

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2020/2021

**KRYŠTOF
URBAN**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Urban** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **483931**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Svařování hliníkových slitin metodou MIG-AC

Název bakalářské práce anglicky:

Welding of aluminum alloys by MIG-AC method

Pokyny pro vypracování:

Popis problematiky svařování hliníku a jeho slitin
Popis možných metod obloukového svařování hliníku – výhody a nevýhody jednotlivých variant
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] Firemní materiály firmy ELMA Tech

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které 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).

Datum:

Podpis:

Poděkování

Poděkování patří panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE, který se ujal vedení mé bakalářské práce, a to hlavně za ochotné rady a konzultace. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. za velmi ochotnou pomoc s vyhodnocením vzorků.

Anotace

Název bakalářské práce:	Svařování hliníkových slitin metodou MIG-AC
Autor práce:	Kryštof Urban
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Akademický rok:	2020/2021
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Rozsah práce:	62 stran, 39 obrázků, 21 tabulek

Teoretická část bakalářské práce pojednává o problematice svařování hliníkových slitin, jejich svařitelnosti, mechanických vlastnostech a metodách svařování. Konkrétním zaměřením práce je svařování hliníkových slitin metodou MIG – AC (tzn. s pomocí střídavého proudu).

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na zhodnocení průběhu svařování touto metodou a jejího porovnání s metodou MIG DC+ (s využitím stejnosměrného proudu s nepřímou polaritou) svařování hliníku, a to jak z pohledu mechanických vlastností, tak z pohledu využití výhod vyplývajících z použití střídavého proudu.

Klíčová slova

MIG AC, MIG DC, svařování, hliník, ochranné plyny, svařitelnost, slitina

Annotation

Title of the bachelor thesis: Welding of aluminium alloys by MIG-AC method
Author: Kryštof Urban
Supervisor: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Academic year: 2020/2021
Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology
Extent: 62 pages, 39 tables, 21 pictures

Theoretical part of my Bachelor thesis deals with problematics of welding aluminium alloys, their weldability, mechanical properties and welding processes. Particularly the thesis is about welding aluminium alloys with MIG welding process using alternating current.

The practical part of my Bachelor thesis is focused on evaluation the results of this welding process and comparing it with the other processes according to mechanical properties and advantages resulting from using this process against the other ones.

Key words

MIG AC, MIG DC, welding, aluminium, shielding gasses, weldability, alloy

Obsah

Seznam použitých zkratk a veličin.....	9
1. Úvod.....	10
2. Hliník a jeho vlastnosti	11
2.1 Slitiny hliníku.....	11
2.1.1 Tvářené slitiny	12
2.1.2 Slévárenské slitiny	13
2.2 Značení slitin a jejich vytvrzování	14
2.3 Faktory ovlivňující svařitelnost hliníku	18
2.4 Výběr slitiny a přídavného materiálu pro experimentální část	20
3. Metody obloukového svařování hliníkových slitin	21
3.1 Čistící efekt elektrického oblouku	22
3.1.1 Teorie katodové skvrny	22
3.1.2 Teorie kladných iontů.....	22
3.2 Metoda MIG.....	23
3.2.1 Svařování metodou MIG	23
3.3. Metoda TIG.....	25
3.2.1. Svařování metodou TIG	26
3.3 Metoda svařování MIG AC.....	28
3.4 Ochranné plyny	29
4. Kontrola kvality svarových spojů	30
5. Praktická část	31
5.1 Vybavení pro praktickou část.....	31
5.1.1 Svařovací zdroj	31
5.1.2 Přípravek pro upnutí vzorku	33
5.1.3 Monitorování svařovacích parametrů.....	34
5.2 Technické komplikace při svařování hliníku	35
5.3 Svařování zkušebních vzorků	39
5.3.1 Vzorky svařené stejnosměrným proudem	39
5.3.2 Vzorky svařené střídavým proudem.....	44
5.4 Provedení kapilární zkoušky	48
5.5 Metalografické zkoušky	50
5.5.1 Příprava vzorků	50
5.5.2 Zkouška makrostruktury.....	52
5.5.3 Zkouška mikrostruktury	54

