá
WCe20	1,8-2,2 % CeO <sub>2</sub>	Šedá	WZr8	0,7-0,9 % ZrO <sub>2</sub>	Bílá

Elektrody jsou tyčky kruhového průřezu upevněné v hořáku za pomoci systému kleštinového upínání, do kterého je přiváděn svařovací proud. Průměr elektrody se volí v závislosti na velikosti přiváděného proudu a je normalizovaný v několika průměrech, konkrétně 0,5 až 8 mm. Minimální proud závisí na stabilitě oblouku a maximální proud, který umožňuje elektroda vést, je dán začátkem přehřívání a tavení. Důležitou podmínkou pro dosažení dobrého výsledku svařování je úhel nabroušení konce elektrody. Elektrody se brousí na brusce s diamantovými kotouči a musí se zajistit, aby nedošlo k jejímu znečištění jinými prvky a neklesla tak její teplota tavení. Při svařování TIG DC by měl být konec elektrody zbrúšen do kužele pro získání koncentrovaného oblouku, který zajistí úzký a hluboký průvar. Úhlem nabroušení kuželu ovlivníme i velikost svarové lázně (menší úhel znamená užší svarovou lázeň). Svařujeme-li střídavým proudem, potřebujeme malé zkosení, jelikož při zapálení oblouku se konec elektrody zaoblí. Uvedené tvary elektrod můžeme vidět na obrázku 7 a v tabulce 3 jsou uvedeny doporučené hodnoty vrcholových úhlů pro stejnosměrný proud. [3, 14]

Tabulka 3 - Doporučené hodnoty vrcholového úhlu pro stejnosměrný proud [16]

Svařovací proud	Vrcholový úhel	Svařovací proud	Vrcholový úhel
do 20 A	30°	100 až 200 A	90° - 120°
20 až 100 A	60° - 90°	nad 200 A	120°



Obrázek 7 - Příklady broušení wolframových elektrod pro TIG DC a TIG AC [14]

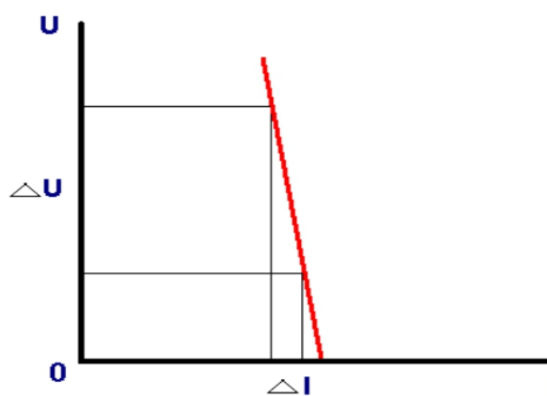
S použitým proudem úzce souvisí další proměnné, které ovlivňují výslednou kvalitu svařování včetně již zmíněné volby průměru elektrody, průtoku ochranného plynu a dalších parametrů. V tabulce 4 můžeme vidět doporučené volby těchto parametrů pro svařování hliníku s použitím ochranného plynu Ar.

Tabulka 4 - Doporučené volby parametrů při ručním svařování hliníku metodou TIG [17]

Tloušťka plechu [mm]	Průměr W elektrody [mm]	Průměr příd. drátu [mm]	Svařovací proud [A]	Spotřeba Ar [ $l \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Rychlost svařování [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
2	2,5	3	80-110	6-9	300
2,5	2,5	3-4	90-120	6-9	290
3	3	4	110-150	6-9	280
4	3-4	4	140-170	7-10	270
5	4-5	4-6	160-210	9-12	260
6	5-6	4-6	210-270	11-15	240
7	5-6	5-6	250-290	11-15	230
8	5-6	5-6	280-320	12-15	210

## 1.4 Svařovací zdroje a hořáky TIG

Pro TIG svařování se používají zdroje stejnosměrného a střídavého proudu se strmou charakteristikou schopné dodávat konstantní proud. Ze strmé V-A charakteristiky (viz obrázek 8) lze vyčíst, že i při vyšších změnách napětí  $\Delta U$  na oblouku dochází k minimálním změnám svařovacího proudu  $\Delta I$ . Jestliže je tedy napětí úměrné délce oblouku, pak i při větších změnách jeho délky (např. špatnou technikou držení hořáku) je ovlivnění velikosti proudu minimální. [4, 7, 8]



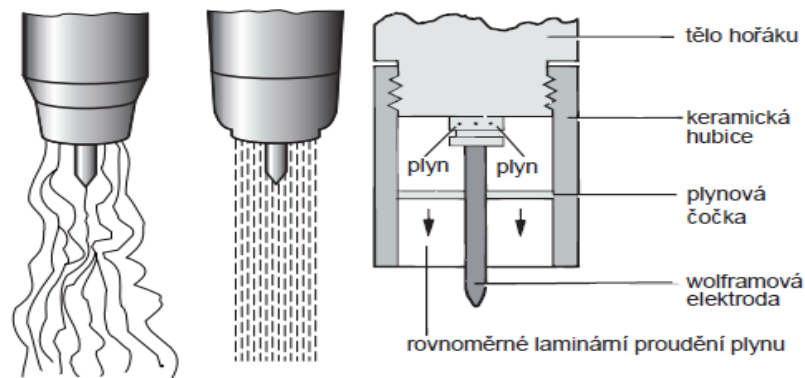
Obrázek 8 - V-A charakteristika [7]

Nejjednodušší zdroje, se kterými je možné se setkat, lze využívat i při svařování obalenou elektrodou (MMA) a zapálení oblouku ve většině případů probíhá mechanickým dotykem wolframové elektrody o základní materiál („náškrabem“). U kvalitnějších zdrojů je možné přepínání mezi VA charakteristikou pro MMA a pro TIG. Další výhodou těchto zdrojů je zapalování oblouku „lift arc“, se kterým je možné zajistit pozvolný nárůst svařovacího proudu při počátečním kontaktu. Pro svaření TIG DC se dále v některých případech užívají usměrňovače. Nejmodernější zdroje (viz obrázek 9) umožňují vytváření stejnosměrného a střídavého proudu a jsou vybaveny bezdotykovým zapalováním elektrického oblouku vysokonapěťovým výbojem (HF zapalování), takové zdroje se pak označují jako AC/DC. Zdroje mohou být dále vybaveny např. nožním regulátorem, dálkovým ovládáním proudu, funkcí zabraňující vzniku kráteru (postupná redukce proudu na konci housenky). [3, 18]



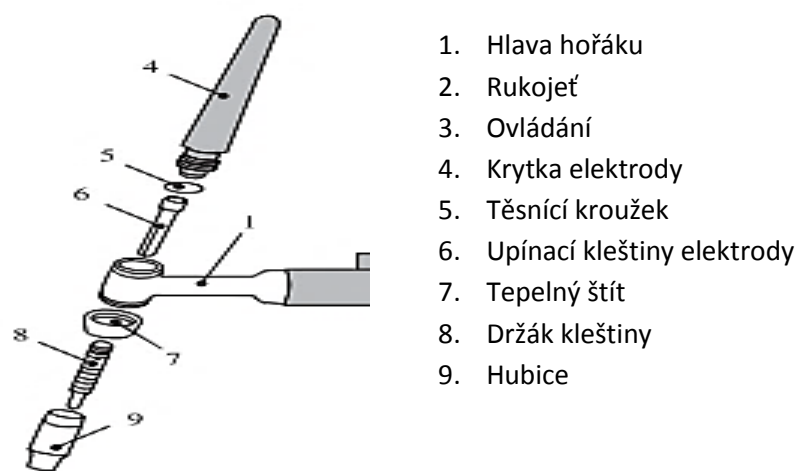
Obrázek 9 - Moderní svařovací zdroj TIG [19]

Konstrukce hořáku se skládá z rukojeti, na které se nachází ovládací prvky (obvykle se jedná o vypínače umožňující řízení přiváděného proudu a ochranného plynu), a hlavy hořáku, který je potažen elektricky izolovaným materiálem. Zbylé komponenty jsou umístěny v těsné blízkosti elektrody, aby nedošlo k příliš silnému proudovému zatížení elektrody při přechodu proudu na elektrodu. Tryska bývá z keramických materiálů odolávajících vysokým teplotám a je označována číslem charakterizujícím vnitřní průměr (např. tryska 4/16 má vnitřní průměr 6.4 mm). Její hlavní funkcí je usměrňování ochranného plynu. Pro lepší usměrňování plynu se v některých případech používá plynová čočka, která je konstruovaná jako drátová mřížka (viz obrázek 10). Výhodou využití plynové čočky je stabilnější tok a jeho delší dosah, čímž umožňuje větší přesah elektrody vůči hubici a lepší viditelnost oblouku i svařovaného místa. [14]



Obrázek 10 - Plynová čočka [3, 14]

Schéma se všemi komponenty hořáku můžeme vidět na obrázku 11.



Obrázek 11 - Svařovací hořák TIG [14]

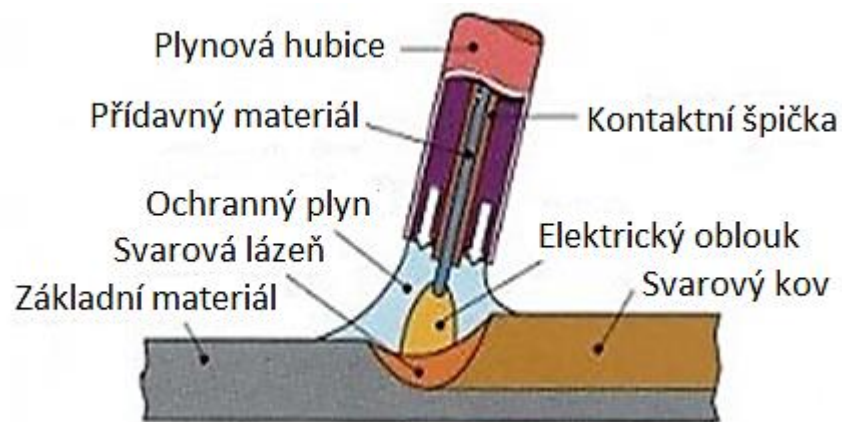
Trh se svařovací technikou pro TIG svařování je velice pestrý a každá firma, která se touto technologií zabývá, nabízí různá provedení a „vylepšení“ svých produktů oproti konkurenci, ale v zásadě se hořáky pro TIG svařování rozdělují podle proudu, se kterým jsou schopny pracovat. Od velikosti použitého proudu se tedy odvíjí volba samotného hořáku a způsob jeho chlazení. U nižších svařovacích proudů se využívá především hořáků, které jsou chlazeny proudem ochranného plynu, naproti tomu při vyšších svařovacích proudech (nad 150 A) se setkáváme s hořáky chlazenými kapalinou. Dále existují různé tvary hubic, které ovlivňují účinek ochranné atmosféry (viz obrázek 12). [3]



Obrázek 12 - Příklady tvarů hubic [20]

## 2 Metoda MIG

MIG/MAG (MIG= Metal Inert Gas, MAG= Metal Active Gas) metody se řadí mezi metody obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře plynu. Oblouk hoří mezi základním materiálem a tavící se elektrodou (viz obrázek 13). Tavící se elektroda (drát, trubička) je zde odvíjena z cívky a pomocí podávacích kladek nepřetržitě přiváděna do svařovacího hořáku. Za nejdůležitější rozdíl mezi metodami MIG a MAG považujeme druh používaného ochranného plynu. U metody MAG se používají aktivní plyny, které chemicky reagují se svarovou lázní, jako je např. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, aj. Oproti tomu u metody MIG jsou využívány plyny inertní, které chemicky nereagují se svarovou lázní (např. Ar, He). Dalším rozdílem mezi uvedenými metodami jsou drobné konstrukční úpravy svařovacího zařízení (např. výměna hořáků). [8, 21]



Obrázek 13 - Metoda MIG/MAG [22]

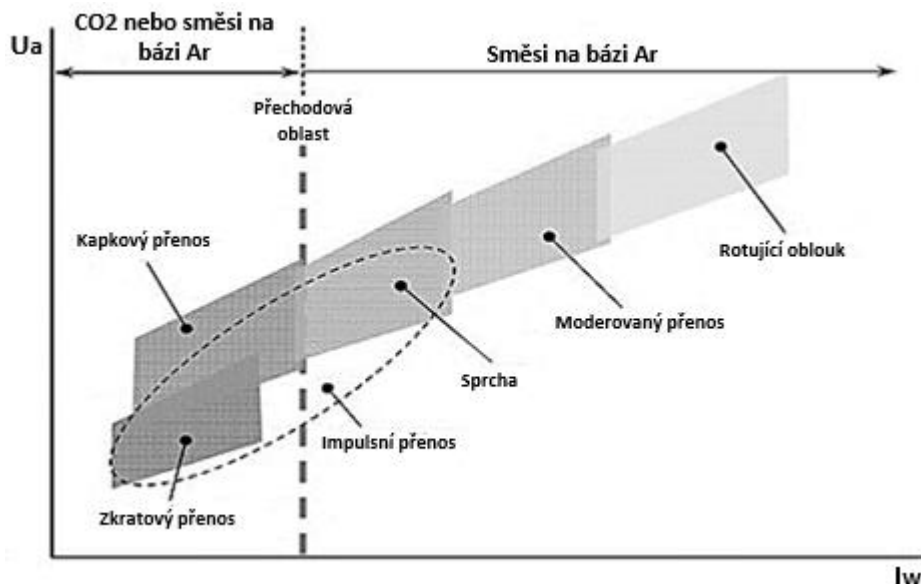
Za největší přednosti MIG/MAG svařování se považuje:

- Možnost svařovat ve všech polohách
- Vysoká svařovací rychlost
- Menší vnesené teplo při svařování ve zkratovém přenosu (menší deformace)
- Dobrá viditelnost oblouku a svarové lázně [23]

Díky ochraně svarové lázně inertním plynem, který nereaguje s materiálem se metoda MIG často využívá ke svařování hliníku, mědi, titanu a dalších neželezných kovů. [24]

### 2.1 Přenos kovu u MIG svařování

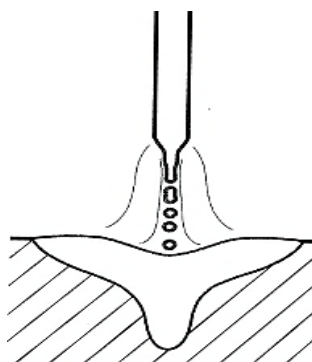
Přenos svarového kovu do svarové lázně lze u MIG/MAG svařování realizovat několika způsoby. Pomocí nastavených svařovacích parametrů může být zvolen vhodný typ přenosu kovu pro konkrétní materiál. Druhy přenosů, které mohou být u MIG/MAG svařování použity, jsou zkratový přenos, kapkový přenos, impulsní přenos, sprchový přenos, moderovaný přenos a rotační přenos. Na obrázku 14 můžeme vidět přibližnou oblast použití zmíněných druhů v závislosti na nastaveném proudu, napětí a použitém ochranném plynu. [21]



Obrázek 14 - Druhy přenosů kovu u MIG/MAG svařování [21]

### 2.1.1 Sprchový přenos

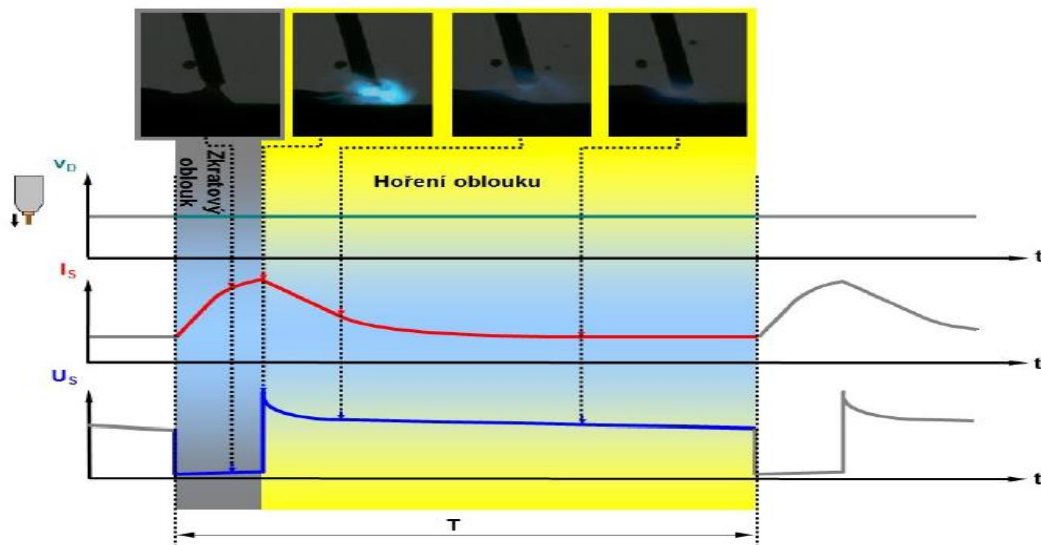
Sprchový přenos vzniká nad přechodovou oblastí (viz obrázek 14) při nastavení vysokého proudu (200 až 500 A) a napětí (28 až 40 V). Hlavní předností přenosu je vysoká stabilita oblouku, při kterém se kov přenáší ve formě malých kapiček (viz obrázek 15) s vysokou frekvencí (150 až 350 Hz). Vzniku malých kapiček je docíleno díky působení magnetických sil, které napomáhají jejich uvolňování z elektrody. Jako ochranný plyn se volí především čistý Ar, nebo směs Ar s maximálně 25 % CO<sub>2</sub>, případně s 1 až 5 % O<sub>2</sub>. Snadná ionizace Ar a jeho směsí zajistí, že plazma obklopuje konec tavicí se elektrody, čímž dochází k ohřevu drátu a vytváření ostrého hrotu. V průběhu oddělování kapky je proud konstantní až do přerušení můstku, kde je patrné jeho navýšení. Jelikož nedochází k zhasínání oblouku, je pro sprchový přenos charakteristický velký vnos tepla do základního materiálu a velká hloubka průvaru. Sprchový přenos se využívá především pro svařování hliníku a korozivzdorných ocelí a je omezen na vodorovnou polohu svařování. [16, 25]



Obrázek 15 - Sprchový přenos [25]

## 2.1.2 Zkratový přenos

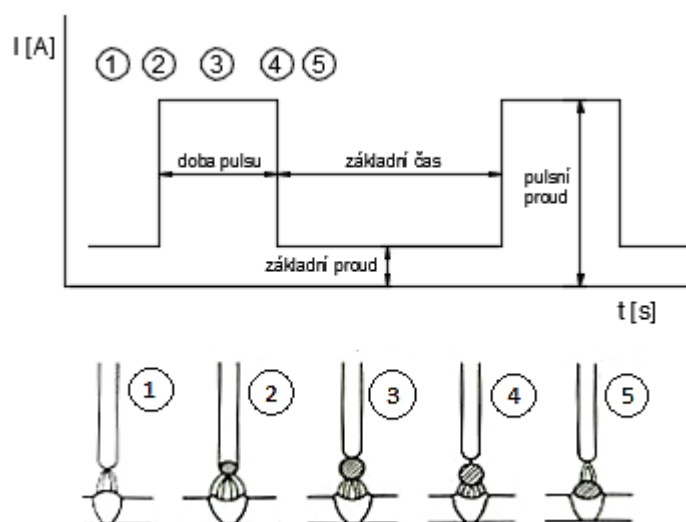
Principem zkratového přenosu jsou opakované zkraty, kterých je dosaženo fyzickým kontaktem elektrody se základním materiálem nebo svarovou lázní (viz obrázek 16). K přenosu kapek z elektrody dochází při zkratové fázi přenosového cyklu, jehož četnost může být až 200krát za sekundu. Vlivem elektromagnetického pole obklopujícího elektrodu, vznikajícího navýšováním proudu ze zdroje dochází, k vyvolání síly, díky níž dojde k odtržení kapky z konce elektrody. Objem kovu přeneseného do svarové lázně a frekvenci zkratů nejvíce ovlivňuje napětí na oblouku (délka oblouku), ochranný plyn, průměr a materiál drátu. Nejčastější využití zkratového přenosu je při svařování tenkých plechů. [26, 27]



Obrázek 16 - Průběh svařovacích parametrů zkratového oblouku [28]

## 2.1.3 Impulsní přenos

Jedná se o formu bezzkratového přenosu kovu pomocí oblouku, kde nedochází téměř k žádnému rozstříku a hodnoty proudu se v čase mění. Z obrázku 14 je patrné, že parametry impulsního přenosu zasahují do oblastí zkratového i sprchového přenosu. Celý proces je řízen elektronicky s pravidelným cyklem frekvencí amplitudy pulsního proudu, pro který je definován jeho tvar (může být pravouhlý, oblý nebo různě tvarovaný podle použitého přídavného materiálu) i čas. Hodnota základního proudu je nízká (20 až 50 A). Hlavním účelem základního proudu je udržení sloupce oblouku a vedení proudu. V okamžiku pulsního proudu intenzivně hoří oblouk a dochází k odtavování kapky přídavného materiálu. Příklad průběhu proudu a přechodu kovu můžeme vidět na obrázku 17. Šířka pulsu a frekvence je definována vztahem  $f=1/T_p$  ( $T_p$  - doba trvání pulsu,  $f$  - frekvence). Pro optimální velikost kapky je nutné, aby při použití nízkého proudu byla i frekvence pulsů nízká a naopak při vysokém proudu (=vysoká frekvence pulsů). Všeobecně bývá frekvence pulsů v rozsahu 25-500 Hz, někdy i 1 kHz. [16, 24]



Obrázek 17 - Průběh proudu a přechod kovu u impulsního svařování [24]

Největší využití impulsního přenosu nalzáme při svařování hliníku. Stabilní a řízený přenos kapek s impulsním přenosem umožňuje použití větších průměrů elektrod, čímž můžeme částečně eliminovat problém (měkkost hliníku) s dodáváním přídatného materiálu. Nejmodernější zdroje od firmy Fronius pro svařování hliníku umožňují využití střídání běžných pulsních frekvencí s dlouhými pulsy (0,5 až 10 Hz), díky čemuž dochází ke snížení vneseného tepla a možnosti svařovat hliníkové plechy od 0,8 mm. [16, 25]

V tabulce 5 můžeme vidět doporučené hodnoty parametrů ( $t$  - tloušťka materiálu,  $\varnothing d$  - průměr drátu,  $U$  - napětí,  $I$  - proud,  $v_d$  - rychlost podávání drátu,  $v_s$  - rychlost svařování) svařování pro impulsní, respektive sprchový přenos v závislosti na typu svarového spoje pro svařování hliníku a slitin hliníku.

Tabulka 5 - Parametry svařování MIG hliníku a jeho slitin [26]

Impulsní přenos							
$t$ (mm)	Typ svarového spoje	Podložení kořene	$\varnothing d$ [mm]	$U$ [V]	$I$ [A]	$v_d$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$v_s$ [cm.min <sup>-1</sup> ]
2	koutový svar a tupý svar		1,6	17	90	3,3	62
2			1,6	17	90	3,3	30
4			1,6	20	220	4,5	55
4			1,6	20	220	4,5	45
Sprchový přenos							
4	tupý svar	ano	1,6	17	220	6,2	70
6		ano	1,6	23	280	8,4	65
6		ano	1,6	25	280	9	90
6		ne	1,6	25/26	200	6,3	65

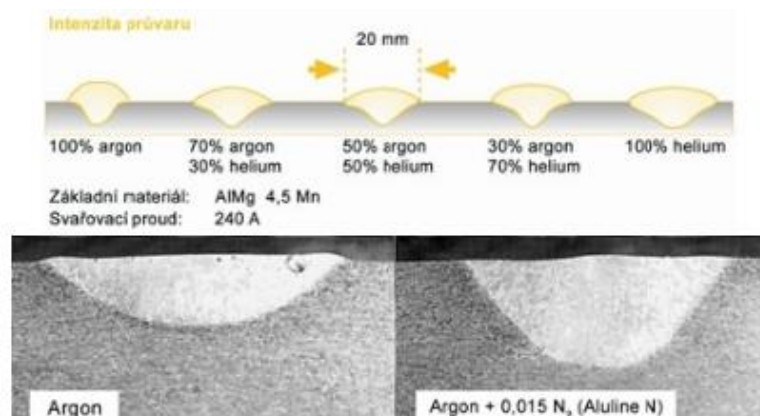


## 2.2 Ochranné plyny pro svařování MIG

Správná volba ochranného plynu u MIG/MAG svařování je velice důležitá a ovlivňuje řadu aspektů výsledného svaru (hloubku průvaru, šířku svaru, nebezpečí vzniku vrubů aj.). Zvolením vhodného ochranného plynu získáváme požadované mechanické vlastnosti svaru s vhodnou metalurgickou strukturou, ale také možnost svařovat vyšší rychlostí a snížit rozstřík kovu. [24]

Jak již bylo zmíněno v úvodu, při MIG svařování se využívá inertních plynů. Mezi nejvyužívanější plyny patří především Ar nebo He. Dále se můžeme setkat s ochrannými plyny, které jsou tvořeny směsí Ar + He (pro větší tloušťky materiálu), případně  $N_2$ . Průtoky plynů se liší v závislosti na velikosti proudu a průměru elektrody (často 10-12 x průměr drátu v  $l \cdot \text{min}^{-1}$ ), avšak při svařování hliníku se pohybují okolo 16 až 20  $l \cdot \text{min}^{-1}$  (pro PM průměru 1,2 mm) pro čistý Ar. Při použití směsi Ar + He může být spotřeba až dvojnásobná. [24, 29, 30]

Pro svařování hliníku se ve většině případů u metody MIG používá již zmíněný čistý Ar (s min. čistotou 4.6), který zajistí klidný a stabilní oblouk a zároveň zabraňuje rozstříku. Svary vyhotovené čistým argonem mají charakteristický široký tvar. Vzhledem ke své nízké tepelné vodivosti svařujeme čistým Ar především tenké materiály a v případech, kdy jím chceme svařovat silnější materiály, je nutné použít přehřev. Alternativní možností bez použití (s omezením) přehřevu je finančně náročnější He, nebo směs Ar + He (obsah He bývá 10 až 90 %). He zvyšuje napětí na oblouku, díky čemuž zajistí vyšší přenos výkonu do svařovaného materiálu, a tedy i větší hloubku průvaru a vyšší rychlost svařování. Dalším pozitivum, které He, nabízí je nižší převýšení svaru a s tím spjaté i nižší nároky na dodatečné opracování. Naopak s vyšším podílem He v ochranném plynu vzrůstá nestabilita oblouku a zvyšuje se rozstřík. Výzkumy z posledních let také potvrdily vhodnost používání směsí Ar +  $N_2$ . Byla stanovena optimální hodnota koncentrace  $N_2$  ve směsi na 0,015 %.  $N_2$  lze použít jako příměs čistého Ar, ale i směsí Ar + He. Dusík napomáhá stabilitě oblouku a přivádí do svařovacího procesu více tepla vzhledem ke zpětné rekombinaci, která nastává na povrchu materiálu. Na obrázku 18 můžeme vidět vlivy He a  $N_2$  na velikost průvaru. [24, 31]



Obrázek 18 - Vliv obsahu Helia a Dusíku na intenzitu průvaru [31]

## 2.3 Příkladné materiály pro metodu MIG

Příkladné materiály pro metodu MIG/MAG se dodávají ve formě drátu navinutého na cívce nebo v sudech. Na trhu existuje velké množství nabídek drátů dodávaných v celé řadě průměrů pro konkrétní svařované materiály. Pro svařování ocelí jsou vyráběny ve dvou formách, plné a trubičkové dráty. K svařování hliníku a hliníkových slitin bývá využíváno nejčastěji drátů průměru od 0,6 až 1,6 mm, nejčastěji z materiálu stejného nebo obdobného chemického složení jako základní materiál. Vhodné volbě a druhům přídatných materiálů pro svařování hliníku a hliníkových slitiny bude dále věnována samostatná kapitola. Z důvodu měkkosti hliníku se doporučuje používání čtyřkladkových podavačů s drážkami tvaru „U“, které zajistí větší adhezi při potřebě nižšího přítlaku a bowdenu s teflonovou vložkou. Dále pak použití průvlaků s většími otvory z důvodu větší tepelné roztažnosti hliníku. [29, 32, 33]

## 2.4 Svařovací zdroje a hořáky MIG

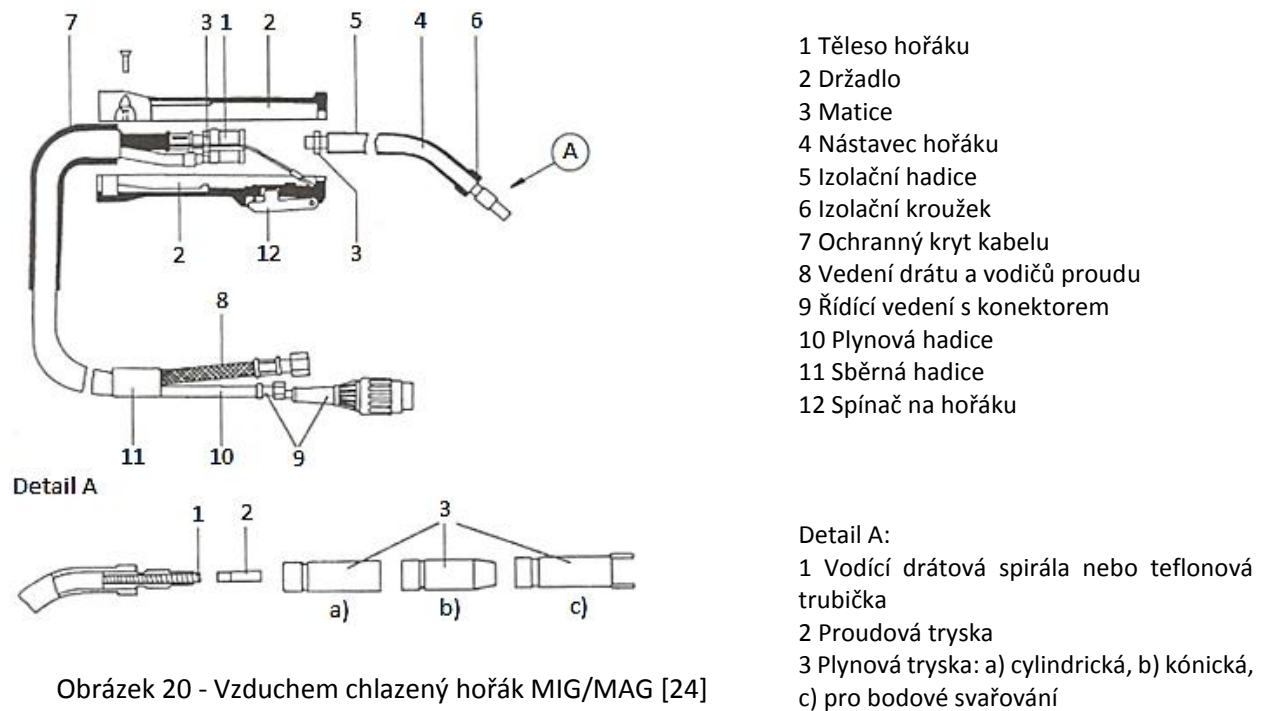
U MIG/MAG svařování se využívá stejnosměrných zdrojů proudu, které se vyznačují plochou statickou charakteristikou. Velikost svařovacího výkonu je zde ovlivněna velikostí napětí a rychlostí posuvu drátu přiváděného z podavače, umístěného samostatně nebo jako součást zdroje. Skoková změna zmíněných dvou veličin bývá realizována přepínáním odboček transformátoru, případně může mít pozvolnější průběh u tyristorových usměrňovačů nebo invertorových zdrojů. Novější zdroje s vlastním mikroprocesorem mohou být vybaveny předpřipravenými programy pro určité druhy materiálu a ochranné plyny. Dále mohou obsahovat možnosti úprav velikostí a časů působení svařovacího proudu v jednotlivých fázích svařování (zapalování oblouku, ukončování oblouku). [34]



Obrázek 19 - Svařovací zdroj Origo Mig 4004i [35]

Hořáky u metody MIG/MAG slouží k přivádění drátu, svařovacího proudu na drát a přívodu ochranného plynu. Konstrukční provedení může být strojní nebo ruční s plyným nebo kapalinovým chlazením (převážně pro větší výkony). Příklad hořáku chlazeného vzduchem včetně popisu jeho jednotlivých částí můžeme vidět na obrázku 20. Důležitými částmi hořáku jsou proudová a plynová tryska (nejčastěji vyrobené z mědi), u kterých časem dochází k jejich opotřebení. V případě proudové

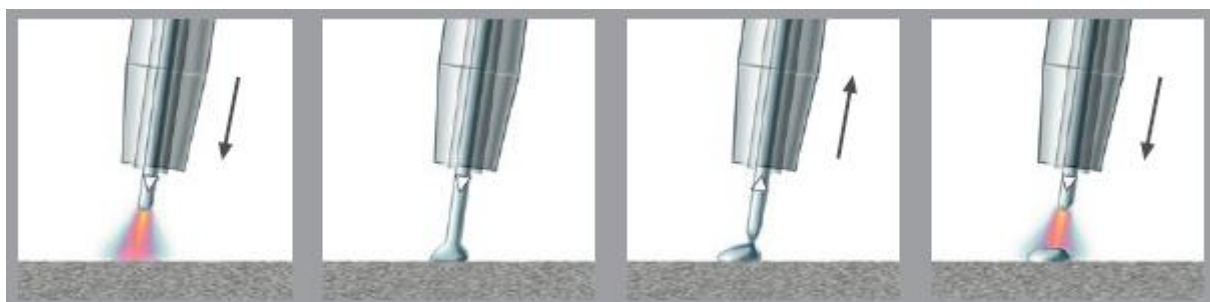
trysky je poté nutná její výměna, aby nedocházelo k nestabilitě oblouku. U plynové trysky je čas od času nutné očištění od ulpělých kapek kovu a nečistot od svařování (riziko vytvoření vodivého můstku mezi tryskami). [24]



Obrázek 20 - Vzduchem chlazený hořák MIG/MAG [24]

### 3 Metoda CMT

Zkratka CMT vychází z anglického označení Cold Metal Transfer, který v českém překladu zní jako přenos studeného kovu. Počátky této technologie se datují k roku 1999, kdy se vývojáři snažili vyřešit požadavek na kontrolované deponování (okapávání) pájky na dotekový terčík žárovky a v roce 2002 už započala snaha o využití této technologie v sériové výrobě. Metoda CMT vznikla modifikací MIG/MAG svařování. Tento proces se vyznačuje oproti uvedeným metodám velmi malým vneseným teplem a vysoce stabilním obloukem díky přesnému řízení celého procesu a inovačnímu způsobu podávání drátu s vysokorychlostním digitálním řízením. Vysoká stabilita oblouku je získána především přesně definovanou délkou oblouku, který není řízen svařovacím napětím, ale je funkcí rychlosti a času. Největší změnou oproti konvenčním metodám je však již zmíněný způsob podávání drátu (přidavného materiálu). Při svařování za pomoci krátkého oblouku dochází k pohybu drátu pouze směrem vřed a v okamžiku, kdy dojde ke zkratu, vzroste proud, který způsobí přerušování („rozstřík“) a opětovné zapálení oblouku. U CMT je tomu jinak, drát ve vysoké frekvenci (až 70 Hz) střídá pohyby vpřed a vzad (viz obrázek 21). Pohyb drátu je zajištěn přesnou digitální regulací procesu. Z počátku se drát pohybuje směrem vpřed, avšak v okamžiku zkratu je tažen zpět. Důsledkem toho je získán kontrolovaný zkrat s nízkou hladinou proudu, minimální vnesené teplo a bezrozstříkový přechod mezi materiály. [36, 37, 38]



Obrázek 21 - Pohyb drátu a princip metody CMT [37]

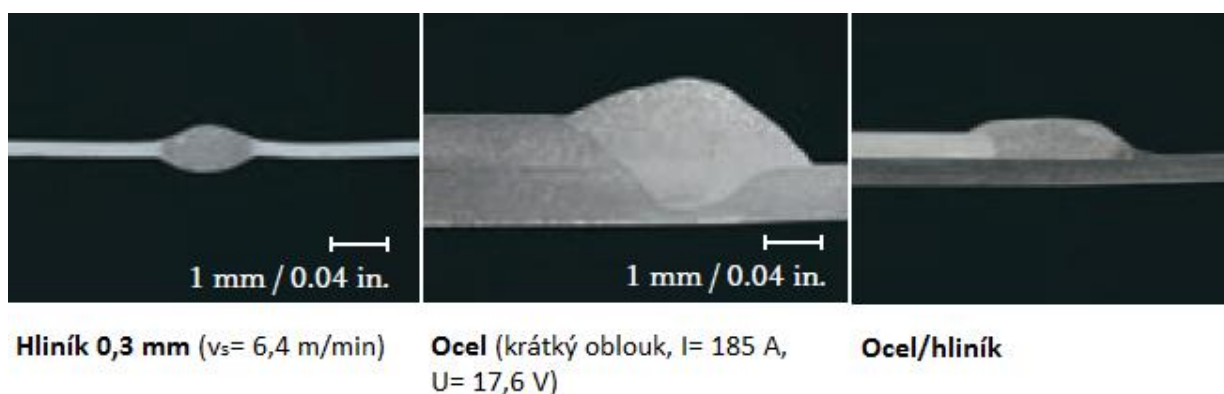
Shrnutí hlavních výhod CMT:

- Stabilní oblouk nezávislý na stavu povrchu svařovaného materiálu.
- Možnost práce v jakékoliv poloze, bez ohledu na plynulosti práce svářeče.
- Nízké vnesené teplo, vysoce stabilní oblouk, žádný rozstřík (odpadá dodatečná úprava povrchu).
- O 50 % nižší promísení základního a přídavného materiálu.
- Umožnění svařování i velice tenkých plechů od tloušťky 0,3 mm. [36, 39]

Proces CMT má tyto hlavní oblasti použití:

- Bezrozstříkové MIG-pájení.
- Práce s tenkými plechy (hliník, uhlíkové a ušlechtilé oceli).
- Spojování ocele a hliníku elektrickým obloukem.

