

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE
2020**

**VÍT
STEINER**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití střídavého proudu pro MIG svařování hliníkových slitin

Autor: Bc. Vít Steiner
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Steiner** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **438301**
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:

Využití střídavého proudu pro MIG svařování hliníkových slitin

Název diplomové práce anglicky:

Use of alternating current for MIG welding of aluminum alloys

Pokyny pro vypracování:

Rozbor problematiky svařování hliníku a jeho slitin – princip čistícího účinku, porovnání DC a AC
Popis zařízení pro svařování metodou MIG AC
Návrh experimentu – porovnání MIG AC s vybranými metodami
Vyhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mathers, G.: The welding of Aluminium and its alloys, CRC press, 2002
- [2] Langer, T. Svařování přenosných konstrukcí z hliníkových slitin, Diplomová práce, FS, ČVUT v Praze, Praha, 2019
- [3] Puschner, P.: Homogenisierung der Stromquellentechnik unter Berücksichtigung des Anwenders und der Instandhaltung, RWTH Aachen, 1993
- [4] Firemní materiály firmy ELMA Tech, Valk welding

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

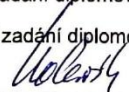
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


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


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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

9.7.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Využití střídavého proudu pro MIG svařování vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

V Praze dne

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za vedení této diplomové práce a cenné rady.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Karlovi Kovandovi, Ph.D., IWE a doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za pomoc při měření v laboratořích ČVUT v Praze a za jejich vstřícnost.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi svarů hliníkových slitin zhotovených novou metodou tavného svařování MIG AC (Metal Inert Gas) za použití střídavého proudu. V teoretické části je popsána problematika svařování hliníku a jeho slitin, svařování konvenčními metodami (MIG DC+ a TIG AC) vč. jejich výhod a nevýhod. V experimentální části je popsáno svaření vzorků novou metodou MIG AC, svařovacím zdrojem od výrobce ELMA-Tech GmbH, vyhodnocení svarů nedestruktivními zkouškami (vizuální a kapilární) a destruktivními zkouškami (vyhodnocení mikrotvrdomosti, makroskopické a tahové zkoušky). Dále byly stejné vzorky svařeny konvenční metodou TIG AC a znovu vyhodnoceny stejnými zkouškami. Výsledkem práce je zhodnocení vlastností svařenců novou technologií, porovnání s konvenční, zavedenou technologií a zhodnocení přínosu nové technologie v praxi.

Klíčová slova: MIG AC, DC+, TIG, svařování, střídavý proud, čistící účinek efekt, ELMA-Tech, hliník, hliníkové slitiny, zkoušky svaru, destruktivní, nedestruktivní

Abstract

The diploma thesis deals with the properties of welding of aluminum alloys made by a new method of fusion welding MIG AC (Metal Inert Gas) using alternating current. The theoretical part describes the issue of welding of aluminum and its alloys, welding by conventional welding methods (MIG DC + and TIG AC), incl. their advantages and disadvantages. The experimental part describes the welding of samples with the new MIG AC method, welding source from the manufacturer ELMA-Tech GmbH, evaluation of welds by non-destructive tests (visual and capillary) and destructive tests (evaluation of microhardness, macroscopic and tensile tests). Furthermore, the same samples were welded by a conventional TIG AC method and re-evaluated by the same tests. The result of the work is the evaluation of the properties of weldments new technology, comparison with conventional, established technology and evaluation of the benefits of new technology in practice.

Keywords: MIG AC, DC +, TIG, welding, alternating current, cleaning effect, ELMA-Tech, aluminum, aluminum alloys, weld tests, destructive, non-destructive

Obsah

1	Vlastnosti čistého hliníku.....	9
1.1	Slitiny hliníku a jejich rozdělení.....	10
1.1.1	Tvářené slitiny	10
1.1.1.1	Vytvrditelné tvářené slitiny	11
1.1.1.2	Nevytvrditelné tvářené slitiny	11
1.1.2	Slévárenské (lité) slitiny	12
1.1.3	Rozdělení hliníku a jeho slitin dle svažitelnosti	13
2	Konvenční svařování hliníku	14
2.1	Problémy při svařování hliníku.....	14
2.1.1	Trhliny za tepla	15
2.1.2	Oxidická vrstva Al_2O_3	15
2.1.3	Rozpustnost plynů v hliníku.....	16
2.1.4	Pokles mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti	17
2.2	Čistící účinek při svařování hliníku.....	17
2.2.1	Teorie katodové skvrny.....	17
2.2.2	Teorie kladných iontů	18
2.3	TIG (WIG) – Tungsten (Wolfram) inert gas	18
2.3.1	Výhody/nevýhody metody TIG.....	20
2.4	Svařování MIG – Metal inert gas	21
2.4.1	Přenos kovu u MIG svařování.....	22
2.4.1.1	Zkratový přenos	23
2.4.1.2	Kapkový přenos.....	23
2.4.1.3	Sprchový přenos	24
2.4.1.4	Impulzní přenos	24
2.4.2	Výhody/nevýhody metody MIG	25
2.5	Ochranné atmosféry – inertní plyny.....	26
2.5.1	Argon.....	27
2.5.2	Helium.....	27
2.6	Svařování MIG AC	28
3	Experimentální část.....	32
3.1	Svaření vzorků pomocí metody MIG AC	32
3.1.1	Příprava vzorků svařených metodou MIG AC.....	33
3.1.2	Experimentální zařízení pro svařování metodou MIG AC	34
3.1.3	Popis svaření vzorků metodou MIG AC.....	35

3.1.4	Zkoušky svarů vzorků vytvořených metodou MIG AC	38
3.1.4.1	Vizuální zkouška svarů vytvořených metodou MIG AC	38
3.1.5	Kapilární zkouška vzorků vytvořených metodou MIG AC	41
3.1.6	Metalografická zkouška – zkouška makrostruktury vzorků vytvořených metodou MIG AC	42
3.1.7	Mikrotvrdost svarů vytvořených metodou MIG AC.....	47
3.1.8	Zkouška tahem vzorků vytvořených metodou MIG AC.....	48
3.2	Svaření vzorků pomocí metody TIG AC.....	51
3.2.1	Experimentální zařízení pro svařování metodou TIG AC.....	51
3.3	Svaření vzorků vytvořených metodou TIG AC.....	52
3.4	Zkoušky svaru vzorků vytvořených TIG AC.....	54
3.4.1	Vizuální zkouška svaru vytvořených metodou TIG AC	54
3.4.2	Kapilární zkouška TIG AC	57
3.4.3	Metalografická zkouška – zkouška makrostruktury TIG AC	58
3.4.4	Mikrotvrdost svarů TIG AC	61
3.4.5	Zkouška tahem.....	62
3.5	Zhodnocení výsledků	65
4	Závěr.....	66
5	Zdroje:	67

Seznam obrázků

Obrázek 1: Nárůst objemu produkce hliníku [30]	9
Obrázek 2: Schéma zapojení při svařování [31].....	14
Obrázek 3: Rozpustnost vodíku v hliníku [41]	16
Obrázek 4: TIG – princip svařování [32]	19
Obrázek 5: Čtyřkladkový podavač [36]	22
Obrázek 6: Způsoby přenosu kovu při svařování MIG/MAG [33].....	23
Obrázek 7: Schéma průběhu impulzního svařování [5]	25
Obrázek 8: Argon (vlevo), Helium (vpravo) [7].....	26
Obrázek 9: vliv hélia na závar při MIG svařování [6].....	28
Obrázek 10: Překlenutí 2,5 mm mezery mezi plechy tloušťky 1,5 mm [18]	29
Obrázek 11: Porovnání vneseného tepla (heat input) a velikosti průvaru (root penetration) pro různé metody [19]	30
Obrázek 12: přenos kovu během svařování metody MIG AC [42]	31
Obrázek 13: Upnutí plechů v přípravku	33
Obrázek 14: ELMA-Tech MIDI MIG 300 AC	34
Obrázek 15: Svařovací vozík Air Liquide NV	36
Obrázek 16: Průběh proudu a napětí MIG_1	37
Obrázek 17: Průběh proudu a napětí MIG_2	37
Obrázek 18: Průběh proudu a napětí MIG_3	37
Obrázek 19: Průběh proudu a napětí MIG_4	38
Obrázek 20: Krycí vrstva svaru MIG_1	39
Obrázek 21: Krycí vrstva vzorku MIG_2	39
Obrázek 22: Krycí vrstva vzorku MIG_3	39
Obrázek 23: Krycí vrstva vzorku MIG_4	39
Obrázek 24: kořen svaru MIG_1	40
Obrázek 25: kořen svaru MIG_2	40
Obrázek 26: kořen svaru MIG_3	40
Obrázek 27: kořen svaru MIG_4	40
Obrázek 28: kapilární zkouška vzorku MIG_1	41
Obrázek 29: kapilární zkouška vzorku MIG_2	41
Obrázek 30: kapilární zkouška vzorku MIG_3	42
Obrázek 31: kapilární zkouška vzorku MIG_4	42
Obrázek 32: Metalografický výbrus	43
Obrázek 33: makrostruktura vzorku MIG_1	43
Obrázek 34: makrostruktura vzorku MIG_2	44
Obrázek 35: makrostruktura vzorku MIG_3	44
Obrázek 36: makrostruktura vzorku MIG_4	45
Obrázek 37: šířka a výška svaru [37]	46
Obrázek 38: převýšení kořene svaru [44]	46
Obrázek 39: lineární přesazení [45]	46
Obrázek 40: výkres zkušebního tělesa	48
Obrázek 41: Trhací stroj Instron 5900R	48
Obrázek 42: Graf průběhu tahové zkoušky MIG AC	49
Obrázek 43: Přetržené vzorky tahové zkoušky vzorku MIG AC	50
Obrázek 44: Fanuc Robot Art Mate 100ic	51

Obrázek 45: Hořák a elektroda TIG AC.....	52
Obrázek 46: Grafický průběh svařování TIG AC.....	53
Obrázek 47: Krycí vrstva vzorku TIG_1.....	55
Obrázek 48: Krycí vrstva vzorku TIG_2.....	55
Obrázek 49: Krycí vrstva vzorku TIG_3.....	55
Obrázek 50: Kořen svaru vzorku TIG_1.....	56
Obrázek 51: Kořen svaru vzorku TIG_2.....	56
Obrázek 52: Kořen svaru vzorku TIG_3.....	56
Obrázek 53: Kapilární zkouška TIG_1.....	57
Obrázek 54: Kapilární zkouška TIG_2.....	57
Obrázek 55: Kapilární zkouška TIG_3.....	57
Obrázek 56: Kapilární zkouška TIG_3 detail.....	57
Obrázek 57: Makroskopie TIG_1.....	58
Obrázek 58: Makroskopie TIG_2.....	59
Obrázek 59: Markoskopie TIG_3.....	59
Obrázek 60: šířka a výška svaru [37].....	60
Obrázek 61: převýšení kořene svaru [44].....	60
Obrázek 62: lineární přesazení [45].....	60
Obrázek 63: Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku TIG AC.....	63
Obrázek 64: Graf průběhu tahové zkoušky TIG AC.....	64
Obrázek 65: Zápal viditelný i po vybroušení svaru u vzorku TIG_1.....	64

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti čistého hliníku [12].....	10
Tabulka 2: Značení tvářených slitin AL dle ČSN EN 573–1 až 3 [12].....	11
Tabulka 3: Značení slévárenských slitin hliníku podle ČSN EN 1706 [39].....	12
Tabulka 4: Rozdělení hliníku a jeho slitin dle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608 [40].....	13
Tabulka 5: Rozsah základních parametrů metody TIG [6].....	19
Tabulka 6: Rozsah základních parametrů metody MIG [6].....	21
Tabulka 7: Vlastnosti základního materiálu [34].....	32
Tabulka 8: Technická data Elma-Tech MIDI MIG 300 [43].....	35
Tabulka 9: vlastnosti přídatného materiálu OK AUTROD 5087 [35].....	35
Tabulka 10: Svařovací parametry jednotlivých vzorků.....	36
Tabulka 11: šířka a výška svaru.....	46
Tabulka 12: převýšení kořene.....	46
Tabulka 13: lineární přesazení.....	46
Tabulka 14: Hodnoty mikrotvrdosti MIG AC.....	47
Tabulka 15: Hodnoty tahové zkoušky MIG AC.....	49
Tabulka 16: Svařovací parametry TIG AC.....	53
Tabulka 17: šířka a výška svaru.....	60
Tabulka 18: převýšení kořene.....	60
Tabulka 19: lineární přesazení.....	60
Tabulka 20: Hodnoty mikrotvrdosti TIG AC.....	61
Tabulka 21: Srovnání mikrotvrdosti MIG AC a TIG AC.....	62
Tabulka 22: Hodnoty tahové zkoušky TIG AC.....	63

Použité symboly a zkratky

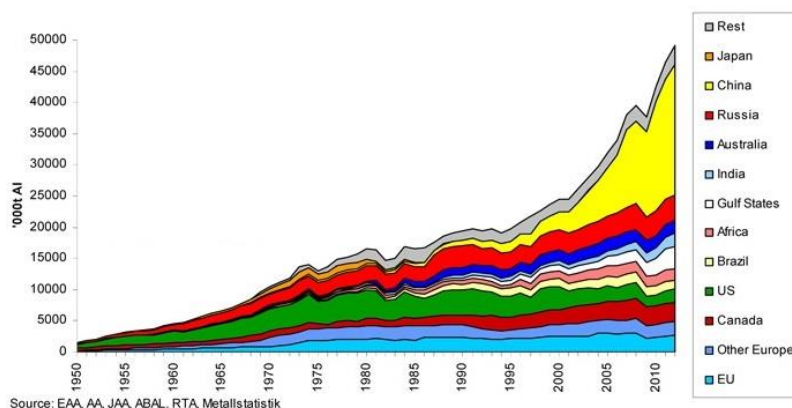
MIG	Metal inert gas (obloukové svařování v inertní ochranné atmosféře s odtavující se elektrodou)	
TIG (WIG)	Tungsten (Wolfram) inert gas (obloukové svařování v inertní ochranné atmosféře s neodtavující se wolframovou elektrodou)	
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)	[A]
AC	Alternating current (střídavý proud)	[A]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
HV1	Tvrdość dle Vickerse zatížením 1 kp	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
ZM	Základní materiál	
SK	Svarový kov	
PM	Přídavný materiál	

Úvod

Od roku 1950 do roku 2017 se objem výroby hliníku zvýšil z 3 milionů tun/rok [1] na 60 milionů tun/rok. [3] Tento nárůst plyne především z možnosti širokého využití výhodných vlastností hliníku, popř. jeho slitin. Především nízká hmotnost, dobrá slévatelnost, zpracovatelnost tvářením a obráběním, svařitelnost, dobré korozní vlastnosti, příznivý poměr pevnosti k hustotě a další vlastnosti jsou důležitými rozhodovacími faktory při výběru tohoto materiálu, zejména v dopravním průmyslu, kde jsou ve stále větší míře hliník a jeho slitiny uplatňovány. S neustále vzrůstajícími objemy výroby a následným uplatňováním hliníku a jeho slitin v technické praxi rostou i požadavky na jeho spojování. Ne vždy je vhodné, popř. možné použití šroubového, nýtovaného nebo lepeného spoje, a proto má svařování hliníku dominantní postavení při jeho spojování. [10]

Možností, jak svařit hliník a jeho slitiny, je mnoho. Jednotlivé metody, kterým se dále bude věnovat diplomová práce v teoretické části, mají některé přednosti, ale zároveň i určité nevýhody, proto vždy záleží na vhodně zvolené technologii svařování pro určitou součást. Volba technologie závisí na mnoha faktorech, jako např. na požadavku na produktivitu svařování, cenu zařízení, ekonomičnost jeho provozu, schopnost svařovat složité součásti z hlediska konstrukce, svařování malých nebo velkých tloušťek základního materiálu atp. Proto již se zmíněným nárůstem potřeby spojovat tento materiál, přichází výrobci s novými metodami svařování, pro uspokojení širší poptávky při různých aplikacích. V této diplomové práci bude jedna z těchto nových metod, konkrétně svařování metodou MIG střídavým proudem (AC), zkoumána. Cílem práce bude vyhodnocení kvality svarového spoje, produktivity svařování a porovnání s konvenční metodou TIG AC.

Diplomová práce byla řešena v období koronavirové pandemie, kdy platila omezení ohledně vstupu do laboratoří FS a tím byl značně ovlivněn i rozsah řešení a výsledků praktické části DP.



Obrázek 1: Nárůst objemu produkce hliníku [30]

1 Vlastnosti čistého hliníku

Hliník je lesklý neželezný kov bílé až stříbrolesklé barvy s nízkou měrnou hmotností $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (podle stupně tváření), díky které je řazen mezi tzv. lehké kovy. Má dobrou tvářitelnost za studena, což je zapříčiněno krystalovou mřížkou plošně středěnou, teplota tavení čistého hliníku je $660 \text{ }^\circ\text{C}$ a pevnost v tahu je cca $70\text{--}100 \text{ MPa}$, která může být výrazně zvýšena legováním nebo mikrolegováním. Hliník se vyznačuje dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí, která je však značně závislá na jeho čistotě. Hlavními nečistotami v hliníku bývají příměsi železa ($0,005 \text{ \%}$) a křemíku (cca $0,05 \text{ \%}$). Důležitou vlastností hliníku je jeho odolnost proti korozi. Tato odolnost je dána vrstvou oxidu hlinitého (Al_2O_3), která se na povrchu vytváří okamžitě po jejím odstranění kvůli vysoké afinitě ke kyslíku. Tloušťka této oxidické vrstvy je asi $0,01 \text{ }\mu\text{m}$ a poskytuje ochranu před další oxidací. Tato problematika bude dále popsána v teoretické části diplomové práce. [1] [11] [12]

Tabulka 1: Vlastnosti čistého hliníku [12]

Měrná hmotnost při 20 °C [g.cm ⁻³]	2,7
Pevnost [N.mm ⁻²]	70–100
Tažnost [%]	30–40
Modul pružnosti [N.mm ⁻²]	72000
Teplota tavení [°C]	660
Teplota varu [°C]	2270
Teplota tavení Al ₂ O ₃ [°C]	2046
Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	223–235
Měrné teplo [MJ.m ⁻³ .K ⁻¹]	2,45
Lineární tepelná roztažnost [m.K ⁻¹ .10 ⁻⁶]	23,8
Elektrická vodivost při 20 °C [S]	35–36

1.1 Slitiny hliníku a jejich rozdělení

Ve strojírenství a pro konstrukční účely (vyjma elektrotechniky) se použití čistého hliníku používá velmi zřídka, především kvůli jeho nízké pevnosti. Výhodnější je proto použití různých slitin. Ty se dělí nejčastěji na tvářené a slévárenské, popř. podle způsobu tepelného zpracování na vytvrditelné a nevytvrditelné. Nejčastějšími legujícími prvky jsou Cu, Si, Mg, Zn, Mn. [12]

1.1.1 Tvářené slitiny

Tyto slitiny se vyznačují dobrou tvárností za tepla i za studena. Mají nízké množství legujících prvků a obvykle jsou dodávány jako polotovary ve formě tyčí, plechů, pásů, trubek, drátů, protlačovaných profilů atp. Pro svařování je tento typ slitin vhodnější, a proto budou použity i v experimentální části této diplomové práce. [12]

1.1.1.1 Vytvrditelné tvářené slitiny

U těchto slitin mohou být mechanické vlastnosti zvýšeny tepelným zpracováním – vytvrzováním. To se skládá z rozpouštěcího žíhání a rychlého ochlazení. Cílem je rozpad přesyceného tuhého roztoku (nazývaný také jako stárnutí) a vznik precipitátů, které způsobují pnutí v mřížce, a tím vytvářejí překážky pro pohyb dislokací. Rozpad přesyceného tuhého roztoku může probíhat za normální teploty (přirozené stárnutí) anebo za zvýšené teploty do cca 250 °C (umělé stárnutí).