5.6 Zkouška mikrotvrlosti	56
6. Závěr	58
Seznam použitých literárních zdrojů:	59
Seznam tabulek:	61
Seznam obrázků:	61

Seznam použitých zkratek a veličin

Zkratka	Význam
MIG/GMAW/131	Metal inert gas neboli svařování odtavující se elektrodou v inertním plynu
TIG/GTAW/141	Tungsten inert gas neboli svařování neodtavující se wolframovou elektrodou v inertním plynu
SK	Svarový kov
ZM	Základní materiál
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
PM	Přídavný materiál
AC	Alternating current neboli střídavý proud
DC	Direct current neboli stejnosměrný proud
NDT	Nedestruktivní testování
I	Proud [A]
U	Napětí [V]
v_s	Rychlost svařování [mm/s]
t_s	Svařovací čas [s]
Q	Vnesené teplo [kJ/mm]
t	Teplota [°C]

1. Úvod

Svařování je v dnešní době nedílnou součástí většiny výrobních závodů ve strojním průmyslu. Postupem času začal především hliník a jeho slitiny získávat na popularitě oproti běžně svařovaným slitinám železa tzn. ocelím, a to zejména díky své nízké měrné hmotnosti a dobrým korozivzdorným vlastnostem. Nízká pevnost čistého hliníku se v praxi řeší přidáním legujících prvků. Nicméně svařování hliníku a jeho slitin sebou přináší určité komplikace spojené právě s jeho vlastnostmi.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na optimalizaci svařování hliníku a otestování nového svařovacího procesu (MIG AC = obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu pomocí střídavého proudu) společně s testováním konkrétního svařovacího zdroje. Záměrem je ověřit možnosti využití střídavého proudu v kombinaci se svařovacím procesem MIG. Motivací pro vývoj zařízení schopného skloubit tento proces se střídavým proudem je značená svařovací rychlost procesu MIG společně s výhodnými vlastnosti střídavého proudu podporujícími svařování hliníku.

Uvažovaným postupem praktické části je vyhodnocení vzorků svařených procesem MIG s využitím jak střídavého, tak i stejnosměrného svařovacího proudu (MIG AC a MIG DC+) s následným vyhodnocením nejlepších vzorků.

2. Hliník a jeho vlastnosti

Hliník je kov zastoupený na zemi v největším měřítku (přibližně 7,5 - 8,3 %). V přírodě se vyskytuje ve formě sloučenin, nikoliv jako čistý prvek. Je znám pro svoji tvárnost, korozivzdornost, svařitelnost, tepelnou a elektrickou vodivost. Zejména z naposled jmenovaného důvodu je využíván jako vodič v elektrotechnice, jelikož jako vodič elektrického proudu zaujímá za mědi druhé místo ve vodivosti. Má dobrý poměr pevnosti ke své hmotnosti, nicméně pevnost čistého hliníku je poměrně nízká (50 – 70 MPa), lze ji ovšem, jak již bylo řečeno, zvýšit pomocí legur (tím vznikají slitiny hliníku). Tento poměr je velmi podobný oceli. Hliník je využíván v celé řadě odvětví, kde nahradil ocel, a to hlavně kvůli snížení hmotnosti. To je možné díky jeho malé měrné hmotnosti (2700 kg/m^3).

Nejznámější rudou, ze které je možné hliník získat, je bauxit, který je sloučeninou oxidu hlinitého a vody ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Bauxit je nejvyužívanější rudou hliníku, jelikož má při výrobě největší výtěžnost čistého hliníku. Tento poměr je zhruba 4-6 tun bauxitu na výrobu jedné tuny čistého hliníku. Další sloučeninou hliníku je minerál kryolit neboli hexafluorohlinitan sodný (Na_3AlF_6), který se používá jako tavidlo snižující teplotu tání oxidu hlinitého při elektrolytické výrobě hliníku [1,5].