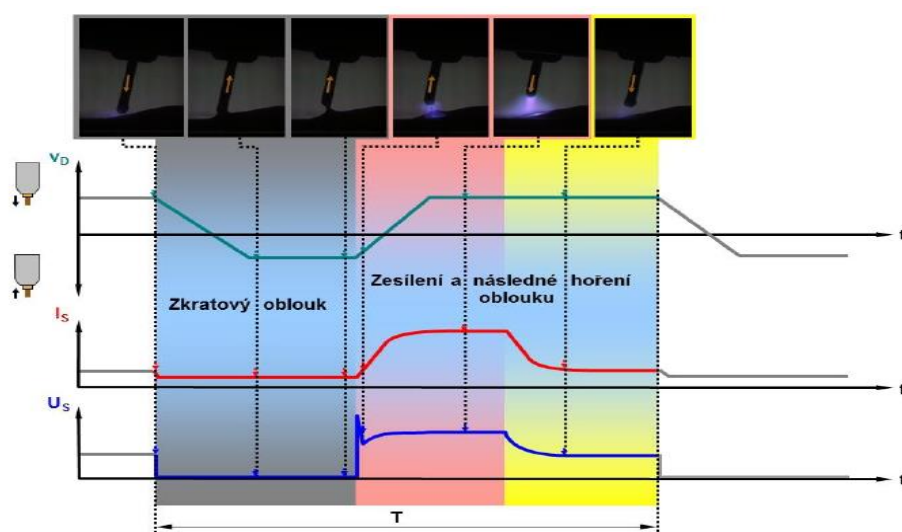
Hlavní výhodou MIG-pájení pozinkovaných plechů oproti využití běžného MIG-pájení je skutečnost, že dochází jen k tavení přídavného materiálu, nižšímu tepelnému zatížení a díky již zmíněné bezrozstříkovosti procesu se zbavujeme i nutnosti dodatečných opracování. Další uplatnění nalézá proces CMT např. v automobilovém průmyslu při svařování ocelových, hliníkových (0,3-3 mm) a korozivzdorných (0,3-2 mm) tenkých plechů, které se svařují natupo, aby nedošlo k jejich propálení. K zamezení propalů se běžně využívá na druhé straně podložka, která však u CMT není nutná díky nízkému tepelnému zatížení. V automobilovém průmyslu se taktéž využívá na problematické svařování ocele s hliníkem, kde vzniká zásadní problém se vznikem křehké a tvrdé intermetalické fáze uvedených materiálů. Výsledné mechanické vlastnosti spoje jsou ovlivněny tloušťkou intermetalické fáze, která se odvíjí od množství vneseného tepla. Příklady mikrostruktur uvedených svarů je možné vidět na obrázku 22. Použitím vhodné charakteristiky lze bezrozstříkově svařovat také hořčík. CMT ukazuje velký potenciál do budoucna a je snaha ho využít ve vícero průmyslových oblastech (letecký průmysl, výroba automobilových dílů, stavebních materiálů, robotů apod.). [37, 40]



Obrázek 22 - Příklady svarových spojů s použitím CMT [37]

### 3.1 Přenos kovu procesem CMT

Celý proces začíná pohybem drátu směrem vpřed k tavné lázni. V okamžiku ponoření přídavného materiálu do tavné lázně dochází k zhasnutí oblouku, snížení svařovacího proudu, napětí a pohybu drátu zpět, který zlepšuje uvolnění kapky během zkratu. Nízká hodnota proudu a napětí je nadále udržována během přerušení zkratového obvodu a při opětovné změně pohybu drátu proces znovu započne. Veškeré děje probíhající v procesu, včetně grafických průběhů svařovacího proudu, napětí a rychlosti podávání drátu v závislosti na čase, můžeme vidět na obrázku 23. [28, 37]



Obrázek 23 - Průběh svařovacích parametrů CMT oblouku [28]

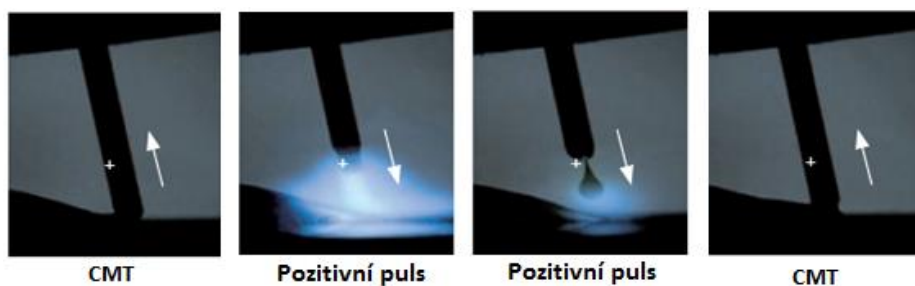
Pro lepší srovnání změn, které nastali u CMT procesu, můžeme provést srovnání obrázku 16 se stejnými parametry jako předešlý obrázek 23, ale pro zkratový oblouk. Lze si povšimnout změn, jako je kontinuální rychlost dodávání přídavného drátu, dále pak vysokého nárůstu svařovacího proudu při přenosu kovu do svarové lázně ve fázi zkratového oblouku zapříčiňující vyšší vnos tepla a rozstřík. Současně je zde patrný vysoký nárůst napětí při klesající hodnotě proudu.

## 3.2 Svařovací režimy CMT

Metodou CMT můžeme svařovat několika režimy PULSE, ADVANCED, PULSE ADVANCED, TWIN, které jsou uvedeny v této práci, a dále ještě pro spojení kovů a plastu režimem CMT PIN.

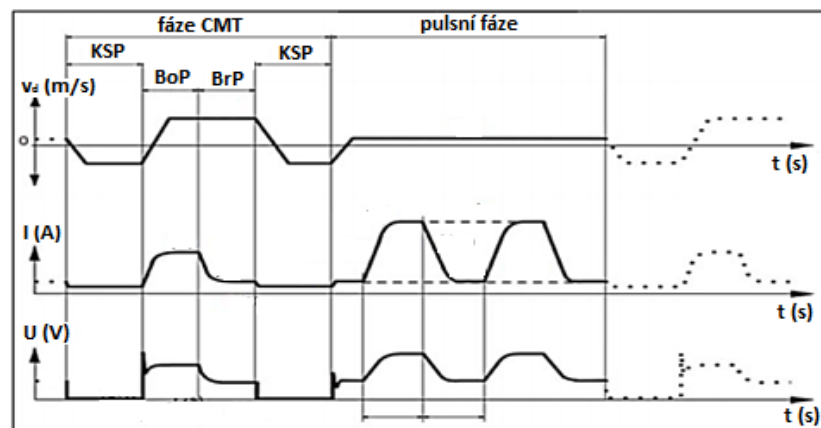
### 3.2.1 CMT PULSE

CMT Pulse byl získán sjednocením procesu CMT s impulsním obloukem (viz obrázek 24), aby mohl vzniknout výkonný proces charakteristický vysoce stabilní regulací oblouku, kde je možné pomocí počtu pulsů optimalizovat chování průvaru. V závislosti na svařovaném materiálu lze nastavit vhodný způsob přechodu materiálu. [41, 42]



Obrázek 24 - Kombinace CMT cyklů a pulsních cyklů [39]

Procesy mohou být řazeny například: jednou zkratový přechod CMT a dvakrát bezdotykový pulsní přechod, nebo jednou CMT a třikrát puls aj., podle individuálních potřeb svařovaného materiálu. Na obrázku 25 můžeme vidět charakteristické grafické průběhy svařovacího proudu, napětí a rychlosti podávání drátu v závislosti na čase pro jeden zkratový přechod CMT a dva pulsní přechody. [42]



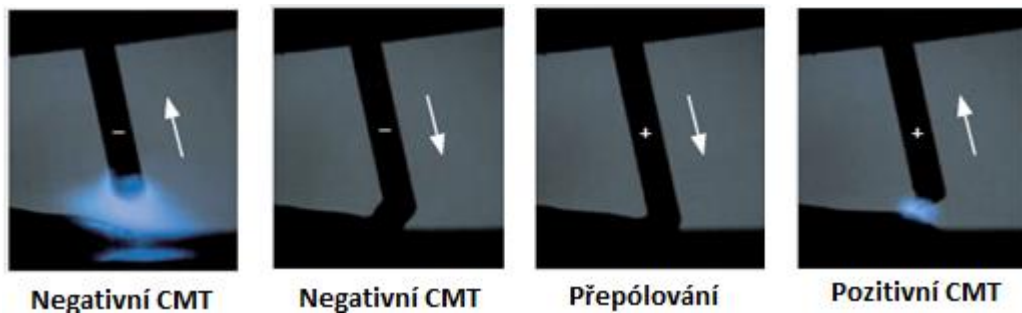
Obrázek 25 - Závislost svařovacího proudu, napětí a rychlosti podávání drátu pro CMT PULSE [40]

(KSP= zkratový oblouk, BoP= vzrůst síly zkratového oblouku, BrP= hoření oblouku)

Mezi další výhody se řadí možnost uživatele téměř plynule si volit vnos tepla, přesné odměřování kapky nebo bezrozstříkovost procesu. Tím je proces CMT Pulse vhodný především pro svařování CrNi ocelí a hliníkových spojů s tloušťkou 0,5 až 3 mm. [41]

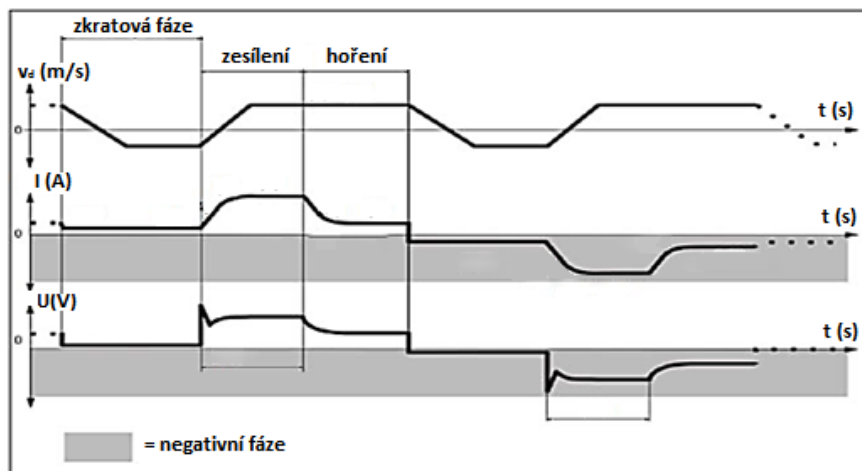
### 3.2.2 CMT ADVANCED

Základem svařovacího procesu je kombinovaný oblouk s pozitivně a negativně polarizovanými cykly (viz obrázek 26), díky kterým je možné přesně nastavit a zvýšit odtavený výkon až o 60 %. Poměr mezi jednotlivými fázemi lze přesně nastavit dle potřeby. Samotná změna polarity nastává ve fázi zkratu, čímž je zajištěna vysoká stabilita procesu. Při působení negativně polarizované fáze svařovacího procesu získáváme vysoký odtavený výkon a zlepšení přemostitelnosti mezer. Pozitivním cyklem naopak dosahujeme cíleného přenosu tepla a přesného přechodu kapky. Mezi klady této metody lze zařadit také nízký vznik svařovacího dýmu. [39, 40, 43, 44]



Obrázek 26 - Kombinace negativního CMT a pozitivního CMT [39]

Na obrázku 27 můžeme vidět grafické průběhy rychlosti podávání drátu, svařovacího proudu a napětí v závislosti na čase při změnách fází.



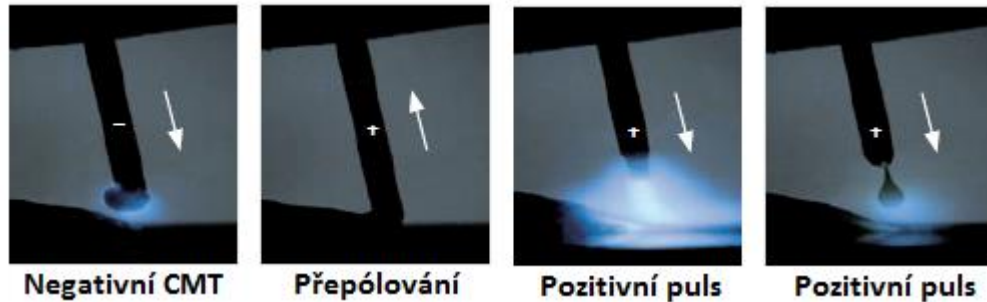
Obrázek 27 - Závislost rychlosti podávání drátu, svařovacího proudu a napětí při procesu CMT ADVANCED [40]

Využití této technologie nalézá při svařování nejrůznějších materiálů, počínaje svařováním ocelí (např. tenké plechy), hliníku, chromniklu až po smíšené spoje (např. ocel a hliník). [44]



### 3.2.3 CMT PULSE ADVANCED

CMT PULSE ADVANCED navazuje na předešlou metodu s tím rozdílem, že se zde střídá negativně polarizovaná fáze s pozitivně polarizovanou pulsní fází. Negativně polarizovanou fází dosahujeme vyššího odtaveného výkonu s nízkým vnosem tepla a s přechodem na pozitivní pulsní fázi získáváme vyšší vnos tepla a bezkratový přenos kapky. [43, 44]



Obrázek 28 - Kombinace negativního CMT a pulsních cyklů [39]

### 3.2.4 CMT TWIN

Metoda CMT TWIN vychází ze známého uspořádání svařovacího postupu TimeTwin obohaceného o výborné svařovací vlastnosti technologie CMT. Základem je synchronizovaný proces obsahující dva nezávisle na sobě pracující digitálně řízené zdroje s dvěma vzájemně izolovanými kontaktními trubicemi („Lead a Trail“) vycházející z jedné hubice. Právě toto výjimečné dvoudrátové řešení umožňuje svařovat v jednom systému dvěma procesy CMT, případně využít spojení procesu CMT a pulsního obloukového svařování v ochranné atmosféře. Výsledkem je vysoce stabilní oblouk od počátku svařovacího procesu až po vyplnění koncového kráteru, vysoká svařovací rychlost a vysoký odtavený výkon, které vedou ke zvýšení produktivity. [45, 46, 47]

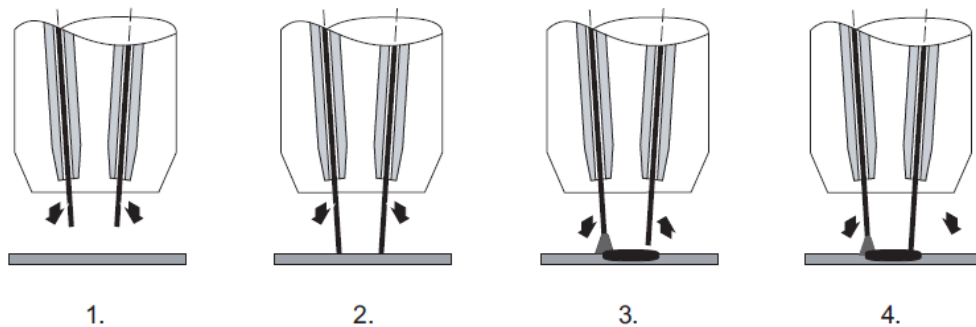


Obrázek 29 - Svařovací proces CMT TWIN [39]

Další výhodou procesu CMT TWIN je jednoduché řízení procesu získané samoregulací synchronizovaného procesu. V okamžiku nastavení první elektrody se druhá (podřízená) elektroda automaticky přizpůsobí. Synchronizace obou elektrod probíhá už od počátku svařování, jak můžeme vidět na obrázku 30. V první fázi se obě elektrody pohybují směrem ke svařovanému materiálu, až dojde k dotyku (pozice 2). Následně vodící elektroda zahájí proces svařování, přičemž druhá elektroda se



zatahuje zpět a vyčkává na signál od vodící elektrody (= zpožděné zapálení). V okamžiku obdržení signálu zahájí svařovací proces i druhá elektroda (pozice 4). [47, 48]

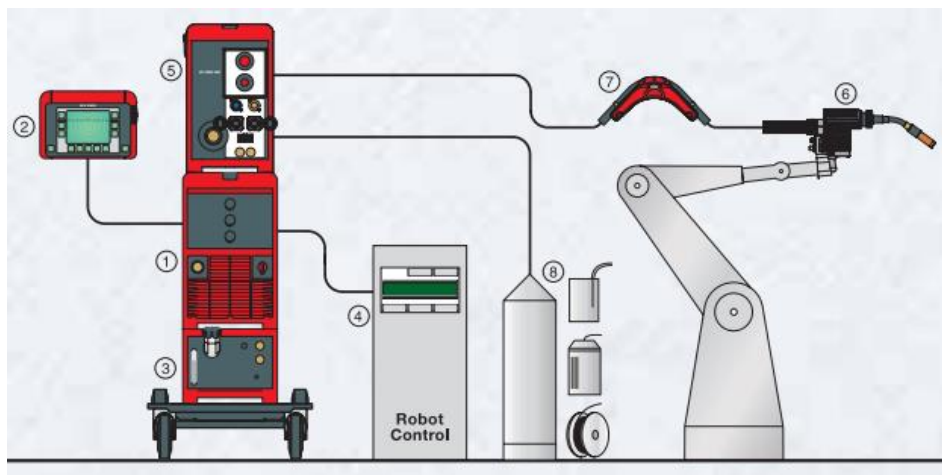


Obrázek 30 - Synchronizovaný začátek svařování procesu CMT TWIN [48]

Využití této metody je rozsáhlé vzhledem k výborným charakteristikám procesu. Pro svařování silných materiálů se nejvíce hodí charakteristika „Heavy Duty“, oproti tomu tenké plechy a materiály se svařují charakteristikou „Speed“. Kvalitních výsledků svařování docílíme i svařováním s plynem CO<sub>2</sub>, kde můžeme docílit až dvojnásobné rychlosti svařování a dvojnásobného odtaveného výkonu. [47]

### 3.3 Sestava CMT

Systémy CMT nabízí řadu modifikací pro robotizované i ruční svařování v závislosti na používané metodě. Na obrázku 31 můžeme vidět příklad sestavy robotizovaného pracoviště, včetně popisu všech použitých komponentů.



Obrázek 31 - Příklad sestavy CMT pro robotizované svařování [49]

**1. Svařovací zdroj CMT** (např. TPS 3200/4000/5000): Uvedené příklady svařovacích zdrojů jsou plně digitalizované, řízené mikroprocesorem a digitálně regulovatelné invertorové zdroje s integrovaným funkčním balíčkem pro proces CMT. **2. Zařízení pro dálkové ovládání:** Ovladače dovolují ovládání procesu na delší vzdálenost od zdroje a obsahují data potřebná pro svařování, včetně jejich monitorování. **3. Chladicí jednotka:** Slouží pro optimální chlazení vodou chlazených robotických hořáků.

**4. Rozhraní pro robot. 5. Podavač drátu:** Podavač drátu se čtyřkladkovým pohonem pro přesný a hladký přenos přídatného materiálu od cívky s drátem až ke svařenci. **6. Svařovací hořák:** Digitálně řízený robotický svařovací hořák opatřený servomotorem bez převodovky zajišťuje přesné a stálé podávání drátu. Integrovaný pohonný motor umožňuje společně se zásobníkem drátu na hadicovém vedení rychlé střídání pohybu drátu. Na obrázku 32 můžeme vidět robotický svařovací hořák Robacta Drive CMT.



Obrázek 32 - Robacta Drive CMT [50]

**7. Vyrovnávací zásobník drátu:** Přidaný tzv. pufrovací člen (viz obrázek 33), připevněný na balanceru nebo na třetí osu robotu, slouží k oddělení obou pohonů drátu.



Obrázek 33 - Pufrovací člen [49]

**8. Zásobník drátu [49]**

## 4 Robotizované svařování

Se zvyšujícím se nedostatkem kvalifikované obsluhy (svářečů) i vyššími nároky na hospodárnost a ekonomičnost výroby zaujímá robotizace a automatizace svařování stále vyšší význam pro zefektivnění výroby. Univerzální roboty nalézají využití při automatizaci velkosériové výroby, ale i při výrobě prototypů. V dnešní době se můžeme setkat s roboty speciálně navrženými pro svařování elektrickým obloukem, které snesou zatížení až 20 kg, mají dosah až dva metry a zároveň dokáží pracovat na malém pracovním prostoru. Dalšími výhodami pro využití svářecích robotů jsou zvýšení kvality svarů, dostupnost univerzálních specializovaných softwarů kompatibilních se všemi výrobci, automatická kompenzace změn polohy hořáku, zlepšení kvality a bezpečnosti pracovišť aj. [51]

Mezi úskalími, se kterými je nutné počítat při zavádění robotů, je problematické zajištění opakovatelnosti přesnosti (kvality) svarových spojů, které však z části lze eliminovat senzory. Dále nutnost upínacích přípravků, které při velkosériové výrobě nebo při upnutí složitějších dílů zaručí opakované přesné upnutí svařovaných dílů. V neposlední řadě pak nutnost kvalitní konstrukce pohonů včetně polohovadel, které musí umožňovat opakované zastavování na jednom i více místech s přesností  $\pm 4$  mm, nebo i méně. [52]

Poslední trendy robotizace svařování ukazují na snahu firem, zabývajících se touto problematikou, co nejvíce uživatelsky ulehčit a zpřístupnit utváření programů svařování. Zvýšit kvalitu svarů zpřesňováním dráhy robotů i za pomoci automatických kontrol. Snižovat dobu neproduktivních přejezdů mezi dvěma svary pomocí vysoké rychlosti os a nekonečným otáčením šesté osy nebo kooperaci více robotů na jedné součásti pro zvýšení produktivity. [53]

Robotizované svařovací pracoviště se skládá nejčastěji z těchto částí:

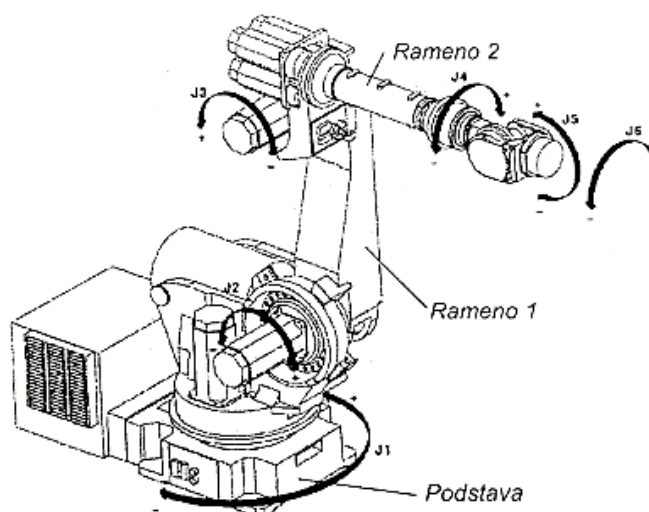
- Zdroj svařovacího proudu a napětí.
- Mechanismus pro podávání drátu.
- Svařovací hlavice - skládá se z vlastního hořáku, držáku hořáku, senzorického systému, chlazení hořáku.
- Řídící jednotka - skládá se z napájecího zdroje, obvodu uživatelského rozhraní, obvodu řízení pohybu, paměti a karty vstupů/výstupů. Dále pak teach pendant a operační panel pro ovládání.
- Pomocná jednotka pro čištění svařovacího hořáku, odsávání a filtrování znečištěného vzduchu.
- Zásobníky ochranných plynů a přípojné vedení.
- Příslušenství - polohovadlo, bezpečnostní prvky. [54]



Obrázek 34 - Robotizované pracoviště pro svařování rámců jízdních kol [53]

#### 4.1 Popis kinematiky robota

Každý robot se skládá z jednotlivých os a ramen poháněných servomotory, jak můžeme vidět na obrázku 35. Kinematická dvojice určující stupeň volnosti je vždy místo spojení dvou ramen (tzv. osa). Osy označené J1, J2 a J3 jsou hlavní osy. Zbylé osy J4, J5 a J6 (osy zápěstí) zajišťují pohyb koncovým efektem (např. svařovací hlavicí), který je připevněný k přírubě zápěstí. [55]

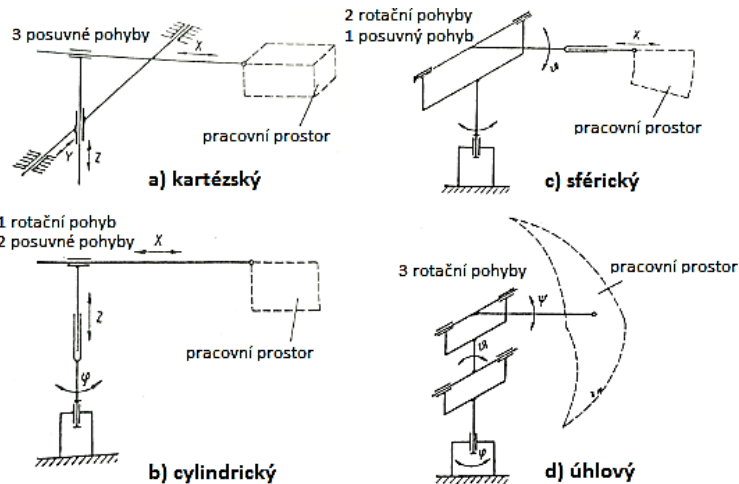


Obrázek 35 - Kinematika šestiosého robota [55]

## 4.2 Souřadnicové systémy robotů

K ovládní robotu je nutné zavést souřadnicový systém, díky kterému můžeme popsat jakoukoliv polohu bodu v prostoru. Konkrétně se jedná o čtyři druhy (viz obrázek 36):

- Pravoúhlý (kartézský) souřadnicový systém - pracovním prostorem je kvádr a polohovací ústrojí robotů má tři lineární pohyby realizované v pravoúhlých souřadnicích  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
- Válcový (cylindrický) souřadnicový systém - pracovním prostorem je válcový prstenec (segment) a polohovací ústrojí robotů má dva lineární pohyby v souřadnicích  $x$ ,  $z$  a rotaci kolem osy  $z$ .
- Sférický souřadnicový systém - pracovním prostorem je kulový prstenec a roboty mají k dispozici jeden lineární pohyb v souřadnici  $x$ , naklápění ramene v rovině procházející osou  $z$  a rotaci kolem osy  $z$ .
- Úhlový souřadnicový systém - pracovním prostorem je torusový prstenec (segment) a pohyb hlavičky robotů je odvozen ze tří rotačních os. [16]

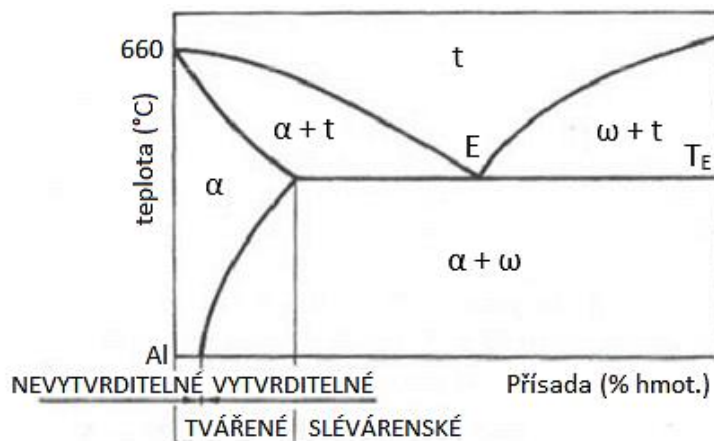


Obrázek 36 - Kinematika polohovacího ústrojí pro souřadnicový systém [16]

## 5 Hliník a slitiny hliníku

Slitiny hliníku jsou druhým nejpoužívanějším konstrukčním materiálem v současné době. Hliník z důvodu jeho měrné hmotnosti  $2\,699\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  řadíme mezi lehké kovy a vyznačuje se svou leskle stříbrnou barvou. Základní surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, v čistém stavu oxid hlinitý, z jehož taveniny ve směsi s kryolitem získáváme elektrolýzou kovový hliník. Hliník krystalizuje v kubické soustavě s plošně středěnou mřížkou, díky které je vhodný zejména k tváření za studena. Dále má dobrou tepelnou a elektrickou vodivost a dobré pevnostní vlastnosti (pevnost asi 70 MPa) i přes svou nízkou měrnou hmotnost. Slitiny hliníku v případech, kdy neobsahují měď, velmi dobře odolávají korozi v atmosféře a látkám kyselé povahy. Odolnost proti korozi je dána především vrstvou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na povrchu hliníku. Jedná se o vysoce přilnavou a elektricky nevodivou oxidickou vrstvu s rozdílnou měrnou hmotností (asi  $3\,960\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a teplotou tavení ( $2\,250\text{ }^\circ\text{C}$ ), jejíž tloušťka se pohybuje okolo  $0,01\text{ }\mu\text{m}$ . Naopak jistou nevýhodou slitin hliníku je jejich nízká tvrdost, obtížné třískové obrábění a mechanické leštění měkkých slitin, případně i možné napadení elektrochemickou korozí při vodivém kontaktu s jinými kovy a slitinami. [17, 56]