Vytvrditelné tvářené slitiny jsou děleny do hlavních 3 skupin: AlCuMg, AlMgSi, AlZnMg(Cu) [12] [20]

1.1.1.2 Nevytvrditelné tvářené slitiny

Tepelným zpracováním nelze zvýšit (nebo pouze velmi nepatrně) mechanické vlastnosti jako je pevnost a tvrdost. Zlepšení vlastností může být docíleno pouze mechanickou cestou – zpevnění tvářením za studena nebo tažením. Zatímco vytvrditelné slitiny bývají ternární, nevytvrditelné slitiny jsou obvykle jednoduššího charakteru – binární. Mezi nevytvrditelné slitiny patří slitiny AlMg(Mn), AlMn. [12]

Tabulka 2: Značení tvářených slitin AL dle ČSN EN 573-1 až 3 [12]

Hlavní legující prvek	Označení třídy	Typ slitiny	stav
Hliník čistoty min 99 %	1xxx	Al	Nevytvrditelný
Měď	2xxx	AlCuMg	Vytvrditelný
Mangan	3xxx	AlMn	Nevytvrditelný
Křemík	4xxx	AlSi	Nevytvrditelný
Hořčík	5xxx	AlMg	Nevytvrditelný
Hořčík a křemík	6xxx	AlMgSi	Vytvrditelný
Zinek	7xxx	AlZnMg	Vytvrditelný
Jiné prvky	8xxx	Al + různé prvky	Vytvrditelný i nevytvrditelný

1.1.2 Slévárenské (lité) slitiny

Jak již z názvu vyplývá, tyto slitiny jsou vhodné především k odlévání, a to zejména kvůli dobré zabíhavosti do formy s malým sklonem ke vzniku trhlin za tepla a ke tvorbě staženin. Jsou méně tvárné než tvářené slitiny, mají vyšší obsah legujících prvků a vyznačují se horší svažitelností.

Nejtypičtější slévárenskou slitinou jsou tzv. siluminy (slitiny typu: AlSi, AlSiMg, AlSiCu), které mají dobrou zabíhavost a odolnost proti trhlinám za tepla. Dále slitiny typu AlMg s dobrou odolností proti korozi, AlCu(Si) s dobrou odolností proti opotřebení i za vysokých teplot, používané např. na písty spalovacích motorů, AlZn(Mg) s možností snadného tepelného zpracování a dobrými mechanickými vlastnostmi. [12]

Norma ČSN EN 1706 stanovuje označování slitin hliníku na odlitky. Části označení se skládají z označení v pořadí: Předpona EN, písmeno A (určuje hliník), písmeno C (určuje odlitky) a pět číslic označující chemické složení. [39]

Tabulka 3: Značení slévárenských slitin hliníku podle ČSN EN 1706 [39]

Hlavní legující prvek	Řada	Slitina
Hliník čistoty min. 99 %	10 000	Al
Měď	20 000	AlCuMg
Mangan	30 000	AlMn
Křemík	40 000	AlSi
Hořčík	50 000	AlMg
Hořčík a křemík	60 000	AlMgSi
Zinek	70 000	AlZnMg
Jiné prvky	80 000	Al + jiné prvky

1.1.3 Rozdělení hliníku a jeho slitin dle svařitelnosti

Obecně se dá říci, že pro svařování jsou vhodnější tvářitelné slitiny, zejména kvůli jemnější struktuře, u kterých ale může vlivem svařování (v důsledku tepelného ovlivnění svařovacím procesem) docházet k rozpouštění vytvrzujících fází a tím k poklesu mechanických vlastností. Za vhodné slitiny ke svařování lze považovat slitiny typu: AlMn, AlMg a AlSi, popř. čistý hliník a za obtížněji svařitelné v různých formách: AlCu-Mg, AlMg-Si a AlZnMg (skupiny 2xxx, 6xxx a 7xxx) - viz tabulka 2. [12]

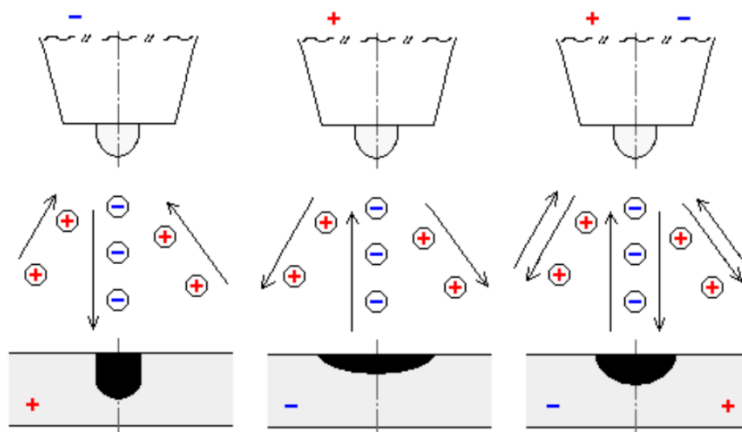
Podle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608 lze hliník a jeho slitiny rozdělit do skupin (viz tabulka 4) [40]

Tabulka 4: Rozdělení hliníku a jeho slitin dle směrnice TNI CEN ISO/TR 15608 [40]

Skupina	Podskupina	Druh hliníku a jeho slitin
21		Čistý hliník s $\leq 1\%$ nečistot nebo legujících prvků
22		Tepelně vytvrditelné slitiny
	22.1	Slitiny hliníku a manganu
	22.2	Slitiny hliníku a hořčíku s $\text{Mg} \leq 1,5\%$
	22.3	Slitiny hliníku a hořčíku s $1,5\% < \text{Mg} \leq 3,5\%$
	22.4	Slitiny hliníku a hořčíku s $\text{Mg} > 3,5\%$
23		Tepelně vytvrditelné slitiny
	23.1	Slitiny hliníku, hořčíku a křemíku
	23.2	Slitiny hliníku, zinku a hořčíku
24		Slitiny hliníku a křemíku s $\text{Cu} \leq 1\%$
	24.1	Slitiny hliníku a křemíku s $\text{Cu} \leq 1\%$ a $5\% < \text{Si} \leq 15\%$
	24.2	Slitiny hliníku, křemíku a hořčíku s $\text{Cu} \leq 1\%$; $5\% < \text{Si} \leq 15\%$ a $0,1\% < \text{Mg} \leq 0,8\%$
25		Slitiny hliníku, křemíku a mědi s $5\% < \text{Si} \leq 14\%$; $1\% < \text{Cu} \leq 5\%$ a $\text{Mg} \leq 0,8\%$
26		Slitiny hliníku a mědi s $2\% < \text{Cu} \leq 6\%$

2 Konvenční svařování hliníku

Mezi nejběžnější a nepoužívanější metody svařování hliníku a jeho slitin z hlediska jednoduchosti a variability použití, produktivity svařování, cenové zátěže na pořízení zařízení a jeho provozu se v současné technické praxi nejvíce používají metody TIG (WIG) – Tungsten (wolfram) inert gas s využitím střídavého proudu (AC) a metody MIG – Metal inert gas s využitím stejnosměrného proudu a nepřímou polaritou (DC+). Ve stále menší míře se používá pro spojování hliníku svařování plamenem, se kterým se setkáme hlavně při opravárenských činnostech nebo svařování obalovanou elektrodou. Pro specifické aplikace se můžeme setkat s metodami jako je jako je svařování třením, laserem apod. [8]



Obrázek 2: Schéma zapojení při svařování [31]

vlevo: DC- (stejnosměrný proud, přímá polarita),

uprostřed: DC+ (stejnosměrný proud, nepřímá polarita),

vpravo: AC (střídavý proud)

2.1 Problémy při svařování hliníku

Hliník a jeho slitiny vyžadují kvůli svým vlastnostem zvláštní přístup pro svařování a je třeba dodržovat některé postupy jako prevenci pro minimalizaci možných problémů, které mohou při svařování vznikat.

2.1.1 Trhliny za tepla

Při svařování dochází vlivem vneseného tepla k natavení základního materiálu a vytvoření svarové lázně. Jedním z rizik při svařování, je možný vznik trhlin za tepla. Kvůli vysokému součiniteli teplotní délkové roztažnosti hliníku mohou vznikat trhliny za tepla v důsledku objemových změn v procesu krystalizace a vzniku tahových napětí především u svarů s velkým objemem. Možnost vzniku trhlin za tepla je navíc dána tím, že koeficient objemové roztažnosti se na rozhraní tuhé a tekuté fáze rychle mění. K zamezení vzniku trhlin může vést snížení obsahu nečistot v základním materiálu, použití přídavného materiálu s větším obsahem Mg, Si, popř. prvky zjemňující zrnitost struktury (Ti, Zr, Nb), vhodně zvolené parametry svařování, popř. předehřev. Předehřev je však omezen teplotou cca 200 °C u vytvrditelných slitin, u kterých po překročení této teploty dochází k poklesu mechanických vlastností. Další možností, jak předcházet trhlinám za tepla, je použití technologie svařování umožňující vyšší rychlost svařování, protože to vede ke snížení tepelného příkonu (např. použití metody MIG místo metody TIG). [2][10]

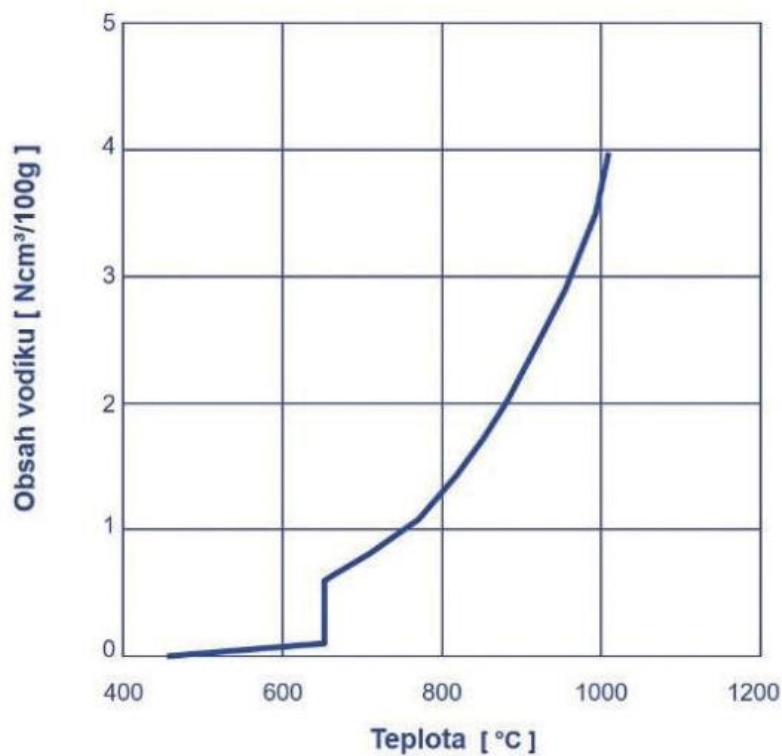
2.1.2 Oxidická vrstva Al_2O_3

Velkým problémem při svařování hliníku a jeho slitin je již zmíněný neustálý vznik oxidické vrstvy (Al_2O_3) na povrchu materiálu způsobený vysokou afinitou hliníku ke kyslíku. Tato vrstva je elektricky nevodivá, může tak bránit zapálení oblouku a správnému nastavení svařovacích parametrů, má vyšší teplotu tavení (cca 2050 °C) než samotný hliník a má vyšší měrnou hmotnost ($101,96 \text{ g/cm}^3$) než základní materiál. Vrstva Al_2O_3 může působit problémy při již započatém svařování, kdy může docházet k roztavení základního materiálu, nikoliv však oxidické vrstvy. Kvůli větší měrné hmotnosti Al_2O_3 může docházet k propadávání neroztavených zbytků oxidů do svarové lázně a docházet tak k tvorbě nežádoucích oxidických vměstků. Je tedy nutné bezprostředně před samotným svařováním správně ošetřit svarové plochy mechanicky nebo chemicky a oxidickou vrstvu tak odstranit. Nejpoužívanější mechanický způsob je kartáčování kartáčem z korozivzdorné austenitické oceli a následné odmaštění. Pro větší plochy nebo složité součásti, popř. velké množství svařenců, je vhodné

použití chemického očištění – moření. Při správně zvolené metodě, resp. správném zapojení polarity, může být během samotného svařování využíváno tzv. čistícího účinku elektrického oblouku, který bude dále podrobněji popsán v samostatné kapitole č. 2.2. [2] [10] [12]

2.1.3 Rozpustnost plynů v hliníku

K dalším možným příčinám vzniku vad ve svaru může vést velká rozpustnost plynů v hliníku, především vodíku. Jeho rozpustnost v hliníku výrazně roste s narůstající teplotou (viz obrázek 3). Vlivem rychlého tuhnutí hliníku nemusí stihnout vodík difundovat pryč ze svarové lázně a mohou tak vznikat nežádoucí póry a bubliny. Je tedy vhodné zajistit pomalejší tuhnutí svarové lázně jako prevence předcházení těmto vadám. [13]



Obrázek 3: Rozpustnost vodíku v hliníku [41]

2.1.4 Pokles mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti

Během svařování dochází velkému vnesení tepla do základního materiálu. To způsobuje, že v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) mění materiál negativně své mechanické vlastnosti a dochází k jejich poklesu v důsledku precipitačních procesů. Tento jev je patrný jak u nevytvrditelných slitin hliníku, tak především u vytvrditelných slitin, kde je tento rozdíl velký. [2] [10] [13]

2.2 Čistící účinek při svařování hliníku

Pro svařování hliníku a jeho slitin je nutná schopnost tzv. čistícího účinku (efektu). Jedná se o fyzické odstranění povrchové oxidické vrstvy během svařování, když má svařovací elektroda kladnou polaritu a základní materiál zápornou. Tento jev je v literatuře popisován dvěma níže popsanými hypotézami, které působí současně. [21]

2.2.1 Teorie katodové skvrny

Při hořícím oblouku a zapojení s nepřímou polaritou se na základním materiálu (záporná elektroda) vytváří katodová skvrna. Ta se pohybuje po materiálu do míst s nejnižší emisní energií, tedy do míst pokrytých oxidy, které mají nižší emisní energii (1,77 eV) pro emisi elektronů, než základní materiál (3,95 eV). Po zasažení katodovou skvrnou o teplotě 2500–3000 °C se oxidy přehřejí, odpaří, následně zkondenzují a jsou vyloučeny na okraji vzniklého svarového spoje. [4] [12]

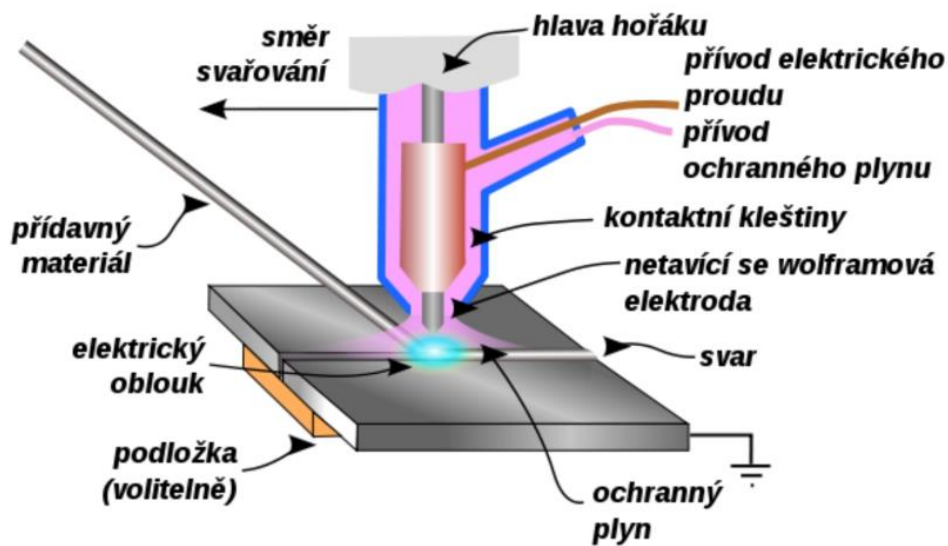
2.2.2 Teorie kladných iontů

Druhou teorií je dynamický účinek kladných iontů urychlovaných směrem ke svarové lázni. Tento jev se děje při využití stejnosměrného proudu a zapojení s nepřímou polaritou (viz obrázek 2). Kladné ionty s vyšší hmotností (asi 1840x) než záporné elektrony, které míří opačným směrem, bombardují povrch, rozrušují vrstvu oxidů a dochází k vyloučení těchto oxidů na kraji svarové lázně. [4] [12]

2.3 TIG (WIG) – Tungsten (Wolfram) inert gas

Metoda TIG (označení 141 dle ČSN EN ISO 4063) je pro svařování hliníku a jeho slitin velmi častá. Při svařování metodou TIG hoří oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Jako ochranný inertní plyn se zpravidla používá argon, helium nebo jejich směs.