Tabulka 1 - fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku [1]

Čistý hliník	
Tepelná vodivost	237 (při 20 °C) $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Teplota tání	660,4 °C
Měrná hmotnost	$2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Modul pružnosti v tahu	70 GPa
Tažnost A_{50}	(20-30) %
Tvrdost HB	15-23
Mez kluzu $R_{p0,2}$	20 MPa
Pevnost v tahu R_m	(50-70) MPa
Elektrická vodivost	$37,7 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

2.1 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku dělíme nejběžněji na dvě skupiny, a to dle zpracování. Těmito skupinami jsou slitiny tvářené a slitiny slévárenské. Pokud uvažujeme slitiny tvářené, tak

ty se dělí dle metody tepelného zpracování. Tímto rozdělením dostáváme slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné.

Velmi podstatným faktorem ovlivňujícím mechanické vlastnosti hliníku je zastoupení legujících prvků ve slitině, a to i přes fakt, že jejich rozpustnost je v hliníku poměrně malá. Z tohoto důvodu označujeme slitiny hliníku jako nízkolegované.

V současné době je dle norem uváděno přes 120 druhů slitin. Vzhledem k tomuto poměrně vysokému počtu se nedá předpokládat markantní vývoj nových slitin. Avšak vývoj, ač malý, lze očekávat u slitin legovaných Al-Cu-Li, Al-Mg-Li, a Al-Li-X pro speciální využití v letectví, u „běžných“ slitin to budou převážně slitiny hořčíku a hořčíku v kombinaci s křemíkem.

2.1.1 Tvářené slitiny

- Tvářené slitiny nevytvrditelné

Těmto slitinám nelze zlepšit mechanické vlastnosti tepelným zpracováním. Ke zlepšení mechanických vlastností tepelným zpracováním sice dochází, ale výsledné vlastnosti se od původních liší minimálně, což je vzhledem k vynaloženým prostředkům naprosto neúčelné. Použitelného zlepšení mechanických vlastností lze dosáhnout pouze tvářením za studena, případně tažením. Slitiny patřící do této skupiny jsou slitiny na bázi Al-Mg (-Mn) a Al-Mn.

- Tvářené slitiny vytvrditelné

Na rozdíl od slitin nevytvrditelných lze zlepšit mechanické vlastnosti tepelným zpracováním. Ke zlepšení dochází převážně u meze kluzu a meze pevnosti, avšak na úkor tažnosti. Jedná se o slitiny, které se díky ohřevu dají homogenizovat do oblasti tuhého roztoku α . Vytvrditelné jsou slitiny, které mají ve své struktuře precipitáty při teplotě okolí. Charakteristická je pro ně dobrá tvářitelnost za studena i za tepla. Tyto slitiny jsou vícesložkové a dělí se do tří skupin.

1. AlCuMg – slitiny označované jako duraly
2. AlMgSi – slitiny označované jako avialy
3. AlZnMg (taktéž AlZnMgCu) – slitiny označované jako superduraly s pevností až 700 MPa [5].

Příklady nejpoužívanějších tvářených slitin:

1. $AlMg0,5Si0,5$ ($AlMg1Si1$). Využívá se převážně pro výrobu komplikovaných výlisků. Příkladem mohou být například chladiče elektromotorů. Mezi výhody této slitiny patří dobrá tvařitelnost za tepla, dobrá svařitelnost a eloxovatelnost. Také je málo choulostivá na rychlost ochlazování.
2. $AlZnMg1$. Svými vlastnostmi je srovnatelná se slitinou z bodu 1.
3. $AlCuMg$. Jedná se o slitinu lidově známou jako dural. Má velkou pevnost, avšak je hůře svařitelná a tvářitelná. Používá se převážně na draky letadel a skříně kolejových vozidel.
4. $AlZn6MgCu$. Tato slitina je nazývána jako superdural. Jde o nejpevnější vytvrditelnou slitinu Al. Využití je shodné s duralem [5].