Slitiny hliníku mohou být rozdělovány z různých hledisek, avšak nejčastěji je dělíme dle způsobu použitého zpracování. V evidenci je vedeno 18 slitin hliníku určených pro tváření a 16 slitin hliníku pro odlitky. Dalším kritériem může být schopnost zlepšovat své vlastnosti (tvrdost, pevnost) tepelným zpracováním (být vytvrzován), které souvisí s chemickým složením slitiny. Uvedená dvě rozdělení můžeme vidět na obrázku 37. [56]



Obrázek 37 - Obecný rovnovážný diagram binárních slitin hliníku [56]

## 5.1 Slitiny hliníku pro odlitky

Slitiny hliníku pro slévání jsou určeny především k odlévání tvarových odlitek. Mechanické hodnoty odlitek vyhotovených ze slitin hliníku ve velké míře závisí na způsobu jejich odlévání. Při odlévání do písku dosahujeme hrubozrnné struktury s nižšími pevnostními vlastnostmi. Lepších vlastností a jemnozrnné struktury dosahujeme až při tlakovém odlévání a při lití do kovových forem. [56]

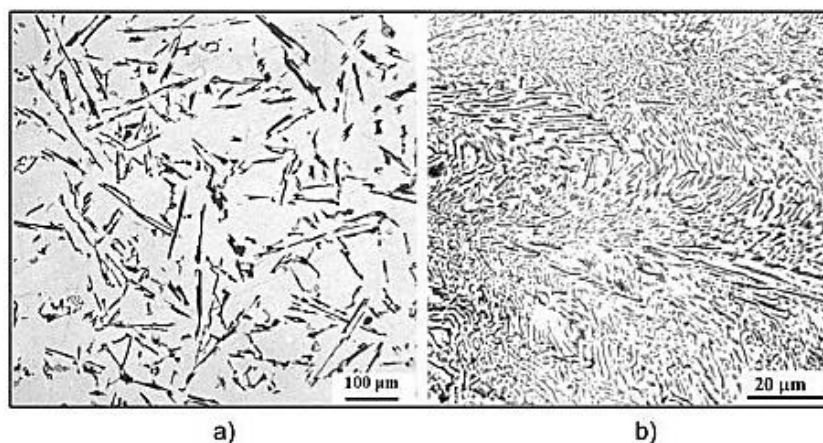
Podle slitinových bází rozdělujeme slitiny hliníku určené k odlévání na:

- slitiny Al-Si (siluminy)
- slitiny Al-Cu (duraluminy)
- slitiny Al-Mg (hydronalia)
- slitiny Al-Zn

Slitiny soustavy Al-Si lze rozdělit do dvou skupin:

- Binární slitiny (binární siluminy) - Do této skupiny řadíme slitiny soustavy Al-Si, které rozdělujeme na podeutektické (pod 11,7 % Si), eutektické (cca 11,7 % Si) a nadeutektické (od 11,7 do 24 hm. % Si). K hlavním přednostem Al-Si slitin řadíme odolnost proti korozi, svařitelnost, avšak pro tvarové odlitky se používají zřídka. Své využití našly mimo jiné jako hliníkové pájky (např. siluminy AlSi5 a AlSi12).
- Speciální slitiny (speciální siluminy) - Přísady Mg (Al-Si-Mg) nebo Cu (Al-Si-Cu) umožňují těmto slitinám být vytvářeny a získat tak zlepšení některých mechanických vlastností za cenu horších slévárenských vlastností, než mají binární siluminy. Dalšími přidanými prvky pro zlepšení vlastností mohou být Mn, Ti, Zn, Ni a vznikají tak siluminy soustav (např. Al-Si-Cu-Mn, atd.). [56, 57]

Zlepšení pevnostních vlastností a tvárnosti se provádí tzv. modifikací (viz obrázek 38), která spočívá v zjemnění eutektických fází, které mají anomální charakter (obsahují velké množství hrubých a křehkých krystalů křemíku). Zjemnění lze dosáhnout podchlazením taveniny se zvýšenou rychlostí ochlazování s následnou vyšší rychlostí eutektické přeměny s tvorbou normálního eutektika. Další možností modifikace je přidáním malého množství přísad Na, Li, Sr do taveniny před odléváním. [56, 57]



Obrázek 38 - Mikrostruktura nemodifikované (a) a modifikované (b) slitiny AlSi12 [58]

Použití binárních slitin Al-Cu je malé a využívá se především polykomponentních slitin, ve kterých je základní báze (Al-Cu) obohacena o Ni a Fe. Sloučenina těchto kovů ve spojení s Al disperzně zpevňuje tuhý matriční roztok, ve kterém jsou nerozpustné. Využívají se především pro dlouhodobé použití při teplotách 350 až 450 °C. Jejich velkou nevýhodou je nízká odolnost proti korozi. Slitiny Al-Mg mají nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost ze všech slévárenských slitin. Setkáme se s nimi u rázově namáhaných odlitků s náhlými změnami průřezu (např. žebrované hlavy válců) nebo u odlitků odolávajících koroznímu prostředí. Slitiny Al-Zn (např. Al-Zn-Mg) se vyznačují obvykle lepší korozní odolností než slitiny Al-Cu, ale v některých případech může docházet ke koroznímu praskání pod napětím. Potlačení praskání se provádí přísadou 0,8 až 1,2 hm. % Fe. [56]

V tabulce 6 můžeme vidět srovnání mechanických vlastností vybraných slitin včetně přibližného obsahu hlavních legujících prvků.

Tabulka 6 - Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných Al slitin pro odlévání [59]

Číselné značení EN-AC	Chemické značení	Přibližný obsah hlavních legujících prvků [hm. %]			Mechanické vlastnosti			
					R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>50 min.</sub> [%]	Tvrdość [HB]
21100	AlCu4Ti	4,2-5,2 Cu	0,15-0,3 Ti	do 0,55 Mn	300	220	3	95
42100	AlSi7Mg0,3	6,5-7,5 Si	0,25-0,45 Mg	do 0,19 Fe	230	190	2	75
51300	AlMg5	4,5-6,5 Mg	do 0,55 Si	do 0,55 Fe	160	90	3	55
71100	AlZn10Si8Mg	9,0-10,5 Zn	7,5-9,5 Si	0,2-0,5 Mg	210	190	1	90



## 5.2 Slitiny hliníku pro tváření

Slitiny hliníku určené k tváření rozdělujeme do dvou skupin podle možnosti jejich tepelného zpracování na vytvrditelné a nevytvrditelné (viz obrázek 37).

Mezi slitiny, které nelze tepelným zpracováním vytvrzovat, řadíme slitiny soustav Al-Mg (např. AlMg3, AlMg5, AlMg6, aj.) a Al-Mn (průmyslově vyráběna pouze slitina AlMn1). Obě tyto skupiny slitin se vyznačují dobrou odolností proti korozi, svařitelností, tvařitelností, lomovou houževnatostí a odolností proti vibračnímu zatížení. Zároveň se však jedná o nízkopevnostní slitiny, jejichž pevnost  $R_m$  se pohybuje okolo 130 až 200 MPa. Pevnost těchto slitin lze zvýšit deformačním zpevněním (tvářením za studena) na  $R_m = 420$  MPa u slitin Al-Mg a  $R_m = 220$  MPa u slitin Al-Mn. Další skupinou jsou slitiny Al-Mg-Si, které však lze oproti Al-Mg tepelným zpracováním vytvrzovat až na  $R_m = 350$  MPa. Obsahy přísadových prvků nepřesahují 1,5 %. Jako příklady těchto slitin můžeme uvést slitiny AlMgSi1 a AlMgSi0,5, které jsou precipitačně vytvrzovány (rozpuštěcí žíhání 525 až 540 °C, následné kalení na vzduchu nebo ve vodě). Uvedené slitiny jsou zároveň velmi dobře svařitelné (především metodami TIG a MIG). Slitina AlMgSi0,5 je využívána pro hliníkové profily (80 % světové produkce). AlMgSi1 nalézá využití např. pro nosné konstrukce nebo přepravní nádrže. [56, 58]

Druhou skupinou slitin určených k tváření jsou slitiny, které mohou být tepelně vytvrzovány. Do této skupiny řadíme především slitiny soustav Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Li, vyznačující se vyšší nebo vysokou pevností, ale nižší odolností proti korozi. Nejvyužívanější z uvedených skupin je skupina Al-Cu-Mg. Zejména pak duraly AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn, dosahující vysoké pevnosti ( $R_m$  až 530 MPa po vytvrzení) a používající se pro výrobky, jako jsou výlisky a plechy chráněné tenkou vrstvou hliníku proti korozi (tzv. plátované duraly). [56, 60]

V tabulce 7 můžeme vidět srovnání mechanických vlastností vybraných slitin včetně přibližného obsahu hlavních legujících prvků.

Tabulka 7 - Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných Al slitin pro tváření [61]

Číselné značení EN-AW	Chemické značení	Přibližný obsah hlavních legujících prvků [hm. %]			Mechanické vlastnosti			
					$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A min. [%]	Tvrdość [HB]
5754 O/H111	AlMg3	2,6-3,6 Mg	do 0,4 Si	Do 0,5 Mn	≤240	80	$A_{50}=17$	52
6082 T6	AlMgSi1	0,7-1,3 Si	0,6-1,2 Mg	0,4-1 Mn	310	260	$A_{50}=7$	94
2007 T4	AlCuMgPb	3,3-4,6 Cu	0,4-1,8 Mg	0,8-1,5 Pb	≥370	≥270	$A_5 \geq 8$ $A_{10} \geq 6$	110
7075 T6	AlZnMgCu1,5	5,1-6,1 Zn	2-2,1 Mg	1,2-2 Cu	525	440	$A_{50}=4$	155

### 5.3 Svařitelnost hliníkových slitin

Všeobecně je svařitelnost technického hliníku i hliníkových slitin, které jsou ve většině případech nízkolegované a jejich vlastnosti se tak příliš neliší, pokládána za velmi dobrou. Avšak je nutné odlišovat vytvrditelné (např. AlMg) a nevytvrditelné slitiny (např. AlZnMg, AlMgSi), kde se můžeme setkat z důvodu jejich náchylnosti na vznik pórů se svařitelností podmíněnou. Dobrá svařitelnost těchto materiálů se přirozeně odvíjí od vhodně zvolených podmínek svařování (metoda, použitý ochranný plyn, PM, technologický postup). [33, 62]

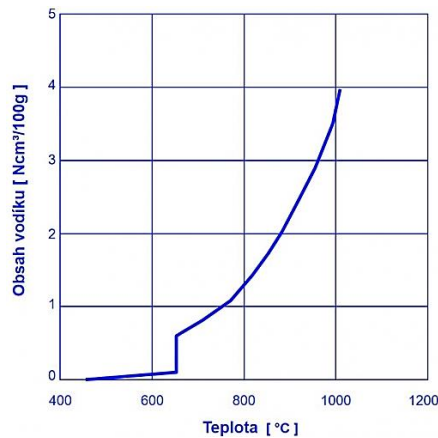
Hlavními problémy při svařování hliníkových materiálů jsou:

- přítomnost oxidické vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- pórovitost svarů,
- vznik horkých trhlin ve svarových spojích,
- praskavost svarových spojů za studena,
- výrazný pokles pevnosti svarového spoje u vytvrditelných slitin. [62, 63]

O nezbytné nutnosti odstranění oxidické vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , včetně způsobů jejího odstranění, již bylo řečeno v kapitole 1.1.1.

Vznik pórů ve svarovém kovu je dán přítomností vodíku. Zdrojem vodíku ve svarových spojích je vrstva oxidu hlinitého na povrchu, který je vysoce hydrofobický a vzniká v důsledku velké afinity hliníku ke kyslíku. Nežádoucí účinky vodíku jsou pak zapříčiněny jeho rozpustností v hliníku v závislosti na teplotě (viz obrázek 39) a způsobují problémy při krystalizaci svarového kovu. Protože hliník velmi dobře odvádí teplo a rychle krystalizuje, nestačí část vodíku včas vydifundovat a začíná se vylučovat až pod teplotou solidu. V okamžiku, kdy je již hliníkový svar v plastickém stavu a dochází k vylučování vodíku, vznikají nežádoucí póry a bubliny.

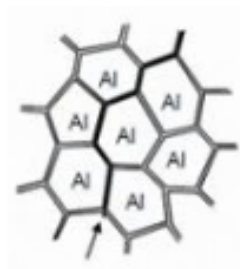
Z důvodu těchto vlivů je nezbytné minimalizovat zdroje vodíku před svařováním (minimalizace vodíku v PM a v ZM, zejména pak odstraněním oxidické vrstvy). Dalšími možnostmi, jak snížit nepříznivé účinky vodíku jsou zkrácení času přímého tavení svarového kovu, zabránění přehřátí svarového kovu, či použití vhodné ochrany svarové lázně (plynové, struskové, tavidlové). [62, 64]



Obrázek 39 - Rozpustnost vodíku v hliníku [65]

S trhlinami se můžeme setkat jak ve svarovém kovu, tak v TOO svaru. Nejčastější trhliny jsou tzv. „trhliny za tepla“, které vznikají ve svarovém kovu (interkrystalické solidifikační trhliny) a v některých případech i v TOO (likvační trhliny). Dále se pak u vytvrzovaných slitin hliníku můžeme setkat s praskáním při nižších teplotách v oblasti svarového spoje (transkrystalické trhliny „za studena“ v TOO) nebo i s praskáním pod napětím u některých slitin. [66, 67]

Utváření horkých trhlin je zapříčiněno způsobem krystalizace a segregace, přičemž nejcitlivější na vznik horkých trhlin jsou svary s širokým intervalem tuhnutí. Zásadní pro vznik horkých trhlin je typ, ale především množství eutektické fáze. V okamžiku, kdy je objem eutektika malý a nedochází k úplnému vyplnění mezer mezi vznikajícími dendrity, hrozí vznik trhlin (viz obrázek 40). Za dostatečný objem eutektické fáze pro potlačení vzniku krystalizačních trhlin je považováno rozmezí 15 - 25 %, dle typu slitiny a podmínek svařování. Nejnáchylnější na vznik horkých trhlin jsou tepelně zpracované slitiny hliníku (např. Al-Mg-Si, aj.), nízkolegované slitiny hliníku (např. AlMg<sub>2</sub>) a některé typy technického hliníku s vyšším obsahem nečistot (Fe, Si). Náchylnost ke vzniku trhlin za tepla u slitin hliníku je dána kritickou hodnotou legujícího prvku (např. u slitin Al-Si je tato kritická hodnota 0,6 hm. % Si). [62, 66]



Obrázek 40 - Nízký obsah legujících prvků ve slitině - nebezpečí vzniku trhlin [66]

Riziko vzniku horkých trhlin lze snížit několika postupy a opatřeními. Pro získání dostatečného množství eutektika ve svarovém kovu je nutné správně zvolit přídatný materiál. Velice vhodným přídatným materiálem je AlSi<sub>5</sub>, kterým můžeme svařovat nejen slitiny typu Al-Si, ale i slitiny více náchylné na vznik těchto trhlin (např. Al-Mg-Si) nebo některé typy technického hliníku. Kromě AlSi<sub>5</sub> jsou

vhodnými materiály pro slitinu Al-Mg-Si také AlMg5 nebo AlMg5Mn, které snižují riziko vzniku trhlin za tepla. Dalšími ochranami jsou přehřev, vhodná technologie svařování umožňující velkou rychlost svařování nebo vyvarování se tuhým upnutím svarového spoje. [62]

V ojedinělých případech se také můžeme setkat s praskavostí hliníkových slitin za studena (nejčastěji v TOO svarového spoje). Trhliny vznikají obvykle při teplotách od 200 do 400 °C v důsledku rozdílných mechanických vlastností při ohřevu slitin a mívají interkrystalický průběh. [62, 63]

U vytvrzovaných slitin hliníku (např. Al-Mg-Si) je možné v častých případech zaznamenat po svařování značný pokles pevnosti. Pokles probíhá v celém svarovém spoji, ale nejcitelněji jej můžeme zaznamenat v TOO v pásmu přehřátí, kde lze sníženou pevnost a tvrdost srovnat s materiály po žíhání. Mezní hranicí pro postupnou ztrátu pevnosti a tvrdosti je teplota 200 °C, nad kterou již dochází k postupnému poklesu. Velikost snížení pevnosti a tvrdosti tedy úzce souvisí s velikostí teploty, při které probíhají precipitační děje. [62]

Určitým řešením, jak se vyvarovat problémům s poklesem pevnostních vlastností, je vhodná volba metody svařování. Používané metody by měly umožňovat vysoký teplotní gradient v místě svarového spoje, nebo použití pracovní teploty nižší, než je teplota stability vytvrzitelných slitin. V neposlední řadě je také možné provést doplňkové vytvrzování svarového spoje nebo celého svarku. [62]

## **5.4 Přídavné materiály pro svařování hliníku a hliníkových slitin**

Při volbě vhodného přídavného materiálu musíme brát v úvahu řadu hledisek, které výběr ovlivňují. Přídavný materiál lze zvolit s ohledem na chemické složení základního materiálu a tím snížit sklon k tvorbě trhlin. V některých případech však mohou být kladeny určité požadavky na mechanické vlastnosti spoje, kde bude nutné pro jejich splnění zvolit přídavný materiál chemicky odlišný. Dalšími faktory správného výběru mohou být požadavky na korozní odolnost spoje, následná úprava svarů a konstrukcí (eloxování, povrchové úpravy, aj.), optimální svařitelnost nebo i ekonomické faktory. [68]

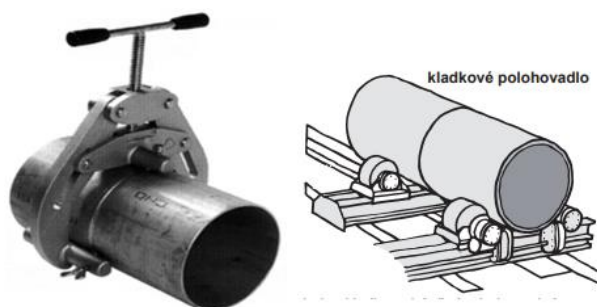
Norma ČSN EN 1011-4 uvádí doporučené přídavné materiály (viz tabulka 8), které rozděluje do pěti skupin a následně přiřazuje k používaným základním materiálům. Doporučení v uvedené normě nejsou závazná a pro konkrétní potřebu lze zvolit i jiný přídavný materiál mimo doporučení. Přídavné materiály typu 4 mají odlišnou barvu ve srovnání s tvářenými základními slitinami z důvodu jejich anodické oxidace, při které získávají tmavě šedou barvu. Používají se k zabránění vzniku krystalizačních trhlin ve spojích s velkým stupněm promísení a vysokou tuhostí. Volba přídavných materiálů typu 5 se odvíjí od hlavního faktoru volby. Je-li hlavním faktorem odolnost proti korozi, volíme přídavný materiál se stejným obsahem Mg, jako má základní materiál. V případě mechanických vlastností jako hlavního faktoru musí být obsah Mg 4,5 až 5 %. [68]

Tabulka 8 - Rozdělení přídavných materiálů do skupin dle normy ČSN EN 1011-4 [68]

Typ	Označení slitiny	Chemické složení
Typ 1	R-1450	Al99,5Ti
	R-1080A	Al99,8
Typ 3	R-3103	AlMn1
Typ 4	R-4043A	AlSi5
	R-4046	AlSi10Mg
	R- 4047 A	AlSi12(A)
	R- 4018	AlSi7Mg
Typ 5	R-5249	AlMg2Mn0,8Zr
	R-5754	AlMg3
	R-5556A	AlMg5,2Mn
	R-5183	AlMg4,5Mn0,7(A)
	R-5087	AlMg4,5MnZr
	R-5356	AlMg5Cr(A)

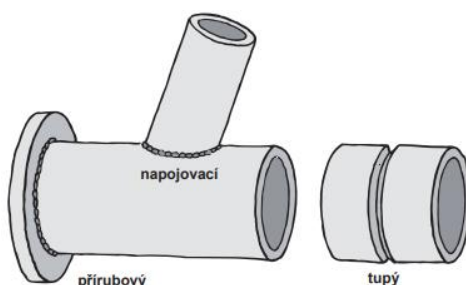
## 6 Technologičnost konstrukce trubkových spojení

Technologičnost konstrukce spočívá v zajištění provedení výrobku tak, aby výroba byla co možná nejehospodárnější, ale zároveň zajišťovala požadovanou funkčnost, životnost a spolehlivost výsledného výrobku. Nežli započne samotné svařování, je nutné provést přípravu základního svařovaného materiálu. Takováto příprava obvykle začíná dělením materiálu na potřebné rozměry. Následují operace, jakými jsou čištění svarových ploch, zajištění vzájemné polohy svařovaných dílů nebo nalezení vhodné polohy pro svařování. Čištění svarových ploch ve většině případů spočívá v odstranění všech nežádoucích nečistot (tuky, barvy, aj.). V případech svařování hliníkových slitin je nutné i odstranění oxidické vrstvy, pokud není použita metoda s čistícím účinkem. Odstranění oxidů chemickou cestou je vhodné provádět za použití např. technického lihu. Zajištění vzájemné polohy svařovaných dílů slouží především k zajištění dostatečné tuhosti svařence v průběhu svařování, ale také k udržení stálé šířky mezery mezi svařovanými díly. Přípravky musí mít také dostatečnou tuhost z důvodu vysokých pnutí při chladnutí hliníkových svařenců (až 3x vyšší než u ocelových). Stálé polohy svařovaných dílů (např. trubek) bývá dosaženo stehováním, speciálními upínacími přípravky nebo v případě spojování trubek přípravky umožňujícími jejich otáčení (viz obrázek 41). [3, 26, 27]



Obrázek 41 - Svěrka pro upnutí trubek "W T" a kladkové polohovadlo [3, 69]

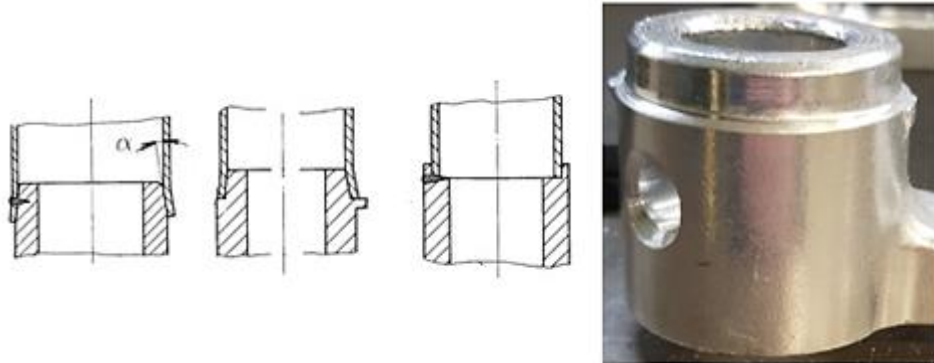
Pro spojování trubek bývají nejčastěji používány tři typy spojů (tupý, napojovací, přírubový), které můžeme vidět na obrázku 42.



Obrázek 42 - Typy spojů při svařování trubkových konstrukcí [3]

Avšak můžeme se setkat s celou řadou jiných konstrukčních provedení. Dalším případem konstrukčního svarového spojení je spojení tenkostěnné trubky s masivnější součástí. Takovéto spojení v mnoha případech vyžaduje přípravu stykových a svarových ploch, která se váže na použitou metodu

svařování a požadované funkční vlastnosti výsledného svařence. Jedná se např. o zkosení masivnější součásti pod malým úhlem s následným natlačením tenkostěnné trubky (časté pro svařování svazkem elektronů), zkosení hran pro lepší kompletaci dílů aj. Příklady konstrukčního provedení spojení tenkostěnné trubky s masivní můžeme vidět na obrázku 43. [60]



Obrázek 43 - Příklady spojení tenkostěnné trubky s masivním materiálem [70]

Dále je možné provádět úpravy tvaru svarových ploch, které se vážou na tloušťku svařovaného materiálu. Příklady úprav svarových ploch pro svařování bez podložky dle normy ČSN EN ISO 9692-3 jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 - Úpravy svarových ploch dle normy ČSN EN ISO 9692-3 [71]

Tloušťka	Název svaru	Značka	Zobrazení	Řez	Rozměry
$t \leq 4$	I-svar				$b \leq 2$
$3 \leq t \leq 15$	V-svar s výrazným otupením	Y			$b \leq 2$ $c \leq 2$ $\alpha \leq 50^\circ$

Mezi tupé svary řadíme svary tvaru I, U, V a poloviční V, X, U. Pro ruční svařování hliníku a jeho slitin bývají tupé svary materiálů do tloušťky 5 mm svařovány bez úkosu a bez mezery, avšak doporučuje se zkosení spodní hrany svaru (0,5 až 1 mm), aby se předešlo vzniku vad v kořeni svaru a vniknutí oxidických vměstků. Materiály větších tlouštěk jsou upraveny „V“ úkosem s úhlem rozevření 80 - 90° a odstoupením 2 mm. [72]

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce je věnována robotizovanému svařování metodou MIG přenosné konstrukce z hliníkových slitin. Úvod je věnován popisu pracoviště, po kterém již následuje samotný experiment s dílčími zhodnoceními a závěrem.

### 7 Experimentální pracoviště

Experiment v diplomové práci byl realizován na robotizovaném pracovišti laboratoře výuky svářecích technologií ČVUT v Praze. Pracoviště je vybaveno řídicí jednotkou propojující jednotlivé části pracoviště, invertorovým svařovacím zdrojem Sigma Galaxy 400 od firmy Migatronik, šestiosým průmyslovým robotem Arc Mate 100iC od firmy Fanuc Ltd., jednoosým polohovadlem Fanuc P250 a dalším vybavením.



Obrázek 44 – Laboratoř výuky svařovacích technologií (LVST)

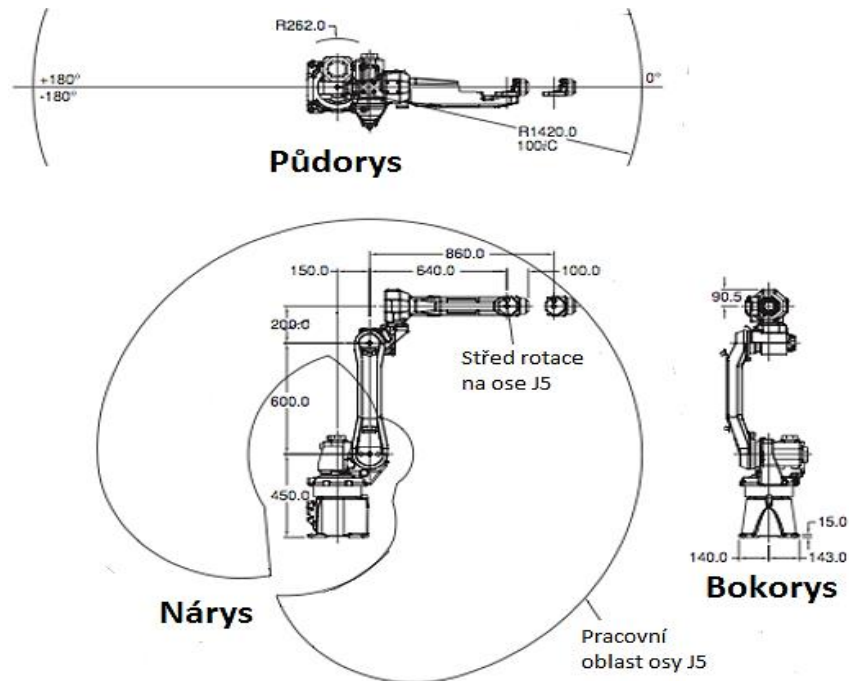
#### 7.1 Svařovací robot Arc Mate 100iC

Šestiosý svařovací robot používaný v experimentu disponuje těmito parametry: opakovatelností  $\pm 0,08$  mm, nosností na šesté ose 10 kg a dosahem 1420 mm, díky němuž může být používán pro aplikaci s rozměrnými díly a nástroji. Pohyb robota je realizovaný šesti elektromotory, které jsou propojeny s mechanickými převodovkami umožňujícími pohyb ramen robota. Převod první a druhé osy je planetový a třetí, čtvrtá, pátá, šestá osa má harmonický převod. Technické údaje o robotu Arc Mate 100iC jsou uvedeny v tabulce 10 a na obrázku 45 je vyobrazen pracovní diagram robota.

Tabulka 10 - Technické parametry robota Arc Mate 100iC [73]

osy	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Rychlost pohybu [°/s]	210	190	210	400	400	600
Rozsah pohybu [°]	360	250	444	480	380	720





Obrázek 45 - Pracovní diagram laboratorního robotu [73]

## 7.2 Polohovadlo Fanuc P250

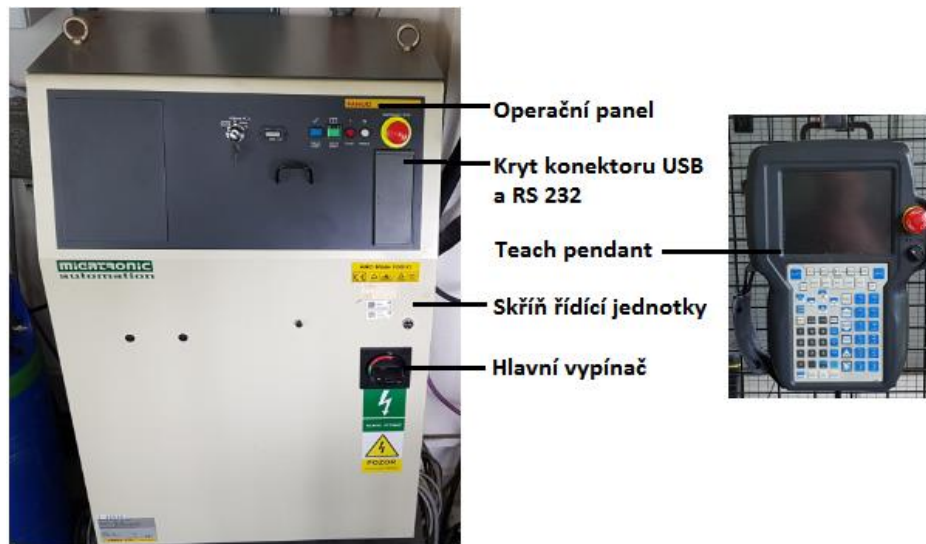
Součástí LVST je polohovadlo Fanuc P250 s jedním stupněm volnosti, umožňující otáčení o  $360^\circ$  na obě strany. Ovládání polohovadla probíhá prostřednictvím řídicí jednotky, kterou můžeme synchronizovat pohyby robota s polohovadlem. Pracovní plochu zde tvoří přípravná deska umístěná na rámu o ploše  $1600 \times 1000$  mm, který je upnut k polohovadlu.



Obrázek 46 - Polohovadlo Fanuc P250

## 7.3 Řídicí jednotka R-J3i C

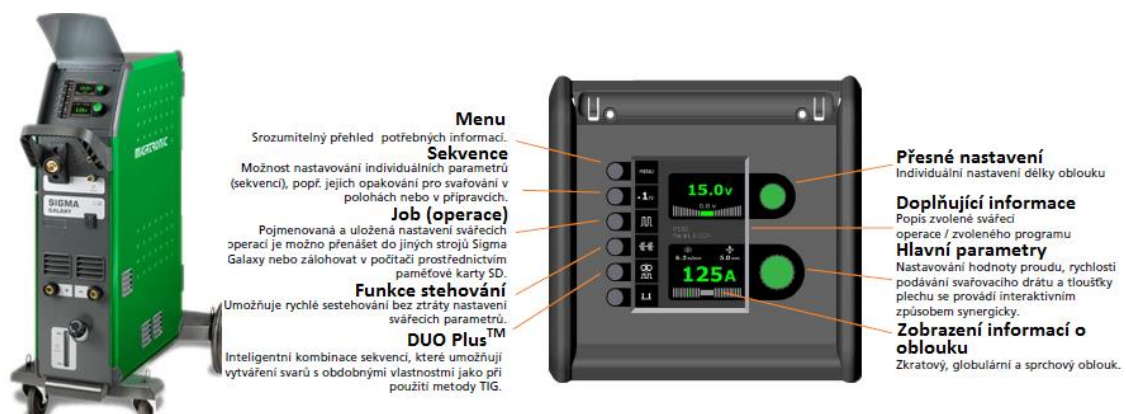
Řídicí jednotka se skládá z napájecího zdroje, obvodu uživatelského rozhraní, obvodu řízení pohybu, paměti a karty vstupů a výstupů. Paměťová karta slouží k uchování programů a uživatelských dat v paměti typu CMOS RAM na CPU kartě. Karta vstupů a výstupů tvoří rozhraní mezi řídicí jednotkou a periferiemi zařízení. Ovládání je zajištěno přímo na operačním panelu řídicí jednotky, nebo lze využít tzv. teach pendant.