Pro svařování hliníku a jeho slitin touto metodou se zpravidla využívá zapojení střídavého proudu (AC). Toto zapojení zajišťuje jak čistící efekt během svařování v půlperiodě, kdy je na wolframové elektrodě kladný pól, tak i ochranu wolframové elektrody proti nadměrnému zahřívání v druhé půl periodě, kdy se na elektrodě vyvine pouze 1/3 tepla a zbylé 2/3 tepla jsou využité pro tavení základního materiálu. [4] [5] [6]



Obrázek 4: TIG – princip svařování [32]

Svařuje se s přídavným materiálem obvykle ve formě drátu podávaného ručně nebo podavačem, lze však svařovat i bez přídavného materiálu. [4] [5] [6]

Tabulka 5: Rozsah základních parametrů metody TIG [6]

Polohy svařování	Všechny
Tloušťka základního materiálu (doporučená)	0,5–10 mm
Druh základního materiálu	legované ocele, Al, Mg, Cu, Ni, Ti a jejich slitiny
Svařovací proud	10–500 A
Průměry wolframových elektrod	1–8 mm (obvykle 2–4 mm)

2.3.1 Výhody/nevýhody metody TIG

Přednostmi této metody je vysoká kvalita provedených svarů, pravidelné formování kořene, krycí vrstvy svaru, dobré mechanické vlastnosti svaru, výborná ochrana svarové lázně ochranným plynem před účinky okolní atmosféry, úzké teplotní pole, možnost svařování ve všech polohách a absence dalšího nutného opracování svarové housenky (nevzniká struska), možnost svařovat malé tloušťky základního materiálu (jednotky milimetrů), možnost automatizace.

Nevýhodou je malá produktivita této metody především při ručním svařování. Dále je při ručním svařování kvalita výsledného svaru značně závislá na zručnosti svářeče a jím správně nastavených svařovacích podmínkách a parametrů. Proto se příliš nehodí pro velkosériovou výrobu jednoduchých svařenců, ačkoli je i u této metody automatizace možná, pro tento úkon se hodí lépe metoda MIG DC+, která je však vhodnější pro střední a větší tloušťky ZM. [6] [7]

2.4 Svařování MIG – Metal inert gas

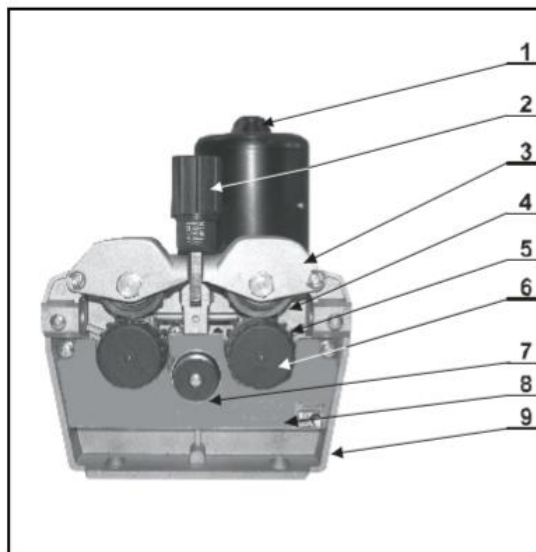
Metal inert gas (označení 131 dle ČSN EN ISO 4063) je tavné obloukové svařování, během kterého dochází k tavení elektrody, kdy elektrický oblouk a oblast svaru jsou chráněny před okolní atmosférou inertním plynem nejčastěji argonem nebo směsí argonu nebo helia pro větší tloušťky základního materiálu. Přídavný materiál v podobě hliníkového drátu je přiváděn do svařovacího hořáku podavačem. Protože je hliník měkký a přiváděný přídavný drát by se mohl deformovat, bývá podavač (obrázek 4) vybaven čtyřmi podávacími kladkami s profilem drážky ve tvaru půlkruhu, které zaručí větší adhezi při menším přitlaku. Dále se nepoužívá ocelový bowden, ale vedení s teflonovou vložkou a speciální typy koncových průvlaků (kontaktních špiček) o větším průměru vnitřního otvoru o cca 0,2 mm kvůli velké tepelné roztažnosti hliníku. [5][6][9]

Tabulka 6: Rozsah základních parametrů metody MIG [6]

Polohy svařování	Všechny
Tloušťka základního materiálu (doporučená)	0,8 – 40 mm
Druh základního materiálu	Legované ocele, Al, Cu, Ni a jejich slitiny
Přenos kovu	Zkratový, sprchový, Impulsní
Průměry svařovacích drátů	0,6 – 2,6 mm (nejčastěji 1,2 mm)

Posuv čtyřkladkový

1. Motorek
2. Matice šroubu dotlaku
3. Přítlačné ramínko
4. Přítlačná kladka z ozub.kolem
5. Podávací kladka z ozub.kolem
6. Šroub podávací kladky
7. Pohon podávacích kladek
8. Kryt ozubení
9. Základna posuvu



Obrázek 5: Čtyřkladkový podavač [36]

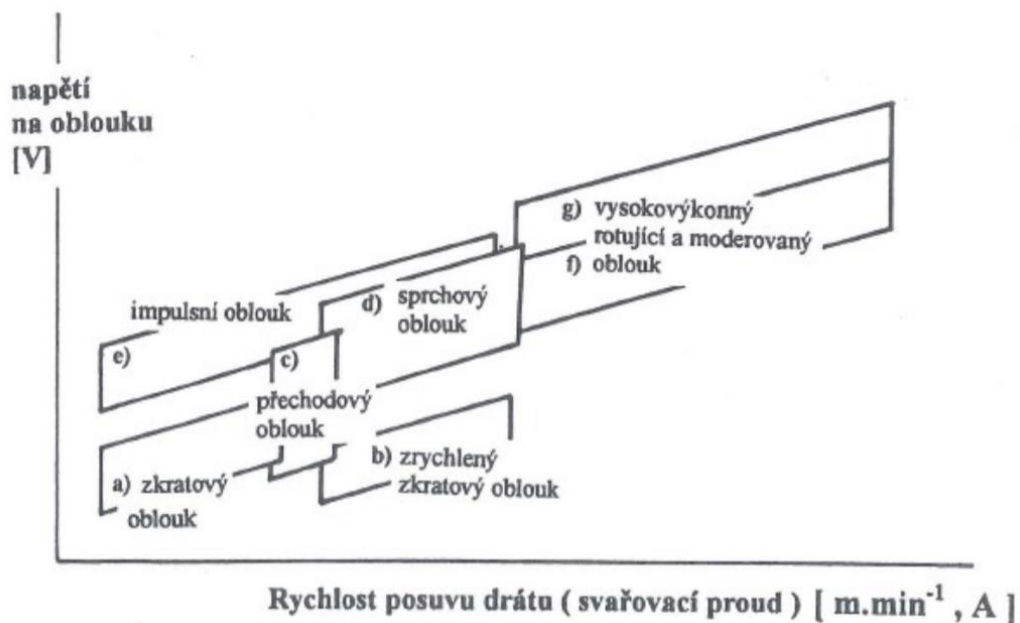
Jak již bylo zmíněno, pro svařování hliníku a jeho slitin metodou MIG se v současné době nejvíce používá stejnosměrný svařovací proud a nepřímá polarita (DC+). Vhodné jsou svařovací zařízení o vyšším výkonu (do 400 A) a vodní chlazení svařovacího hořáku. Pro svařování hliníku se obecně doporučuje vyšší rychlost svařování, avšak nadměrná rychlost může vést k tvorbě studených spojů. Naopak příliš malá rychlost může způsobovat propalování základního materiálu.

2.4.1 Přenos kovu u MIG svařování

Pro svařování v ochranné atmosféře je rozlišováno několik základních druhů přenosu materiálu z tavicí se elektrody do svarové lázně, které závisí na velikosti svařovacího proudu, napětí, prostředí, ve kterém se přenos uskutečňuje a typu ochranného plynu. Různé typy přenosů ovlivňují průběh samotného svařování, především stabilitu oblouku a výsledné vlastnosti svaru jako je kvalita povrchu, tvar housenky, hloubka závaru.

2.4.1.1 Zkratový přenos

Tento způsob přestupu roztaveného kovu probíhá při nižším napětí (16–21 V) a proudu (40–190 A) a krátkém oblouku. Během svařování dochází k periodě hoření a následnému přerušení oblouku, kdy zkrat vyvolá vytvořená kapka roztavené elektrody při dotyku se základním materiálem (perioda zkratu). Tento způsob se používá pro svařování malých tloušťek základního materiálu a pro svařování v polohách. [6]



Obrázek 6: Způsoby přenosu kovu při svařování MIG/MAG [33]

2.4.1.2 Kapkový přenos

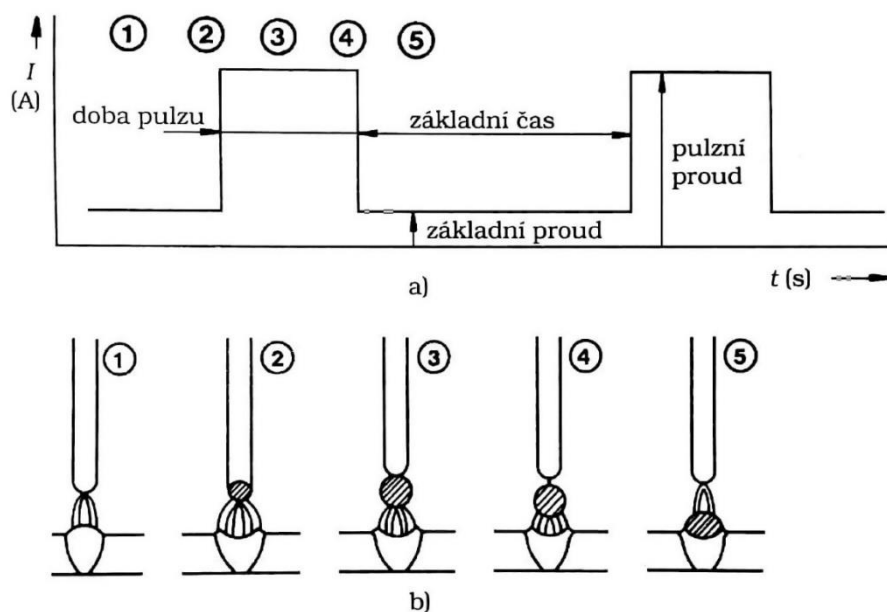
Tento způsob přestupu kovu probíhá při vyšších hodnotách napětí a tím i při větší délce oblouku. Dochází k natavení konce přídavného materiálu a vlivem povrchového napětí k formování roztaveného materiálu do tvaru kuličky. Kapky roztaveného kovu se odtavují bez zkratu v množství 20 až 50 kapek za sekundu. Frekvence odtavování kapek je nestejněměrná, oblouk je méně stabilní. Nevýhodou tohoto přenosu je nežádoucí rozstřík a hrubé svarové housenky. Jedná se v podstatě o přechod mezi zkratovým a sprchovým přenosem. [6][14] [15]

2.4.1.3 Sprchový přenos

Probíhá bezkratovou formou v ochranné atmosféře. Přenos probíhá při vysokém napětí (20 až 36 V) a vysokém proudu (200 do 500 A) a vzniká tak i delší oblouk. Jemně rozptýlené kapičky roztaveného kovu přecházejí z elektrody směrem do svarového kovu za konstantního proudu. Velikost kapek roztaveného kovu je výrazně menší, než je průměr elektrody, přelétávají volně přes elektrický oblouk a mají tak větší rozptyl. Výsledné svary mají hladký povrch a nedochází k rozstříku. Sprchový přenos je vhodný pro základní materiál tlouštěk 5–6 mm. [6] [14] [15]

2.4.1.4 Impulzní přenos

Impulzní svařování (svařování pulzním proudem) je zvláštní variantou svařování MIG, popř. MAG, kdy se v průběhu času pravidelně mění hodnota svařovacího proudu (obrázek 6). Dochází tak k definovanému přenosu kapek kovu řízeného regulací impulzního proudu a frekvencí pulzů. Při každém pulzu dochází k přechodu kapky roztaveného kovu z konce drátu. U tyristorových zdrojů bývá tato frekvence 25, 33, 50 až 100 impulzů za sekundu, u tranzistorových zdrojů jsou frekvence 10 až 4000 impulzů za sekundu. Výhodou svařování pulzním proudem je velká stabilita oblouku a velmi malý rozstřík. Dále možnost svařovat tenké plechy a optimalizovat teplo vnášené do svarové lázně. [4] [5] [6]. Běžné hodnoty základního proudu se pohybují v rozmezí 70–90 A. Délka a tvar oblouku se mění při změnách pulzní frekvence. Pokud je nastavení všech parametrů správné, dochází tak ke krátkému oblouku (cca 3–5 mm). [6]



Obrázek 7: Schéma průběhu impulzního svařování [5]

- 1 Základní proud, udržuje oblouk
- 2 Intenzivní pulz rozžhavljuje konec elektrody
- 3 Roztavený konec elektrody je zaškrčován
- 4 Na konci pulzu se odděluje kapka
- 5 Kapka dopadá na začátku další fáze základního proudu do lázně

2.4.2 Výhody/nevýhody metody MIG

Výhodou je možnost nastavení širokého rozsahu výkonu elektrického oblouku bez nutnosti měnit průměr elektrody, popř. tloušťku základního materiálu. Dále pak dobrá kvalita svarů a redukce oxidů díky čistícímu efektu, vysoká svařovací rychlost a efektivita svařování. Kvůli tomu dochází i k menším deformacím svařenců než u metody TIG.

Mezi nevýhody patří problematický začátek a konec svaru, kdy na začátku může vzniknout studený spoj a na konci je nutné vyplnit koncový kráter, který může obsahovat nečistoty a trhliny. Vadám lze předcházet předehřevem, náběhovými plechy, počítat s přídávky na obrábění, stanovit počátek svaru mimo uvažovaný svar nebo nastavení času dofuku na konci svaru, aby kov ztuhl ještě v pokrytí ochranným plynem po ukončení svařování. [22]. Při MIG svařování může významně ovlivnit tvorbu kořene délka oblouku, která je závislá také na zručnosti svářeče a správném nastavení svařovacích parametrů. [6]

2.5 Ochranné atmosféry – inertní plyny

Obecně při svařování (nejen hliníku a jeho slitin) je hlavní úlohou ochranných atmosfér ochránit tavnou svarovou lázeň před vlivy okolní atmosféry. Ochranné atmosféry tak poskytují ochranu elektrody, oblouku a okolí vznikajícího svaru, chrání kořen svaru, ovlivňují proces při zapalování a hoření elektrického oblouku tím, že vytvoří dostatečně ionizované prostředí, udržují stabilitu hoření a podporují přenos svarového kovu elektrického oblouku a přispívají k přenosu tepelné energie do svaru. Dále mají vliv na tekutost a smáčivost svarových tavných lázní, na vlastnosti svarového kovu, odtavovací výkon, tvar a rozměr svarové housenky, velikost průvaru, rychlost svařování a množství rozstříku. [6]

Ochranné atmosféry se dělí na aktivní a inertní. Jak už z názvů metod vhodných pro svařování hliníku a jeho slitin (TIG, MIG) je patrné, používají se pouze inertní plyny jako argon nebo helium, popř. jejich směs, stejně jako v této diplomové práci.



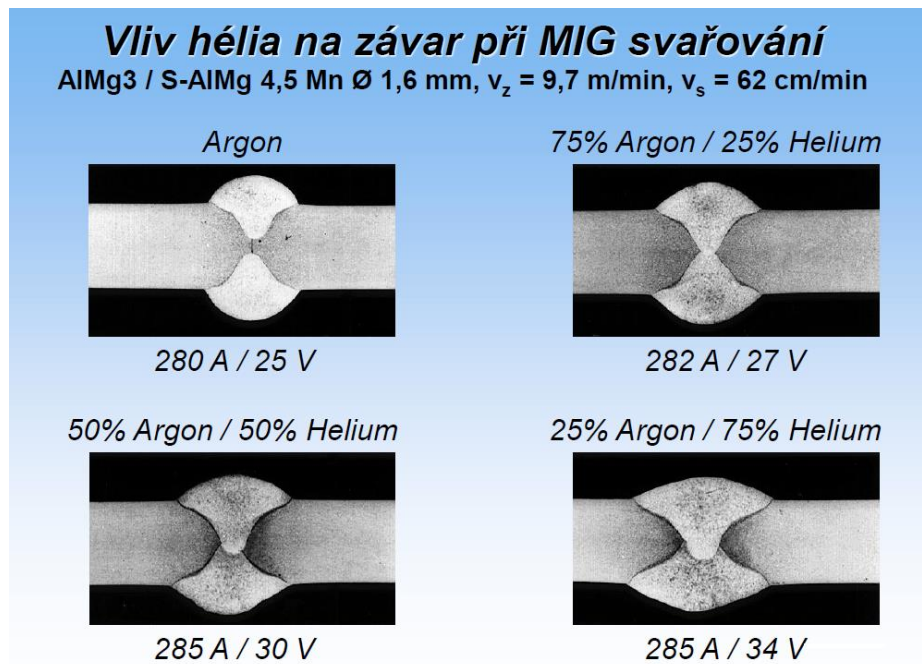
Obrázek 8: Argon (vlevo), Helium (vpravo) [7]

2.5.1 Argon

Argon (Ar) je nejběžnějším inertním ochranným plynem pro svařování hliníku a tvoří základ směsných plynů (jak inertních, tak i aktivních) pro svařování. Vyznačuje se dobrým čistícím účinkem a dobrou ochranou lázně, protože je 1,3x těžší než vzduch. Dobře ionizuje kvůli svému nízkému ionizačnímu potenciálu (15,8 eV). To umožňuje vysoké proudové zatížení, dobré zapálení a stabilitu oblouku a vyšší intenzitu záření elektrického oblouku. Hůře však vede teplo, což vede k typickému tvaru průvaru, kdy v horní části je průvar široký a směrem do hloubky základního materiálu se výrazně zužuje. [6]

2.5.2 Helium

Stejně jako argon je helium (He) jednoatomový inertní plyn bez barvy a zápachu. Avšak oproti argonu hůře ionizuje, protože má vyšší ionizační potenciál (24,6 eV), to způsobuje obtížnější zapálení oblouku a je nutné použití vyššího napětí. Oproti argonu je přibližně 10x lehčí a 7x lehčí než atmosférický vzduch, takže pro stejný stupeň ochrany musíme nastavit větší průtok ochranného plynu. Kvůli své dobré vodivosti tepla dosahuje svarová lázeň vyšších teplot, dosahuje se tak i větší rychlosti svařování a tím i lepšího odplynění lázně (snížení pórovitosti svarů). V porovnání s argonem je závar při použití helia širší. Helium se často používá v automatizovaných provozech, u velkých součástích. Zároveň je ale cena helia několikanásobně vyšší než cena argonu. [6]



Obrázek 9: vliv hélia na závar při MIG svařování [6]