2.1.2 Slévárenské slitiny

Chemické složení těchto typů slitin je obdobné jako u slitin tvářených, ale mají větší procentuální zastoupení legujících prvků ve své struktuře. Oproti tvářeným slitinám mají menší tvařitelnost, na druhou stranu mají velmi dobrou zabíhavost do forem a jsou málo náchylné na vznik trhlin za tepla a staženin. To je důsledkem většího obsahu legujících prvků, slitiny s malým obsahem legur jsou na tyto vady náchylné daleko víc. Mechanické vlastnosti slévárenských slitin se odvíjejí jak od chemického složení, tak od způsobu lití. Nejvyšší pevnosti lze dosáhnout u slitin odlévaných do kokil po tepelném zpracování. Není vhodné tepelně zpracovávat odlitky vyrobené tlakovým litím.

Příklady nepoužívanějších slévárenských slitin:

1. $AlSi$ má výbornou zabíhavost a dobrou odolnost proti trhlinám za tepla. Jedná se o nejběžnější slévárenskou slitinu tzv. silumíny.
2. $AlMg$ má velmi dobrou odolnost proti korozi. Označuje se jako nejlepší slévárenská slitina.
3. $AlCu$ je slitina běžně používaná na písty ve spalovacích motorech, a to díky své odolnosti, která přetrvává i za vysokých teplot.
4. $AlZn$ se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, jednoduchým tepelným zpracováním a dobrou slévateľností.

Svařitelnost slévárenských slitin je možné označit jako nižší oproti slitinám tvářeným. To je následkem porozity a staženin, které se vyskytují u odlitků. Taktéž je to přičítáno hrubozrnnosti odlitků oproti jemnější struktuře po tváření [5].

2.2 Značení slitin a jejich vytvrzování

Značení slitin hliníku probíhá podle EN norem. Typickou normou je ČSN EN 573-(1-3) – Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – (Část 1: Číselné označování; Část 2: Označování chemickými značkami; Část 3: Chemické složení) a ČSN EN 1706 – Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti [5,12,13].

Tvářené slitiny označované podle ČSN EN 573-1 až 3

Značení má následující formu: Začíná postupně písmeny EN, mezerou, písmenem A (zastupující hliník Al – A) společně s písmenem W (Wrought – anglický výraz pro „tvářený“). Následuje spojovník a čtyři číslice charakterizující chemické složení. Toto označení může být doplněno o mezeru a písmeno společně s číslem charakterizující stav slitiny (např. povrch/tepelné zpracování).

Příklad označení slitiny: EN AW – 5057 H22. Tento typ značení je možné upřesnit uvedením chemického označení, a to podle ČSN EN 573-2 (421401) Hliník a slitiny hliníku. Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Část 2: Označování chemickými značkami. Značení pak vypadá následovně EN AW – 5057 [AlMg3] H22. Chemické značení doplněné do číselného mezinárodního značení se bere pouze jako doplňkové [5,14].

Tabulka 2 - značení tvářených slitin dle ČSN EN 573-1

Dominantní legující prvek (Chemické značení slitiny)	Označení skupiny	Vytvrditelnost
Min. 99% hliník (Al)	1xxx	✘
Měď (AlCuMg)	2xxx	✓
Mangan (AlMn)	3xxx	✘
Křemík (AlSi)	4xxx	✘
Hořčík (AlMg)	5xxx	✘
Hořčík + křemík (AlMgSi)	6xxx	✓
Zinek (AlZnMg)	7xxx	✓
Ostatní prvky (Al + „X“)	8xxx	✓ / ✘

Slévárenské slitiny označované podle ČSN EN 1706

Značení je obdobné jako u tvářených slitin s pár obměnami. Opět začíná písmeny EN, následuje mezera a znovu dvě písmena. Písmeno A zůstává a W je nahrazeno písmenem C (Casting – „odlévané“), následuje mezera a pět číslic. První číslice označuje, stejně jako u slitin, tvářených skupinu slitin podle hlavních legujících prvků [5].