Obrázek 47 - Řídicí jednotka R-J3i C

## 7.4 Svařovací zdroj Sigma Galaxy 400

Jedná se o moderní svařovací zdroj určený pro svařování metodami MIG/MAG a MMA, který umožňuje plynulou regulaci tvrdosti zdroje a napětí. Mezi další funkce patří možnost uložení až 200 individuálních nastavení svářecích operací a pro každou operaci nastavit a uložit 9 parametrů (sekvencí). Zdroj je opatřen digitálním panelem pro ovládání, na kterém je možné individuálně nastavit parametry na začátku a na konci svařování, včetně ovládání pulsního přenosu. Technické parametry zdroje můžeme vidět v tabulce 11. [74]



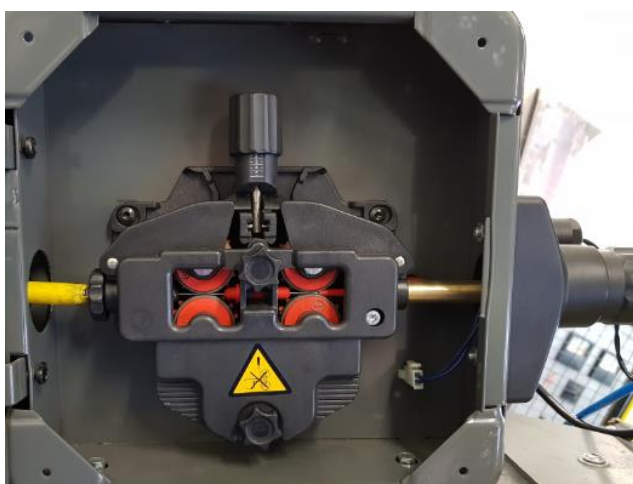
Obrázek 48 - Sigma Galaxy 400 [74]

Tabulka 11 - Technické parametry zdroje Sigma Galaxy 400 [74]

<b>Napájecí napětí +/- 15 % (50-60 Hz)</b>	3 x 400V	Proudový rozsah	15-400 A
<b>Pojistky</b>	20 A	Zatěžovatel 20 °C (MIG/MAG)	310 A/100 %
<b>Proud činný</b>	27,8 A	Zatěžovatel 20 °C (MIG/MAG)	400 A/60 %
<b>Proud max.</b>	28,2 A	Zatěžovatel 40 °C (MIG/MAG)	280 A/100 %
<b>Příkon, 100 %</b>	19,3 kVA	Zatěžovatel 40 °C (MIG/MAG)	350 A/60 %
<b>Příkon, max.</b>	24,2 kVA	Zatěžovatel 40 °C (MIG/MAG)	400 A/40 %
<b>Příkon naprázdno</b>	40 VA	Napětí naprázdno	80 V
<b>Účinník</b>	0,90	Rozměry verze S (V x Š x D)	120 x 54,5 x 119 cm
<b>Účinnost</b>	0,90	Hmotnost verze S	85 kg

## 7.5 Podavač drátu RWF Multi

RWF Multi je robotový podavač drátu z cívky (případně ze sudu), který lze použít i pro ruční svařování. Jedná se o čtyřkladkový podavač (viz obrázek 49) připojený ke svařovacímu zdroji, přes který je ovládán. Pro experiment bylo využito kladek podavače s hladkými „U“ drážkami určenými pro svařování hliníku a jeho slitin. Zvolené kladky snižují riziko deformací a otěru drátu, čímž zajišťují plynulé dodávání. Drát byl do podavače přiváděn volně z cívky umístěné na sloupu vedle robota. Umístění cívky a samotného podavače na robotu, jak tomu bylo v experimentu, můžeme vidět na obrázku 44. Dále jsou v tabulce 12 uvedeny technické parametry podavače. [75]



Obrázek 49 - Čtyřkladkový podavač RWF Multi

Tabulka 12 - Technické parametry podavače RWF Multi [75]

<b>Rychlost podávání [m.min<sup>-1</sup>]</b>	<b>Zatěžovatel 40 °C</b>	<b>Zatěžovatel 40 °C</b>	<b>Rozměry (v x š x d) [mm]</b>	<b>Hmotnost [kg]</b>
1-30	420 A/100 %	500 A/60 %	270 x 210 x 270	9

## 7.6 Svařovací hořák MIG

Svařovací hořák MIG je umístěný na konci zápěstí robota a je možné ho vyměnit za hořák pro metodu TIG, či CMT. Hořák je chlazený kapalinou, která je přiváděna ze svařovacího zdroje. Drát do hořáku je přiváděn z podavače umístěného na třetí ose robota přes teflonový bowden, aby nedocházelo ke zvýšenému otěru přídavného drátu.



Obrázek 50 - Svařovací hořák ROBO WH-PP

## 8 Realizace experimentu

Hlavním cílem experimentu bylo nalezení optimálních parametrů pro svařování hliníkové konstrukce robotickým svařováním metodou MIG. Proto je úvodní část experimentu zaměřena na sledování vlivů parametrů nastavovaných na svařovacím zdroji, aby bylo možné lépe pochopit a nalézt vhodné parametry při svařování samotné hliníkové konstrukce. Následně již bylo řešeno svařování hliníkové konstrukce. Nejprve bylo nutné zajistit vyhovující upnutí svařované konstrukce a zvolit vhodný PM pro svařování. Poté bylo s přihlédnutím k zjištěným výsledkům z úvodu svařeno několik konstrukcí s různými parametry, které byly postupně vyhodnocovány a následně upravovány dle potřeby. Ověření kvality svarů bylo zajištěno srovnáním mikrostruktur a tvrdosti svarů roboticky svařenými díly metodou MIG s ručně svařovanými díly metodou TIG, poskytnutými firmou MILOS s.r.o. Roudnice nad Labem.

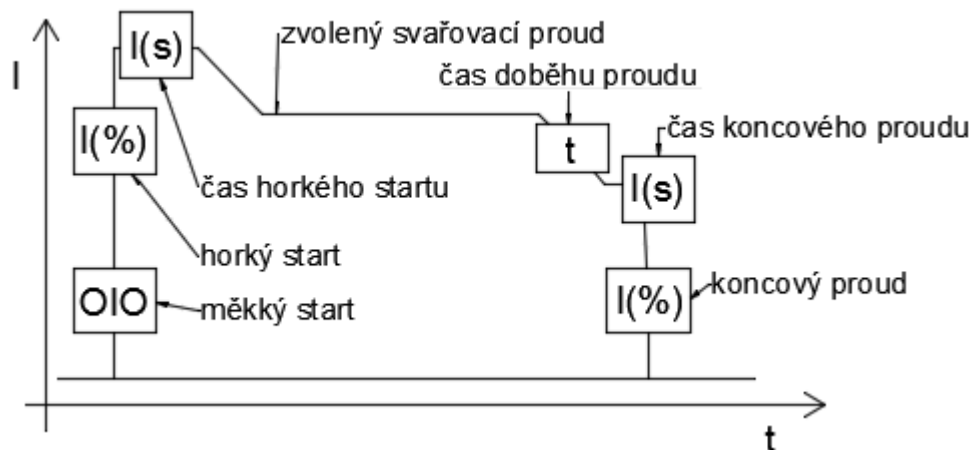
### Navržený postup experimentu:

1. sledování vlivu parametrů zapalování oblouku a ukončování svaru
2. realizace upnutí konstrukce a volba PM
3. optimalizace parametrů pro svařování konstrukce
4. zhodnocení a porovnání makrostruktur
5. zhodnocení a porovnání mikrostruktur
6. zjištění tvrdosti v jednotlivých částech svaru
7. závěrečné shrnutí

## 8.1 Vliv parametrů zapalování a ukončování elektrického oblouku

Úkolem bylo zjišťování vlivu nastavovaných parametrů pro zapálení oblouku a ukončování svaru impulsním svařováním. Prováděné návary byly realizovány na plechu tloušťky 3 mm z materiálu AlMgSi0,5. Jako PM byl použit drát ze slitiny AlSi5 průměru 1,2 mm. Ochranným plynem byl čistý Ar 4.6 s průtokem  $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Hořák byl při svařování skloněn pod úhlem  $18^\circ$  od svislé osy. Vzdálenost kontaktní špičky hořáku od základního materiálu byla 13 mm a výlet drátu 8 mm. Před započítím samotného svařování byly plechy odmaštěny technickým lihem a oxidická vrstva odstraněna drátěným kartáčem.

Postupně byly voleny jednotlivé parametry ovlivňující nejdříve zapalování (měkký start [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ], horký start [%], čas horkého startu [s]) a poté i ukončování svaru (čas doběhu proudu [s], čas koncového proudu [s], koncový proud [%]), které můžeme vidět na obrázku 51. Na vyhotovených návarech byla následně vyhodnocována šířka svaru, vzdálenost počátku průvaru od zapálení oblouku a převýšení. Z těchto hodnot byly sestaveny křivky charakterizující tvar návary v závislosti na vybraných parametrech.

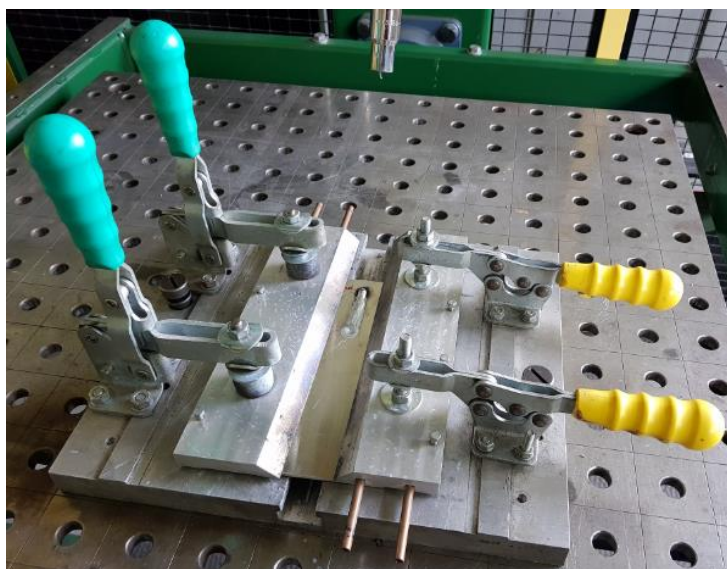


Obrázek 51 - Parametry zapalování a ukončování oblouku

### 8.1.1 Upínací přípravek plechu

Pro upnutí plechu v části experimentu zapalování a ukončování elektrického oblouku byla jako upínací přípravek zvolena deska s čelistmi (viz obrázek 52). Deska i se všemi komponenty je připevněna speciálními přípravky k pracovní desce polohovadla. Součástí základní desky je drážka tvaru „T“ k možnému vsazení lišty pro přívod plynu, který by sloužil jako ochrana kořene svaru. Sevření plechu je realizováno dvěma čelistmi, které jsou pomocí čtyř samostatných upínek připevněny k základní desce.





Obrázek 52 - Upínací přípravek plechu

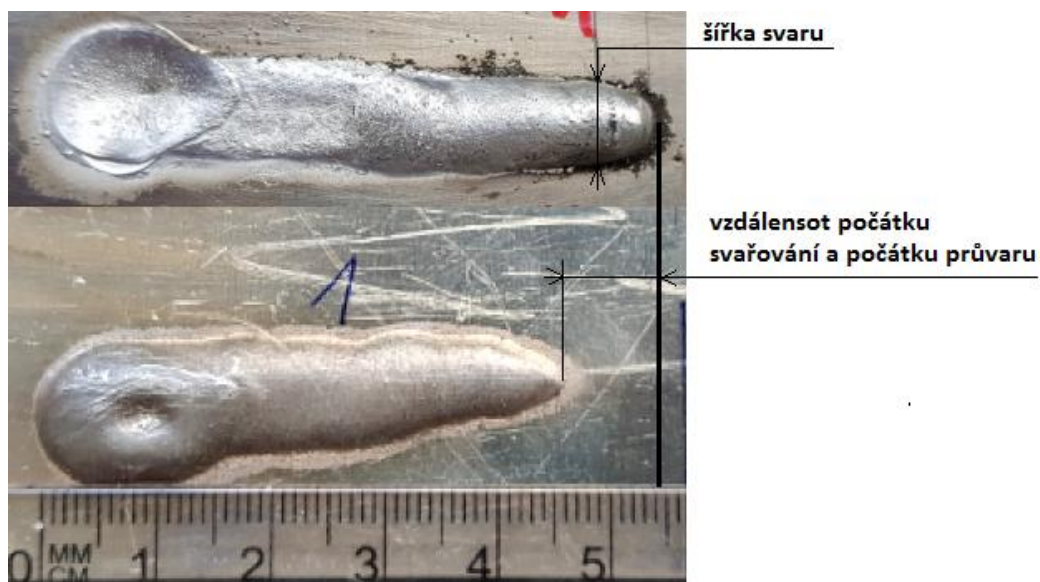
### 8.1.2 Zapalování elektrického oblouku

V tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty, které byly nastavovány na svařovacím zdroji. Barevně odlišené hodnoty značí měnící se parametr svařování. Nastavené hodnoty svařování byly následující:  $I = 100 \text{ A}$ ,  $U = 18,1 \text{ V}$ ,  $v_d = 4,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 45 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Tabulka 13 - Parametry zapalování oblouku

č.m.	měkký start [m.min <sup>-1</sup> ]	horký start [%]	čas horkého startu [s]	č.m.	měkký start [m.min <sup>-1</sup> ]	horký start [%]	čas horkého startu [s]
1.	0	0	0	14.	0	90	0,3
2.	1	0	0	15.	0	99	0,3
3.	2	0	0	16.	0	40	0,7
4.	3	0	0	17.	0	40	1,5
5.	4	0	0	18.	0	40	2,5
6.	8	0	0	19.	0	40	5
7.	12	0	0	20.	0	70	0,7
8.	0	10	0,3	21.	0	70	1,5
9.	0	20	0,3	22.	0	70	2,5
10.	0	30	0,3	23.	0	99	0,7
11.	0	40	0,3	24.	0	99	1,5
12.	0	50	0,3	25.	0	99	2,5
13.	0	70	0,3				

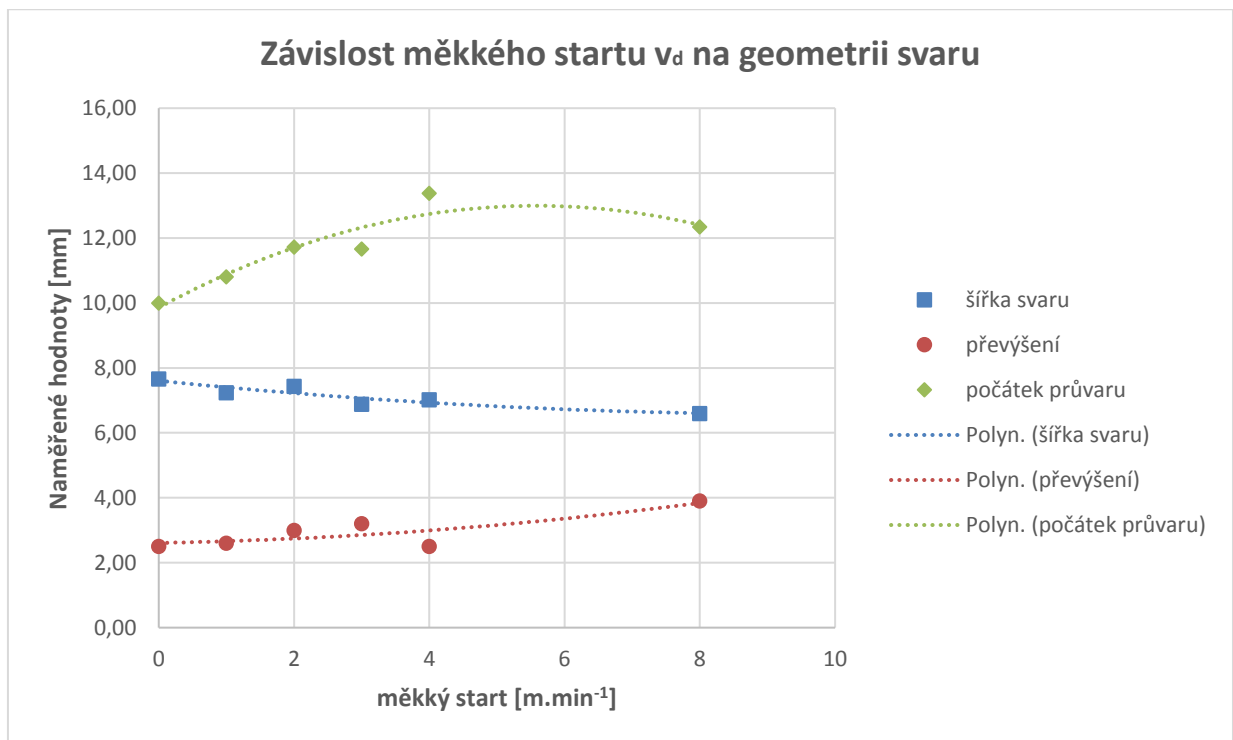
Ze svařených vzorků byly odměřeny hodnoty pomocí digitálního posuvného měřítka a měrek na tupé svary. Šířka a převýšení návaru měřená na krycí vrstvě charakterizují maxima těchto parametrů v oblasti zapálení oblouku. Vzdálenost měřená v kořenové části určuje vzdálenost vzniku průvaru od počátku svařování (viz obrázek 53). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14.



Obrázek 53 - Schéma měření svaru (zapalování oblouku)

Tabulka 14 - Naměřené hodnoty zapalování oblouku

č.m.	délka svaru [mm]	krycí vrstva		kořenová část
		šířka svaru [mm]	převýšení [mm]	vzdálenost počátku svařování a počátku průvaru [mm]
1.	60	7,6	2,5	10,0
2.	60	7,2	2,6	10,8
3.	60	7,4	3,0	11,7
4.	60	6,8	3,2	11,6
5.	60	7,0	2,5	13,3
6.	60	6,6	3,9	12,3
7.	50	x	x	x
8.	50	7,4	2,7	12,0
9.	50	7,6	3,2	10,5
10.	50	8,2	2,9	10,4
11.	50	8,9	2,6	10,3
12.	50	9,8	2,7	9,1
13.	50	10,8	2,5	6,7
14.	50	11,1	2,1	5,5
15.	50	11,5	2,1	4,2
16.	50	10,6	2,9	8,4
17.	50	11,9	2,4	7,0
18.	50	12,2	2,1	5,3
19.	50	12,1	2,2	6,4
20.	50	12,6	2,6	5,0
21.	50	14,3	2,1	4,2
22.	50	14,9	1,9	3,9
23.	50	14,1	1,5	3,0
24.	50	16,5	1,1	2,2
25.	50	17,0	1,0	2,9



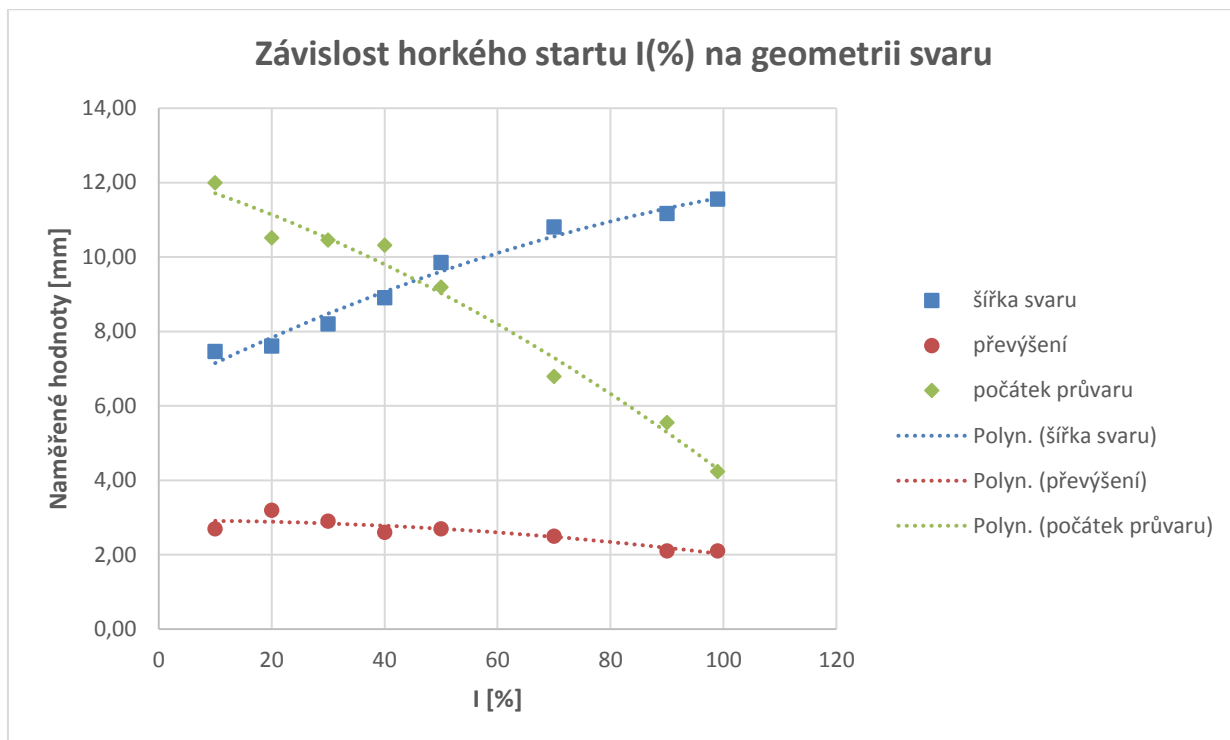
Graf 1 - Závislost měkkého startu na šířce svaru, převýšení a počátku průvaru

V grafu 1 můžeme vidět závislost měkkého startu na naměřených parametrech (šířce návaru, převýšení návaru a počátku průvaru). Bereme-li v úvahu počáteční předpoklad, tedy dosažení co možná nejrychleji plného průvaru již od počátku, je z grafu patrné, že nejrychleji došlo k průvaru při měření číslo 1 a jemu odpovídajícím parametrům. Šířka a převýšení návaru se při parametrech  $v_d = 0$  až  $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  příliš nemění. V měření číslo 7 byla zvolena příliš vysoká hodnota měkkého startu, díky čemuž došlo k jeho nahromadění (zkrucování) a nezapálení oblouku, jak můžeme vidět na obrázku 54. Ideální rozsah nastavení parametru  $v_d$  se tedy pohybuje v oblasti cca od  $0,5$  do  $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .



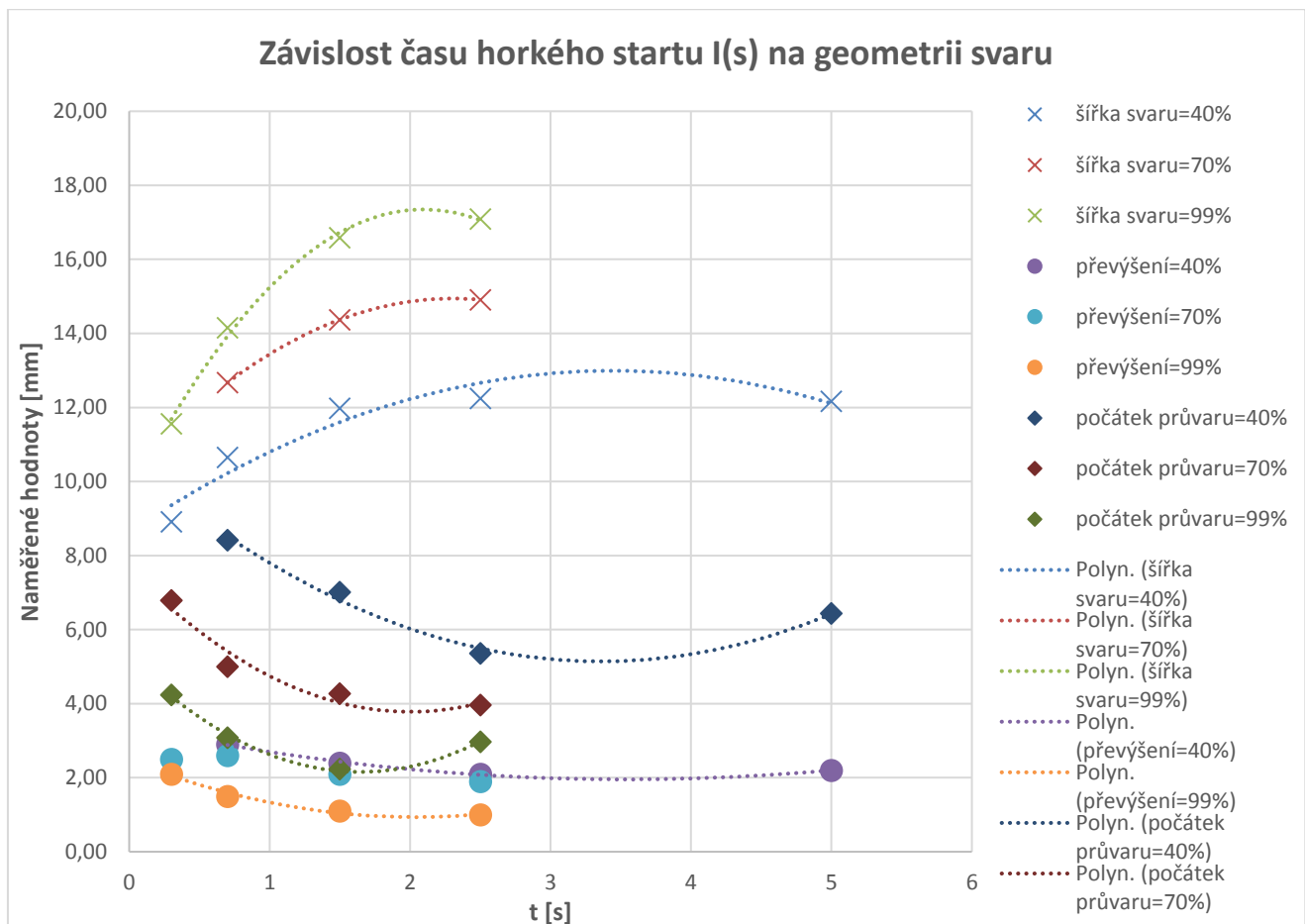
Obrázek 54 - Měření číslo 7 (zapalování oblouku)





Graf 2 - Závislost horkého startu na šířce svaru, převýšení a počátku průvaru

V grafu 2 je znázorněno procentuální navýšení hodnoty proudu oproti svařovací hodnotě ( $I = 100 \text{ A}$ ) na odměřených parametrech. Při nastavených parametrech došlo nejdříve k průvaru při měření číslo 15, avšak docházelo téměř k protavení svařovaného materiálu a k zcela nevyhovující šířce návaru, která se následně s procentuálním navýšováním proudu při zapalování značně zvyšovala. Parametr převýšení v těchto případech zůstal téměř konstantní a pohyboval se okolo hodnoty cca 2,5 mm. Z grafu také vyplývá, že ideální nastavení procentuálního zvýšení proudu při konstantním čase navýšení ( $t = 0,3 \text{ s}$ ) se pohybuje v oblasti 50 - 70 %.



Graf 3 - Závislost času horkého startu na šířce svaru, převýšení a počátku průvaru

Závislost času navýšení proudu při zapalování oblouku na naměřených hodnotách (šířce návaru, převýšení návaru a počátku průvaru) je možné vidět v grafu 3. V tomto grafu jsou zahrnuta i měření číslo 11, 13 a 15 z předchozího měření pro  $t=0,3$  s. Nejvyššího nárůstu při zvyšování času bylo zaznamenáno u parametru šířky svaru, která s tímto časem rapidně vzrůstala. Nejrychlejšího průvaru bylo dosaženo u hodnot cca 1,5 - 2,5 s. Z průběhu grafu lze předpokládat, že hodnota převýšení se po určité době ustálila a zůstává neměnná. Z těchto důvodů lze usuzovat, že vhodné nastavení času horkého startu se bude pohybovat při hodnotě  $t= 1$  až  $2$  s.

#### Shrnutí:

Z hlediska zapalování oblouku se ukázalo, že parametr měkkého startu nejvíce ovlivňuje vzdálenost počátku průvaru, kde se zvyšující se rychlostí podávání drátu byla vzdálenost počátku větší (případně nedošlo ani k zapálení). Procentuálním navýšením proudu došlo k zajištění poměrně „rychlého“ průvaru, ovšem za cenu rychle se zvyšující šířky svaru. Navýšování šířky svaru by bylo možné z části kompenzovat volbou kratšího časového intervalu působení zvýšeného proudu. Z měření, jako nejvýhodnější parametry zapalování oblouku vzešly:  $v_d= 0,5 - 3$  m.min<sup>-1</sup>,  $I(\%)= 50 - 70$  %,  $I(s)= 1 - 2$  s.

### 8.1.3 Ukončování svaru

V tabulce 15 jsou uvedeny hodnoty, které byly nastavovány na svařovacím zdroji. Barevně odlišené hodnoty značí měnící se parametr svařování. Nastavené hodnoty svařování následující:  $I = 100 \text{ A}$ ,  $U = 18,1 \text{ V}$ ,  $v_d = 4,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 45 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Tabulka 15 - Parametry ukončování svaru

č. m.	čas doběhu koncového proudu [s]	čas koncového proudu [s]	koncový proud [%]
1	0	0	0
2	0,5	0	0
3	1	0	0
4	4	0	0
5	0,5	0	40
6	0,5	1	40
7	0,5	1	60
8	0,5	1	80
9	0,5	1	20
10	0,5	0,5	40
11	0,5	2	40
12	0,5	4	40
13	0,5	4	20

Ze svařených vzorků byly odměřeny šířky návarů (viz obrázek 55) a převýšení/krátery pro nastavené parametry. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 16.

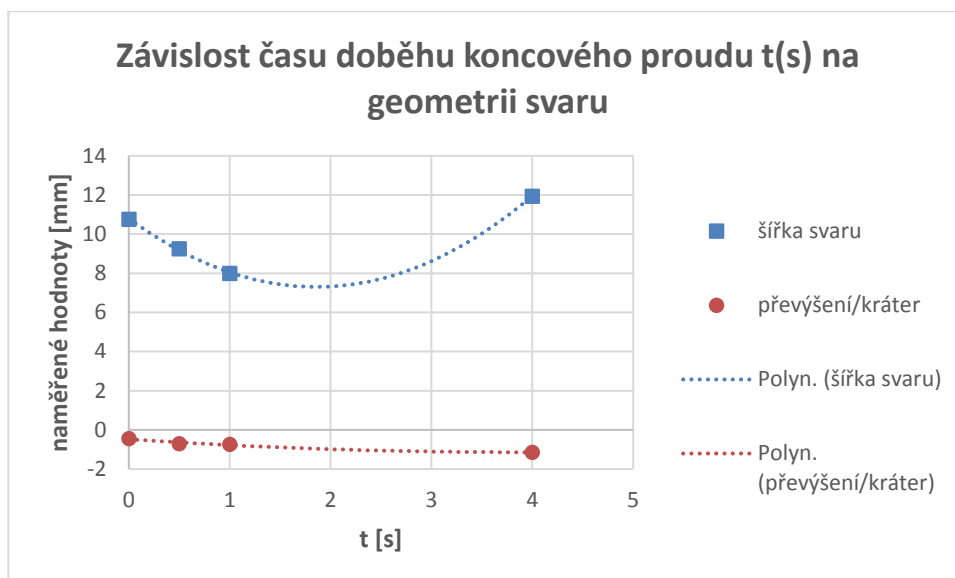


Obrázek 55 - Schéma měření ukončování svaru

Tabulka 16 - Naměřené hodnoty ukončování svaru

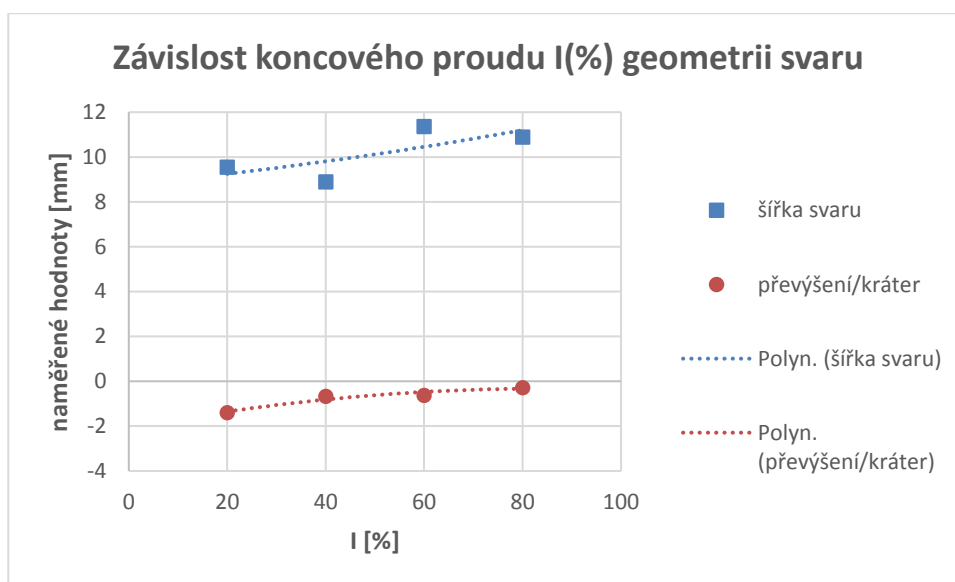
č. m.	délka svaru [mm]	šířka svaru [mm]	převýšení (+)/kráter (-) [mm]	č. m.	délka svaru [mm]	šířka svaru [mm]	převýšení (+)/kráter (-) [mm]
1	50	10,7	-0,4	8	50	10,9	-0,2
2	50	9,2	-0,7	9	50	9,5	-1,4
3	50	8,0	-0,7	10	50	9,4	-0,5
4	50	11,9	-1,1	11	50	8,7	-0,6
5	50	9,3	-0,6	12	50	8,9	+1,6
6	50	8,9	-0,6	13	50	10,9	-0,3
7	50	11,3	-0,6				

Pro sestavení grafických závislostí byla vyřazena měření číslo 5 a 13, aby nedocházelo ke zkreslování průběhu (Parametry čas koncového proudu a koncový proud nebyly shodné se zbylými konstantami).