2.6 Svařování MIG AC

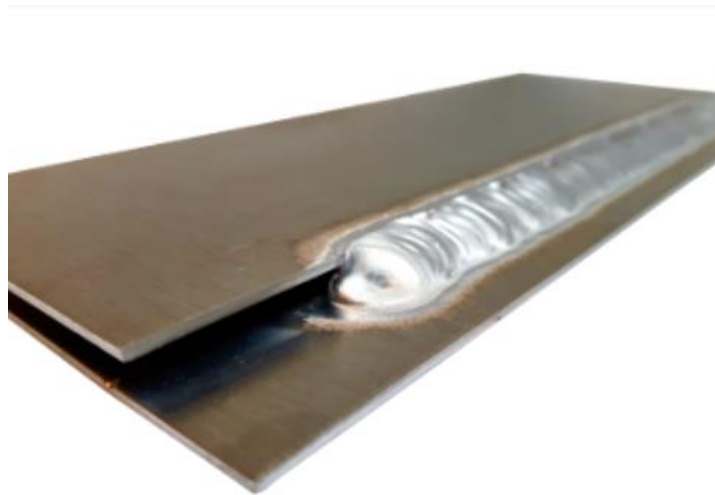
Počátky svařování hliníku metodou MIG se střídavým proudem sahají do přelomu 80. a 90. let minulého století. Důvodem, proč nebyla již dříve tato metoda více rozšířena, byla neúměrně vysoká cena tehdejších svařovacích systémů a nestabilita elektrického oblouku. [16]

Pozornost této metodě v posledním desetiletí způsobilo, že cena svařovacího zařízení pro svařování hliníku metodou MIG střídavým proudem (AC) je již vcelku srovnatelná s náklady na MIG DC+ pulzní systémy. Dalším důvodem je přínos této metody z hlediska produktivity pro svařování tenkých plechů a možnost svařování v polohách a snadná automatizace. Konvenční metoda TIG AC dovede svařovat tenké plechy, avšak tato metoda se vyznačuje nízkou produktivitou, složitější možností automatizace a v případě ručního svařování vysokými nároky na zručnost svářeče. Metoda MIG DC+ se naopak vyznačuje vysokou produktivitou, ale nemožností svařovat velmi tenké materiály. V tomto směru kombinuje metoda MIG AC obě výhody stávajících konvenčních zařízení, tedy možnost svařovat tenké hliníkové materiály vysokou produktivitou, popř. snadnou automatizací a svařování v polohách. [16]

Dalšími přednostmi této metody je snížení vneseného tepla do základního materiálu, tím pádem i snížení rizika vzniku trhlin za tepla a minimalizace deformací, dále pak minimální nebo žádný rozstřík. [17]

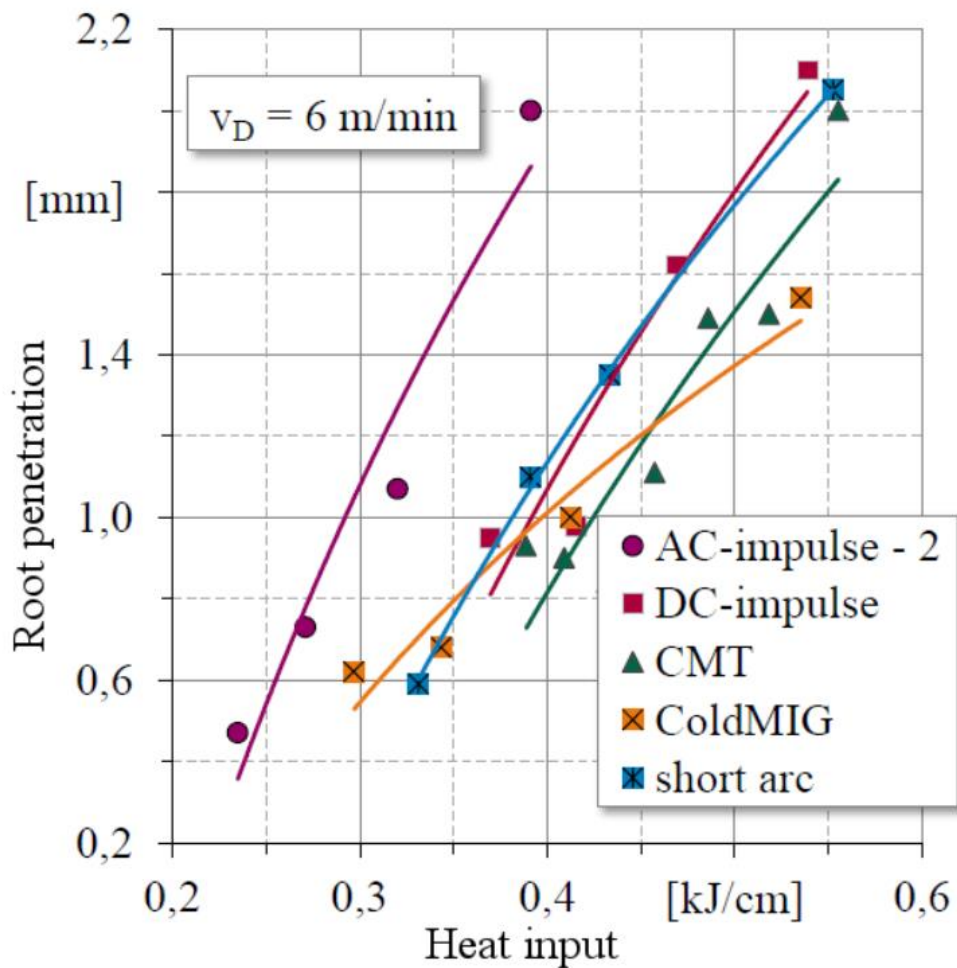
Podle výrobce je metoda MIG AC vhodná pro svařování tenkých plechů o tloušťce až 1 mm. Je vhodná pro materiály citlivé na tepelné změny – neželezné kovy (hliník, měď, hořčík, mosaz, titan, nikl a jejich slitiny) a i např. pro korozivzdorné oceli.

Tato metoda je dále vhodná ke svařování plechů různé tloušťky a podle výrobce i k přemostění velkých svarových mezer mezi tenkými plechy, tzn. při nevhodné přípravě svarových ploch (viz obrázek 9). [18]



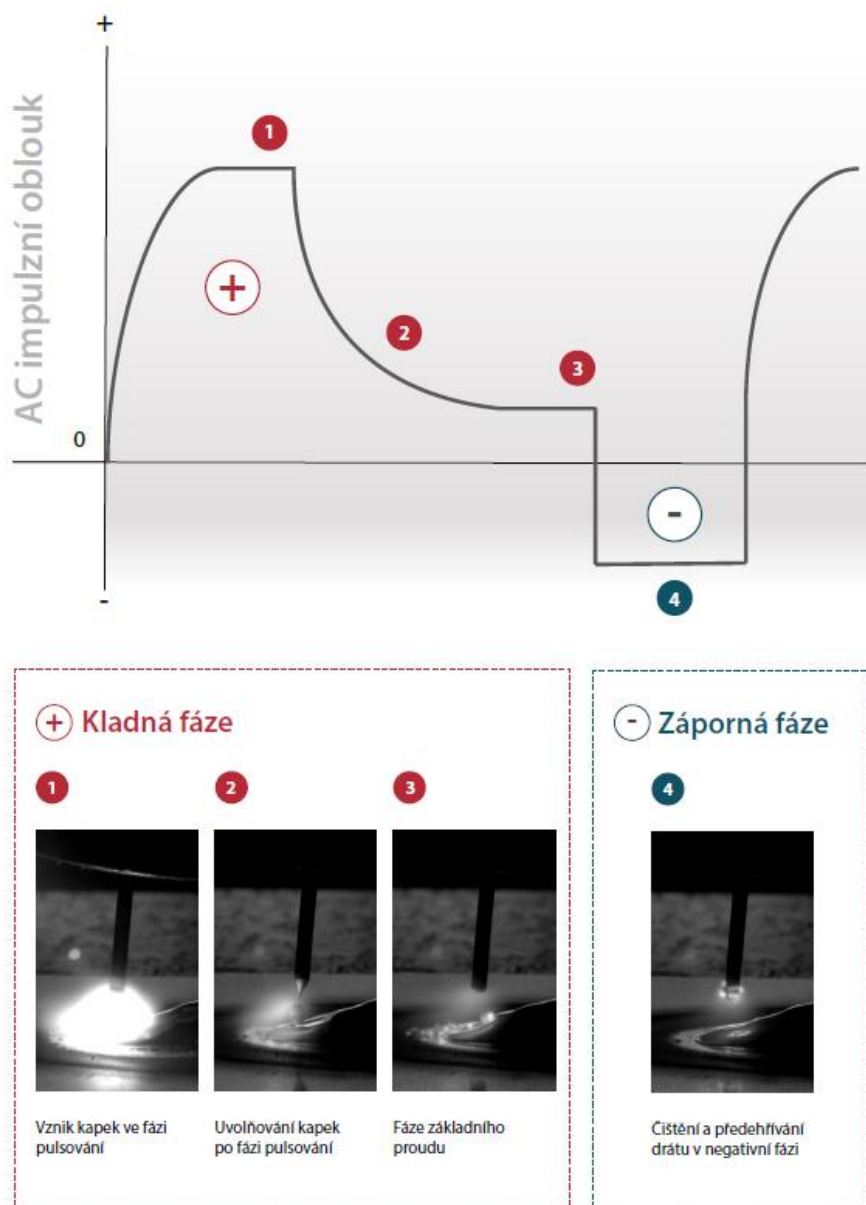
Obrázek 10: Překlenutí 2,5 mm mezery mezi plechy tloušťky 1,5 mm [18]

Z grafu (viz obrázek 11) je vidět především srovnání metod MIG AC a DC+ z hlediska vneseného tepla. Metoda MIG AC by měla zaručovat výrazně méně vneseného tepla do základního materiálu. To je výhodné především ke zmenšení velikosti tepelně ovlivněné oblasti a ovlivnění základního materiálu.



Obrázek 11: Porovnání vneseného tepla (heat input) a velikosti průvaru (root penetration) pro různé metody [19]

Pro MIG AC svařování je využíváno především svařování pulzním proudem. Svařování pulzním proudem zaručuje dobrou kvalitu svaru, absenci rozstřiku a redukci tepla vneseného do základního materiálu. Průběh přenosu kovu v závislosti na velikosti proudu v kladné a záporné fázi je zobrazen na obrázku 12. Doba kladné fáze je asi 3x delší než doby záporné. V kladné fázi dochází k prudkému nárůstu proudu v pulzu a tím ke vzniku kapky svarového kovu, po kterém následuje pokles na hodnotu základního proudu a následně změna na zápornou fázi. [42]



Obrázek 12: přenos kovu během svařování metody MIG AC [42]

3 Experimentální část

3.1 Svaření vzorků pomocí metody MIG AC

Experimentální část diplomové práce se zabývá vlastnostmi svarů, které byly svařeny metodou MIG AC, jejich vyhodnocením destruktivními a nedestruktivními zkouškami a následným porovnáním s metodou tavného svařování TIG AC. Samotné svařování probíhalo v laboratoři Ústavu strojírenské technologie, ČVUT v Praze fakulty strojní.

Jako základní materiál pro účely svařování a následné porovnání zvolených metod, byly zvoleny přístřihy plechů (150 x 100 mm) z hliníkové slitiny EN AW 5754 [AlMg3] o tloušťce 2 mm. Jedná se o nevytvrditelnou slitinu hliníku s hlavním legujícím prvkem hořčíkem (viz tabulka 7). Slitina se vyznačuje dobrou svařitelností a snadnou obrobitelností a střední pevností.

Pro potřeby dobrého porovnání svarů a jejich vlastností byl zvolen tupý svar typu „I“. Na svarech byly vyhodnocovány nedestruktivně povrchové vady vizuální a kapilární zkouškou, destruktivními zkouškami byly svary vyhodnoceny pomocí tahové zkoušky, metalografickou zkouškou a zkouškou makrostruktury a měřením mikrotvrdosti svarového spoje.

Tabulka 7: Vlastnosti základního materiálu [34]

Materiál	Mechanické vlastnosti			Chemické složení			
	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [MPa]	Tažnost [%]	Mg [%]	Mn [%]	Si [%]	Fe [%]
EN AW 5754 H22	220–270	130	min. 9	max. 3,6	max. 0,5	max. 0,4	max. 0,4

3.1.1 Příprava vzorků svařených metodou MIG AC

Přístřihy plechů byly nejprve vizuálně zkontrolovány, zda nedošlo při dělení (stříhání) k jejich deformaci, což by znesnadňovalo pozdějšímu správnému sesazení a upnutí. Hrany vzorků byly zbaveny otřepů ručním odjehlovačem, plocha svaru a okolí byly bezprostředně před svařováním jemně ošetřeny kartáčem s drátky z korozivzdorné oceli pro zbavení nežádoucí vrstvy Al_2O_3 . Plochy byly dodatečně odmaštěny lihem s použitím buničiny. Přístřihy byly upnuty do přípravku (viz obrázek 13) tak, aby mezi nimi nevznikala nežádoucí mezera, a aby hrany obou plechů dobře lícovaly. Po provedeném svařování byly vzorky po několik minut ponechány v přípravku upnuté k zamezení možné deformaci.



Obrázek 13: Upnutí plechů v přípravku

3.1.2 Experimentální zařízení pro svařování metodou MIG AC

Samotné svařování bylo realizováno na svařovacím zdroji ELMA-Tech MIDI MIG 300 (AC Pulse welding) (viz obrázek 14). Přístroj využívá technologii střídavého proudu a svařování pulzním proudem. MIG AC proces řídí přechod kapek mezi přímou a nepřímou polaritou a fázemi nízké a vysoké energie. Tím dochází k zamezení nežádoucího rozstříku. Jako ochranná atmosféra byl zvolen inertní plyn argon 4.6 s průtokem 15 l/min.

Svařovací zdroj obsahuje databázi různých typů svařovacích procesů a parametrů. V praxi to znamená, že si zdroj automaticky určí svařovací parametry na základě obsluhou zadaných vstupních podmínek jako je zvolení složení základního materiálu, jeho tloušťky a složení přídavného materiálu.

Při použití parametrů na zvolený vzorek (viz kapitola 3.1.3) však výrobcem nastavené vstupní parametry nebyly použitelné, docházelo k propalování materiálu a bylo potřeba vlastního nastavení, resp. pro svaření 2 mm plechu byly voleny hodnoty jako pro svařování plechu 1,3 – 1,5 mm základního materiálu.



Obrázek 14: ELMA-Tech MIDI MIG 300 AC

Tabulka 8: Technická data Elma-Tech MIDI MIG 300 [43]

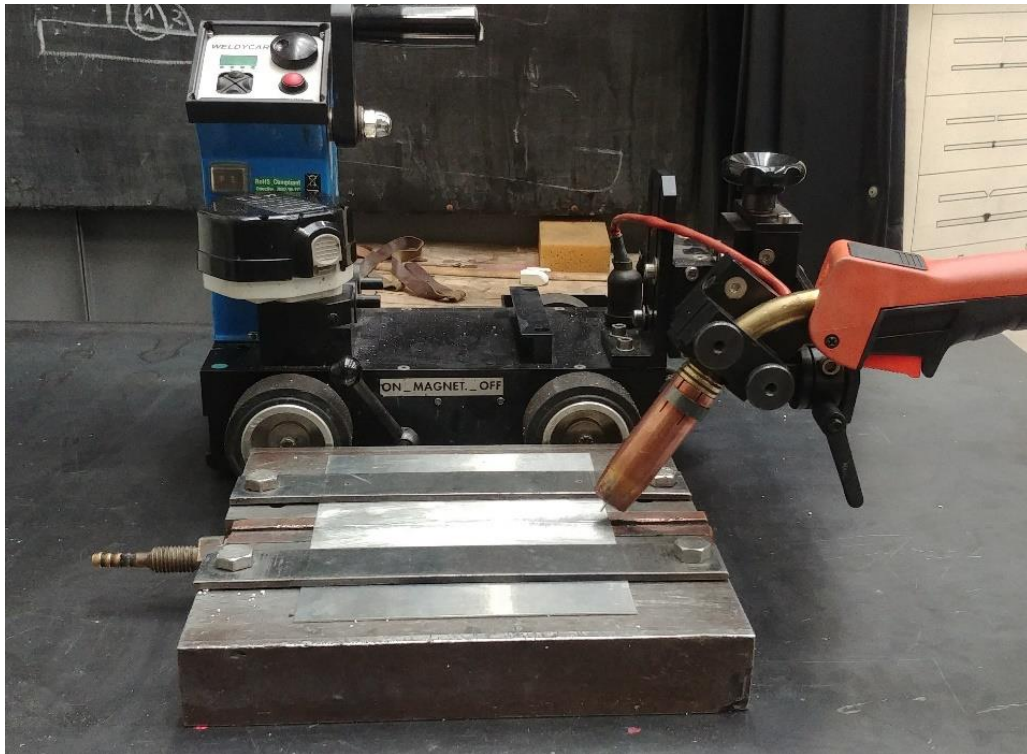
Technická data	
Síťové napětí	3 x 400 V 50 Hz
Maximální výkon	11,5 kW
Rozsah nastavení	10 A / 14,4V – 300 A / 29 V
Maximální pulzní proud	800 A

3.1.3 Popis svaření vzorků metodou MIG AC

Jak již bylo zmíněno, svařování bylo uskutečněno na vzorcích ve formě plechu tloušťky 2 mm. Bylo využito manipulátoru (svařovacího vozíku) Air Liquide Welding NV, na kterém byl uchycen svařovací hořák pod úhlem 35°. Jako přídatný materiál byl zvolen svařovací drát o průměru 1,2 mm typu AlMg4,5MnZr (obchodní označení OK AUTROD 5087). [35] Tento přídatný materiál je vhodný pro svařování slitin hliníku s obsahem hořčíku do 5 %. PM má vyšší pevnost v tahu než základní materiál a přídavek zirkonu zlepšuje odolnost vůči trhlinám za tepla. [35]

Tabulka 9: vlastnosti přídatného materiálu OK AUTROD 5087 [35]

Materiál	Mechanické vlastnosti			Chemické složení			
	Pevnost v tahu R _m [MPa]	Mez kluzu R _e [MPa]	Tažnost [%]	Mg [%]	Mn [%]	Zr [%]	Fe [%]
OK AUTROD 5087	280	130	30	4,7	0,8	0,11	0,12



Obrázek 15: Svařovací vozík Air Liquide NV

Celkem bylo provedeno úspěšné svaření čtyř vzorků různými svařovacími parametry. V případě vyšších svařovacích hodnot parametrů docházelo již k propalování základního materiálu, v případě nižších hodnot docházelo k vytvoření neprůvarů nebo až k zhasínání oblouku. Konkrétní hodnoty svařovacích parametrů, které byly použity, jsou uvedeny níže (viz tabulka 10).