Tabulka 3 - značení slévárenských slitin dle ČSN EN 1706

Dominantní legující prvek (Chemické značení slitiny)	Označení skupiny
Min. 99% hliník (Al)	10 000
Měď (AlCuMg)	20 000
Mangan (AlMn)	30 000
Křemík (AlSi)	40 000
Hořčík (AlMg)	50 000
Hořčík + křemík (AlMgSi)	60 000
Zinek (AlZnMg)	70 000
Ostatní prvky (Al + „X“)	80 000

Značení stavu materiálu hliníkových slitin

Značení vychází z druhu tepelného zpracování, které je charakterizované písmenem následovaným číslem pro upřesnění [5].

Tabulka 4 - Značení stavů TZ dle ČSN EN 515 – Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů [14]

Označení TZ	Typ zpracování
F	Tepelně nezpracován – z výroby (bez udání mech. vlast.)
O (1 až 3)	Žihán (po rozpouštěcím žihání, na snížení vnitřních pnutí nebo homogenizačním žihání)
H (1 až 4)	Deformačně zpevněn (za studena)
W	Po rozpouštěcím žihání
T (1 až 9)	Tepelně zpracován

Jak je uvedeno v tabulce č. 4, jednotlivé skupiny TZ mají další podskupiny, nejvýznamnější skupinou je skupina T, kterou popisuje následující tabulka č. 5 [5,14].

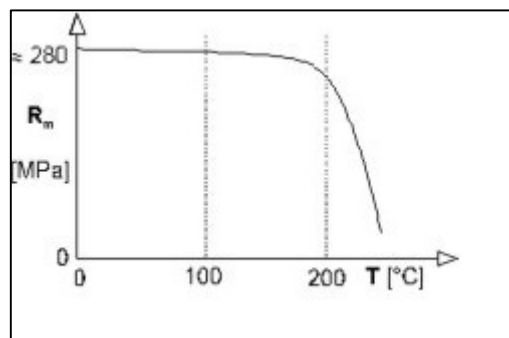
Tabulka 5 - Podskupiny tepelného zpracování slitin hliníku dle ČSN EN 515 – Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů [14]

Označení TZ	Typ TZ
T1	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí
T2	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí
T3	Po rozpouštěcím žihání, tváření za studena a přirozeném stárnutí
T4	Po rozpouštěcím žihání a přirozeném stárnutí
T5	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a umělém stárnutí
T6	Po rozpouštěcím žihání a umělém stárnutí
T7	Po rozpouštěcím žihání a umělém přestárnutí
T8	Po rozpouštěcím žihání, tváření za studena a umělém stárnutí
T9	Po rozpouštěcím žihání, umělém stárnutí a tváření za studena

Vytvrzování (jinak také precipitační zpevnění) je komplexní způsob tepelného zpracování, při němž dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku a vzniká množství jemných, symetricky rozprostřených částic. Tento děj je nazýván precipitace. Aby mohlo k precipitačnímu vytvrzování dojít, musí mít daná slitina rovnovážný binární diagram s limitovanou rozpustností v tuhém roztoku, která se snižuje s klesající teplotou.