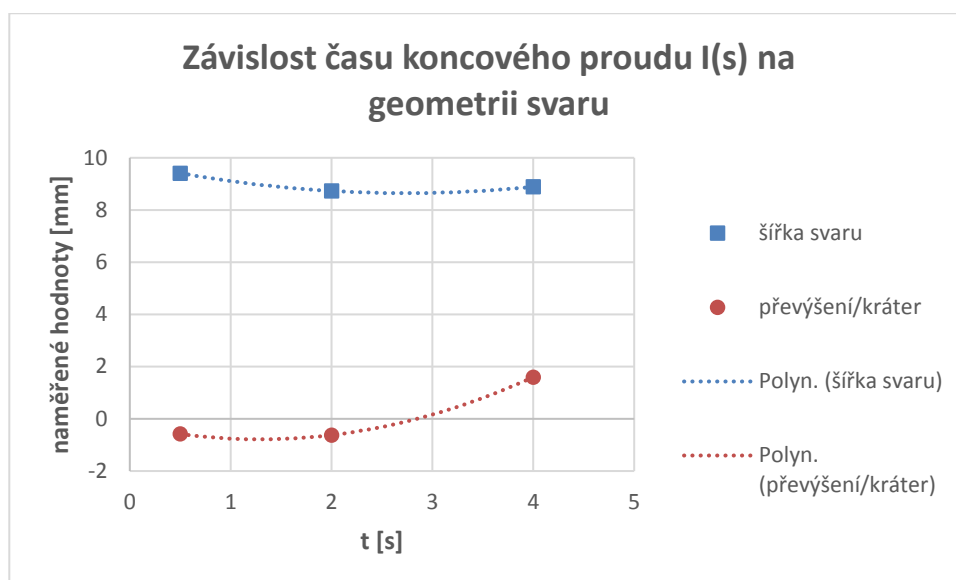
Graf 4 - Závislost času doběhu koncového proudu na šířce svaru a převýšení

Vliv času doběhu na rozměry návaru můžeme vidět v grafu 4. Z průběhu křivky převýšení/kráter vyplývá, že se zvyšováním hodnoty času doběhu koncového proudu dochází postupně k prohlubování vznikajícího kráteru. Pokles však není příliš strmý a lze usoudit, že nastavovaný parametr jej příliš neovlivňuje. Výrazněji ovlivňuje až šířku návaru, u které nejdříve dochází k poklesu a následně k postupnému nárůstu. Ideální rozsah nastavení parametru času doběhu koncového proudu by se mohl pohybovat při nastavených hodnotách 1,5 až 2,5 s.



Graf 5 - Závislost koncového proudu na šířce svaru a převýšení

V grafu 5 můžeme vidět závislost procentuálního navýšení proudu a naměřených hodnot. Navyšováním hodnoty proudu při ukončování návaru, a tedy i větším teplem vneseným do návaru docházelo k postupnému vyplňování kráteru za cenu větší šířky návaru. Vhodný rozsah nastavení by se mohl pohybovat v rozsahu 40 - 60 %.



Graf 6 - Závislost času koncového proudu na šířce svaru a převýšení

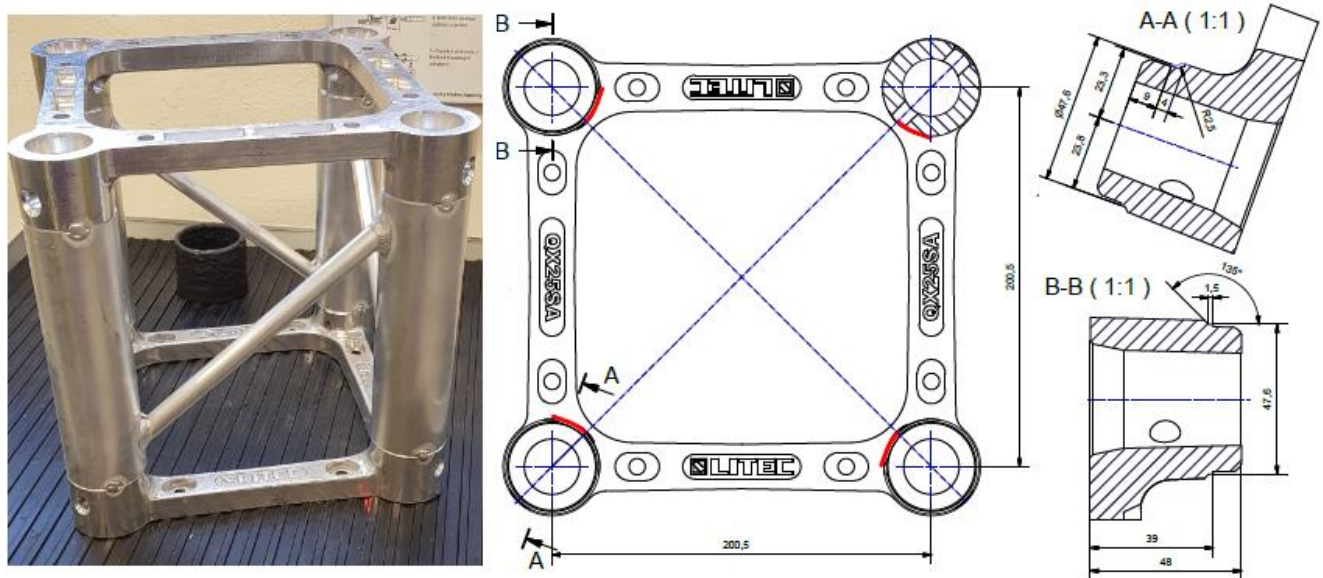
Závislost času koncového proudu a naměřených hodnot můžeme vidět v grafu 6. Prodlužováním času koncového proudu docházelo k postupnému vyplnění kráteru a v měření číslo 12 až k dosažení převýšení a částečnému odstranění (ve svarovém kovu se objevil malý kráter). Šířka návaru byla nastavovaným parametrem ovlivněna minimálně. Jako vhodný čas působení koncového proudu se ukázala hodnota 3,5 až 4 s.

#### Shrnutí:

Při sledování parametrů ukončování svaru docházelo v drtivé většině ke vzniku kráterů. Vznik kráterů lze přisuzovat postupu měření, kdy byla sledována vždy pouze jedna nastavovaná veličina a ostatní byly brány jako konstanty. Pro odstranění bude nutné zvolit vhodné kombinace nastavovaných parametrů. Z měření vyplývá, že výšku svaru nejvíce ovlivní procentuální navýšení koncového proudu s časem koncového proudu. Nastavení delšího intervalu působení zvýšeného proudu by mohlo zajistit požadované převýšení. Jako nejvýhodnější parametry ukončování svaru se ukázali  $t = 1,5 - 2,5$  s,  $I(\%) = 40 - 60$  %,  $I(s) = 3,5 - 4$  s.

## 8.2 Svařování hliníkové konstrukce

Experiment byl prováděn na přenosné hliníkové konstrukci poskytnuté firmou MILOS s.r.o. Roudnice nad Labem, kterou můžeme vidět na obrázku 56. Hliníková konstrukce se skládá ze dvou odlévaných podstav z materiálu EN AC-42200 T6 (AlSi7Mg0,6), čtyř trubek o vnějším průměru 50 mm s tloušťkou stěny 1,75 mm a čtyř příčných vzpěr o vnějším průměru 13 mm z materiálu EN AW-6082 T6 (AlMgSi0,5). Experiment je zaměřen na svařování tvářené tenkostěnné trubky a silnostěnného odlitku podstavy v místech řez A-A, respektive B-B.



Obrázek 56 - Přenosná hliníková konstrukce

V tabulce 17 je uvedeno chemické složení a vybrané mechanické vlastnosti slitin použitých v experimentu. Tepelné zpracování označené T6 značí použití rozpouštěcího žíhání + kalení s umělým stárnutím pro dosažení optimální houževnatosti a pevnosti.

Tabulka 17 - Chemické složení a mechanické vlastnosti slitin AlSi7Mg0,6 a AlMgSi0,5 [61, 76]

Chemické značení	Číselné značení	Chemické složení [hm. %]								Mechanické vlastnosti			
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	Tvrdost [HB]
AlSi7Mg0,6	EN-AC-42200	6,50-7,50	0,2	0,2	0,1	0,45-0,7	0,1	0,04-0,2	zb.	240	290	min. 2	90
AlMgSi0,5	EN-AW-6060	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,6	0,1	0,1	zb.	≥160	≥215	A <sub>5</sub> ≥ 12 A <sub>10</sub> ≥ 10	70

## 8.2.1 Navržení přídavného materiálu

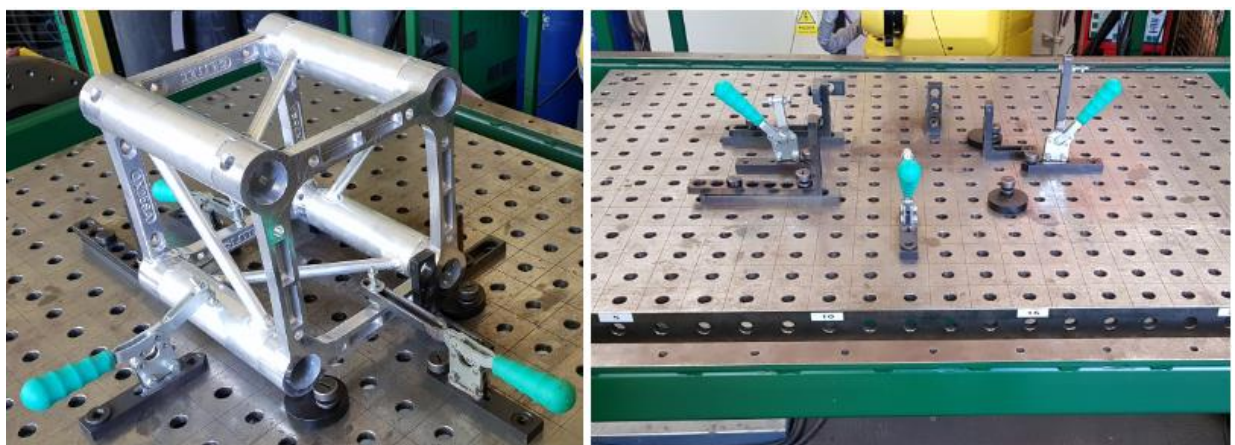
Při navrhování vhodného přídavného materiálu pro svařování zmíněných slitin se vycházelo z doporučení uvedených v normě ČSN EN 1011-4, která již byla rozebrána v kapitole 5.4. Norma doporučuje volbu přídavných materiálů typu 4. Z materiálů typu 4 byla jako přídavný materiál pro svařování hliníkové konstrukce vybrána slitina AlSi5 (viz tabulka 18) s přihlédnutím na přídavný materiál použitý u vzorku svařovaného metodou TIG (také AlSi5), který byl dodán a poslouží pro porovnání dosažených výsledků. Průměr drátu 1,2 mm používaný při svařování byl zvolen s ohledem na požadavky na rozměry svaru.

Tabulka 18 - Chemické složení a mechanické vlastnosti slitiny AlSi5 [77]

Chemické značení	Chemické složení [hm. %]						Mechanické vlastnosti		
	Si	Mn	Ti	Fe	Zn	Al	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
AlSi5	4,7	0,01	0,01	0,3	0,01	zb.	140	50	10-17

## 8.2.2 Upnutí hliníkové konstrukce

Před započítím samotného svařování bylo nutné vyřešit upnutí hliníkové konstrukce tak, aby zajišťovala dostatečnou tuhost, ale i snadné a rychlé vyjmutí (otočení) po svařování. Zároveň musela umožňovat dobrý přístup svařovacímu robotu (hořáku). Konečné upnutí bylo po několika pokusech a úpravách navrženo, tak jak je zachyceno na obrázku 57. Hliníková konstrukce je umístěna a připevněna ve středu přípravné desky polohovačla. Pohybu desky do stran je zamezeno speciálními upínacími přípravky, které jsou určeny pro upnutí tvarově složitých dílů. Při otáčení polohovačla v průběhu svařování by mohlo dojít k nežádoucímu pohybu, proto byla konstrukce přikotvena třemi upínkami, které umožňují i snadné vyjmutí a otáčení.



Obrázek 57 - Upnutí hliníkové konstrukce

### 8.2.3 Robotické svařování metodou MIG hliníkové konstrukce

Úvodem této práce byly zjištěny od firmy MILOS s.r.o. Roudnice nad Labem, která se problematikou svařování přenosných hliníkových konstrukcí zabývá a která poskytla potřebný materiál ke svařování požadavky, které jsou na konstrukci kladeny. Od zjištěných informací se následně odvíjel směr, kterým bylo nutné hledání vhodných parametrů vést. V tabulce 19 je uvedeno shrnutí veškerých kritérií, kterých bylo nutné dosáhnout i s konkrétními hodnotami parametrů.

Tabulka 19 - Požadavky na přenosnou konstrukci

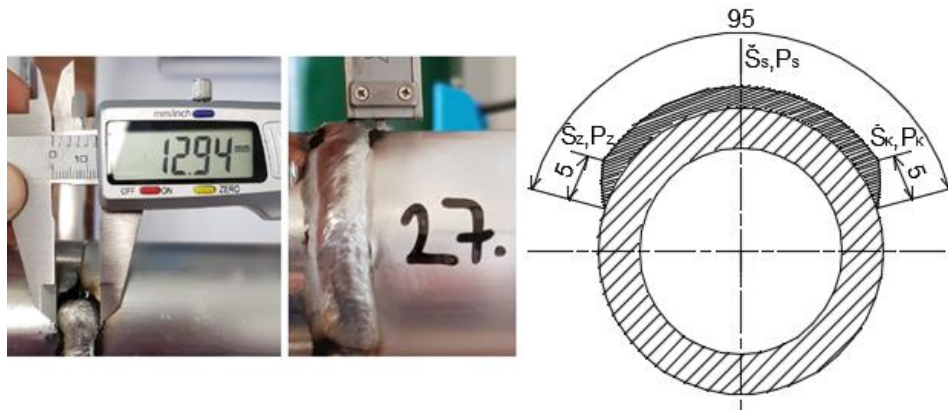
Požadavek	Hodnota požadavku
plný průvar	1,6 mm
převýšení svaru	0,5 až 2 mm
šířka svaru	cca 9 až 12 mm
rychlost svařování	7,5 cm.min <sup>-1</sup>

Výsledný tvar svaru pak byl důležitý i z hlediska estetičnosti a s ní spjatou prodejností dílů. Při svařování často vznikají zplodiny, které ulpívají na svařovaném dílci a je nutné je odstranit. Muselo tedy být dosaženo svaru za takových podmínek, aby při jejich vzniku bylo snadné je odstranit bez přidání dalších náročných operací, které by výrobu prodražily. Ekonomickou stránku výroby svařováním ovlivňuje do značné míry rychlost svařování, ale i spotřeba přídavného materiálu a ochranného plynu. Cenově náročné zakoupení svařovacího robota, včetně potřebného příslušenství musí být vyváženo jeho efektivností. Při svařování hliníkové konstrukce nebyla ve většině měření prováděna předúprava svarové plochy z důvodu problematického zajištění operace na čistě robotizovaném svařovacím pracovišti bez kooperace s operátory, kteří by předúpravu povrchu prováděli.

V experimentální části svařování hliníkových konstrukcí impulsní metodou MIG bylo provedeno 28 svarů (veškeré informace o parametrech svařování a parametrech svarů jsou uvedeny v přílohách), avšak pro ukázání postupu a úvah, kterými byla tato práce provázena, jsou v popisech uvedeny jen ty, na kterých byl znatelný progres nebo slouží k poukázání na vzniklý problém. Ochranným plynem při svařování byl čistý Ar 4.6 (měření číslo 1-22) s průtokem 14 l.min<sup>-1</sup> a následně směs Ar 50 % + He 50 % (měření číslo 23-28) s průtokem 17 l.min<sup>-1</sup>. Hořák byl po dobu experimentu naklopen o úhel 5° od svislé osy. Vzdálenost kontaktní špičky hořáku od svařované konstrukce byla 13 mm a výlet drátu 7 mm. Prováděné spojení odlévané podstavy s trubkou by ve skutečnosti mělo být ideálně po celém obvodu, v rámci jednoho svaru (360°). Experiment byl ovšem omezen vybavením, které bylo k dispozici v robotizovaném pracovišti laboratoře výuky svářecích technologií ČVUT v Praze. Proto pro potřeby experimentu bylo provedeno zjednodušení, které zahrnovalo svary, u kterých závěrečné napojení na začátek svaru bylo simulováno napojováním další housenky.



Na vyhotovených svarech byla provedena vizuální kontrola a zhodnocení, včetně změření geometrie svaru (šířky svaru, převýšení) ve stanovených místech, jak je naznačeno na obrázku 58. V případech, kdy bylo vyhodnoceno, že by se mohlo jednat o svar požadované jakosti nebo bylo nutné ověřit některé změny, které běžnou vizuální kontrolou nebylo možné odhalit, byla provedena kontrola makrostruktury svaru.




Obrázek 58 - Příklad měření šířky svaru a převýšení hliníkové konstrukce

Poznámka:  $\check{S}_z$  - šířka na počátku svaru,  $\check{S}_s$  - šířka ve středu svaru,  $\check{S}_k$  - šířka na konci svaru,  $P_z$  - převýšení na počátku svaru,  $P_s$  - převýšení ve středu svaru,  $P_k$  - převýšení na konci svaru

Dále bylo pro potřeby měření počítáno vnesené teplo do svaru dle normy ČSN EN 1011-1 podle

$$\text{následujícího vzorce: } q = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v_s} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (1)$$

kde  $U$  – svařovací napětí [V],  $I$  – svařovací proud [A],  $v_s$  – rychlost svařování [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $\eta$  – koeficient tepelné účinnosti metody svařování ( $\eta = 0,8$ )



č. m.	Parametry svařování				Parametry zapalování oblouku			Parametry ukončování svaru		
	I (A)	U [V]	$v_d$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$v_s$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	$v_d$ [m.min <sup>-1</sup> ]	horký start [%]	čas horkého startu [s]	Čas doběhu proudu [s]	Koncový proud [%]	Čas koncového proudu [s]
1	100	18,1	4,5	60	1,5	60	1,5	0,2	20	2,5
	Délka svaru [mm]	$\check{S}_z$ [mm]	$\check{S}_s$ [mm]	$\check{S}_k$ [mm]	$P_z$ [mm]	$P_s$ [mm]	$P_k$ [mm]	$q$ [J.mm <sup>-1</sup> ]		
	40	10,7	6,3	4,0	5,1	2,4	4,0	144		

Obrázek 59 - Měření číslo 1

První měření sloužilo především pro stanovení výchozích parametrů pro následující pokusy. Do jisté míry se zvolené parametry opíraly o předešlá měření, která proběhla na hliníkovém plechu, ale také o zkušenosti získané z konzultací. Vyhotovený svar zároveň sloužil pro nastínění problémů, se kterými bude nutné se vypořádat. Svar číslo 1 (viz obrázek 59) měl řadu vad, které provázely celý experiment. Prvním problémem bylo stanovení přesné dráhy robota, která se určovala 6 body po obvodu celé délky svaru (95 mm). Dráha, po které se robot pohyboval, byla tedy ovlivněna přesným stanovením těchto bodů, ovšem jak lze vidět z prvního měření, konec housenky se odchýlil mírně do strany. V průběhu experimentu se mírné vychýlení dráhy opakovalo a pro jeho odstranění bude nutné určovat dráhu robota z více bodů. S tímto problémem zároveň úzce souvisí příprava konstrukce před svařováním a pevné upnutí. Svařovaná konstrukce v experimentu byla pevně ukotvena v přípravku a před robotickým svařováním ručně sestehována metodou TIG. Z důvodu velkého množství tepla vneseného do konstrukce a její dilatace docházelo ke mírnému zkroucení, které však dráhu robota a jeho určené body ovlivňovalo. Proto při otáčení konstrukce na další svar bylo nutné dráhu ověřovat a upravovat. Dalšími problémy, které se ukázaly u prvního svaru, bylo velké převýšení a šířka svaru při zapalování oblouku, vzniklá nahromaděním přídavného materiálu. Uvedený jev je velkým omezením metody MIG, kdy ihned od počátku svařování, kdy ještě není vytvořena požadovaná svarová lázeň a základní materiál není prohřátý, dochází ke konstantnímu přivádění přídavného materiálu. Oproti tomu při ručním svařování metodou TIG, se kterou jsou svary v závěru porovnávány, si svářeč po vytvoření svarové lázně sám reguluje množství přídavného materiálu a tím zabrání velkému převýšení na počátku svaru. Jedním z možných způsobů eliminace uvedeného problému by mohl být předeřev, ale v rámci konzultace u firmy MILOS s.r.o. Roudnice nad Labem se s přihlédnutím k dalším nákladům k zajištění předeřevu u sériového robotického svařování od této varianty upustilo a hledala se cesta přes nastavované parametry.

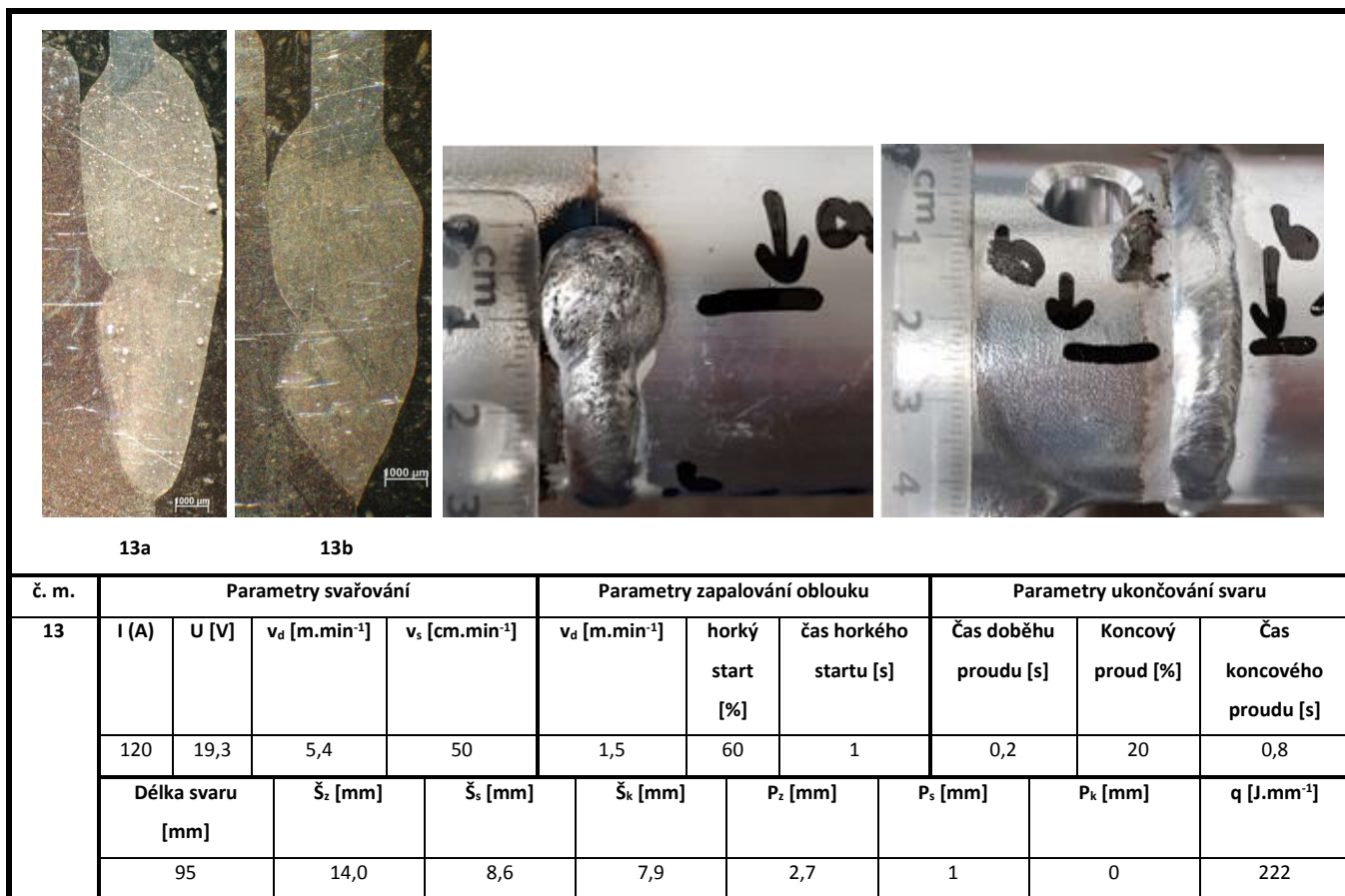
č. m.	Parametry svařování				Parametry zapalování oblouku			Parametry ukončování svaru		
	I (A)	U [V]	$v_d$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$v_s$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	$v_d$ [m.min <sup>-1</sup> ]	horký start [%]	čas horkého startu [s]	Čas doběhu proudu [s]	Koncový proud [%]	Čas koncového proudu [s]
5	120	19,3	5,4	30	1,5	60	1	0,2	20	0,8
6	120	19,3	5,4	40	1,5	60	1	0,2	20	0,8
7	120	19,3	5,4	50	1,5	60	1	0,2	20	0,8
	Délka svaru [mm]	$\bar{S}_z$ [mm]	$\bar{S}_s$ [mm]	$\bar{S}_k$ [mm]	$P_z$ [mm]	$P_s$ [mm]	$P_k$ [mm]	$q$ [J.mm <sup>-1</sup> ]		
5	95	14,1	12,1	12,8	3,3	3,3	1,2	370		
6	95	13,6	9,2	8,9	3,1	2,8	1,7	277		
7	95	13,5	9,2	8,6	3,3	2,4	0,6	222		

Obrázek 60 - Měření číslo 5, 6, 7 (zvětšení makrostruktur 10x)

Následujících několik měření bylo zaměřeno na stanovení vhodné rychlosti svařování, při které bude dosaženo průvaru a zároveň se splní požadované nároky zmíněné v úvodu. Pro stanovení průvaru bylo nutné rozřezání svarů a vyhodnocení makrostruktur, které je možné vidět na obrázku 60, kde písmeno u čísla označuje místo řezu (počátek svařování = a, střed svaru = b). Nejlépe z hlediska rychlosti vzešlo měření číslo 7, u kterého bylo dosaženo požadovaného průvaru ve všech místech řezu při nejnižších hodnotách šířky svaru a převýšení. Spočítané vnesené teplo do svaru následně sloužilo jako výchozí hodnota pro zadávání parametrů dalších měření. Při nižších rychlostech svařování (především u měření číslo 5) k průvaru došlo, ale nastával zde problém s šířkou svaru, kde svar téměř zasahoval do otvoru pro čep. U měření číslo 8 a 9 (parametry uvedeny v příloze) s vyššími rychlostmi 80, respektive 90 cm.min<sup>-1</sup> bylo podezření z nedosažení průvaru v počátcích svařování, kdy je materiál ještě studený.

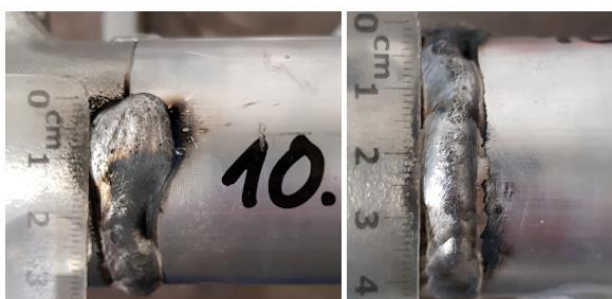
Makrostruktura vzorků 5, 6, 7 (viz obrázek 60) odhalila velké množství pórů ve svarovém kovu. Za zdroj velkého množství pórů byl nejprve pokládán přídavný materiál, který mohl být po čase v důsledku atmosférických vlivů zoxidovaný. Proto se od měření číslo 13 (viz obrázek 61) zakoupila nová cívka

s přidavným materiálem a byly vyměněny a očištěny veškeré komponenty, na kterých mohla po čase ulpívat mastnota a jiné nečistoty (bowden, kladky podavače aj.).



Obrázek 61 - Měření číslo 13 (zvětšení makrostruktur 10x)

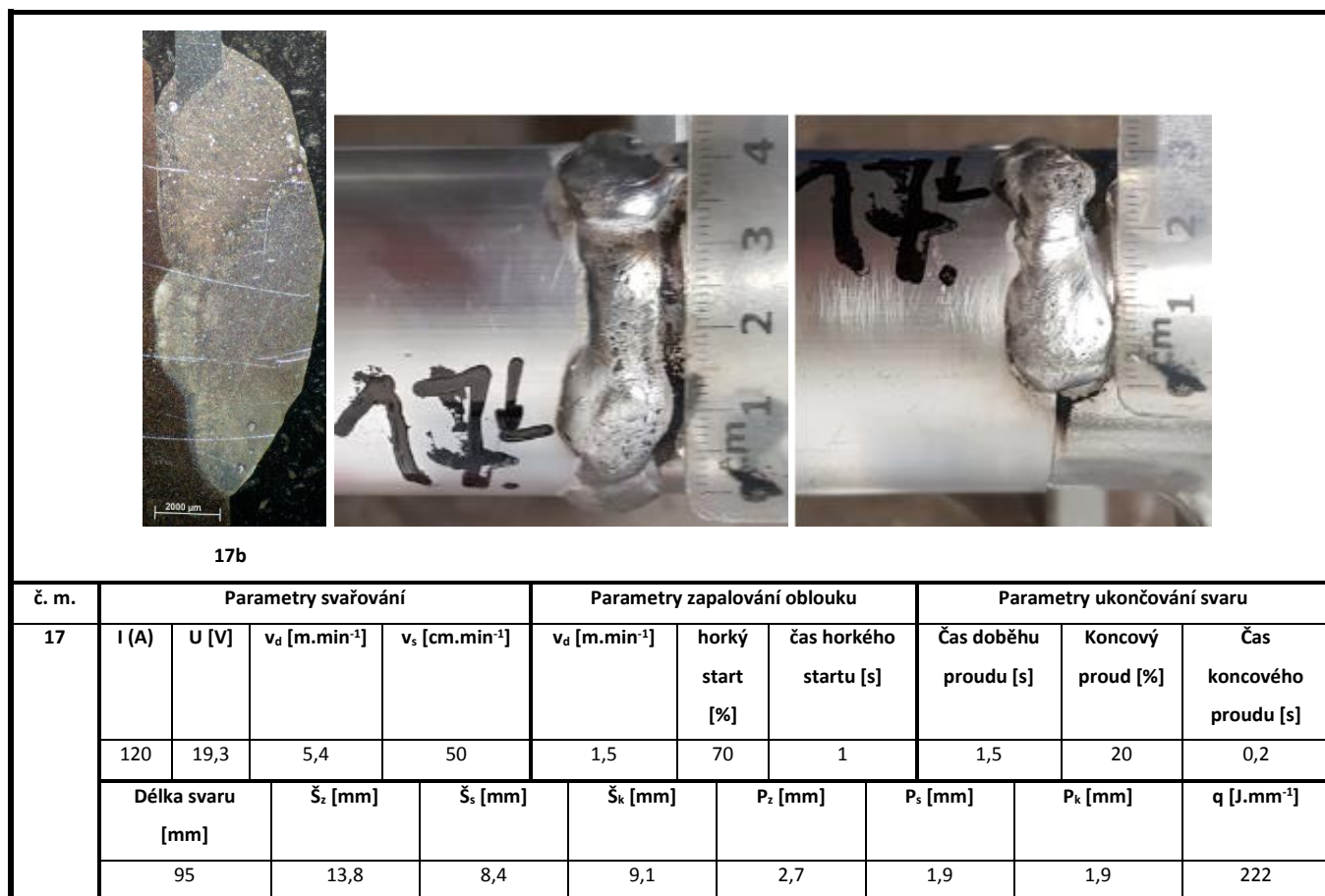
Změna drátu se všemi komponenty a odstranění oxidické vrstvy na základním materiálu kartáčem s nerezovými štětinami a technickým lihem nepřineslo požadovaný efekt. Z makrostruktur na obrázku 61 je vidět stále velké množství pórů, které jsou rozmístěny v celém objemu svarového kovu. Při pokusech s vnesením více tepla do materiálu a tím i prodloužení času, po který může vodík uniknout, jako tomu bylo v měřeních 9 a 10 (viz obrázek 62), docházelo k propalům tenkostěnné trubky, nepravidelnému vrstvení housenek a vzniku velkého množství zbytkových zplodin. Proto pro zamezení vzniku propalů byla provedena korekce dráhy, při které se posunul drát (do této doby mířící do „mezery“ mezi trubkou a odlitkem) 1 mm směrem do odlitku.