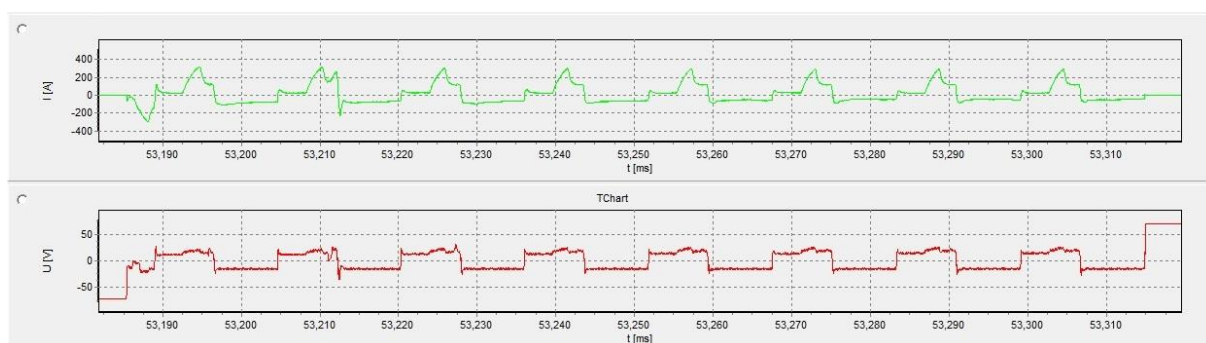
Tabulka 10: Svařovací parametry jednotlivých vzorků

Označení vzorku	Napětí U [V]	Proud I [A]	Rychlost svařování [cm/min]	Přístrojem předdefinovaná tloušťka materiálu [mm]
MIG_1	17,8	73	40	1,5
MIG_2	17,7	68	40	1,4
MIG_3	17,6	64	40	1,3
MIG_4	17,7	68	50	1,4

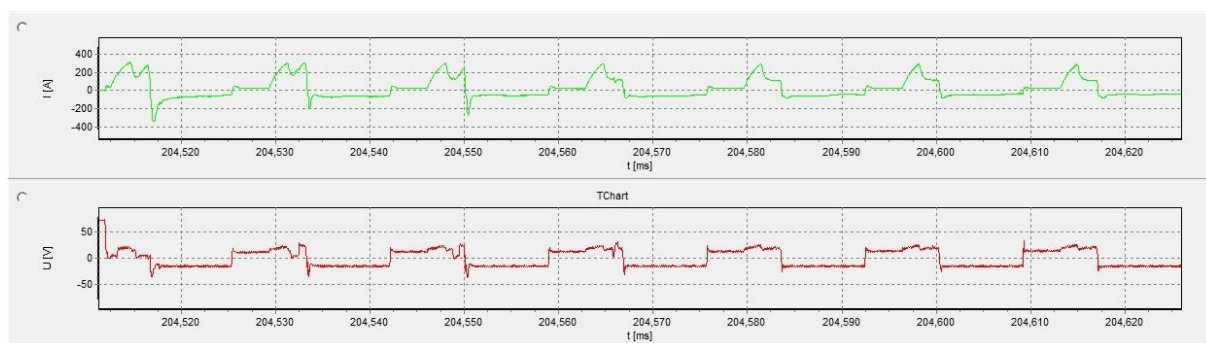
Na obrázcích 16–19 níže je vidět grafické znázornění průběhu napětí a proudu během svařování. Hodnota základního proudu se pohybovala od 68 do 73 A. V pulzech řízených svařovacím zdrojem dosahovaly hodnoty proudu až 300 A. Průběh křivek proudu i napětí nebyl vždy pravidelný, křivky za sebou měnily svůj tvar a vyskytovaly se místy i „dvojité pulzy“ (viz obrázek 16 vlevo). To mělo za následek nepravidelnou kresbu svaru, která je patrná ve vizuální zkoušce v kapitole 3.1.4.1.



Obrázek 16: Průběh proudu a napětí MIG_1



Obrázek 17: Průběh proudu a napětí MIG_2



Obrázek 18: Průběh proudu a napětí MIG_3



Obrázek 19: Průběh proudu a napětí MIG_4

3.1.4 Zkoušky svarů vzorků vytvořených metodou MIG AC

Svařené vzorky byly dále podrobeny zkouškám nedestruktivním i destruktivním. V následujících kapitolách jsou zkoušky popsány a svarové spoje vyhodnoceny.

3.1.4.1 Vizuální zkouška svarů vytvořených metodou MIG AC

Na obrázcích 20–23 níže jsou vidět krycí svarové housenky (krycí vrstvy) 4 vybraných vzorků. Na začátcích svaru (vpravo) je patrný výrazný objemný návar (kromě vzorku MIG_2), kdy došlo k zapálení oblouku bez současného pohybu vozíku. Na koncích svaru (vlevo) naopak docházelo k propálení základního materiálu. Začátek ani konec svaru nebyl při zkoušení uvažován a vyhodnocení bylo realizováno pouze ze středních částí svarového spoje. Při použití v praxi by bylo vhodné využít náběhových plechů k eliminaci těchto možných vad nebo začít mimo uvažovaný svar.

Během svařování nedocházelo ani u jednoho ze svarů k nežádoucímu rozstříku. Kresba svarové housenky nebyla po celé délce úplně pravidelná, což má spojitost s nepravidelnou charakteristikou proudu z grafů (viz obrázky 16–19).

Šířka svarové housenky a kořene svaru také nebyla po celé délce svaru zcela stejná, tvar svaru se měnil především v důsledku postupného vnášení tepla do svařence.

Jak je i z obrázků 20–23 níže patrné, výsledné rozdíly v počátečních a koncových místech nejsou příliš veliké a nedocházelo k výrazným změnám. Změna šířky svaru se pohybovala v řádech desítek μm . Řešením těchto rozdílů by mohl být předehřev materiálu, popř. ještě větší délka svaru.



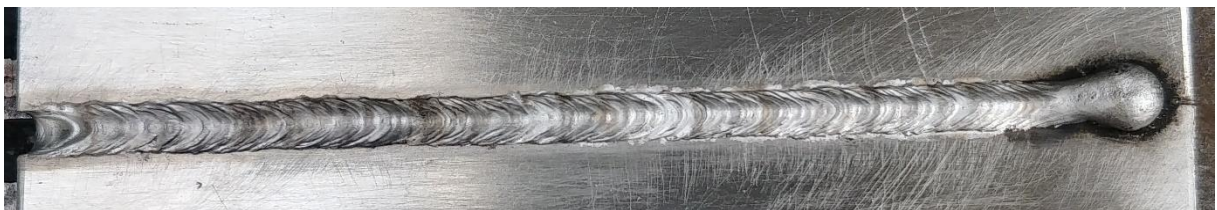
Obrázek 20: Krycí vrstva svaru MIG_1



Obrázek 21: Krycí vrstva vzorku MIG_2



Obrázek 22: Krycí vrstva vzorku MIG_3



Obrázek 23: Krycí vrstva vzorku MIG_4

Na obrázcích 24–27 níže jsou vidět obrázky kořenů svarů. Během svařování nebylo použito spodního přívodu inertní ochranné atmosféry k formování kořene svaru. Formování kořene svarů nebylo proto úplně pravidelné, vznikaly tzv. krápníky, nejvíce patrné u vzorku MIG_4. Tyto vady vznikají při příliš vysoké rychlosti svařování, což se potvrdilo, neboť vzorek MIG_4 byl svařován rychlostí 50 cm/min. Další příčinou může být nedostatečná předúprava svařovaných plechů, resp. správné ošetření dolní hrany plechů.

Jak je vidět na vzorku MIG_3 (viz obrázek 26), kde bylo použito nejnižších hodnot svařovacího proudu a napětí (viz tabulka 10), nedošlo k průvaru vzorku po celé délce, avšak pouze na začátku, kde se svařovací vozík ještě nepohyboval.



Obrázek 24: kořen svaru MIG_1



Obrázek 25: kořen svaru MIG_2



Obrázek 26: kořen svaru MIG_3



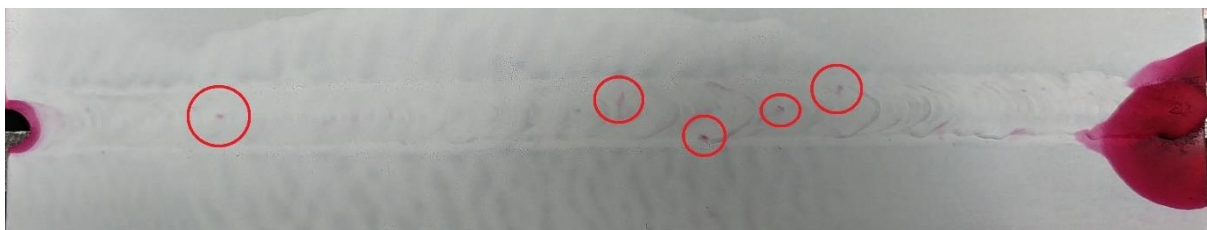
Obrázek 27: kořen svaru MIG_4

3.1.5 Kapilární zkouška vzorků vytvořených metodou MIG AC

Kapilární (penetrační) zkouška je jednou z nedestruktivních zkoušek svarů. Umožňuje zjistit i povrchové vady, které nejsou patrné vizuální zkouškou. Zkouška je založena na vzlínavosti detekční tekutiny (penetrantu) vad spojených s povrchem materiálu.

V první části zkoušky bylo provedeno důkladné čišění a odmaštění zkoušených svarů. Následně byl nanesen barevný penetrant, zároveň byla dodržena doba alespoň 10 minut, aby stihl penetrant zatéci do možných vad. Poté byl přebytek penetrantu odstraněn a na očištěný povrch byla nanesena vývojka.

Z provedené zkoušky je patrné, že svary vytvořené metodou MIG AC mají relativně malý výskyt pórů, což je však nepřijatelné, neboť pro hliníkové slitiny by se na vzorcích zkoušených kapilární zkouškou neměly vyskytovat žádné póry. Tuto podmínku splnil pouze vzorek MIG_2. Vznik pórů v tomto případě může být způsoben příliš vysokou rychlostí svařování.



Obrázek 28: kapilární zkouška vzorku MIG_1



Obrázek 29: kapilární zkouška vzorku MIG_2



Obrázek 30: kapilární zkouška vzorku MIG_3



Obrázek 31: kapilární zkouška vzorku MIG_4

3.1.6 Metalografická zkouška – zkouška makrostruktury vzorků vytvořených metodou MIG AC

Pomocí metalografické zkoušky lze zjistit, makroskopické charakteristiky svaru, popř. strukturální vlastnosti, které ale v této diplomové práci nebyly hodnoceny. Na vytvořených vzorcích makrostruktury byla měřena velikost tepelně ovlivněné oblasti, vyhodnocení tvaru svaru, vyhodnocení lineárního přesazení, popř. vnitřní vady jako jsou póry nebo trhliny.

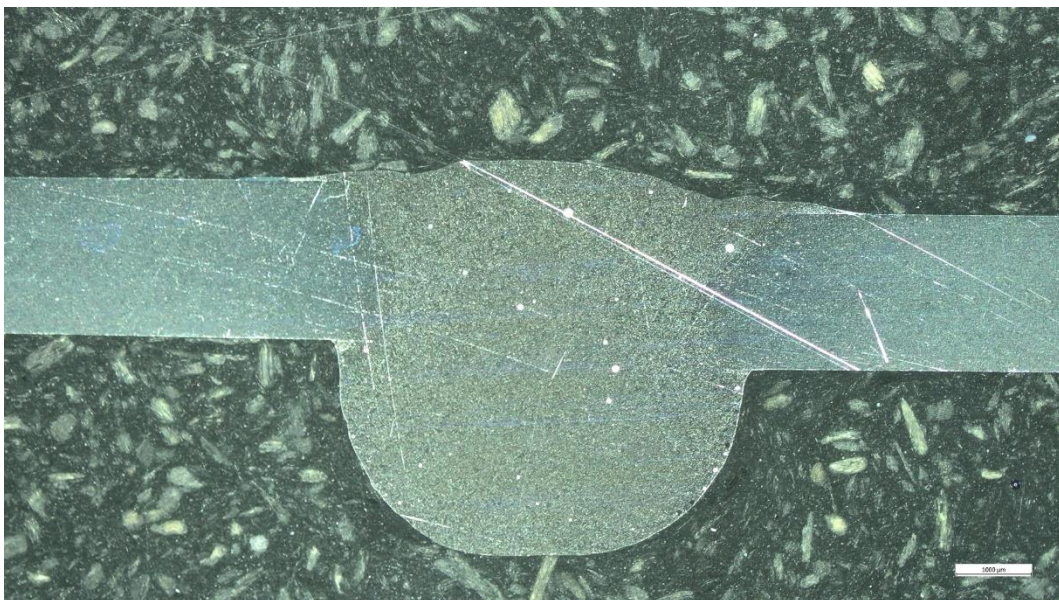
Vzorky byly rozřezány na přesné metalografické pile Struers Labotom 3 s kotoučem 20A25 s intenzivním chlazením, kde byl proveden příčný řez, kolmý k ose svaru. Dále byly vzorky zalisovány za tepla v metalografickém lisu Struers Citopress_1. Broušení bylo realizováno na brusce/leštičce Buehler Beta s automatickou hlavou Vector. Broušení probíhalo s protiběžným pohybem brusného kotouče a přítlačné hlavy s upevněnými vzorky, přítlakem 30 N. Pro postupné broušení bylo využito brusných papírů zrnitosti 180, 1200, 2000 a 4000 a chlazení vodou.

Následovalo postupné, několika-stupňové leštění leštícím plátnem za přítomnosti smáčedla a leštící suspenze a následné leptání.



Obrázek 32: Metalografický výbrus

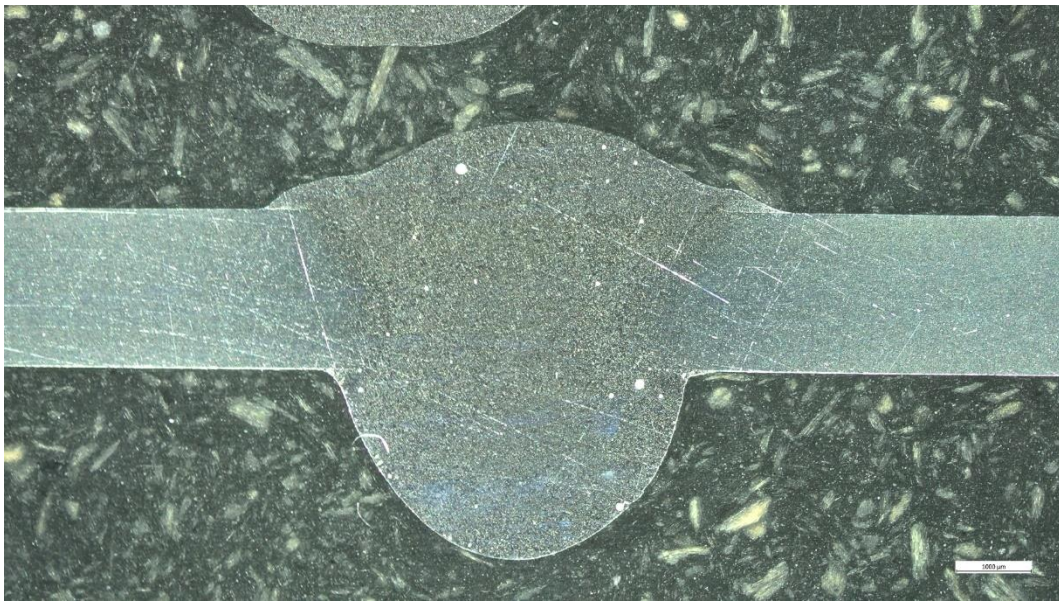
Makrostruktura svařených vzorků byla zkoumána na přístroji Carl Zeiss STEMI 508 a programu ZEN. Díky tomuto programu byly pořízeny fotografie, které jsou níže (viz obrázky 33–36).



Obrázek 33: makrostruktura vzorku MIG_1

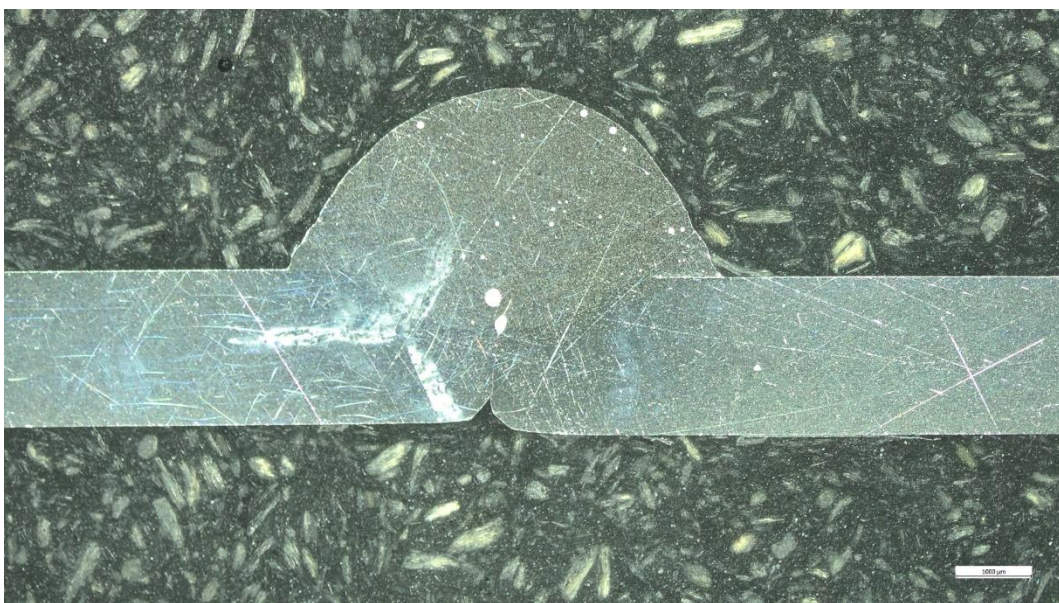
Na obrázku 33 je vidět lineární přesazení a objemný kořen svaru a velmi malé převýšení svaru. Na vině mohou být příliš vysoké svařovací parametry, především hodnoty proudu (základní proud byl 73 A). Uvnitř svarového kovu jsou patrné i póry jako bílé tečky na snímku a studené

spoje na hranici základního materiálu, svarové housenky a kořene. Tyto vady mohou být opět způsobeny příliš vysokou rychlostí svařování. Je zde i patrná tepelně ovlivněná oblast, která je velmi úzká, dosahující maximálně 1000 μm . Šířka tepelně ovlivněné oblasti byla u všech vzorků téměř stejně velká.