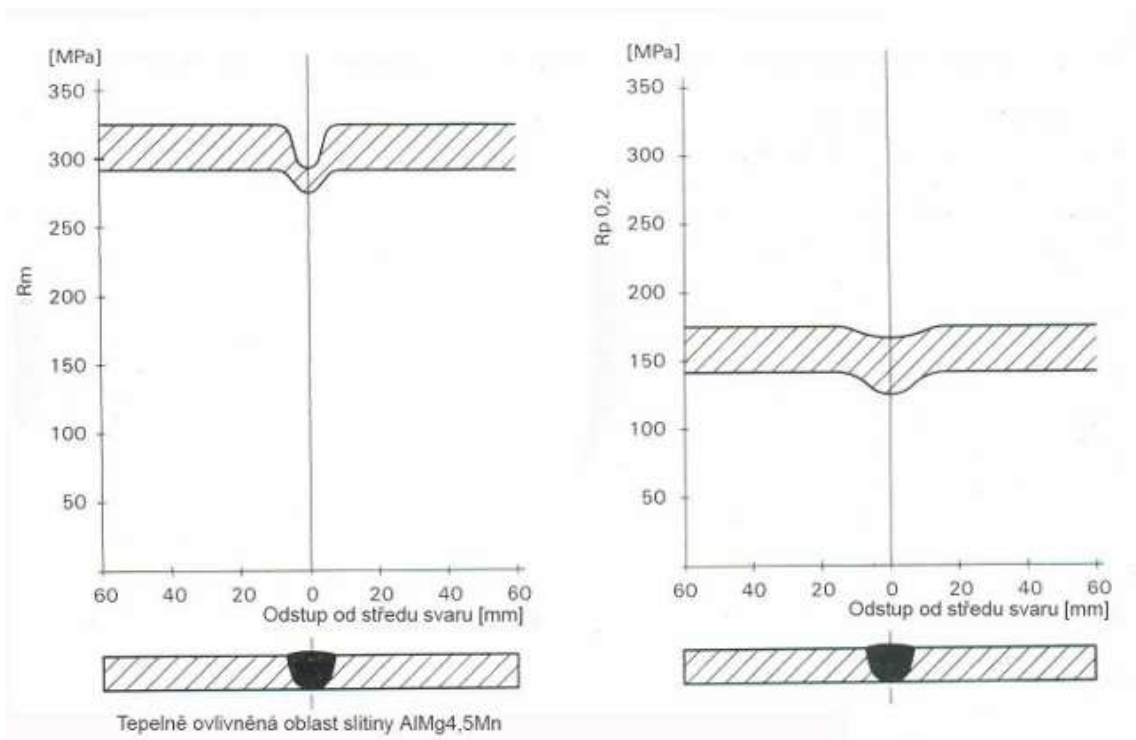
Slitina se ohřívá na teplotu, při které se nachází v oblasti výskytu tuhého roztoku, kde dochází k rozpouštění legur. Toto ohřátí se nazývá rozpouštěcí žihání. Pokud by po tomto žihání došlo k pomalému ochlazení, mělo by to za následek vyloučení vytvrzovací fáze na hranicích zrn, což je nežádoucí. Takto vyloučená fáze se nazývá segregát. Následkem tohoto děje nastává výrazná degradace plastických vlastností a pokles houževnatosti. Abychom zamezili tomuto nežádoucímu ději, je třeba slitinu rychle ochladit na teplotu okolí. Díky tomu je znemožněna difúze a dochází ke vzniku metastabilního přesyceného roztoku legujících prvků. Slitina má následně snahu dosáhnout rovnovážného stavu, současně s tímto dějem dochází ke snížení koncentrace legujících prvků v tuhém roztoku na úroveň již zmíněného rovnovážného stavu. Během těchto dvou dějů také dochází k vylučování minoritní fáze. Tento proces se nazývá stárnutí a je řízen difúzí. Pokud dochází k tomuto ději za stejné teploty, jako je teplota okolí, nazýváme ho stárnutím přirozeným. Avšak pokud se teplota slitiny zvýší, a to obvykle na teplotu v intervalu (90-200) °C, pak se jedná o stárnutí umělé. Zvýšení teploty má za následek urychlení difúze a tím i procesu stárnutí [3].

U vytvrditelných slitin vyvolává ohřev (předehřev) precipitační děje mnohem významnějšího charakteru, než u slitin nevytvrditelných (především v tepelně ovlivněné oblasti -TOO). Tento děj degraduje mechanické vlastnosti. Pevnost klesá až při ohřevu nad 200°C. U slitin s legurami mědi a hořčíku dochází v TOO taktéž ke strukturálním změnám. Pokud je tato svařena v upnutém stavu, může docházet ke vzniku trhlin [4].