Obrázek 62 - Vznik propalů u měření číslo 10



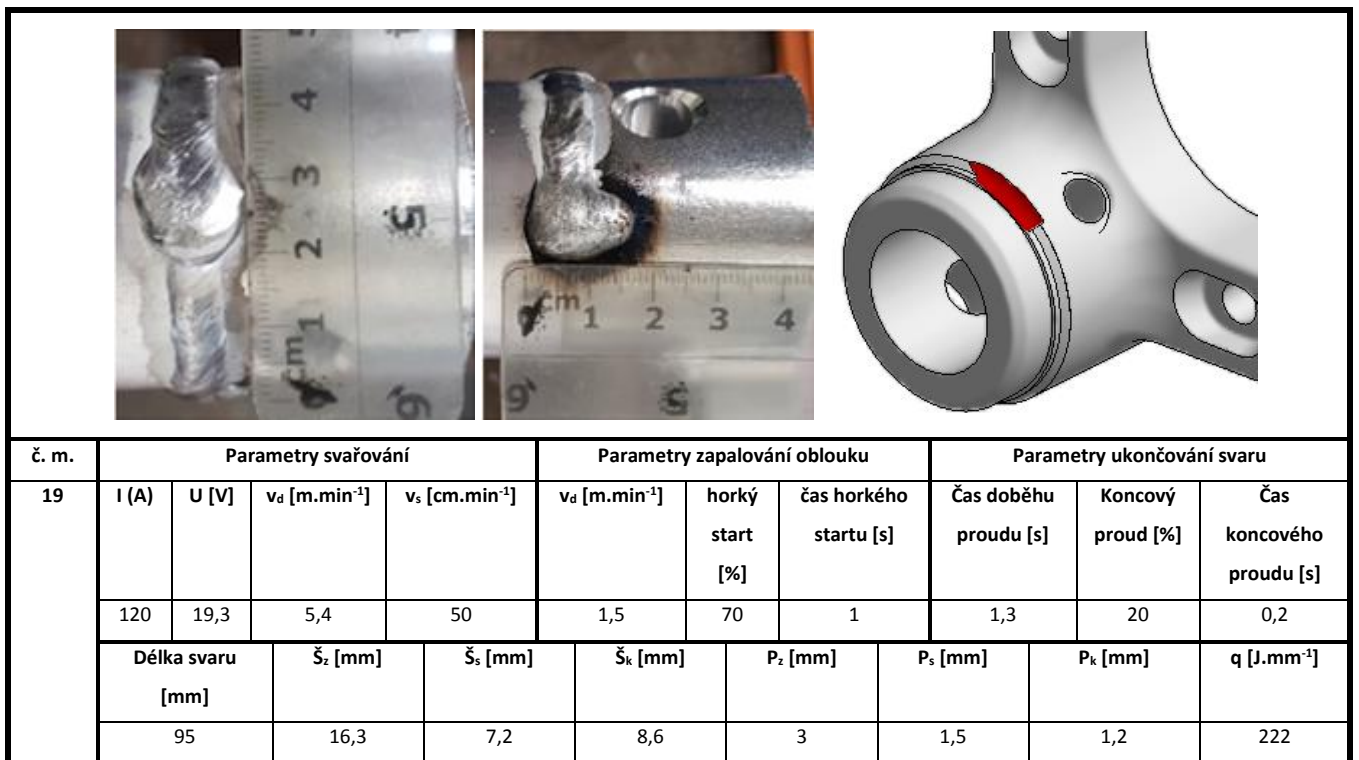
I přes rozsáhlou pórovitost, jejímž dalším zdrojem může být např. samotný odlitek, se povedlo v měření 13 rozměrově ustálit střední část svaru, která splňovala požadavky na šířku svaru a převýšení, měla pravidelné vrstvení a lesklý povrch. Zbytky zplodin byly snadno rukou odstranitelné. Ukončování svaru bylo v následujícím měření (měření číslo 14) vyřešeno prodloužením času doběhu proudu z 0,2 na 1,5 s, čímž došlo k vyplnění vznikajících kráterů.



Obrázek 63 - Měření číslo 17 (zvětšení makrostruktur 10x)

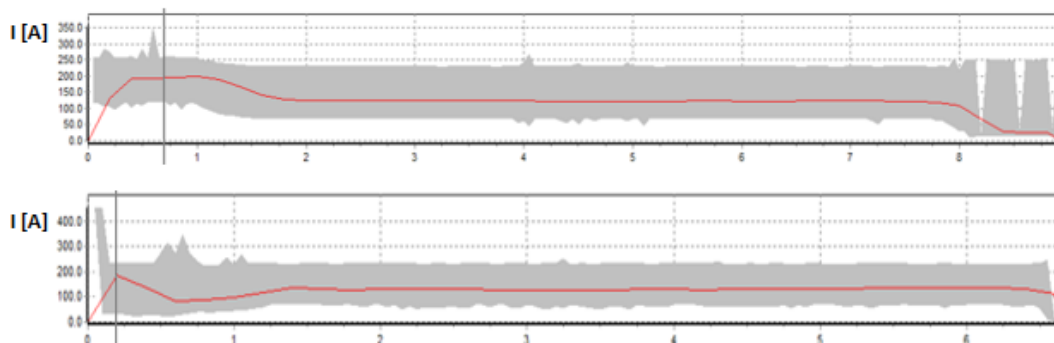
V dalších měřeních s ochranným plynem Ar byla snaha vyřešit stále trvající problémy s tvorbou pórů a velkého převýšení na počátku svaru, ale také možné napojení svaru při ukončování svařování, případně při poruchách např. svařovacího robota, kdy dojde k přerušení svaru. Napojování bylo prováděno rozdělením dráhy robota, např. do tří částí, jako tomu bylo v měření číslo 17 (viz obrázek 63). Provedenými pokusy bylo zjišťováno, zda-li by bylo možné při ukončování svaru opětovně z části natavit počáteční převýšení, aby se zajistil plný průvar po celém obvodu, ale i varianta s napojováním na konec svaru v případě přerušení procesu svařování. Parametry svaru 17 odměřené po svaření: 1. napojení (šířka svaru 13,6 mm, převýšení 3 mm), 2. napojení (šířka svaru 14,7 mm, převýšení 3 mm) ukázali, že roztavení stávající housenky je obtížné. Nejlepších výsledků napojení bylo dosaženo v měření číslo 19, které je možné vidět na obrázku 64 (šířka svaru 13,6 mm, převýšení 3 mm). Řešení oprav svarů, by tak mohlo být následující. Opravy svarů, pokud by se nejednalo o velké množství, by bylo možné provádět ručním svařováním, např. metodou TIG.

Současně v měření číslo 17 byl proveden pokus s navýšením horkého startu na 70 %, u kterého byla snaha snížit převýšení za cenu větší šířky svaru. Předpokladem bylo vhodné umístění počátku svařování na konstrukci (mimo otvor čepu nebo místa styčných bodů v případě položení konstrukce). Převýšení se však při srovnání s měřením číslo 16, kdy byl parametr horkého startu 60 %, snížilo pouze o 0,05 mm, a pokud by se hodnota horkého startu nadále zvyšovala, hrozilo by riziko propálení. Eliminací převýšení na počátku svaru by mohlo být vyfrézování drážky v odlitku nebo změna formy již při odlévání. Jestliže by započalo svařování v silnostěnném odlitku, bylo by možné nastavit vyšší parametry, které by zpočátku natavily nezahřátý základní materiál. Pro zjištění hloubky případné drážky se provedlo měření číslo 19 (viz obrázek 64), u kterého byl počátek svařování stanoven na 7 mm od hrany odlitku. Převýšení v místě návaru na odlitek bylo naměřeno 3 mm, z čehož vychází minimální hloubka drážky 1 mm.



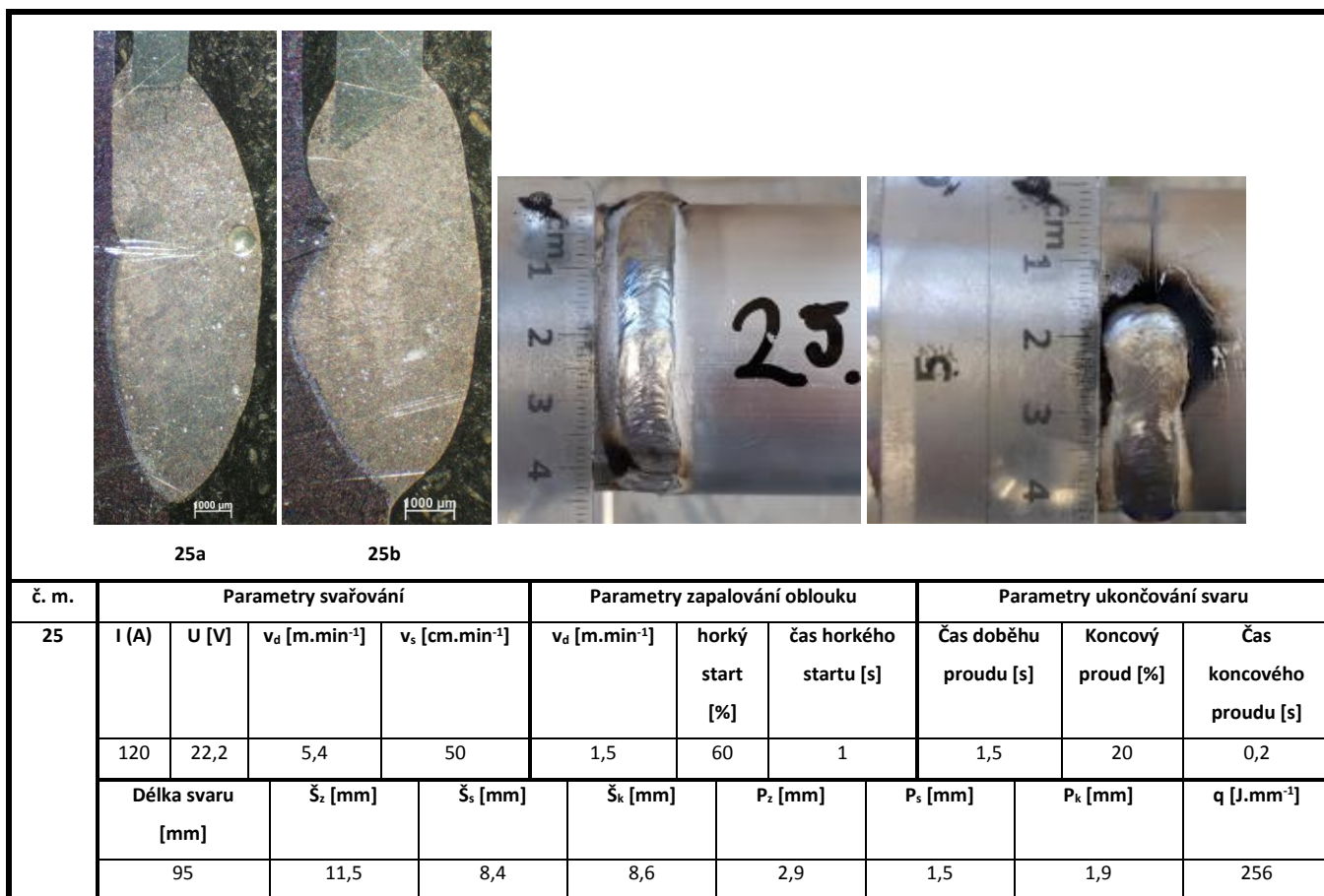
Obrázek 64 - Měření číslo 19

V měřeních číslo 20 až 21 proběhly pokusy s využitím záporných hodnot horkého startu. Porovnání průběhů proudu získané z programu WeldMonitor při horkém startu +50 %, -50 % můžeme vidět na obrázku 65. Náhlý pokles proudu na konci dolní křivky (-50 %) je způsoben snížením parametrů ukončování svaru na 0, které bylo použito u druhé (napojené) housenky v měření číslo 21. Pro malé množství vneseného tepla v počátcích svařování nedocházelo k průvaru obdobně jako při pokusech na hliníkovém plechu, které svařování na konstrukci předcházely. Z těchto důvodů se od pokračování v těchto pokusech upustilo.



Obrázek 65 - Průběhy svařovacích proudů

Měřením číslo 23 došlo ke změně používaného plynu, kdy byl Ar 4.6 nahrazen směsí Ar 50 % + He 50 %. Díky vysokému obsahu He ve směsi se zvyšuje tepelný výkon, od kterého se očekával pozitivní účinek na tvar a rozměry svaru, ale také snížení množství pórů ve svarovém kovu.




Obrázek 66 - Měření číslo 25 (zvětšení makrostruktur 10x)

Z důvodu zajištění stability oblouku byly provedeny korekce velikosti napětí. Nejdříve v měření číslo 23 na 20,3 V a následně u zbytku měření na 22,2 V. Obdobně jako při využití Ar i v případě směsi byla provedena korekce dráhy a posunutí drátu 1,5 mm od hrany odlitku z důvodu propalů, které vznikaly v předcházejících měřeních. Změna plynu měla ihned v prvním měření pozitivní vliv na velikost šířky svaru a převýšení ve všech měřených parametrech. Vysoká hodnota převýšení (2,9 mm) v počátku svařování u měření číslo 25 (viz obrázek 66) byla spíše výjimečná a ve zbytku měření se pohybovala okolo

hodnoty 2,2 mm. Svary měly pravidelné vrstvení s lesklým povrchem včetně snadno odstranitelných zbytků zplodin.

Jak je vidět z makrostruktur vzorků 25b, ale především 25a, množství pórů ve svarovém kovu zůstalo téměř beze změny. Ze vzorku 25a, je navíc patrný velký pór ve svarovém kovu, jehož poloha odpovídá póru z měření 13 (viz obrázek 61), který naznačuje, že nedošlo ani ke změně směru šíření. Současně byla provedena kontrola makrostruktury teplem neovlivněného odlitku, která kromě zbytků mezidendritických staženin nepotvrdila odlitek, jako možný zdroj pórovitosti. Řešením by proto mohla být změna typu přídatného materiálu, která by mohla dopomoci k odstranění vznikajících vad.



**28b**

č. m.	Parametry svařování				Parametry zapalování oblouku			Parametry ukončování svaru		
	I [A]	U [V]	$v_d$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$v_s$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	$v_d$ [m.min <sup>-1</sup> ]	horký start [%]	čas horkého startu [s]	Čas doběhu proudu [s]	Koncový proud [%]	Čas koncového proudu [s]
28	120	22,2	5,4	50	1,5	70	0,7	1	20	0,2
	Délka svaru [mm]		$\check{s}_z$ [mm]	$\check{s}_s$ [mm]	$\check{s}_k$ [mm]	$P_z$ [mm]	$P_s$ [mm]	$P_k$ [mm]	q [J.mm <sup>-1</sup> ]	
	95		13,7	9,1	9,3	2,2	3,0	1,7	256	

Obrázek 67 - Měření číslo 28 (zvětšení makrostruktury 10x)

V měření 28 byla provedena zkouška napojení svaru, při které byla dráha robota rozdělena na dvě části. První housenka měla parametry nastaveny tak, jak je uvedeno na obrázku 67, a u druhé byly změněny parametry ukončování svaru (čas doběhu proudu 0,4 s, koncový proud 50 % a čas koncového proudu 0,2 s). V této oblasti nedošlo ke zlepšení oproti použití Ar 4.6 a odměřené parametry (šířka svaru 13,2 mm, převýšení 3,7 mm) se nadále nepřibližovaly požadavkům.

Pórovitost je soustředěna především v místech napojení vrstev jednotlivých svarových kovů, jako tomu bylo v měření 17 (viz obrázek 63) a lze konstatovat, že ani zde nedošlo k posunu k lepším výsledkům.



## 8.3 Vyhodnocování provedených svarových spojů

Pro porovnání svarových spojů bylo kromě vizuální kontroly provedeno srovnání makrostruktur a u vybraných vzorků i mikrostruktur svarů. Dále pak byly provedeny zkoušky tvrdosti dle Vickerse. Sledovány byly struktury a tvrdosti ve spojích vyhotovených robotickým svařováním MIG i ručně svařovanými spoji metodou TIG, které byly dodány.

### 8.3.1 Porovnání makrostruktur svarových spojů

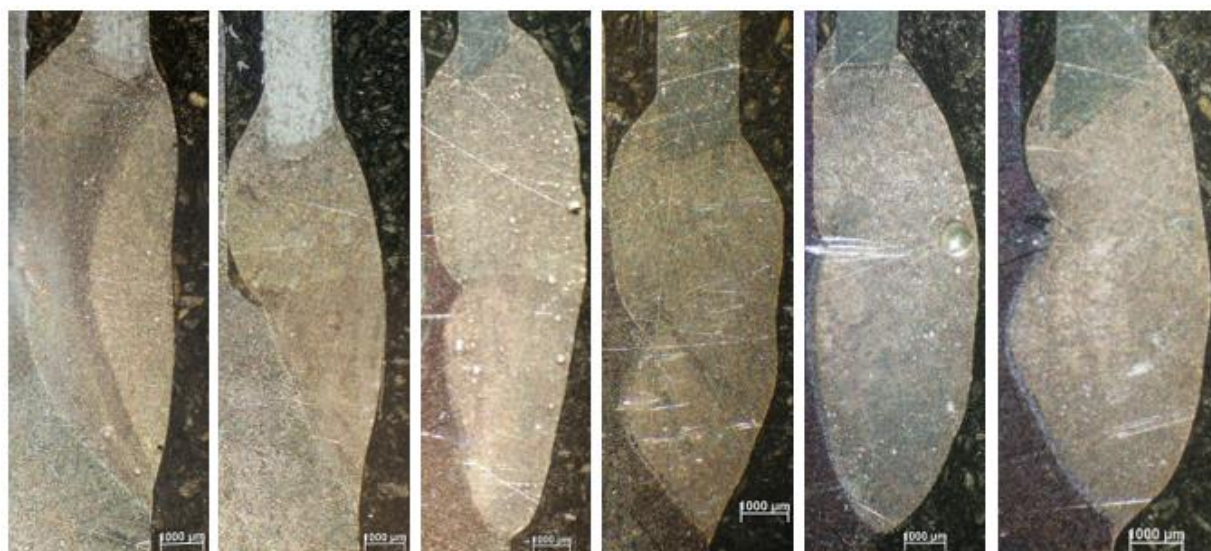
Makroskopické zkoušky slouží k pozorování vzorků (svarových spojů) v příčném řezu ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení. Vzorky jsou pro potřebu zkoušky vybroušeny, vyleštěny a případně i naleptány. Příprava vzorků pro mikroskopickou a makroskopickou zkoušku podléhá normě ČSN EN ISO 17693, ve které jsou uvedeny doporučení pro přípravu vzorků, zkušební postupy a hodnocení struktury. Cílem zkoušky může být hodnocení tvaru svaru, tvaru a šířky TOO, způsobu kladení housenek aj.

Na svarech byly prováděny makroskopické zkoušky pro sledování tvaru svaru a průvarů ve stanovených místech (počáteční a střední část svaru). Pro metodu MIG byly vybrány vzorky 13a, 13b (svařovány v ochranném plynu Ar 4.6) a 25a, 25b (svařovány v ochranném plynu Ar 50 % + He 50 %). Snímky byly pořizovány v laboratořích metalografie Ústavu strojírenské technologie ČVUT FS na mikroskopu AxioCam ERc 5s a NEOPHOT 21.

Vzorky TIG použité pro získání makrostruktury a mikrostruktury byly dodány firmou MILOS s.r.o. Roudnice nad Labem. Poskytnuté parametry svařování a odměřené parametry svaru jsou uvedeny v tabulce 20. Jedná se o ručně svařované obvodové svary, které byly následně rozřezány na dvou sledovaných místech (TIG I - počátek/konec svaru, TIG II - střední část svaru).

Tabulka 20 - Parametry svaru a svařování TIG vzorků

Parametry svařování			
Svařovací zdroj	Migatron PI 500	Svařovací hořák	-
PM	AlSi5	Ochranný plyn	Argon 4.6
typ elektrody	WP	průměr elektrody [mm]	3,2
$I_p$ [A]	325	$I_b$ [%]	80
$v_s$ [cm.min <sup>-1</sup> ]	cca 12,6		
Parametry svaru			
šířka počátku/konce svaru [mm]	11,1	převýšení počátku/konce svaru [mm]	0,7
šířka středu svaru [mm]	10,5	převýšení středu svaru [mm]	0,6



**TIG I**

**TIG II**

**MIG 13a**

**MIG 13b**

**MIG 25a**

**MIG 25b**

Obrázek 68 - Porovnání makrostruktur vybraných vzorků (zvětšení 10x)

Z makrostruktury vzorků TIG, které můžeme vidět na obrázku 68, je patrné problematické spojení v horní části svaru, kde je nutné překonat mezeru mezi odlitkem a trubkou. V těchto místech po svaření nedošlo ke spojení materiálů, jak bude lépe vidět z mikrostruktur. Pórovitost ve svarových spojích je minimální, ale lze si povšimnout mírně zvýšené pórovitosti ve spodní části svaru TIG I, která mohla vzniknout z důvodu menšího množství přídatného materiálu a nižší teploty v okrajové části svaru. Rychlejší krystalizace v této oblasti zapříčinila, že hliníková slitina již byla v plastickém stavu a část např. vodíku zde nestačila včas vydifundovat na povrch. V makrostruktura TIG I je také možné vidět vrstvení svarového kovu při napojování, které u vybraných vzorků pro porovnání metodou MIG zkoušeno nebylo. Svary získané metodou TIG splňují veškeré požadované nároky, které byly stanoveny. Ve zkoumaných vzorcích byly splněny nároky na výšku převýšení i šířku svaru, povrch svaru je lesklý a pravidelný, bez větších tvarových výkyvů.

Svary 13a a 13b svařované v ochranné atmosféře Ar 4.6 mají vysokou pórovitost v celém objemu svarového kovu. Vzorek 13a navíc nesplňuje požadavky na výšku převýšení a šířku svaru z důvodu, které již byly popsány. Tvary svarů jsou s přihlédnutím na výsledky prováděných měření pravidelné, avšak srovnáme-li je se vzorky zhotovenými metodou TIG, nedosahují ani v této oblasti takové kvality. Sníženou kvalitu v oblasti rozměrů svaru, pravidelnosti a celkového výsledného vzhledu lze přisoudit i k samotným použitým metodám svařování, kde je metoda MIG více omezena svým principem.

Použití směsi s vysokým obsahem He dopomohlo svarům ke splnění, nebo alespoň přiblížení se požadavkům na šířku svaru a převýšení. Svým tvarem a lesklým povrchem jsou srovnatelné se vzorky vyhotovenými metodou TIG. Hlavním problémem, tak zůstává rozsáhlá pórovitost ve svarovém kovu, která vznikala především při zapalování oblouku.

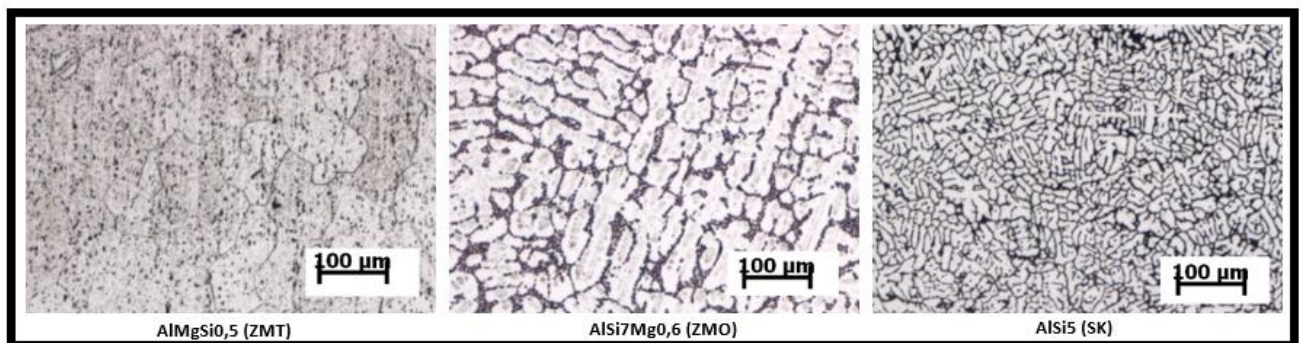
### 8.3.2 Porovnání mikrostruktur svarových spojů

Podobně jako u makroskopické zkoušky jsou i zde vzorky pozorovány v příčném řezu k ose svaru, ovšem při několikanásobně větším zvětšení. Mikroskopické zkoušky slouží k pozorování zrn materiálu, hranic zrn, strukturních složek materiálu či TOO.

Kontrola mikrostruktur byla pro potřeby experimentu prováděna v laboratořích metalografie Ústavu strojírenské technologie ČVUT FS. Porovnávané vzorky byly stejné jako při porovnání makrostruktur. Postup přípravy vzorku včetně použitých zařízení a přípravků byl následující:

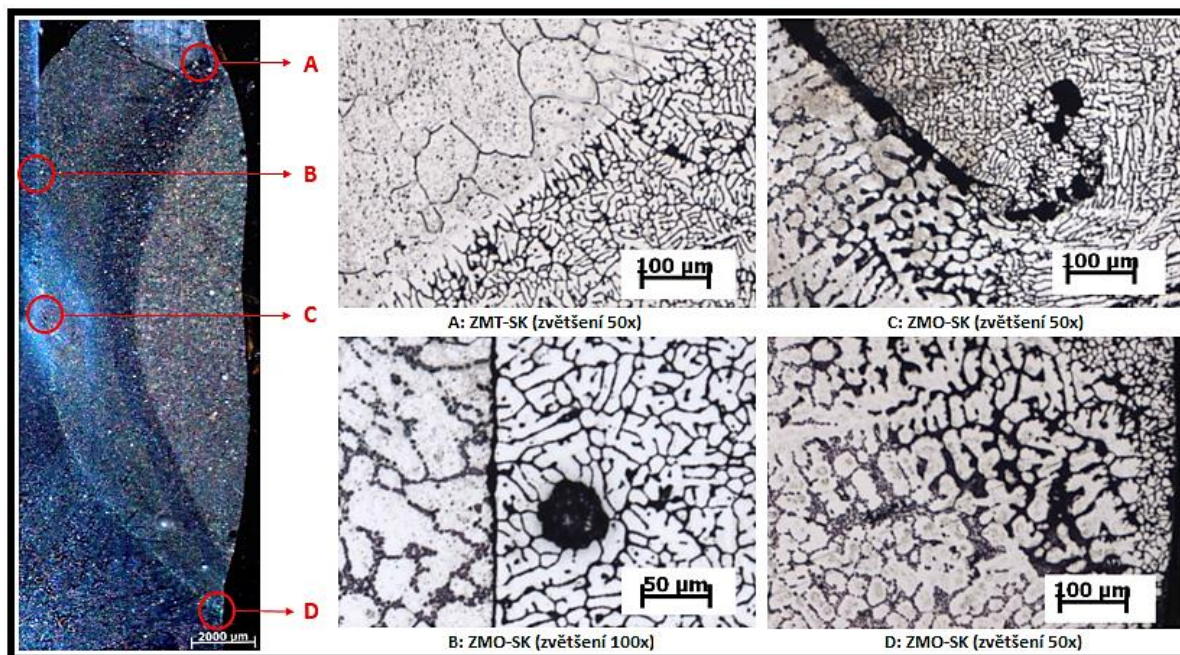
1. Rozřezání svarů na rozbrušovací pile Labotom 3.
2. Zalisování vzorků do formy na metalografickém lisu CitoPress.
3. Broušení vzorků brusným papírem (P180, P1200, P2000) s vodní suspenzí přítlakem 30 N s následným oplachem a sušením.
4. Leštění textilním plátnem (smáčedlo MetaDi Fluid, diamant monokrystal 3  $\mu\text{m}$ , poté vodní suspenze, MasterPrep 0,05  $\mu\text{m}$ ) s následným oplachem a sušením.
5. Naleptání vzorků leptadlem pro hliník a slitiny hliníku.
6. Pořízení snímků na mikroskopu Zeiss Axio Observer D1m a NEOPHOT 21.

Obrázek 69 zachycuje jednotlivé struktury materiálů ve svarových spojích prováděného experimentu, včetně jejich označení a zkratk uvedených v závorce. Zkratky jsou využívány v následujících obrázcích této kapitoly a při měření tvrdosti.



Obrázek 69 - Mikrostruktura základních materiálů a svarového kovu (zvětšení 50 x)

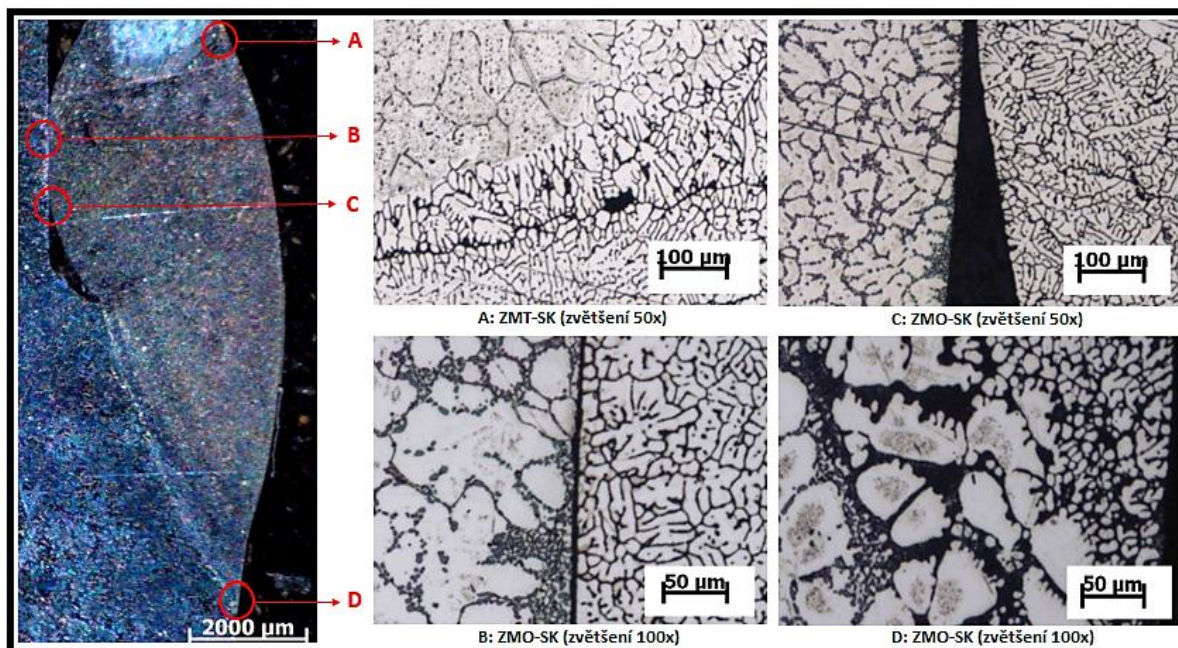
Mikrostruktura tvářené slitiny AlMgSi<sub>0,5</sub> (levý obrázek 69) použitá v experimentu obsahuje dobře viditelné „pásky“ černých útvarů (tzv. řádkovitost) vytvářející fáze Mg<sub>2</sub>Si. U slitiny AlSi<sub>7</sub>Mg<sub>0,6</sub> vidíme dendrity primární fáze  $\alpha$  (Al) a mezi dendrity se nacházející křemíkové eutektikum. Podle charakteru útvarů křemíku je zřejmé, že slitina byla tepelně zpracována. Dále si můžeme povšimnout výrazně jemnější struktury svarového kovu ve srovnání s materiálem AlSi<sub>7</sub>Mg<sub>0,6</sub>.