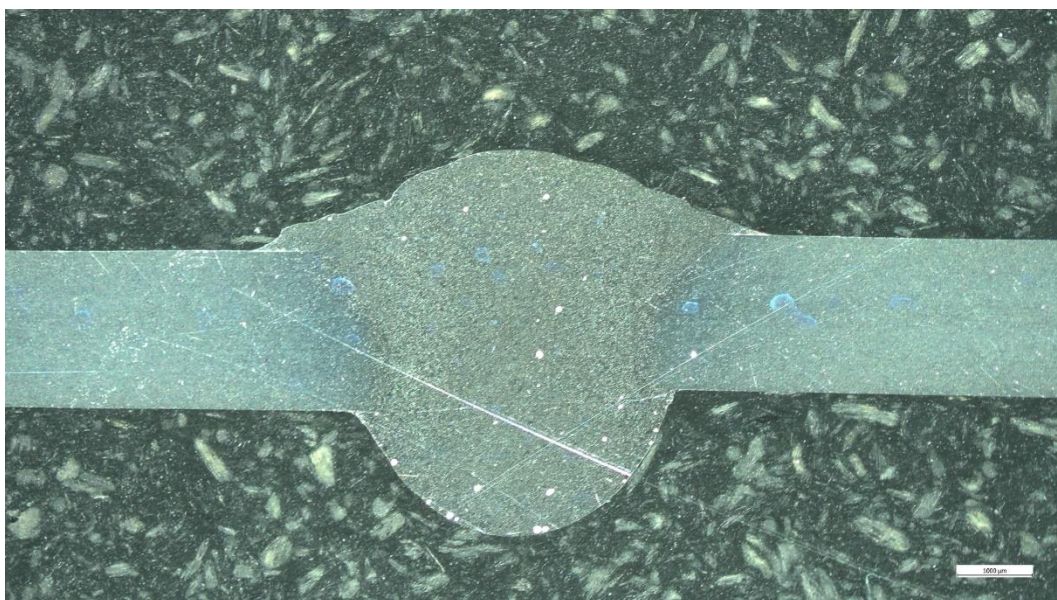
Obrázek 34: makrostruktura vzorku MIG_2

Vzorek MIG_2 nemá žádné lineární přesazení, avšak opět je zde příliš velký kořen svaru a horní strana svaru není osově symetrická. Výskyt pórů je zde výrazně menší než u předchozího vzorku a jsou zde vidět opět i studené spoje.



Obrázek 35: makrostruktura vzorku MIG_3

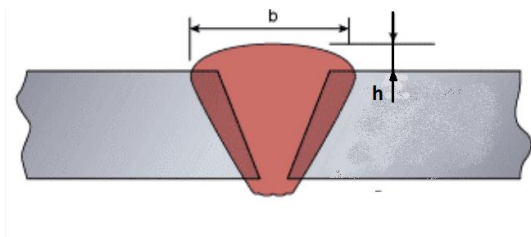
Z důvodu příliš nízkých svařovacích parametrů (základní proud 64 A) je na obrázku 35 patrné úplné neprovaření základního materiálu, studené spoje a velké množství pórů. Svar byl sice dále podroben zkoušce mikrotvrdosti a tahem, ale do celkových výsledků a srovnání nebyl dále uvažován.



Obrázek 36: makrostruktura vzorku MIG_4

Vzorek MIG_4 byl svařován stejnými svařovacími parametry jako vzorek MIG_2, pouze s vyšší svařovací rychlostí (50 cm/min). Upnutí svaru zde bylo téměř přesné, svar je osově symetrický, provaření svaru bylo úplné. Na krajích krycí vrstvy svaru je ovšem patrný studený spoj vzniklý právě příliš vysokou rychlostí svařování a velké množství pórů. Ty jsou patrné především v oblasti kořene svaru, který je výrazně méně převýšený než předchozí vzorky.

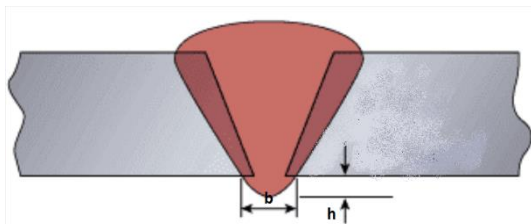
Z metalografických výbrusů byly dále odečteny rozměry svarů a porovnány mezi sebou a vyhodnocena přípustnost podle normy ČSN EN ISO 10042. Všechny svary, kromě vzorku MIG_3, kde došlo k neprůvaru, splňovaly požadavky dle normy a byly přípustné.



Obrázek 37: šířka a výška svaru [37]

Tabulka 11: šířka a výška svaru

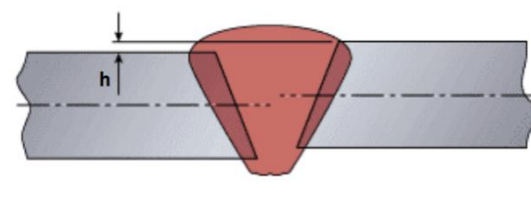
Vzorek	b [mm]	h [mm]	Přípustnost
MIG_1	7,2	0,7	Ano
MIG_2	6,9	1,1	Ano
MIG_3	5,7	2,4	Ano
MIG_4	6,7	1,2	Ano



Obrázek 38: převýšení kořene svaru [44]

Tabulka 12: převýšení kořene

Vzorek	b [mm]	h [mm]	Přípustnost
MIG_1	4,9	2,2	Ano
MIG_2	5,0	2,4	Ano
MIG_3	-	-	Ne
MIG_4	4,2	1,7	Ano



Obrázek 39: lineární přesazení [45]

Tabulka 13: lineární přesazení

Vzorek	h [mm]	Přípustnost
MIG_1	0,35	Ano
MIG_2	-	Ano
MIG_3	-	Ano
MIG_4	0,27	Ano

3.1.7 Mikrotvrdość svarů vytvořených metodou MIG AC

Vhodnou metodou pro měření mikrotvrdości svarových spojů, která byla zvolena i v této diplomové práci, je metoda měření tvrdości dle Vickerse. Metoda je založena na vtisku diamantového indentoru tvaru čtyřbokého jehlanu a změření úhlopříček vtisku. Obě úhlopříčky jednotlivých vtisků byly měřeny opticky na přístroji Buehler Indenta met 1100 a vyhodnocena výsledná mikrotvrdość.

Pro účely této diplomové práce byla zkouška prováděna zatížením velikostí 1 kp (kilopondu) (HV1) a na každém svařeném vzorku byly provedeny 3 vtisky ve všech oblastech svarového spoje, tedy do základního materiálu (dále ZM) po obou stranách svaru, do tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a do svarového kovu (SK).

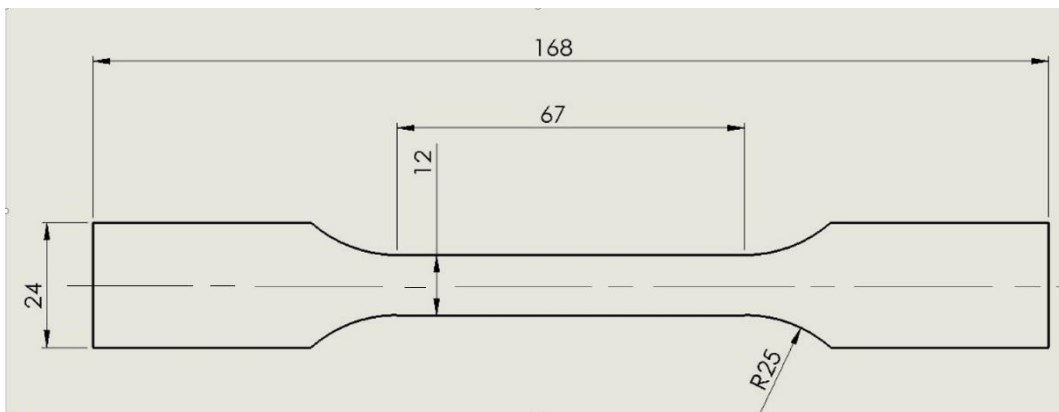
V tabulce 14 jsou uvedeny průměrné hodnoty jednotlivých vtisků (každá hodnota v tabulce je průměr složený ze 3 měření dané oblasti). Hodnoty z každého jednotlivého měření jsou uvedeny v příloze. Z naměřených hodnot je patrné, že nejmenší hodnota tvrdości byla naměřena v tepelně ovlivněné oblasti. Pokles tvrdości oproti svaru a základnímu materiálu v TOO byl do 10 %.

Tabulka 14: Hodnoty mikrotvrdości MIG AC

Vzorek	Tvrdość HV1				
	ZM ₁	TOO ₁	SK	TOO ₂	ZM ₂
MIG_1	62,5	60,1	62,0	54,8	61,7
MIG_2	63,3	61,3	65,0	60,6	62,3
MIG_3	64,5	57,6	64,6	61,2	63,9
MIG_4	62,1	57,0	69,3	53,7	61,8
Průměr	63,1	59,0	65,3	57,6	62,4

3.1.8 Zkouška tahem vzorků vytvořených metodou MIG AC

Zkouška tahem je jednou ze základních destruktivní zkoušek používaných pro vyhodnocení pevnosti svarových spojů. V této práci byly všechny vzorky pro účely tahové zkoušky předem obrobeny na přesné rozměry na CNC frézce podle normy ČN EN 42 0321 do tvaru zkušební tělesa (viz obrázek 40). Dále bylo zkušební těleso obrobeno do roviny se základním materiálem v místě svaru. Pro každý vzorek byla vyhotovena dvě zkušební tělesa.



Obrázek 40: výkres zkušební tělesa

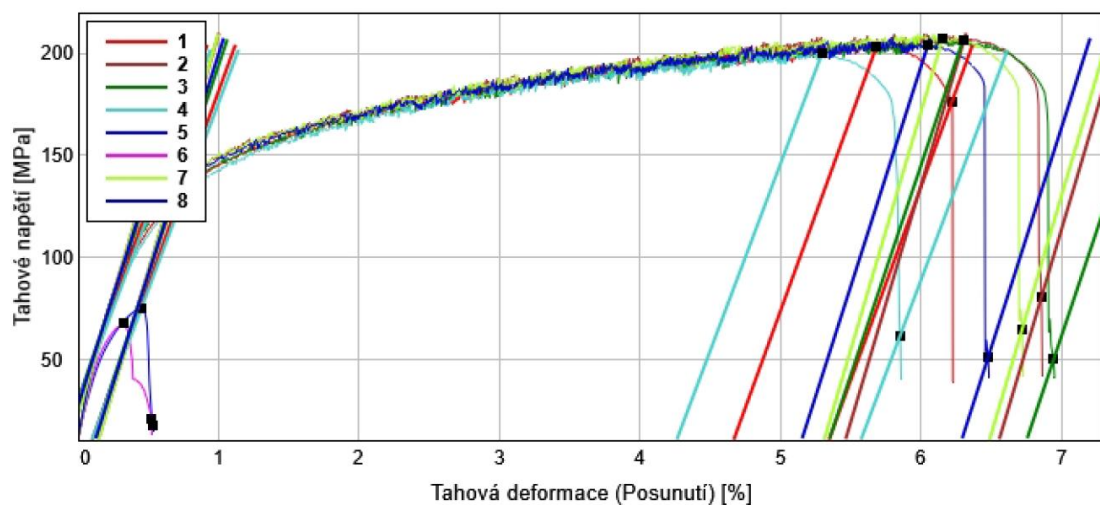


Obrázek 41: Trhací stroj Instron 5900R

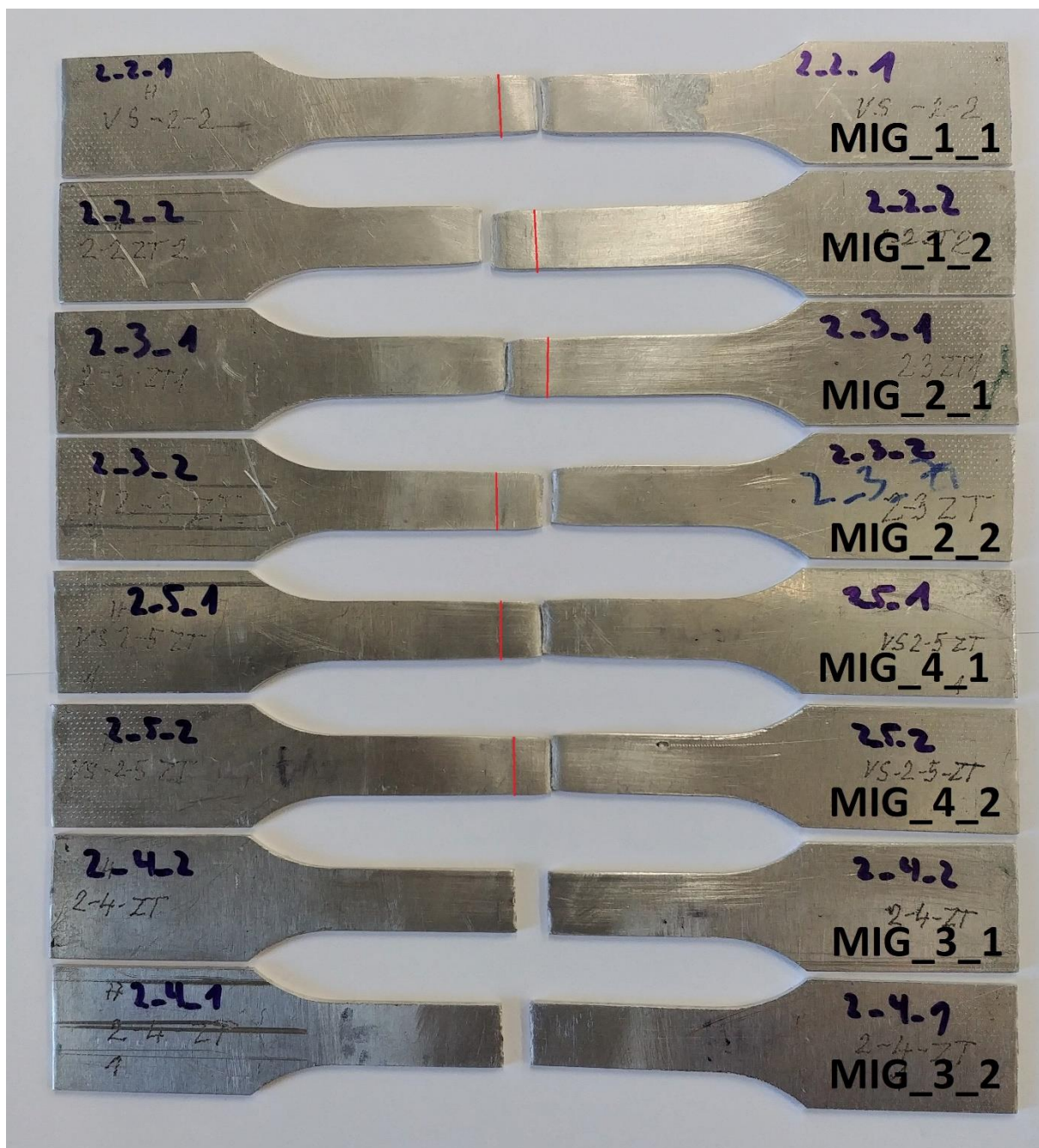
Tahová zkouška byla provedena na trhacím stroji Instron 5900R (viz obrázek 41), kde byla zkoušena mez pevnosti při přetržení. Kromě vzorku MIG_3, kde došlo k neprůvaru a tudíž k přetržení v oblasti svaru, docházelo u všech vzorků k tvorbě „krčku“ a následnému přetržení v tepelně ovlivněné oblasti. Pro lepší znázornění polohy místa porušení jsou na obrázku 43 červeně zvýrazněny osy svarů. To, že k porušení materiálu došlo v tepelně ovlivněné oblasti, potvrzují i výsledky uvedené v tabulce 15, kde je patrné, že vzorky vykazovaly mez pevnosti v rozmezí 203,5 – 205,5 MPa, ačkoliv základní materiál dodaný výrobcem udává minimální mez pevnosti v tahu 220 MPa (viz tabulka 5).

Tabulka 15: Hodnoty tahové zkoušky MIG AC

Číslo měření	Označení vzorku	Mez pevnosti R_m [MPa]	Průměrná hodnota R_m [MPa]
1	MIG_1_1	203	204,5
2	MIG_1_2	206	
3	MIG_2_1	207	203,5
4	MIG_2_2	200	
5	MIG_3_1	207	205,5
6	MIG_3_2	204	
7	MIG_4_1	75	71,5
8	MIG_4_2	68	



Obrázek 42: Graf průběhu tahové zkoušky MIG AC



Obrázek 43: Přetržené vzorky tahové zkoušky vzorku MIG AC

3.2 Svaření vzorků pomocí metody TIG AC

V druhé části experimentu byly stejné plechy svařeny metodou TIG AC a dále vyhodnoceny pomocí nedestruktivních a destruktivních zkoušek. Podmínky předúpravy plechů i upnutí byly stejné jako při svařování MIG AC, stejně tak jako přídatný materiál o průměru 1,2 mm AlMg4,5MnZr (obchodní označení OK AUTROD 5087).

3.2.1 Experimentální zařízení pro svařování metodou TIG AC

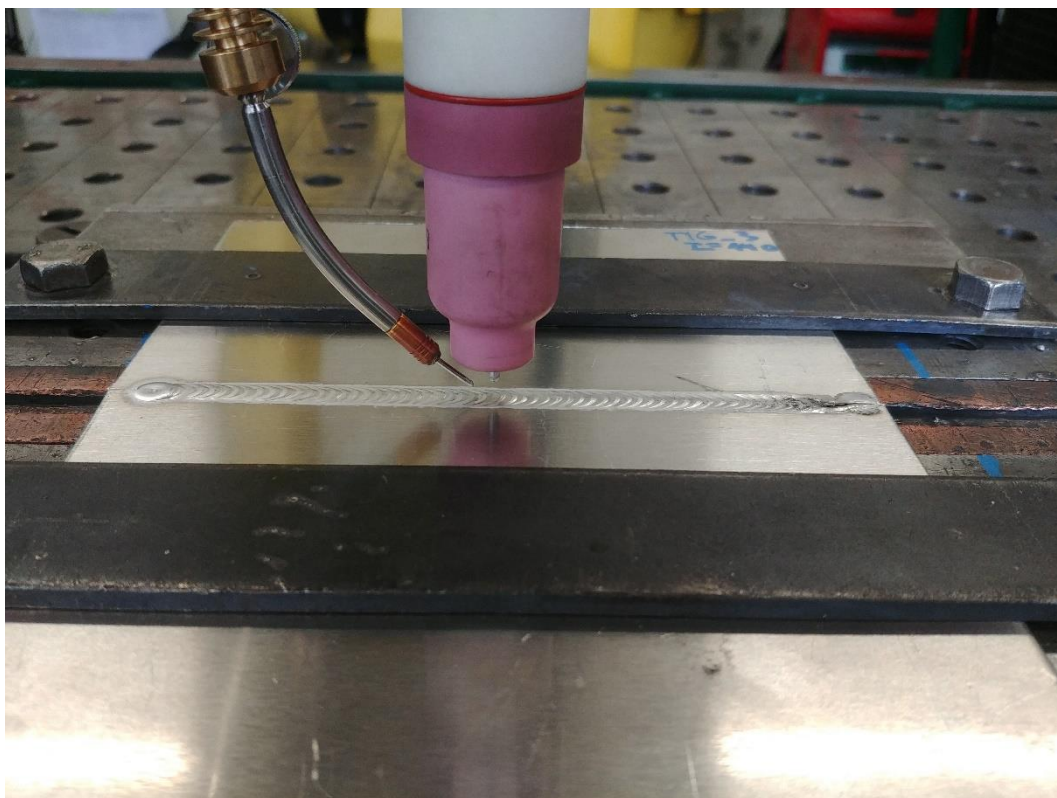
Svařování probíhalo pomocí svařovacího stroje Migatronik PI 320 a robotu Fanuc Arc Mate 100ic s využitím robotického hořáku a automatickým podáváním drátu (viz obrázek 44). Vzorky byly svařeny střídavým proudem s pulzou. Jako ochranná atmosféra byl stejně jako u MIG AC zvolen inertní plyn argon 4.6, avšak s nižší rychlostí proudění 8–10 l/min.