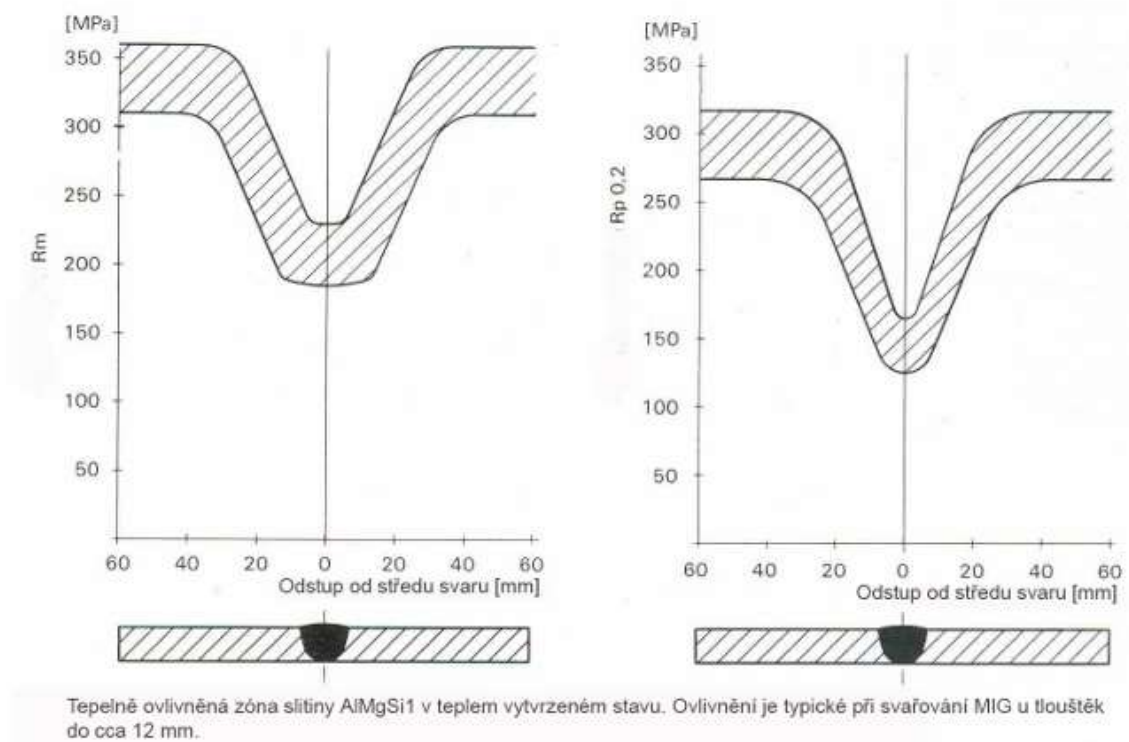


Obrázek 1 - Pokles pevnosti v závislosti na teplotě ohřevu

Porovnání degradace mechanických vlastností v TOO u vytvrditelných a nevytvrditelných slitin po svařování je ukázána na obrázku 2 a 3.



Obrázek 2 - Minimální pokles meze pevnosti (vlevo) a meze kluzu (vpravo) u tupého svaru nevytvrzené slitiny (AlMg4,5Mn)



Obrázek 3-Výrazný pokles meze pevnosti (vlevo) a meze kluzu (vpravo) u tupého svaru vytvrzené slitiny (AlMgSi1)[5]

2.3 Faktory ovlivňující svařitelnost hliníku

Hliník, respektive většina jeho slitin, je obecně dobře svařitelný, ale je třeba zohlednit jisté faktory vycházející z jeho chemických a fyzikálních vlastností.

Dle svařitelnosti je možné rozdělit slitiny Al na dvě skupiny:

- Dobře svařitelné: technický hliník, slitiny AlMg, AlMn, AlSi
- Obtížně svařitelné: slitiny AlCuMg (dle ČSN EN 573-3 skupina 2xxx), AlMgSi (dle ČSN EN 573-3 skupina 6xxx), AlZnMg (dle ČSN EN 573-3 skupina 7xxx) [12]

Obecně pak lze říci, že pro svařování jsou vhodnější slitiny tvářené díky své jemnozrnnější struktuře. Avšak dochází v jejich případě v průběhu času k poklesu mechanických vlastností. Tento jev je ještě markantnější u slitin vytvrditelných.