Obrázek 70 - Mikrostruktura vzorku TIG I (zvětšení makrostruktury 8x)

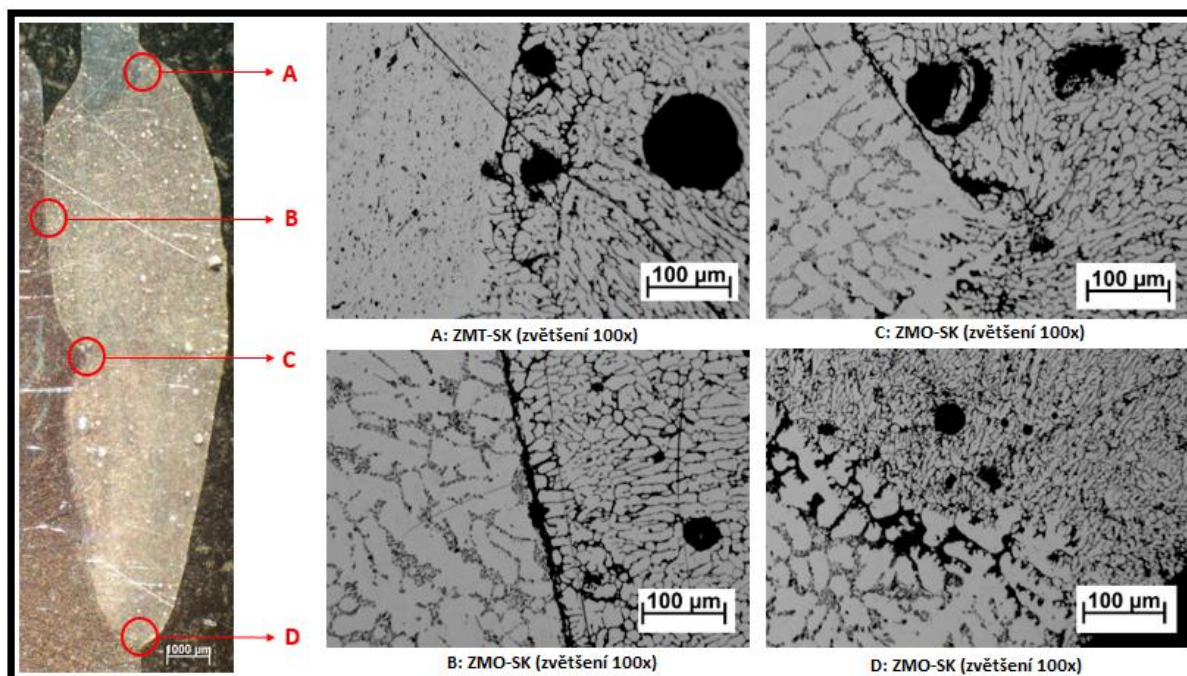
Obrázek 70, stejně jako zbylé obrázky kapitoly 8.3.2, ukazuje mikrostrukturu v důležitých oblastech svaru nebo místa, kde se vyskytovala určitá vada. Mikrostruktura v místě spojení SK s ZMT (pozice A) vykazuje nižší koncentraci vytvrditelné fáze  $Mg_2Si$ , která by se měla projevit sníženou tvrdostí v těchto místech. V oblasti spojení SK a ZMO (pozice D) lze dobře vidět přechod z modifikované struktury s jemnými krystaly křemíku do vysoké koncentrace hrubých a křehkých krystalů křemíku, který by měl vést opět ke snížení tvrdosti v těchto místech. Pórovitost vzorku TIG I byla všeobecně nízká a v ojedinělých případech se ve vyšších koncentracích vyskytovala pouze v dolní části svaru. Výjimečnou situací je pór, který můžeme vidět v pozici B. Pozice B, respektive C také ukazují na problém zmíněný již při porovnání makrostruktur. Neprůvar mezi SK a ZMO, vzniklý mezerou mezi uvedenými materiály, dosahoval po odměření šířky  $3,3 \mu m$ . Plný průvar nastal až při těsném spojení materiálů (pozice C), které poukázalo na důležitost přesného dodržení sesazení trubky s odlitkem před svařováním.





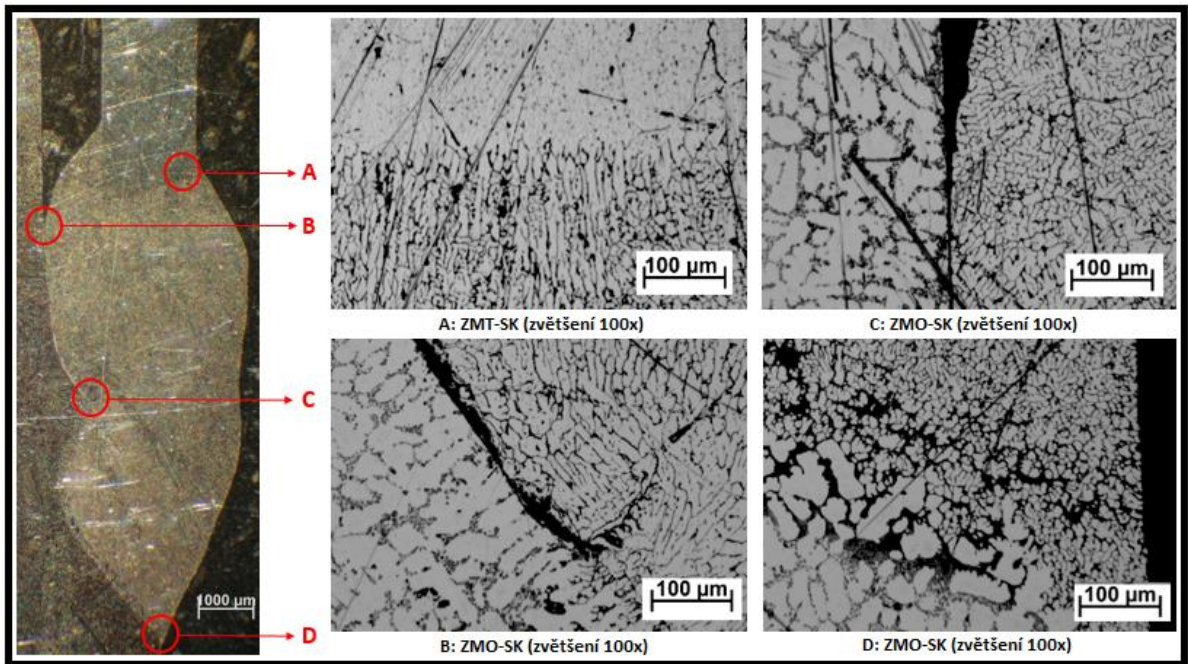
Obrázek 71 - Mikrostruktura vzorku TIG II (zvětšení makrostruktury 8x)

Mikrostruktury u vzorků TIG I a TIG II se veskrze příliš nelišily a došlo zde „pouze“ k nižšímu výskytu pórů. Znatelný rozdíl nastal pouze u velikosti neprůvaru, který dosahoval v pozici B velikosti 6,1 μm a v pozici C byl patrný pouhým okem. Menší mezera vzorku TIG I je dána napojováním svaru v těchto místech při ukončování svařování, kdy došlo k opětovnému natavení a vyššímu průvaru.



Obrázek 72 - Mikrostruktura vzorku MIG 13a (zvětšení makrostruktury 10x)

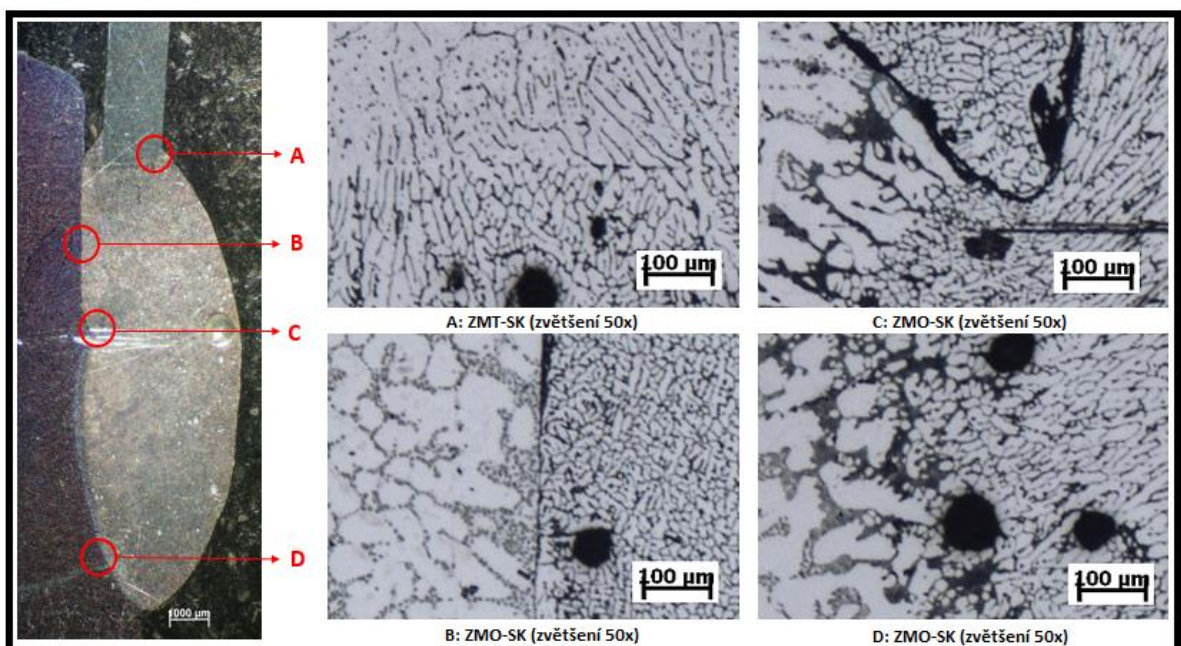




Obrázek 73 - Mikrostruktura vzorku MIG 13b (zvětšení makrostruktury 10x)

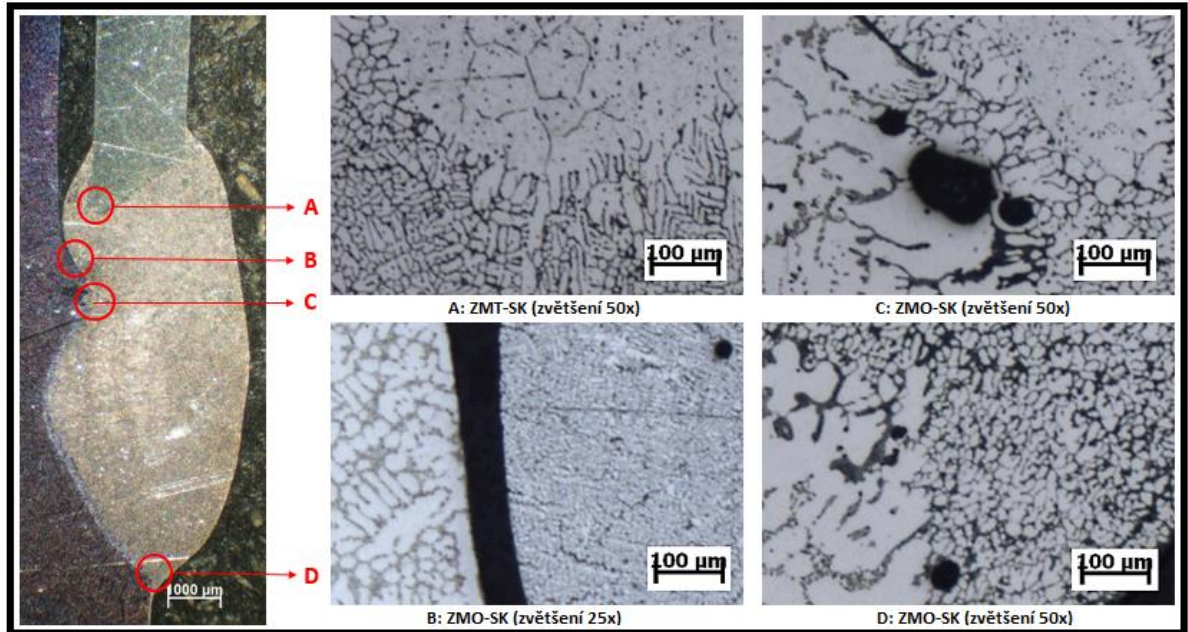
Poznámka: vzorky 13a a 13b obsahují ve snímcích mikrostruktury množství rýh vzniklých při přípravě vzorků, které se nepodařilo odstranit.

Mikrostruktura vzorků 13 ukázala (především u vzorku 13a) množství pórů vyskytujících se ve větší koncentraci v hraničních oblastech svarového kovu. Vzhledem k výměně přídatného materiálu před tímto měřením lze říci, že hlavním faktorem pro snížení pórovitosti je množství vneseného tepla. Zároveň ani v jednom z případů se nepodařilo dosáhnout průvaru v horní části svaru, tak jako tomu bylo u vzorků TIG, a mezera zde dosahovala šířky 7 μm u vzorku 13a, respektive 1,4 μm u vzorku 13b.



Obrázek 74 - Mikrostruktura vzorku 25a (zvětšení makrostruktury 10x)

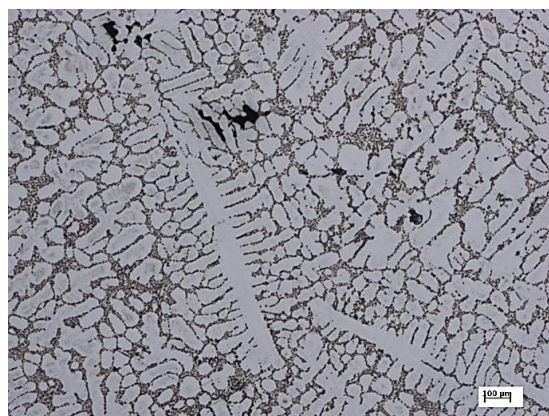
V mikrostruktuře vzorku 25a (viz obrázek 74), můžeme vidět rozsáhlou pórovitost nacházející se především v oblastech spojení jednotlivých materiálů, stejně jako tomu bylo na obrázku 72. Pozice B naznačuje, že v některých místech docházelo téměř ke spojení ZMO se SK. Mezery, které se zde objevují dosahují šířky 0,8  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 75 - Mikrostruktura vzorku 25b (zvětšení makrostruktury 10x)

Při vzniku mezery mezi ZMO a SK došlo v případě vzorku 25b (viz obrázek 75,) ke změně jejího charakteru a rychlejšímu plnému průvaru. Mezera, která je v počátku patrná již z makrostruktury se rychle uzavírá a na svém konci (pozice C) nemá charakteristický spirálový tvar, který bylo možné vidět u předchozích vzorků.

Poznámka: na obrázku 76 můžeme vidět teplem neovlivněný základní materiál (AlSi7Mg0,6), který byl podroben kontrole. Ve struktuře si můžeme povšimnout formování dendritů, ale také mezidendritických staženin (zmněny v kapitole 8.2.3), které vyplňují prostor mezi krystaly.

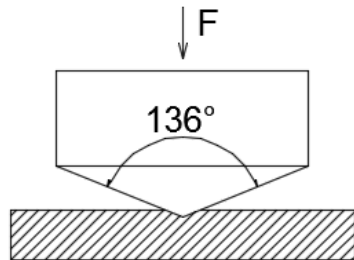


Obrázek 76 - Struktura teplem neovlivněného odlitku (zvětšení 50x)



### 8.3.3 Porovnání tvrdosti svarových spojů

Tvrdost je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Měření tvrdosti dle Vickerse spočívá ve vtláčování diamantového čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° do materiálu stanovenou silou F (viz obrázek 77). Po provedení vtisku je nutné odměřit uhlopříčku, která je dosazena do vztahu pro výpočet tvrdosti.



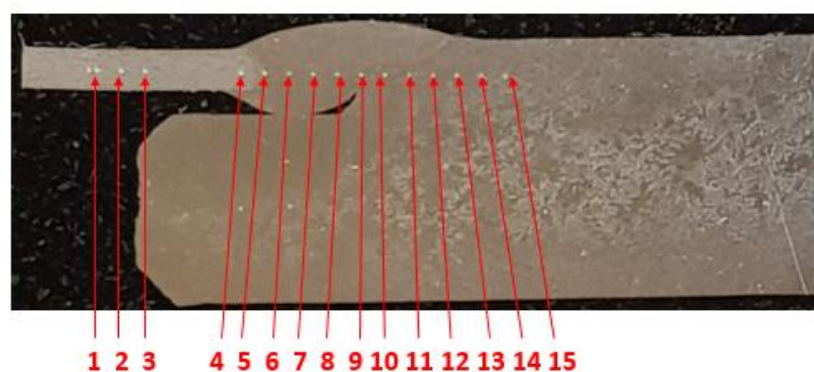
Vztah pro výpočet tvrdosti dle Vickerse:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (2)$$

kde u - průměrná hodnota uhlopříčky [mm],  
F - zátěžná síla

Obrázek 77 - Zkouška dle Vickerse

Měření tvrdosti v této práci bylo prováděno na tvrdoměru IndetntaMe t1104 u vybraných vzorků pro metodu TIG (TIG I, TIG II) a MIG (13a, 13b, 25a, 25b). Přítlačná síla při zkoušce byla 1 kg (HV1) a doba zatížení 12 s. Celkem bylo uděláno 15 vpichů (viz obrázek 78) pro každý vzorek, přičemž vzorek byl vždy rozdělen do pěti oblastí, kde se provedli tři vpichy v rozestupu 1 mm. Jedná se o oblasti ZMT (základní materiál AlMgSi0,5), SK (AlSi5), ZMO (AlSi7Mg0,6) a poté přechodové oblasti mezi uvedenými materiály. Rozdělení vzorků do těchto oblastí bylo provedeno z důvodu nesymetričnosti vzorků a pro možnost porovnání velikosti snížení tvrdosti v TOO. Dále bylo provedeno měření tvrdosti tepelně neovlivněných základních materiálů pro určení jejich počáteční tvrdosti před svařováním. Průměrná hodnota tvrdosti u těchto vzorků byla naměřena 83 HV1 pro ZMT a 128 HV1 pro materiál ZMO.



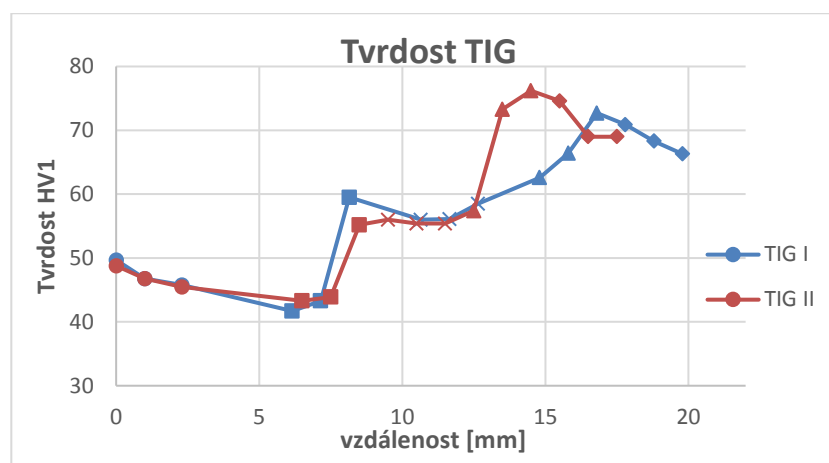
Obrázek 78 - Příklad měření tvrdosti (vzorek TIG I)



Tabulka 21 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků

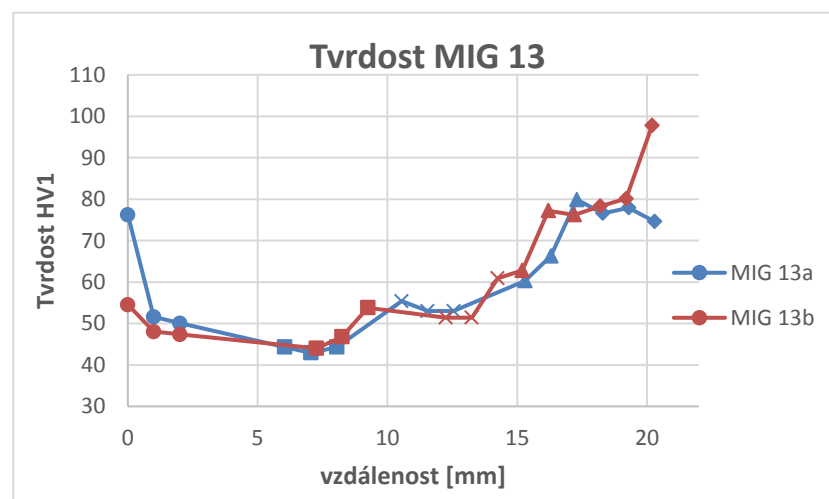
	oblast ZMT			oblast ZMT-SK			oblast SK			oblast ZMO-SK			oblast ZMO		
č. m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>TIG I</b> [HV1]	49	47	45	41	43	59	56	56	58	62	66	72	70	68	66
<b>TIG II</b> [HV1]	48	47	45	43	43	55	56	55	55	57	73	76	74	69	69
<b>MIG 13a</b> [HV1]	76	51	50	44	42	44	55	53	53	60	66	79	76	77	74
<b>MIG 13b</b> [HV1]	54	48	47	44	46	53	51,4	51	60	62	77	76	78	80	97
<b>MIG 25a</b> [HV1]	60	44	44	47	52	58	62	60	60	60	82	77	76	79	107
<b>MIG 25b</b> [HV1]	74	64	51	49	52	61	62	64	64	63	79	75	76	75	78

Naměřené hodnoty tvrdosti, které jsou uvedeny v tabulce 21 ukazují, že změna tvrdosti v nejméně TOO (ZMT-SK, SK, ZMO-SK) nebyla zásadně ovlivněna zvolenou metodou svařování a hodnoty se řádově příliš neliší. Nižší pokles tvrdosti, lze zaznamenat až u měření MIG 25a v oblasti ZMO nebo MIG 13a v oblasti ZMT. Skoková změna některých hodnot, jako např. u měření číslo 1 (MIG 13a) nebo 15 (MIG 25a), oproti zbylým hodnotám je dána ne zcela totožným rozmístěním vpichů ve vzorcích z důvodu rozdílných tvarů svaru. Je tedy velmi pravděpodobné, že v těchto místech měření došlo k velkému vzdálení od hlavní TOO a pokles tvrdosti zde bude nižší, jak můžeme také vidět v grafu 8 a grafu 9. Pro potvrzení těchto závěrů bylo u vzorku MIG 13a provedeno další měření („měření číslo 0“), u kterého byla naměřena tvrdost 86 HV1. Vezmeme-li v úvahu velikost použitého proudu (325 A) a rychlost svařování ( $v_s=12,6 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ), u ručního svařování metodou TIG bude množství vneseného tepla zřejmě vyšší ve srovnání s roboticky svařeným vzorkem 13 ( $q=222 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) a tím i větší rozsah TOO, který způsobí vyšší pokles tvrdosti. Celkový rozsah TOO nebylo možné z důvodu omezené velikosti připravovaných vzorků odhalit.



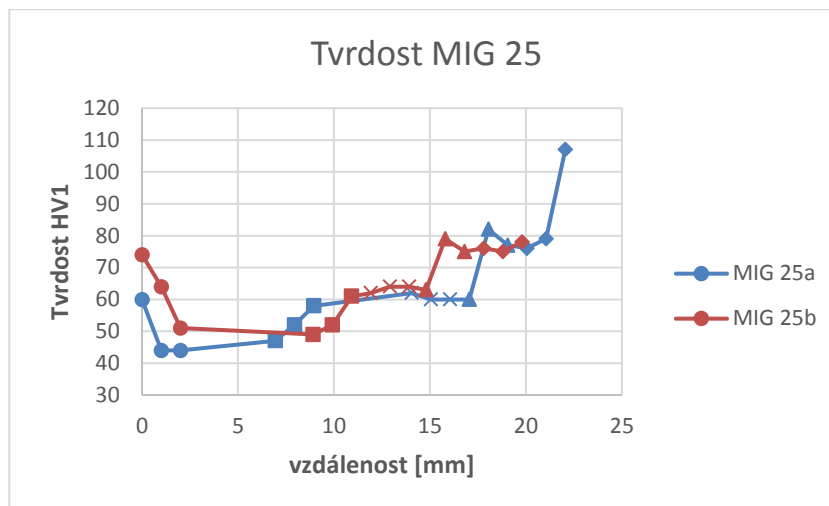
Graf 7 - Průběh měření tvrdosti vzorků TIG

V grafu 7 můžeme vidět průběh naměřené tvrdosti ve vzorcích svařených metodou TIG. Nejvyšší pokles tvrdosti nastal v oblasti ZMO, kde došlo ke snížení tvrdosti o 46 % u vzorku TIG I. V oblasti ZMT tvrdost klesla shodně u obou vzorků o 43 %.



Graf 8 - Průběh měření tvrdosti vzorků MIG 13

Ztráta tvrdosti byla u vzorků svařovaných v ochranné atmosféře Ar 4.6 (MIG 13), nižší v obou oblastech základního materiálu ve srovnání s metodou TIG. K nejvyšší ztrátě došlo u vzorku 13a (40 %) v oblasti ZMO, naopak nejméně poklesla tvrdost v oblasti ZMT u stejného vzorku o 29 %.



Graf 9 - Průběh měření tvrdosti vzorků MIG 25

Při měření tvrdosti byl stejně, jako u vzorku MIG 13 zaznamenán nižší pokles tvrdosti. K nejvyššímu poklesu tvrdosti došlo u vzorku MIG 25a (41 %) v materiálu ZMT. Nejnižší pokles byl naměřen u vzorku MIG 25b v materiálu ZMT, kde nastal pokles 24 %.

Velké množství tepla přivedené do svaru u metody TIG způsobuje, dle zjištěných výsledků, větší ztrátu mechanických vlastností. Z hlediska množství vneseného tepla tak metoda MIG při použití ochranného plynu Ar 4.6, respektive Ar 50 % + He 50 % dosahuje lepších výsledků. Ovšem zajistíme-li více vneseného tepla do svaru, umožníme vodíku lépe unikát a tím bude struktura svarových spojů méně náchylná na vznik pórů.

## 9 Závěrečné shrnutí

V první části diplomové práce byl proveden teoretický rozbor možných metod robotického svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách (TIG, MIG, CMT) hliníku a hliníkových slitin. Byly studovány technologické zásady pro svařování hliníkových konstrukcí a jejich svařitelnost.

Praktická část práce se věnovala svařování hliníkové konstrukce, u které bylo nutné vyřešit řadu počátečních problémů. Prvním problémem bylo zajištění tuhého upnutí příhradové konstrukce, tak aby bylo možné snadné vyjmutí a zároveň splňovala požadavky na dostatečnou tuhost, která zabrání deformacím v průběhu svařování a bude zajištěno přesné sesazení svařované trubky s odlévanou podstavou.

Při samotném svařování impulsní metodou MIG bylo zprvu provedeno několik desítek „cvičných“ návarů na hliníkových plechách, pro lepší porozumění vlivů nastavování parametrů při zapalování oblouku a ukončování svaru. Získané poznatky posloužily jako dobrý základ pro první svary a pomohly vyřešit např. vznikající krátery na konci svarů.

Svařování hliníkové konstrukce řešilo problémy týkající se vysokého převýšení a šířky svaru, pórovitosti a možného napojování svarů v případě poruch nebo ukončování svařování.

V průběhu experimentu se po nastavení vhodných kombinací parametrů podařilo šířku svaru a výšku převýšení ve střední části dostat do požadovaných mezí, přibližně od měření číslo 13 již tyto problémy nevznikaly. Problém převýšení a šířky svaru při zapalování oblouku, kdy byl jako ochranný plyn použit Ar 4.6, se vyřešit nepodařilo, ale byla navržena možná řešení problému (např. drážka v odlitku simulovaná v měření číslo 19). Využitím směsi Ar 50 % + He 50 % jako ochranného plynu přineslo zlepšení v podobě snížení přítomnosti pórů a snížení převýšení.

V případě pórovitosti u měření s čistým Ar 4.6 nedocházelo k žádným posunům k lepším výsledkům. I přes očištění svarových ploch technickým lihem a drátěným kartáčem s nerezovými štětinami, či výměnou přídavného materiálu za nový i se všemi komponenty, docházelo k rozsáhlému výskytu pórů v celém objemu svarů (především u vzorků získaných v místě zapalování oblouku). Změna ochranného plynu v tomto případě nepřinesla žádné pozitivní výsledky a pórovitost vznikala dále.

Napojování jednotlivých svarů u obou ochranných plynů nepřineslo pozitivní výsledky. Svary se potýkaly se stejnými problémy jako při zapalování oblouku, a především výška převýšení zde byla zcela mimo stanovené meze.

Kontrola makrostruktury u vybraných vzorků ukazuje požadovaný průvar ve všech případech. Porovnání mikrostruktur u vzorků TIG a MIG (13a, 13b, 25a, 25b) neukázalo žádnou zvláštní odchylku ve formování struktur svarů, ale potvrdilo rozsah značné pórovitosti u vzorků MIG. Při porovnání tvrdosti

pro metodu TIG (TIG I, TIG II) a MIG (13a, 13b, 25a, 25b) v jednotlivých oblastech svaru vycházely výsledky poklesu tvrdosti lépe pro metodu MIG. Rozdíl ve velikosti poklesů v TOO se ale lišil pouze v řádech 5 %. Proto s ohledem na výrazně nižší pórovitost u vzorků TIG i při vyšší TOO a v ní snížené tvrdosti lze říci, že pokles je zanedbatelný.

Z experimentální části vyplývá, že velké tepelné pnutí ve svařované konstrukci způsobovalo deformace v průběhu svařování a při chladnutí, se kterými bude nutné počítat při navrhování upnutí u robotizovaného svařování. V praxi bude nutné použití např. dvou masivních desek s chladícími trny ze stran, které budou držet celou sestavu dílů pohromadě a budou velmi dobře odvádět teplo v průběhu svařování. Svary vyhotovené metodou MIG byly velmi náchylné na tvarové vady a množství pórů.

Ve srovnání s ručním svařováním TIG však byla zajištěna výrazně vyšší rychlost svařování ( $50 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ), ale také nižší pokles tvrdosti. Závěrem lze říci, že se nepodařilo nalézt pomocí uvedených postupů a parametrů svar vyhotovený metodou MIG, který by odpovídal požadavkům. Zjištěné poznatky pomohou při pokračování výzkumu k nalezení kombinace proměnných a parametrů, které by umožnily dosáhnout požadovaných cílů.

V případě dalšího pokračování experimentu by bylo dobré využití speciálně tvarovaného hořáku, který by umožnil vytvořit svar po celém obvodu. Nebo provést např. rozřezání konstrukce na menší díly, které by se upnuly mezi dva otáčecí trny na polohovadle, čímž by bylo možné svařit celý obvodový svar i s napojením. Dalším pokračováním by mohla být změna typu přídavného materiálu (např. AlSi12) a jeho vlivu na tvorbu pórů, vyzkoušení sprchového přenosu při zapalování oblouku s následným přechodem do impulsního přenosu a rozdělení svarové dráhy do sekcí s korekcí parametrů.

Další důležitý poznatek vede k programování dráhy robota, která by se měla skládat z více kratších úseků. V okamžiku, kdy je délka mezi dvěma body příliš vzdálená a hořák by měl opisovat kruhovou dráhu, po které svařuje, dochází k rovným přejezdům. V průběhu přesouvání se mění délka oblouku a dochází k jeho destabilizaci.

## SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Milos* [online]. Roudnice nad Labem: MILOS [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.milossystems.com/>
- [2] TIG (Tungsten Inert Gas Welding). *Automig* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
- [3] *Příručka svářeče* [online]. Děčín: Air products [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: [http://www.airproducts.cz/~media/Files/PDF/industries/metals/CZ\\_Priruckasvarece.pdf?la=cs-CZ](http://www.airproducts.cz/~media/Files/PDF/industries/metals/CZ_Priruckasvarece.pdf?la=cs-CZ)
- [4] *O svařovařovací metodě TIG* [online]. 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.alfin-trading.cz/o-svarovani-tig>
- [5] *Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu WIG (TIG)-141* [online]. In: . Ostrava: VSB, 2009, s. 5 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/09-141.pdf>
- [6] *TIG svařování I - základní principy*. [online]. 2009 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702&>
- [7] *Svařování TIG - AC nebo DC?* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-ac-nebo-dc/t-68/t-122>
- [8] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02351-6.
- [9] *Mezníky technologie TIG AC/DC pro svařování hliníku* [online]. Ostrava: Hadyna - International, 2 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-ac-nebo-dc/t-68/t-122>
- [10] ARCLINE PP: TIG quality at MIG productivity in aluminium welding. *Linde* [online]. , 12 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: [https://www.linde-gas.com/en/images/ARCLINE%20PP%20brochure\\_tcm17-430029.pdf](https://www.linde-gas.com/en/images/ARCLINE%20PP%20brochure_tcm17-430029.pdf)
- [11] *TIG LP 200 L/P AC-DC* [online]. Třebíč: OMICRON - svářečí stroje, 2013 [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: [http://www.omc.cz/prilohy/TIG\\_200LP\\_AC-DC.pdf](http://www.omc.cz/prilohy/TIG_200LP_AC-DC.pdf)
- [12] SLABÝ, Ondřej. *Vysokorychlostní TIG Svařování austenitické oceli metodou TIG* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf16/6532.pdf>. ČVUT. Vedoucí práce Karel Kovanda.
- [13] Shielding Gases. *Linde* [online]. 28 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://docplayer.net/21279504-Shielding-gases-innovation-consultation-application.html>
- [14] *TIG welding – Method and Application* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: [https://www.electrocal.com/pdf/TIG\\_Welding.pdf](https://www.electrocal.com/pdf/TIG_Welding.pdf)
- [15] ČSN EN ISO 6848. *Obloukové svařování a řezání - Netavící se wolframové elektrody - Klasifikace*. 2016.
- [16] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [17] KOUTNÝ, Jiří. *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování* [online]. [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://www.ews.cz/files/servis/hlinik.pdf>
- [18] *Úvod do svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách* [online]. 30.6.2016, , 1 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://svarox.cz/uvod-do-svarovani-elektrickym-obloukem-v-ochrannych-atmosferach/>
- [19] *Spektrum* [online]. ESAB VAMBERK, 2010, (1) [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: [https://www.esab.cz/cz/cz/news/spektrum/upload/spektrum1\\_2010-cz\\_kor3.pdf](https://www.esab.cz/cz/cz/news/spektrum/upload/spektrum1_2010-cz_kor3.pdf)
- [20] *TIG/Hubice* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.svarujte.cz/svarovaci-technika/svarovaci-horaky/nahradni-dily/tig/hubice>
- [21] *MIG/MAG (CO2)* [online]. 1 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>

- [22] *Svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování, svařování plněnou elektrodou* [online]. [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
- [23] *Svařování - metodou MIG, MAG, TIG* [online]. 1 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://www.kovorako.cz/6119/svarovani-metodou-mig-mag-tig/>
- [24] MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování. 2.*, aktualiz. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 1998. ISBN 80-7183-285-5.
- [25] WEMAN, Klas a Gunnar LINDÉN, ed. *MIG welding guide*. USA: Woodhead publishing in materials, 2006. ISBN 0-8493-9112-1.
- [26] ORSZÁGH, Peter a Viktor ORSZÁGH. *Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000. ISBN 80-88780-36-5.
- [27] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [28] JISKRA, Milan. *POROVNÁNÍ CMT TWIN S OSTATNÍMI MIG/MAG PROCESY* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/109931290-Porovnani-cmt-twin-s-ostatnimi-mig-mag-procesy.html>. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
- [29] Svařování hliníku v ochranných plynech. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, , 40 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech.html>
- [30] *JAKÝ OCHRANNÝ PLYN SE POUŽÍVÁ U SVAŘOVÁNÍ-WIG A JAKÝ U SVAŘOVÁNÍ-MIG/MAG?* [online]. [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/schutzgase.html>
- [31] Ochranné plyny s obsahem dusíku pro svařování hliníku. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ochranne-plyny-s-obsahem-dusiku-pro-svarovani-hliniku.html>
- [32] *Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře MIG/MAG* [online]. In: . s. 15 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33457&revision=-1&instance=2>
- [33] *Svařování hliníku a jeho slitin* [online]. In: . Messer, s. 4 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: [https://www.messergroup.com/documents/20591/717449/Svarovani\\_hliniku\\_a\\_jeho\\_slitin.pdf/2e013bc9-ed92-4b66-a0e9-32bd8ac7a3c3](https://www.messergroup.com/documents/20591/717449/Svarovani_hliniku_a_jeho_slitin.pdf/2e013bc9-ed92-4b66-a0e9-32bd8ac7a3c3)
- [34] *Svařovací poloautomaty MIG, MAG* [online]. [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://www.svarovani.cz/cs/m-18-svarovaci-poloautomaty-mig-mag/>
- [35] *Lkweld* [online]. [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://www.lkweld.sk/www-zvaraciatechnika24-sk/eshop/1-1-Zvaracia-technika-zdroje/2-2-Zvaranie-MIG-MAG-CO/5/74-Origo-Mig-4004i>
- [36] CMT – COLD METAL TRANSFER: STUDENÝ SVAŘOVACÍ PROCES PRO NEJVYŠŠÍ KVALITU. *Fronius* [online]. [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt>
- [37] Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer). *Technický týdeník* [online]. 2006, 1 [cit. 2019-06-01]. 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)
- [38] SELVI, S., A. VISHVAKSENAN a E. RAJASEKAR. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. *Defence Technology* [online]. 2018, (14), 17 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S2214914717301022>
- [39] COLD METAL TRANSFER. *Fronius* [online]. 16 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://www.hbt-weld.cz/wp-content/uploads/CMT-COLD-METAL-TRANSFER.pdf>
- [40] EDOH IMOUDU, Nelson. *The Characteristic of Cold Metal Transfer (CMT) and its application For Cladding* [online]. 2017 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://munin.uit.no/bitstream/handle/10037/12968/thesis.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. The Arctic University of Norway.

- [41] CMT PULSE: ATRAKTIVNÍ SYNERGICKÉ EFEKTY. *Fronius* [online]. [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt-pulse>
- [42] *Weld+vision: TECHNO\_TOPIE* [online]. Fronius, 2008, (21) [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9601165-Casopis-pro-svarovaci-techniku-c-21-zari-2008.html>
- [43] *Weld+vision* [online]. Fronius, 2009, (24) [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/7449691-Casopis-pro-svarovaci-techniku-c-23-listopad-2009.html>
- [44] CMT ADVANCED: VYŠŠÍ ODTAVNÝ VÝKON, LEPŠÍ PŘEMOSTĚNÍ SPÁR A VYŠŠÍ STABILITA. *Fronius* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt-advanced>
- [45] CMT TWIN. *Fronius* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-high-performance/cmt-twin/cmt-twin>
- [46] CMT TWIN: TO NEJLEPŠÍ ZE DVOU SVAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ. *Fronius* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt-twin>
- [47] MOTLOCH, Jan. Nejrychlejší způsob svařování. *MM spektrum* [online]. 2013, 10.04.2013, 60 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nejrychlejsi-zpusob-svarovani.html>
- [48] *CMT Twin Process description and commissioning* [online]. Wels, Austria: Fronius, 2017 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/User%20Information/42%2C0426%2C0138%2CEN.pdf>
- [49] *CMT: Cold Metal Transfer* [online]. Wels, Austria: Fronius [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.digitalweldingsolutions.com/CMT.pdf>
- [50] TPS/i CMT. *Fronius* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://www.tps-i.com/en/cmt/>
- [51] DUCHOSLAV, Petr. 8 výhod svařovacích robotů. *Factory Automation* [online]. 19.2.2017 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/8-vyhod-svarovacich-robotu/>
- [52] KAHUDA, Stanislav. Robotizované svařování: rychlost, ale i problémy. *Technický týdeník* [online]. 3.8.2014 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/robotizovane-svarovani-rychlost-ale-i-problemy\\_26137.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/robotizovane-svarovani-rychlost-ale-i-problemy_26137.html)
- [53] *Roboty KUKA pro svařování v ochranné atmosféře* [online]. KUKA [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/odv%C4%9Btv%C3%AD/kovopr%C5%AFmysl/roboty-kuka-pro-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-v-ochrann%C3%A9-atmosf%C3%A9%C5%99e#>
- [54] BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 80-85771-72-1.
- [55] *Návod k obsluze: Robotizované svařovací pracoviště*. Migatronic.
- [56] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [57] BENEŠ, Libor. *Slitiny hliníku* [online]. In: . Praha: FS ČVUT, 4.10.2013, s. 9 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/PDF\\_01-Slitiny%20Al.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/PDF_01-Slitiny%20Al.pdf)
- [58] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [59] *Strojírenské tabulky online: Černoch, Vávra apod.* [online]. [cit. 2019-07-05]. Dostupné z: <https://www.strojnicketabulkyonline.cz/odlevani/metalurgie-slitin-hliniku/>
- [60] *Tepelné zpracování hliníkových slitin - teorie* [online]. Praha: VSCHT [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20hlin%C3%ADkov%C3%BDch%20slitin.pdf?redirected>
- [61] *Technické údaje* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/technicke-udaje>
- [62] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [63] HAJDÍK, Jiří a Michal HEINRICH. Technologie svařování hliníku a jeho slitin. *Svět Svaru* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: [http://www.kovodvorak.cz/download/technologie\\_svarovani\\_hliniku.pdf](http://www.kovodvorak.cz/download/technologie_svarovani_hliniku.pdf)



- [64] HÁJEK, Jaroslav. Hliník a možnosti jeho svařování. *Konstrukce* [online]. 10.12.2014, , 1 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/hlinik-a-moznosti-jeho-svarovani/>
- [65] KAŠPAR, Jan. Vliv ochranného plynu na tvorbu pórů při svařování hliníkových slitin metodou TIG a MIG. *Konstrukce* [online]. 2.12.2018, 1 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vliv-ochranneho-plynu-na-tvorbu-poru-pri-svarovani-hlinikovych-slitin-metodou-tig-a-mig/>
- [66] KOLAŘÍK, Ladislav a Karel KOVANDA. Svařitelnost hliníkových slitin. *MM spektrum* [online]. 13.04.2011 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin.html>
- [67] ZMYDLENÝ, T. *Trhliny při svařování hliníkových slitin řady 6 000 a 7 000*, SDSM č. 3, TM Vydavatelství, Praha, 2004.
- [68] ČSN EN 1011-4. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku*. 2004.
- [69] *PRACOVNÍ POMŮCKY PRO SVAŘOVÁNÍ POTRUBÍ* [online]. In: . Ústí nad Labem, 7.4.2014, s. 8 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://www.hala-welding.cz/file.php?nid=5135&oid=3643268>
- [70] Příklady typů spojení, příprava a realizace svařování, praktické rady. *ÚPT AVČR* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/cs/priklady-typu-spojenu-priprava-realizace-svarovani-prakticke-rady>
- [71] ČSN EN ISO 9692-3. *Svařování a příbuzné procesy - Příprava svarových ploch - Část 3: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin tavící se elektrodou v inertním plynu a wolframovou elektrodou v inertním plynu*. 2017.
- [72] KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ: Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K* [online]. Brno [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie\\_svarovani\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf)
- [73] *Vdocuments* [online]. [cit. 2019-06-16]. Dostupné z: <https://vdocuments.mx/analisis-cinematico-del-robot-fanuc-arc-mate-100ic.html>
- [74] *Sigma Galaxy 300,400,500* [online]. Migatronik CZ [cit. 2019-06-16]. Dostupné z: <http://files.inox-kt.webnode.cz/200005469-7241b733b8/Sigma%20Galaxy.pdf>
- [75] *Sigma2 300 | 400 | 500* [online]. Teplice: Migatronik [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <http://files.inox-kt.webnode.cz/200005540-9d7c89e765/Sigma2%20300-400-500.pdf>
- [76] Aluminium casting alloys. In: *Alucast* [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: [http://alucast.cz/data/userfiles/files/Alucast\\_mechanical\\_properties.pdf](http://alucast.cz/data/userfiles/files/Alucast_mechanical_properties.pdf)
- [77] *Chemweld* [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://eshop.chemweld.cz/TIG-drat-AISi5-1-6mm-d1098.htm>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>TIG/WIG</b>		Tungsten Inert Gas/Wolfram Inert Gas
<b>MIG/MAG</b>		Metal Inert Gas/Metal Active Gas
<b>CMT</b>		Cold Metal Transfer
<b>AC/DC</b>		střídavý průběh/stejnoseměrný průběh
<b>MMA</b>		svařování obalenou elektrodou
<b>TOO</b>		tepelně ovlivněná oblast
<b>PM</b>		přídavný materiál
<b>ZM</b>		základní materiál
<b>ZMO</b>		základní materiál AlSi7Mg0,6
<b>ZMT</b>		základní materiál AlMgSi0,5
<b>SK</b>		svarový kov AlSi5
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>		oxid hlinitý
<b>CO<sub>2</sub></b>		oxid uhličitý
<b>O<sub>2</sub></b>		kyslík
<b>N<sub>2</sub></b>		dusík
<b>H</b>		vodík
<b>He</b>		helium
<b>Ar</b>		argon
<b>Mg</b>		hořčík
<b>Si</b>		křemík
<b>Mn</b>		mangan
<b>Ti</b>		titan
<b>Fe</b>		železo
<b>Cu</b>		měď
<b>Ni</b>		nikl
<b>Li</b>		lithium
<b>Sr</b>		stroncium
<b>R<sub>m</sub></b>	[MPa]	pevnost v tahu
<b>R<sub>p0,2</sub></b>	[MPa]	smluvní mez kluzu
<b>A</b>	[%]	tažnost
<b>v<sub>d</sub></b>	[m.min <sup>-1</sup> ]	rychlost podávání drátu
<b>v<sub>s</sub></b>	[cm.min <sup>-1</sup> ]	rychlost svařování
<b>HB</b>		tvrdost podle Brinella
<b>HV</b>		tvrdost podle Vickerse

<b>Š<sub>z</sub></b>	[mm]	šířka počátku svaru
<b>Š<sub>s</sub></b>	[mm]	šířka ve středu svaru
<b>Š<sub>k</sub></b>	[mm]	šířka konce svaru
<b>P<sub>z</sub></b>	[mm]	převýšení svaru na počátku
<b>P<sub>s</sub></b>	[mm]	převýšení ve středu svaru
<b>P<sub>k</sub></b>	[mm]	převýšení na konci svaru

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Příhradová konstrukce pódia [1].....	10
Obrázek 2 - Princip metody TIG [4] .....	11
Obrázek 3 - TIG AC [5] .....	14
Obrázek 4 - Příklady průběhu pulsního proudu [5].....	14
Obrázek 5 - Změna proudu při režimu TIG pulsní (vlevo) a svařování TIG AC (vpravo) zdroje TIG 200L/P [11] .....	15
Obrázek 6 - Důsledky záměny plynů u metody TIG [13] .....	16
Obrázek 7 - Příklady broušení wolframových elektrod pro TIG DC a TIG AC [14].....	17
Obrázek 8 - V-A charakteristika [7] .....	18
Obrázek 9 - Moderní svařovací zdroj TIG [19].....	19
Obrázek 10 - Plynová čočka [3, 14] .....	20
Obrázek 11 - Svařovací hořák TIG [14] .....	20
Obrázek 12 - Příklady tvarů hubic [20].....	20
Obrázek 13 - Metoda MIG/MAG [22] .....	21
Obrázek 14 - Druhy přenosů kovu u MIG/MAG svařování [21] .....	22
Obrázek 15 - Sprchový přenos [25] .....	22
Obrázek 16 - Průběh svařovacích parametrů zkratového oblouku [28] .....	23
Obrázek 17 - Průběh proudu a přechod kovu u impulsního svařování [24] .....	24
Obrázek 18 - Vliv obsahu Helia a Dusíku na intenzitu průvaru [31].....	25
Obrázek 19 - Svařovací zdroj Origo Mig 4004i [35].....	26
Obrázek 20 - Vzduchem chlazený hořák MIG/MAG [24] .....	27
Obrázek 21 - Pohyb drátu a princip metody CMT [37] .....	28
Obrázek 22 - Příklady svarových spojů s použitím CMT [37] .....	29
Obrázek 23 - Průběh svařovacích parametrů CMT oblouku [28].....	29
Obrázek 24 - Kombinace CMT cyklů a pulsních cyklů [39] .....	30
Obrázek 25 - Závislost svařovacího proudu, napětí a rychlosti podávání drátu pro CMT PULSE [40].....	30
Obrázek 26 - Kombinace negativního CMT a pozitivního CMT [39] .....	31

Obrázek 27 - Závislost rychlosti podávání drátu, svařovacího proudu a napětí při procesu CMT ADVANCED [40] .....	31
Obrázek 28 - Kombinace negativního CMT a pulsních cyklů [39] .....	32
Obrázek 29 - Svařovací proces CMT TWIN [39].....	32
Obrázek 30 - Synchronizovaný začátek svařování procesu CMT TWIN [48] .....	33
Obrázek 31 - Příklad sestavy CMT pro robotizované svařování [49] .....	33
Obrázek 32 - Robacta Drive CMT [50] .....	34
Obrázek 33 - Pufrovací člen [49] .....	34
Obrázek 34 - Robotizované pracoviště pro svařování rámu jízdních kol [53].....	36
Obrázek 35 - Kinematika šestiosého robota [55] .....	36
Obrázek 36 - Kinematika polohovacího ústrojí pro souřadnicový systém [16] .....	37
Obrázek 37 - Obecný rovnovážný diagram binárních slitin hliníku [56] .....	38
Obrázek 38 - Mikrostruktura nemodifikované (a) a modifikované (b) slitiny AlSi12 [58] .....	40
Obrázek 39 - Rozpustnost vodíku v hliníku [65].....	43
Obrázek 40 - Nízký obsah legujících prvků ve slitině - nebezpečí vzniku trhlin [66].....	43
Obrázek 41 - Svěrka pro upnutí trubek "W T" a kladkové polohovadlo [3, 69] .....	46
Obrázek 42 - Typy spojů při svařování trubkových konstrukcí [3] .....	46
Obrázek 43 - Příklady spojení tenkostěnné trubky s masivním materiálem [70] .....	47
Obrázek 44 – Laboratoř výuky svařovacích technologií (LVST).....	48
Obrázek 45 - Pracovní diagram laboratorního robota [73].....	49
Obrázek 46 - Polohovadlo Fanuc P250.....	49
Obrázek 47 - Řídící jednotka R-J3i C.....	50
Obrázek 48 - Sigma Galaxy 400 [74].....	50
Obrázek 49 - Čtyřkladkový podavač RWF Multi.....	51
Obrázek 50 - Svařovací hořák ROBO WH-PP .....	52
Obrázek 51 - Parametry zapalování a ukončování oblouku .....	53
Obrázek 52 - Upínací přípravek plechu .....	54
Obrázek 53 - Schéma měření svaru (zapalování oblouku) .....	55

Obrázek 54 - Měření číslo 7 (zapalování oblouku).....	56
Obrázek 55 - Schéma měření ukončování svaru .....	59
Obrázek 56 - Přenosná hliníková konstrukce .....	62
Obrázek 57 - Upnutí hliníkové konstrukce .....	63
Obrázek 58 - Příklad měření šířky svaru a převýšení hliníkové konstrukce .....	65
Obrázek 59 - Měření číslo 1.....	66
Obrázek 60 - Měření číslo 5, 6, 7 (zvětšení makrostruktur 10x) .....	67
Obrázek 61 - Měření číslo 13 (zvětšení makrostruktur 10x) .....	68
Obrázek 62 - Vznik propalů u měření číslo 10.....	68
Obrázek 63 - Měření číslo 17 (zvětšení makrostruktur 10x) .....	69
Obrázek 64 - Měření číslo 19.....	70
Obrázek 65 - Průběhy svařovacích proudů .....	71
Obrázek 66 - Měření číslo 25 (zvětšení makrostruktur 10x) .....	71
Obrázek 67 - Měření číslo 28 (zvětšení makrostruktury 10x) .....	72
Obrázek 68 - Porovnání makrostruktur vybraných vzorků (zvětšení 10x) .....	74
Obrázek 69 - Mikrostruktura základních materiálů a svařového kovu (zvětšení 50 x) .....	75
Obrázek 70 - Mikrostruktura vzorku TIG I (zvětšení makrostruktury 8x) .....	76
Obrázek 71 - Mikrostruktura vzorku TIG II (zvětšení makrostruktury 8x) .....	77
Obrázek 72 - Mikrostruktura vzorku MIG 13a (zvětšení makrostruktury 10x) .....	77
Obrázek 73 - Mikrostruktura vzorku MIG 13b (zvětšení makrostruktury 10x).....	78
Obrázek 74 - Mikrostruktura vzorku 25a (zvětšení makrostruktury 10x).....	78
Obrázek 75 - Mikrostruktura vzorku 25b (zvětšení makrostruktury 10x).....	79
Obrázek 76 - Struktura teplem neovlivněného odlitku (zvětšení 50x) .....	79
Obrázek 77 - Zkouška dle Vickerse .....	80
Obrázek 78 - Příklad měření tvrdosti (vzorek TIG I) .....	80

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Používané ochranné plyny pro TIG [3] .....	16
Tabulka 2 - Značení jednotlivých druhů elektrod dle ČSN EN ISO 6848 [15] .....	17
Tabulka 3 - Doporučené hodnoty vrcholového úhlu pro stejnosměrný proud [16] .....	17
Tabulka 4 - Doporučené volby parametrů při ručním svařování hliníku metodou TIG [17] .....	18
Tabulka 5 - Parametry svařování MIG hliníku a jeho slitin [26] .....	24
Tabulka 6 - Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných Al slitin pro odlévání [59] .....	40
Tabulka 7 - Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných Al slitin pro tváření [61] .....	41
Tabulka 8 - Rozdělení přídatných materiálů do skupin dle normy ČSN EN 1011-4 [68].....	45
Tabulka 9 - Úpravy svarových ploch dle normy ČSN EN ISO 9692-3 [71] .....	47
Tabulka 10 - Technické parametry robotu Arc Mate 100iC [73].....	48
Tabulka 11 - Technické parametry zdroje Sigma Galaxy 400 [74] .....	51
Tabulka 12 - Technické parametry podavače RWF Multi [75] .....	51
Tabulka 13 - Parametry zapalování oblouku .....	54
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty zapalování oblouku .....	55
Tabulka 15 - Parametry ukončování svaru .....	59
Tabulka 16 - Naměřené hodnoty ukončování svaru .....	59
Tabulka 17 - Chemické složení a mechanické vlastnosti slitin AlSi7Mg0,6 a AlMgSi0,5 [61, 76].....	62
Tabulka 18 - Chemické složení a mechanické vlastnosti slitiny AlSi5 [77] .....	63
Tabulka 19 - Požadavky na přenosnou konstrukci .....	64
Tabulka 20 - Parametry svaru a svařování TIG vzorků .....	73
Tabulka 21 - Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků .....	81

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Závislost měkkého startu na šířce svaru, převýšení a počátku průvaru .....	56
Graf 2 - Závislost horkého startu na šířce svaru, převýšení a počátku průvaru .....	57
Graf 3 - Závislost času horkého startu na šířce svaru, převýšení a počátku průvaru.....	58
Graf 4 - Závislost času doběhu koncového proudu na šířce svaru a převýšení .....	60
Graf 5 - Závislost koncového proudu na šířce svaru a převýšení .....	60
Graf 6 - Závislost času koncového proudu na šířce svaru a převýšení.....	61
Graf 7 - Průběh měření tvrdosti vzorků TIG .....	82
Graf 8 - Průběh měření tvrdosti vzorků MIG 13.....	82
Graf 9 - Průběh měření tvrdosti vzorků MIG 25.....	83

## SEZNAM PŘÍLOH

- P1 - Parametry svařování hliníkové konstrukce
- P2 - Naměřené parametry svarů při svařování hliníkové konstrukce
- P3 - Fotografie svarů provedených na konstrukci z hliníkových slitin
- P4 - Výpis programu svařovacího robota zadávaný na teachpendantu



## PŘÍLOHA P1 - Parametry svařování hliníkové konstrukce

č. m.	Parametry svařování				Parametry zapalování oblouku			Parametry ukončování oblouku			
	I (A)	U [V]	v <sub>d</sub> [m.min <sup>-1</sup> ]	v <sub>s</sub> [cm.min <sup>-1</sup> ]	Měkký start [m.min <sup>-1</sup> ]	horký start [%]	čas horkého startu [s]	Čas doběhu proudu [s]	Koncový proud [%]	Čas koncového proudu [s]	
1	100	18,1	4,5	15	1,5	60	1,5	0,2	20	2,5	
	Ochranný plyn: Ar 4.6 (bylo použito u měření číslo 1-22)										
2	120	19,3	5,4	60	1,5	60	1	0,2	20	2,5	
3	120	19,3	5,4	80	1,5	60	1	0,2	20	1,5	
4	120	19,3	5,4	90	1,5	60	1	0,2	20	0,8	
5	120	19,3	5,4	30	1,5	60	1	0,2	20	0,8	
6	120	19,3	5,4	40	1,5	60	1	0,2	20	0,8	
7	120	19,3	5,4	50	1,5	60	1	0,2	20	0,8	
8	120	19,3	6,9	60	1,5	60	1	0,2	20	0,8	
9	155	21,5	6,9	70	1,5	60	1	0,2	20	0,8	
10	parametry stejné jako v měření číslo 9, povrch očištěn technickým lihem a drátěným kartáčem										
11	120	19,3	6,9	50	1,5	60	1	0,2	20	0,8	
	zkoušení funkce svařovacího zdroje Duo Plus (I=25 %, t=0,5 s)										
12	parametry stejné jako v měření číslo 11 bez funkce Duo Plus, 1x přerušeny a napojený svar										
13	parametry stejné jako v měření číslo 7, posunutí drátu 1 mm směrem do odlitku (bylo použito u měření číslo 13-24)										
14	120	19,3	5,4	50	1,5	70	1	1,5	20	0,8	
15	120	19,3	5,4	50	1,5	70	1	1,5	20	0,2	
16	parametry stejné jako v měření číslo 15, 3x přerušeny a napojený svar										
17	parametry stejné jako v měření číslo 15, 2x přerušeny a napojený svar										
18	120	19,3	5,4	50	1,5	0	0	1,5	20	0,2	
	proveden návar další housenky na stávající										
19	120	19,3	5,4	50	1,5	70	1	1,3	20	0,2	
	počátek svařování 7 mm od okraje odlitku bez předešlé úpravy svařovaného povrchu (drážky)										
20	120	19,3	5,4	50	1,5	-25	1	1,5	20	0,2	
	3 svarové housenky, u 1. housenky snížen čas horkého startu na 0,5 s										
21	120	19,3	5,4	50	1,5	-50	0,5	1,5	20	0,2	
	2 svarové housenky, u 2. housenky sníženy parametry ukončování oblouku na 0										
22	120	19,3	5,4	50	1,5	-50	0,5	1,5	20	0,2	
	2 svarové housenky, u 2. housenky sníženy parametry ukončování oblouku na 0 a změněn parametr horkého startu na -75 %										
23	120	20,3	5,4	50	1,5	60	1	1,5	20	0,8	
	změna plynu na 50 % Ar + 50 % He (dále pouze tento plyn)										
24	120	22,2	5,4	50	1,5	60	1	1,5	20	0,2	
25	parametry stejné jako v měření číslo 24, posunutí drátu 1,5 mm směrem do odlitku (bylo použito u zbylých měření),										
26	120	22,2	5,4	50	1,5	70	0,7	1	20	0,2	
	mezera mezi trubkou a odlitkem 1 mm										
27	parametry stejné jako v měření číslo 26, bez mezery										
28	120	22,2	5,4	50	1,5	70	0,7	1	20	0,2	
	2 svarové housenky, u 2. housenky změněny parametry ukončování oblouku: čas doběhu proudu 0,4 s, koncový proud 50 %										

Poznámka: u měření 2 - 4 vznikla chyba při zadávání rychlosti, pro kterou je nelze považovat za věrohodné.

**PŘÍLOHA P2 - Naměřené parametry svarů při svařování hliníkové konstrukce**

Č. m.	Délka svaru [mm]	Š <sub>z</sub> [mm]	Š <sub>s</sub> [mm]	Š <sub>k</sub> [mm]	P <sub>z</sub> [mm]	P <sub>s</sub> [mm]	P <sub>k</sub> [mm]	q [J.mm <sup>-1</sup> ]
1	40	10,7	6,3	4,0	5,1	2,4	4,0	144
2	40	13,2	9,5	10,1	2,5	2,1	4,4	-
3	40	14,4	10,8	11,0	2,7	2,3	3,8	-
4	60	15,1	12,1	12,8	2,9	3,2	1,3	-
5	95	14,1	12,1	12,8	3,3	3,3	1,2	370
6	95	13,6	9,2	8,9	3,1	2,8	1,7	277
7	95	13,5	9,2	8,6	3,3	2,4	0,6	222
8	95	12,6	6,6	9,3	3	2	-1,8	185
	lesklý povrch bez propálení, oxidy po stranách svaru (šířky 2,6 mm), kráter na konci svaru							
9	95	15,0	8,8	7,8	4	2	-1,1	228
	vznik propalů v některých místech svaru, velké převýšení na začátku svaru se zbytky zplodin (lehce odstranitelné), kráter na konci svaru							
10	95	14,5	9,1	9,1	4	2,5	-0,8	228
	propálené místo po zapalování oblouku, oxidy po stranách svaru (šířky 1,5 mm), kráter na konci svaru							
11	95	13,6	9,6	9,2	3,5	3	0	222
	nepravidelný tvar housenek, vznik propalů, oxidy po stranách svaru (šířky 2,35 mm)							
12	95	13,3	7,5	8,8	4	2,2	-0,8	222
	nepravidelný tvar housenek, propálené místo po zapalování oblouku, oxidy po stranách svaru (šířky 2,6 mm), velké převýšení při napojení (4 mm)							
13	95	14,0	8,6	7,9	2,7	1	0	222
	lesklý svar s pravidelným tvarem, oxidy po stranách svaru (šířky 2,5 mm), velká šířka svaru při zapálení oblouku, provedena kontrola makrostruktury							
14	95	14,2	7,8	9,4	2,6	2	1,7	222
	lesklý svar s pravidelným tvarem, velká šířka svaru při zapálení oblouku, oxidy po stranách svaru (šířky 3,3 mm)							
15	95	13,8	7,3	8,9	3	2	2	222
	lesklý svar s pravidelným tvarem, velké převýšení na začátku svaru, oxidy po stranách svaru (šířky 2,7 mm)							
16	95	13,5	7,4	9,8	2,7	1	1,9	222
	napojování: 1. napojení (šířka svaru 15 mm, převýšení 2,7 mm), 2. napojení (šířka svaru 14,1 mm, převýšení 3 mm), oxidy po stranách svaru (šířky 3,6 mm), lesklý svar s pravidelným tvarem před napojením							
17	95	13,8	8,4	9,1	2,7	1,9	1,9	222
	napojování: 1. napojení (šířka svaru 13,6 mm, převýšení 3 mm), 2. napojení (šířka svaru 14,7 mm, převýšení 3 mm), provedena kontrola makrostruktury v 1. napojení							
18	95	8,9	7,8	8,2	2,7	1,5	1,5	222
	návar housenky: šířka začátku návaru 8 mm, převýšení začátku návaru 3,5 mm, šířka konce návaru 7,6 mm, převýšení konce návaru 4 mm, oxidy po stranách svaru (šířky 2,4 mm)							
19	95	16,3	7,2	8,6	3	1,5	1,2	222
	začátek svaru 7 mm od okraje odlitku: šířka návaru 14,2 mm, převýšení návaru 2,7 mm							
20	95	6,6	7,5	8,5	3,1	2	2,7	222
	napojování: 1. napojení (šířka svaru 7,1 mm, převýšení 5,2 mm), 2. napojení (šířka svaru 8 mm, převýšení 4,1 mm), oxidy po stranách svaru (šířky 1,7 mm)							
21	95	4,7	8,3	9,1	2,8	4,1	2,2	222
	napojení (šířka svaru 8,3 mm, převýšení 4,1 mm), oxidy po stranách svaru (šířky 3,7 mm), lesklý a hladký povrch do napojení							
22	95	5,1	8,2	9,9	2,4	2,8	3,3	222

	napojení (šířka svaru 5,5 mm, převýšení 3,5 mm), oxidy po stranách svaru (šířky 2,6 mm), lesklý a hladký povrch do napojení, příliš vneseného tepla při napojení							
<b>23</b>	95	12,5	8,1	9	2,7	1,4	1,7	234
	lesklý povrch s pravidelným vrstvením, oxidy po stranách svaru (šířky 2,5 mm), velké množství zplodin při zapálení a ukončování oblouku							
<b>24</b>	95	12,9	9,1	10	2,1	0,8	2,2	256
	lesklý povrch s pravidelným vrstvením, oxidy po stranách svaru (šířky 2,2 mm), vznik propalu při zapálení oblouku							
<b>25</b>	95	11,5	8,4	8,6	2,9	1,5	1,9	256
	lesklý povrch s pravidelným vrstvením, oxidy po stranách svaru (šířky 2,5 mm), zbytek zplodin při zapalování oblouku							
<b>26</b>	95	12,6	8,3	8,9	1,8	1,4	0,5	256
	lesklý povrch s pravidelným vrstvením, oxidy po stranách svaru (šířky 2,5 mm), vznik propalu při zapálení oblouku							
<b>27</b>	95	12,9	8,8	8,7	2,2	1,8	1,8	256
	lesklý povrch s pravidelným vrstvením, oxidy po stranách svaru (šířky 1,3 mm), zbytek zplodin při zapalování a ukončování oblouku							
<b>28</b>	95	13,7	9,1	9,3	2,2	3	1,7	256
	napojení (šířka svaru 13,2 mm, převýšení 3,7 mm)							

PŘÍLOHA P3 – Fotografie svarů provedených na konstrukci z hliníkových slitin



**PŘÍLOHA P4 – Výpis programu svařovacího robota zadávaný na teachpendantu**

Číslo řádku	Druh pohybu	Název příkazu	poznámka
1:		UFRAME_NUM=1	Orientace kartézského systému
2:		UTOOL_NUM=1	Identifikace nástroje
3:			
4:		CALL HOME_ROB	Robot výchozí pozice
5:		CALL HOME_G2	Polohovadlo výchozí pozice
6:			
7:	J	P [1] 40 % FINE	Bod
8:	J	P [2] 20 % CTN40	Bod
9:	J	P [3] 20 % CNT50	Bod
10:	J	P [12] 20 % CNT30	Bod
11:	L	P [4] 350 cm/min FINE Arc Start E1 [1]	Počáteční bod svařování Instrukce zahájení svařování
12:	C	P [5] P [6] 50 cm/min CNT100 COORD	Kruhový pohyb sv.
13:	C	P [8] P [9] 50 cm/min CNT100 COORD	Kruhový pohyb sv. Koncový bod svařování
14:			
15:		Arc End E1 [1]	Instrukce ukončení svařování
16:		WAIT 3.50 (sec)	Instrukce čekej – výplň konc. kráteru, dofuk
17:			
18:	L	P [7] 250 cm/min FINE	Bod
19:	J	P [10] 50 % FINE	Bod
20:	J	P [12] 80 % FINE	Bod
21:		CALL HOME_ROB	Návrat Robot výchozí pozice
22:		CALL HOME_G2	Návrat Polohovadlo výchozí pozice
End			Konec programu