Obrázek 44: Fanuc Robot Arc Mate 100ic

3.3 Svaření vzorků vytvořených metodou TIG AC

Jak již bylo zmíněno, svařování bylo uskutečňováno na vzorcích ve formě plechu tloušťky 2 mm. Díky využití svařovacího robotu probíhalo samotné svařování plně automaticky. Stejně jako u předchozího experimentu nebylo použito přívodu inertní atmosféry k formování kořene svaru. Hořák, resp. elektroda s průměrem 2,4 mm, svírala úhel 90° se základním svařovaným materiálem a vzdálenost od něho byla 2,5 mm. Přídavný materiál byl přiváděn automaticky a pod stálým úhlem cca 35° k základnímu materiálu a byl přiváděn rychlostí 1,6 m/min v pulzu a 1,0 m/min mimo něj. Celkem byly úspěšně svařeny 3 vzorky. Hodnoty svařovacích parametrů jsou uvedeny níže v tabulce 16.



Obrázek 45: Hořák a elektroda TIG AC

Tabulka 16: Svařovací parametry TIG AC

Označení vzorku	TIG_1	TIG_2	TIG_3
Základní proud I [A]	150	145	140
Rychlost svařování [cm/min]	40	40	40
Rychlost podávání drátu [m/min]	1,0/1,6	1,0/1,6	1,0/1,6
Doba pulzu [s]	0,2/0,15	0,2/0,15	0,2/0,15
Frekvence pulzů [Hz]	75	75	75
Časový balanc [%]	70	70	70

Na obrázku 46 je vidět grafické znázornění průběhu napětí a proudu během svařování. Vzhledem k technickým komplikacím byl zaznamenán pouze jeden průběh, konkrétně u vzorku TIG_3. Hodnota základního proudu byla 140 A, v pulzech řízených svařovacím zdrojem dosahovaly hodnoty proudu až 200 A. Ustálená hodnota pulzu byla 150 A. Oproti MIG AC svařování je průběh křivek mnohem pravidelnější, proud i napětí dosahují v kladné a záporné fázi stejně velké opačné hodnoty. „Výdrž na pulzu“ byla u svařování metodou TIG AC až 10 ms, avšak u metody MIG AC byla doba výdrže na pulzu téměř nulová a po dosažení maximálního proudu v pulzu hodnoty okamžitě klesaly.



Obrázek 46: Grafický průběh svařování TIG AC

3.4 Zkoušky svaru vzorků vytvořených TIG AC

Svařené vzorky byly dále podrobeny stejným zkouškám nedestruktivním i destruktivním jako v předchozích kapitolách a následně byly porovnány.

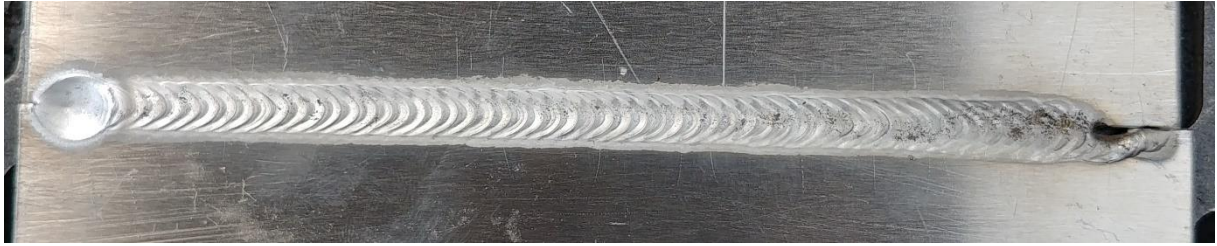
3.4.1 Vizualní zkouška svaru vytvořených metodou TIG AC

Na obrázcích 47–49 níže jsou vidět krycí vrstvy svarů 3 zhotovených vzorků. Na začátcích svaru (vpravo) je vidět pouze částečné natavení základního materiálu a neprovaření. To je způsobeno zpožděným přívodem přídavného materiálu a tzv. „náběhem“, kdy zapálení oblouku probíhalo na 40 % základního proudu po dobu 1 s. Na konci svaru (vlevo) jsou naopak patrné krátery. Začátek ani konec svaru, stejně jako u předchozí metody, není uvažován a vyhodnocován.

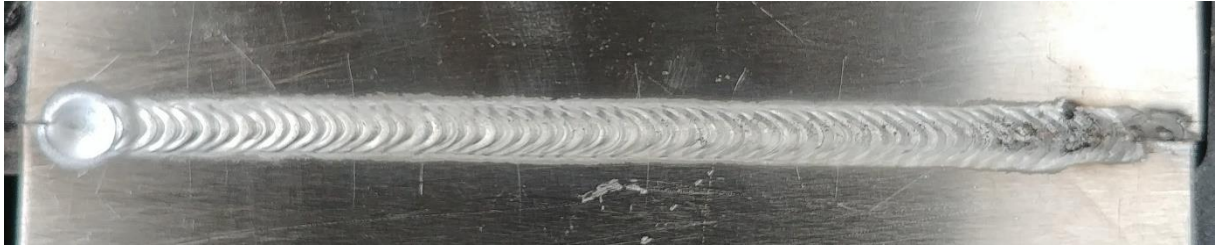
Stejně jako u metody MIG AC nedocházelo ani u jednoho ze svarů k nežádoucímu rozstříku. Kresba svarové housenky byla na rozdíl od MIG AC po celé délce takřka dokonale pravidelná.

Šířka svarové housenky a kořene svaru nebyla, stejně jako u MIG AC, po celé délce svaru úplně stejná, šířka svaru se měnila především v důsledku postupného vnášení tepla do svařence. Rozdíl rozměru počátku a konce svaru je naprosto srovnatelný s MIG AC a změna není nijak významná, pohybuje se v řádech jednotek procent z původní šířky.

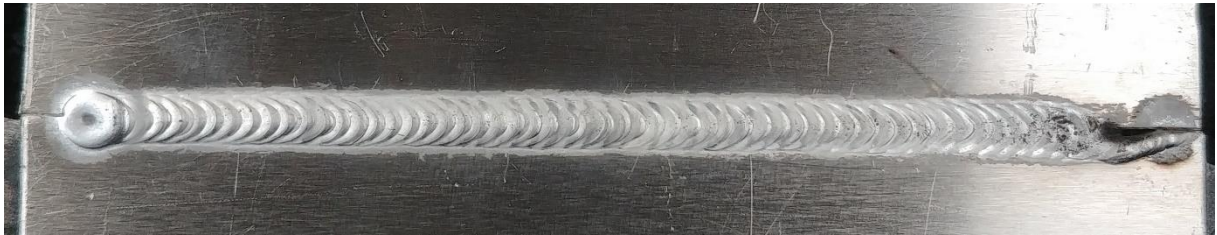
Kromě vzorku TIG_3 není patrné převýšení svaru a podél svarové housenky docházelo k zápalům, které způsobovaly propad pod úroveň základního materiálu, což je dobře patrné z obrázků 60 a 61 pořízených při metalografii v kapitole 3.4.3. Těmto vadám by šlo předcházet nižší rychlostí svařování a tím spojeným i nižším základním proudem.



Obrázek 47: Krycí vrstva vzorku TIG_1



Obrázek 48: Krycí vrstva vzorku TIG_2



Obrázek 49: Krycí vrstva vzorku TIG_3

Na obrázcích 50–52 jsou vidět fotografie kořenů svarů. Stejně jako u metody MIG AC nebylo použito spodního přívodu inertní ochranné atmosféry k formování kořene svaru. I navzdory tomu bylo formování kořene mnohem pravidelnější než u metody MIG AC, bez viditelných vad.



Obrázek 50: Kořen svaru vzorku TIG_1



Obrázek 51: Kořen svaru vzorku TIG_2



Obrázek 52: Kořen svaru vzorku TIG_3

3.4.2 Kapilární zkouška TIG AC

Na níže uvedených obrázcích 56–59 je vidět výsledek kapilární zkoušky. Póry se vyskytovaly ve větší míře než u metody MIG AC. Z obrázků jsou patrné jak velké póry, tak i na detailním snímku menší póry s vysokou četností. Četnost pórů byla ve všech třech zkoušených vzorcích mezi sebou srovnatelná. Opět to může být důsledek příliš vysoké rychlosti svařování.



Obrázek 53: Kapilární zkouška TIG_1



Obrázek 54: Kapilární zkouška TIG_2



Obrázek 55: Kapilární zkouška TIG_3



Obrázek 56: Kapilární zkouška TIG_3 detail

3.4.3 Metalografická zkouška – zkouška makrostruktury TIG AC

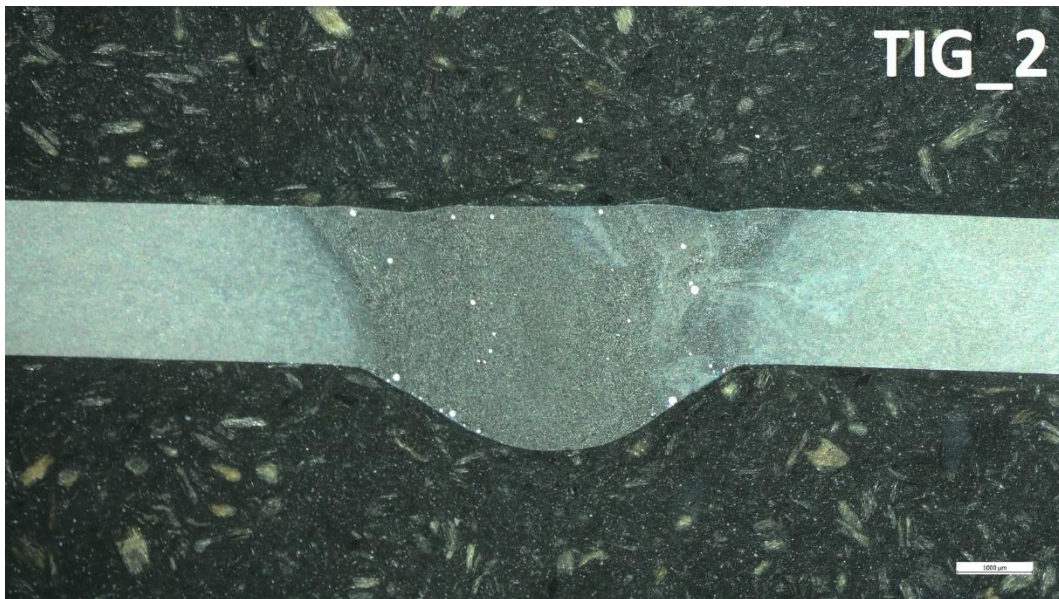
Pomocí metalografické zkoušky makrostruktury byly vyhodnoceny tvary svarů, popř. vnitřní vady jako trhliny nebo póry, popř. lineární přesazení.

Vzorky byly pro metalografickou zkoušku připraveny identickým způsobem jako vzorky pro MIG AC. Rozměry svarů jsou uvedeny v tabulkách 17–19.



Obrázek 57: Makroskopie TIG_1

U vzorku svarového spoje s označením TIG_1 je vidět lineární přesazení plechů. Převýšení svaru není prakticky žádné a jsou patrné menší zápaly podél svarové housenky. Ty se u metody MIG AC nevyskytovaly. Póry se vyskytují především ve spodní části svaru, resp. kořenu, kde jsou dobře patrné jako bílé tečky. Tepelně ovlivněná oblast je zde velmi úzká i oproti vzorkům zhotovených metodou MIG AC. Šířka TOO se pohybuje do 500 µm.



Obrázek 58: Makroskopie TIG_2

Vzorek TIG_2 byl na rozdíl od předchozího vzorku správně upnut a nedošlo tak k lineárnímu přesazení. Je však patrné opět téměř nulové převýšení svaru, drobné zápaly na krajích a póry dispergované v celém objemu svaru.

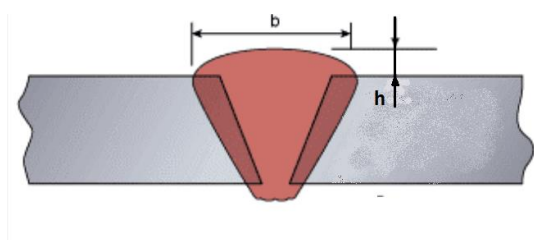


Obrázek 59: Markoskopie TIG_3

Svařenec TIG_3 vykazuje z makroskopického hlediska nejméně vad. Lineární přesazení svaru zde není žádné, je vidět mírné převýšení svaru a žádné zápaly. Kořen svaru je nižší než u předchozích vzorků, svar je osově symetrický a vyskytuje se zde výrazně méně pórů na rozdíl od přechozích dvou vzorků. Z makroskopického hlediska je tento svar nejlépe zhotoven.

Z metalografických výbrusů byly dále odečteny rozměry svarů a porovnány mezi sebou a vyhodnocena přípustnost podle normy ČSN EN ISO 10042.

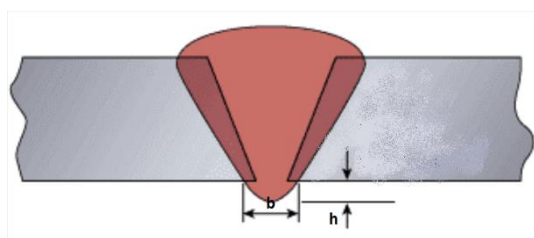
Tabulka 17: šířka a výška svaru



Obrázek 60: šířka a výška svaru [37]

Vzorek	b [mm]	h [mm]	Přípustnost
TIG_1	3,8	0,4	Ano
TIG_2	3,9	-	Ano
TIG_3	4,0	-	Ano

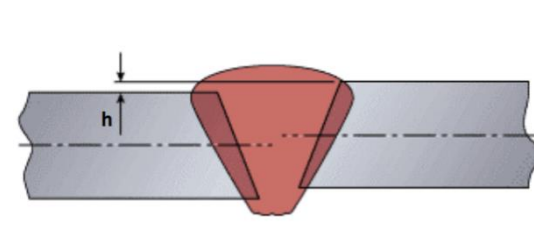
Tabulka 18: převýšení kořene



Obrázek 61: převýšení kořene svaru [44]

Vzorek	b [mm]	h [mm]	Přípustnost
TIG_1	7,1	1,3	Ano
TIG_2	7,5	1,2	Ano
TIG_3	6,4	0,9	Ano

Tabulka 19: lineární přesazení



Obrázek 62: lineární přesazení [45]

Vzorek	h [mm]	Přípustnost
TIG_1	0,3	Ano
TIG_2	-	Ano
TIG_3	-	Ano

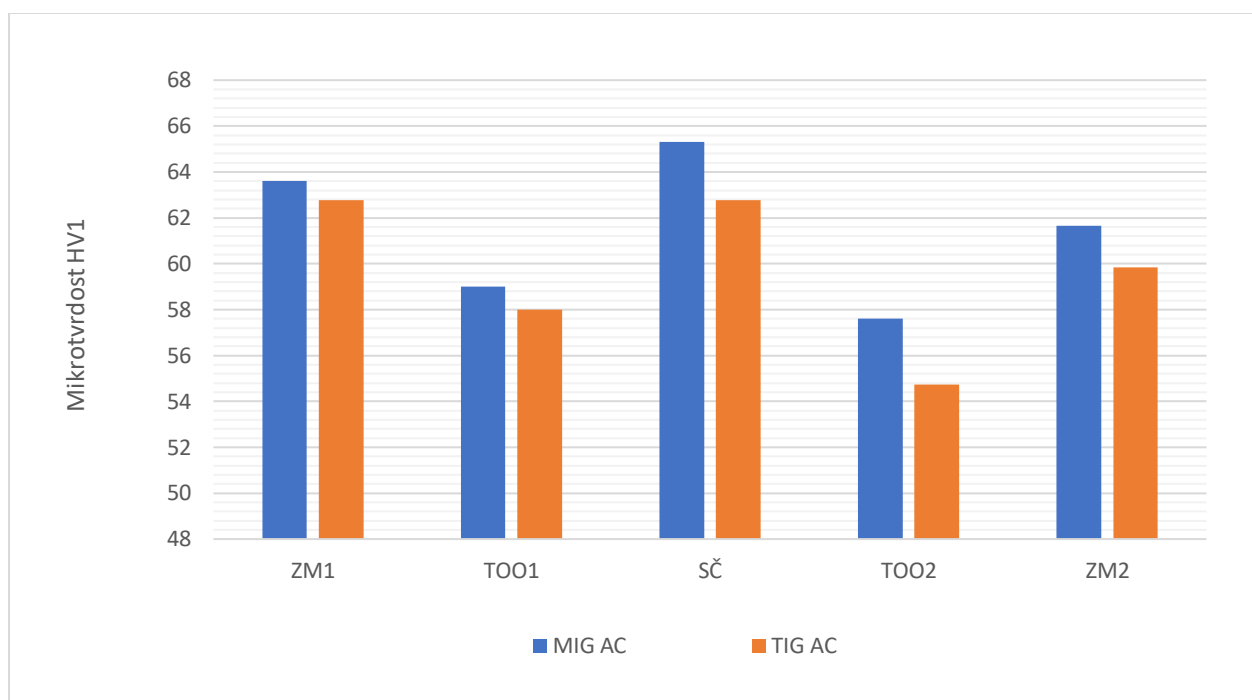
3.4.4 Mikrotvrdość svarů TIG AC

Mikrotvrdość svarů byla opět vyhodnocena stejně jako u metody MIG AC. V tabulce 20 jsou uvedeny průměrné hodnoty mikrotvrdości složené vždy ze 3 měření. Hodnoty měření mikrotvrdości s přihlédnutím k možným nepřesnostem měření vycházejí velmi podobně jako u metody MIG AC. Pro obě metody svařování byl použit stejný základní materiál, tudíž hodnoty mikrotvrdości základního materiálu by měly být stejné. Při měření TIG AC, byly všechny hodnoty mikrotvrdości o cca 3 % nižší, vč. základního materiálu než při měření vzorků MIG AC. Důležité je, že mikrotvrdość svarů a pokles mikrotvrdości v tepelně ovlivněné oblasti u TIG AC je procentuálně srovnatelný (pokles do 10 %) s metodou MIG AC a v tomto ohledu není mezi metodami výrazný rozdíl.

Tabulka 20: Hodnoty mikrotvrdości TIG AC

Vzorek	Tvrdość HV1				
	ZM ₁	TOO ₁	SK	TOO ₂	ZM ₂
TIG_1	60,9	57,2	63,5	57,8	58,1
TIG_2	59,8	56,1	60,3	57,6	63,0
TIG_3	62,8	58	62,8	54,7	59,8
Průměr TIG AC	61,1	57,1	62,2	56,7	60,3
Průměr MIG AC	63,1	59,0	65,3	57,6	62,4

Tabulka 21: Srovnání mikrotvrdosti MIG AC a TIG AC



3.4.5 Zkouška tahem

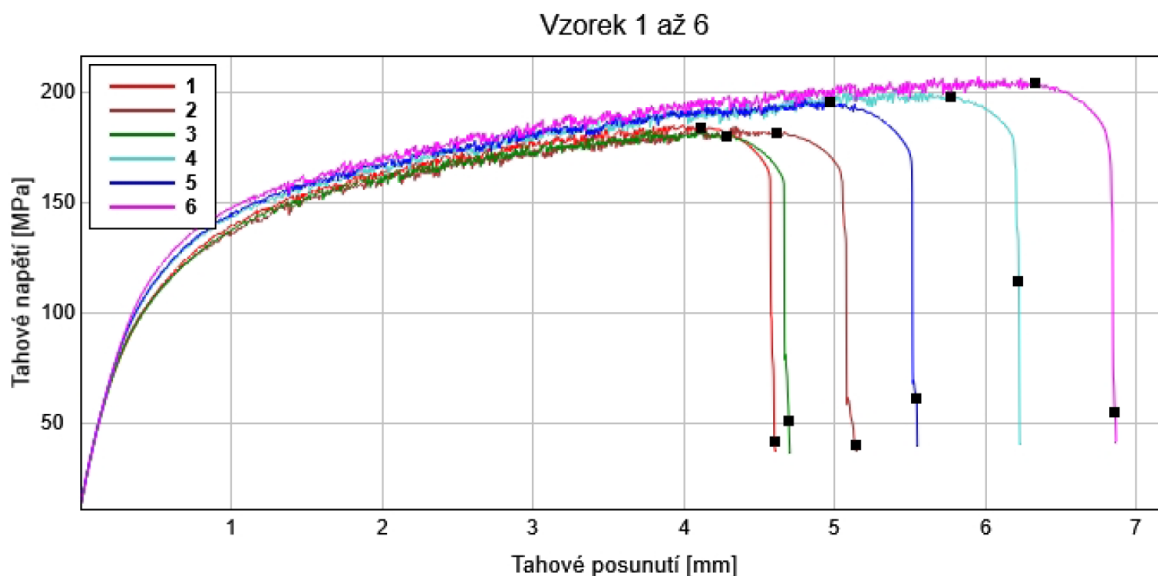
Zkouška tahem proběhla i u svařenců zhotovených metodou TIG AC, které byly obrobeny na tvar normalizovaného tahového tělesa dle normy 42 0321 pro tahovou zkoušku. Na obrázku 67 je grafické znázornění průběhu tahové zkoušky a v tabulce 22 jsou hodnoty tahové zkoušky vč. porovnání hodnot s metodou MIG AC, kde ale nebyl uvažován vzorek MIG_3, u kterého došlo k neprůvaru.



Obrázek 63: Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku TIG AC

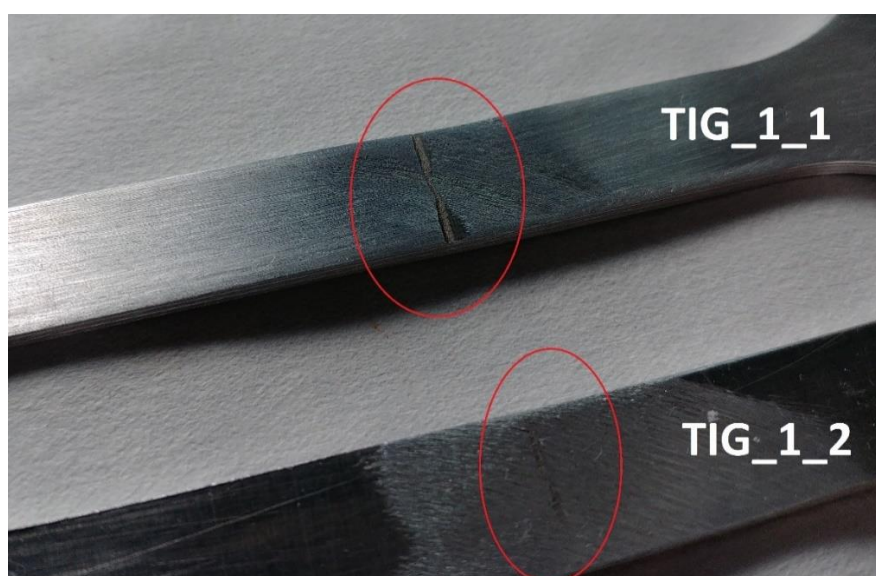
Tabulka 22: Hodnoty tahové zkoušky TIG AC

Číslo měření	Označení vzorku	Mez pevnosti R_m [MPa]	Průměrná hodnota R_m TIG AC [MPa]	Průměrná hodnota R_m MIG AC [MPa]
1	TIG_1_1	184	182,5	204,5
2	TIG_1_2	181		
3	TIG_2_1	180	189	203,5
4	TIG_2_2	198		
5	TIG_3_1	195	199,5	205,5
6	TIG_3_2	204		



Obrázek 64: Graf průběhu tahové zkoušky TIG AC

Hodnoty průměrné meze pevnosti v tahu jsou při porovnání s metodou MIG AC znatelně nižší (asi o 10 %), především při srovnání vzorku TIG_1 a TIG_2. U vzorku TIG_1 může být na vině lineární přesazení svaru a viditelný zápal, který byl znatelný i po vybroušení svaru na zkušebním tahovém tělísku (viz obrázek 68). Vzorek TIG_2 vykazoval také nižší hodnoty meze pevnosti. Opět to může být způsobeno oslabením materiálu zápalom. Vzorek TIG_3, u kterého bylo použito nejnižšího svařovacího proudu, vykázal nejlepší hodnoty a rozdíl v pevnosti v tahu oproti MIG AC je velmi malý, v řádech jednotek procent. V tomto ohledu vykazují obě metody podobné hodnoty mechanických vlastností.



Obrázek 65: Zápal viditelný i po vybroušení svaru u vzorku TIG_1

3.5 Zhodnocení výsledků

V experimentální části byly zhotoveny vzorky dvěma různými metodami (MIG AC a TIG AC) při různých svařovacích parametrech. Pro metodu MIG AC bylo zjištěno, že nejlepších výsledků při následných zkouškách dosáhl vzorek s označením MIG_4, u kterého bylo použito základního proudu o velikosti 68 A a nejvyšší rychlosti svařování, tj. 50 cm/min (hodnoty svařovacích parametrů viz tabulka 10). Vzorek vykazoval dobré vlastnosti, na rozdíl od vzorků s jinými svařovacími parametry, jak ve vizuální zkoušce, kapilární zkoušce, kde výskyt pórů nebyl nijak velký, tak i ve zkoušce tahové, kde dosáhl největší hodnoty meze pevnosti (205,5 MPa).

Při svařování metodou TIG AC bylo nejlepších výsledků svařování dosaženo u vzorku TIG_3, kde byla hodnota základního proudu 140 A a rychlost svařování 40 cm/min (viz tabulka 16). Oproti vzorku MIG_4 zhotoveného metodou MIG AC vykazoval lepší geometrii svaru, avšak kapilární zkouškou byla zjištěna vysoká pórovitost na povrchu svaru, a i na makroskopických snímcích metalografické zkoušky byly odhaleny póry i uvnitř svarového kovu. I kvůli tomu mohly být hodnoty meze pevnosti při tahové zkoušce mírně nižší. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu tohoto svaru byla 199,5 MPa oproti 205,5 MPa u metody MIG AC.

4 Závěr

Metoda MIG AC je jednou z novějších metod vhodných pro svařování hliníkových slitin, která v technické praxi nachází čím dál více uplatnění. Z výsledků a zkušeností získaných touto diplomovou prací sice nepřináší tato metoda průlomový přínos pro spojování hliníku a jeho slitin, avšak své místo a uplatnění bez pochyb má. Jedním z přínosů a výhod je možnost snadné automatizace, mírně větší rychlosti svařování, což se potvrdilo i v této diplomové práci. Výsledky obou metod pro spojování hliníkové slitiny tloušťky základního materiálu 2 mm jsou kvalitativně velmi srovnatelné.

Dle výrobce by svařovací zdroj měl být schopen svařovat i velmi tenké materiály s tloušťkou základního materiálu až 1 mm, což bylo během měření také zkoušeno, ale vzhledem k nedostatku času, bohužel s negativním výsledkem. Plechy se svařit nepodařilo, docházelo buď k propalování základního materiálu, nebo naopak k zhasínání oblouku.

5 Zdroje:

- [1] Ing. Ladislav Kolařík, IWE a Ing. Vladislav Kolář, IWE. *Vlastnosti a rozdělení hliníku a jeho slitin*. Výukové materiály kvalifikačního kurzu IWE/IWT, 2018, v Praze.
- [2] doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE a Ing. Vladislav Kolář, IWE. *Svařitelnost hliníku a jeho slitin*. Výukové materiály kvalifikačního kurzu IWE/IWT, 2018, v Praze.
- [3] Alton Tabereaux. World Primary Aluminum Production in 2017: The Beginning of U.S. Tariffs on Imported Aluminum. *LIGHT METAL AGE* [online]. 18. 6. 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/smelting/world-primary-aluminum-production-in-2017-the-beginning-of-u-s-tariffs-on-imported-aluminum/>
- [4] Jiří Dunovský, CSc. *Speciální technologie*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní: Ediční středisko ČVUT, Praha 1, Husova 5, 1984.
- [5] Václav Minařík. *Obloukové svařování*. Scienta, 2007. ISBN 978-80-86960-28-9.
- [6] doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE a Ing. Vladislav Kolařík, IWE. *Metody svařování hliníkových slitin*. Výukové materiály kvalifikačního kurzu IWE/IWT, 2018, v Praze.
- [7] TIG svařování I - základní principy. *SVARINFO* [online]. 7.1.2009 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>
- [8] Ing. Jaroslav Hájek. Hliník a možnosti jeho svařování. *KONSTRUKCE: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 10.12.2014 [cit. 2020-03-30]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/hlinik-a-moznosti-jeho-svarovani/>
- [9] Svařování hliníku v ochranných plynech. *MM Spektrum* [online]. 8.10.2008 [cit. 2020-03-30]. ISSN 080109. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech.html>
- [10] Ing. Vladislav Kolář. *Vliv vlastností hliníku na svařitelnost jeho slitin: XXXIII. DNY SVAŘOVACÍ TECHNIKY*. DOM ZO 13, s.r.o.
- [11] Ing. Jiří Koutný. *Hliníkové materiály a možnost jejich svařování* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://www.ews.cz/files/servis/hlinik.pdf>
- [12] doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ed. *Konstrukce a navrhování svarových spojů*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017. ISBN 978-80-01-06315-6.
- [13] Ing. Jaroslav Hájek. *Svařování hliníku v ochranných plynech* [online]. 10. 8. 2008, , 40 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech.html>
- [14] Ing. Jaroslav KUBÍČEK. *ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ: TECHNOLOGIE II*. VUT v Brně, 2006. Syllabus přednášek. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf

- [15] VIK, Bc. Radovan. *Svařování hliníku a jeho slitin se zaměřením na vypracování vyučovací metodiky, didaktických postupů a učebních textů pro výuku ve svářečské škole EGE, spol. s r.o. v metodě svařování podle ČSN EN ISO 4063: 131 (MIG)*. České Budějovice, 2016. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
- [16] Frank Armao. *Aluminum Workshop: What are the advantages of AC in aluminum GMAW?* [online]. 22. 6. 2016 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/aluminumwelding/aluminum-what-are-the-advantages-of-ac-in-aluminum-gmaw>
- [17] S. Brumm a G. Bürkner. Gas metal arc pulse welding with alternating current for lightweight materials. *ScienceDirect* [online]. TU Chemnitz, Institute for Machine Tools and Production Processes (IWP), Reichenhainer Str. 70, D-09126 Chemnitz, 2015, , 179 - 187 [cit. 2020-02-23]. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.05.008. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [18] *Multifunktions-Wechselstromschweißanlage MIDI MIG 300/800 AC/DC G W* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.elmatech-gmbh.de/index.php/de/produkte/plasma-lichtbogentechnologie/mig-mag/wechselstromanlagen/midi-mig-300-ac-dc#spitzentechnologie-f%C3%BCr-alle-alu-prozesse>
- [19] *Coldest MIG-AC process and excellent gap bridging thanks to Virtual Machine* [online]. ELMA-Tech GmbH 2012–2018 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.vm-process-control.de/index.php/arc-welding-with-the-vm>
- [20] *Tepelné zpracování hliníkových slitin - teorie* [online]. [cit. 2020-04-01]. 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>
- [21] Ing. Jiří Hajdík a Ing. Michal Heinrich. *Technologie svařování hliníku a jeho slitin: technologie svařování* [online]. In: . Český svářečský ústav, Ostrava [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: http://www.kovodvorak.cz/download/technologie_svarovani_hliniku.pdf
- [22] ZÁKLADY SVAŘOVÁNÍ MIG/MAG. *EWM We Are Welding* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
- [30] History of primary aluminium production: Main producing countries and regions 1952 - 2012. In: ProAluPack [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <http://www.proalupack.at/upload/Produktion3.jpg>
- [31] TIG svařování DC (nepřímá a přímá polarita) a AC. In: SVARINFO.cz [online]. 6. 2. 2009 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008122801>
- [32] Svařování TIG - seznámení. In: Svarecky-Elektrody.cz [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [33] Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 394 s. Svařování. ISBN 80-85771-81-0
- [34] *Alunet: Hliníkové profily na míru* [online]. 2020 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-5754>

- [35] ESAB: OK AUTROD 5087 [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/aluminium-wires/ok-autrod-5087.cfm>
- [36] TECHNICKÁ DOKUMENTACE: Návod k obsluze Omi 305, 385, 405 [online]. Www.omc.cz. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: https://www.oblibene.cz/userdata/shopimg/gamasvar/File/PDF/NAVODY/OMI/Nvod305_405.pdf
- [37] CSWIP & API Question Banks: Geometric Shape Imperfections - Excess weld metal [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <http://cswipquestions.blogspot.com/2014/08/geometric-shape-imperfections-excess.html>
- [38] Inertní ochranné atmosféry: Prodej a rozvoz výčepních a technických plynů. In: *Norbertovy bomby* [online]. [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://bomby.cz/prodej/technicke-plyny/argon-ar-50-l-technicky-plyn-prodej-v-plynove-lahvi/>
- [39] Označování hliníku s slitiny hliníku [online]. In: . [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12907167-Oznacovani-hliniku-a-slitiny-hliniku-podle-csn-en.html>
- [40] SVARBAZAR: Skupiny základních materiálů dle ISO/TR 15608 [online]. [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=skupiny15608>
- [41] Rozpustnost vodíku v hliníku: VLIV ČISTOTY OCHRANNÉHO PLYNU NA JAKOST SVAROVÝCH SPOJŮ [online]. [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/zvaranie/7986-vliv-cistoty-ochranneho-plynu-na-jakost-svarovych-spoju>
- [42] AcArc puls – revoluce ve svařování hliníku: EWM Titan XQ 400 AC puls. : 053-000079-00012 / 2019-09 / © EWM AG
- [43] ELMATECH GMBH: Pulsstrom- und Lötanlage MIDI MIG 300/800 DC G W [online]. [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://www.elmatech-gmbh.de/index.php/de/produkte/plasma-lichtbogentechnologie/mig-mag/pulsstromanlagen/pulsstrom-und-loetanlage-midi-mig-300-800#technische-daten>
- [44] CSWIP & API Question Banks: Geometric Shape Imperfections - Excessive Penetration [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <http://cswipquestions.blogspot.com/2014/08/excessive-penetration.html>
- [45] CSWIP & API Question Banks: Geometric Shape Imperfections - Linear Misalignment (High-Low) [online]. [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <http://cswipquestions.blogspot.com/2014/08/linear-misalignment-high-low.html>

PŘÍLOHA

Mikrotvrdot svarů MIG AC

Vzorek	Tvrdot HV1				
	ZM ₁	TOO ₁	SČ	TOO ₂	ZM ₂
MIG_1	63,7	56,8	62,1	52	61,7
	62,2	60,9	61,4	55	62
	61,7	62,7	62,6	57,3	61,3
Průměr	62,53	60,13	62,03	54,77	61,67
MIG_2	67,2	62,1	63,6	60,8	59,8
	65	60	66,7	59,8	59,3
	63,8	61,7	64,8	61,2	58,7
Průměr	65,33	61,27	65,03	60,60	59,27
MIG_3	65,5	54,5	63,8	62,6	63,7
	63,3	58,3	65,3	61,1	64,1
	64,8	59,9	64,8	59,9	63,9
Průměr	64,53	57,57	64,63	61,20	63,9
MIG_4	61,3	57	70	54,6	62,2
	61,8	54,9	71,1	53,5	60,1
	63,1	59,2	66,8	52,9	63
Průměr	62,07	57,03	69,30	53,67	61,77
Celkový průměr	63,1	59,0	65,3	57,6	62,4

Mikrotvrdot svarů TIG AC

Vzorek	Tvrdot HV1				
	ZM ₁	TOO ₁	SČ	TOO ₂	ZM ₂
TIG_1	58,3	57	61,7	59,2	58
	61,7	55,1	65,9	58	57,2
	62,6	59,6	62,9	56,1	59,1
Průměr	60,87	57,23	63,50	57,77	58,10
TIG_2	61,5	57,8	59,5	56,1	62,2
	59,3	54,9	60	57,1	63,6
	58,6	55,6	61,3	59,5	63,3
Průměr	59,8	56,1	60,27	57,57	63,03
TIG_3	63,0	57,1	61,2	54,8	58,9
	62,4	58,2	62,1	52,4	59,8
	62,9	58,7	65	57	60,8
Průměr	62,78	58,00	62,77	54,73	59,83
Celkový průměr	61,1	57,1	62,2	56,7	60,3