Vzhledem k tomu, že se vlastnosti hliníku poměrně liší od obecně vnímaných „standardních“ vlastností slitin Fe, je nutno volit jiný pohled na samotné svařování.

Prvním faktorem je *velká afinita hliníku ke kyslíku*. Kyslík vytváří na povrchu hliníku vrstvu oxidu hlinitého (Al_2O_3). Tato vrstva má tloušťku přibližně $0,01\ \mu m$. I když má díky ní hliník dobré antikorozi vlastnosti, tak s ohledem na svařitelnost je tato oxidická vrstva komplikací. Vrstva Al_2O_3 má vysokou teplotu tavení ($2054\ ^\circ C$) oproti čistému hliníku ($660\ ^\circ C$). Pokud by nedošlo k odstranění vrstvy Al_2O_3 , pak by při svařování mezi základním materiálem (ZM) a přídatným materiálem (PM) zůstala bariéra tvořená oxidem a nedošlo by k natavení ZM. To by mohlo mít dva následky, a to buď pouhé „nalepení“ PM na ZM, nebo, ještě pravděpodobněji, by nedošlo k žádnému spojení materiálů. Zároveň můžeme během svařování pozorovat vzájemné odpuzování ZM a PM. Primárním problémem ovšem je, že nedojde k dostatečnému a včasnému natavení svarové lázně, díky vyšší teplotě tavení oxidické vrstvy, kdy se ZM díky přenosu tepla ohřívá mnohem rychleji.

Dalším negativním faktorem je měrná hmotnost Al_2O_3 , která je vyšší než hmotnost čistého hliníku, to má za následek propad oxidu do svarové lázně, kde tvoří oxidické vměstky s ostrou hranou. Ty mohou vést ke vzniku trhlin. To je ve všech stupních kvality svarových spojů nepřijatelná vada. Vrstva oxidu je značně hydrofobická, následkem čehož dochází ke koncentraci vlhkosti ve svarovém spoji a vzniku porezity.

Z těch výše uvedených důvodů je třeba oxidickou vrstvu odstraňovat, a to před svařováním, ale i v jeho průběhu. Před svařováním se oxidická vrstva odstraňuje mechanicky například pomocí kartáčů z korozivzdorné oceli (nejčastěji austenitické)

nebo chemicky. To je prováděno standardně mořením. Oxidická vrstva se ovšem opět tvoří hned po odstranění (při styku se vzdušným kyslíkem), z toho důvodu je třeba tuto vrstvu odstraňovat i během svařování. To je opět možné chemickým způsobem, například použitím různých tavidel nebo využitím tzv. čistícího efektu elektrického oblouku. Ten se nejvíce projevuje při svařování v inertních plynech (zejména argonu). Tyto plyny zároveň chrání svarovou lázeň před přístupem dalšího kyslíku.

V neposlední řadě může vznikat porezita působením vodíku, který se v hliníku rozpouští. Zamezit se tomu dá použitím PM s malým množstvím difúzního vodíku [4,5].

2.4 Výběr slitiny a přídavného materiálu pro experimentální část

Zvolený základní materiál pro experimentální část je slitina EN AW – 5057 H22 [AlMg3]. Jedná se o nevytvrditelnou tvářenou slitinu hliníku legovanou na bázi hořčíku. Tato slitina se řadí mezi dobře svařitelné a přirozeně tvrdé. Doplnkové značení H22 nám popisuje, že se jedná o deformačně zpevněný a částečně žíhaný stav, který je z ¼ tvrdý. Tuto slitinu je možné, pokud je to nutné, žíhat na měkko při teplotě 360-380°C. Korozivzdornost je v běžných podmínkách stejně dobrá jako u technického hliníku. Ještě lepší korozivzdornosti dosahuje tato slitina v přímořských podmínkách [10,11,15].

Tabulka 6 - Tabulka 6 – Mechanické vlastnosti EN AW – 5754 dle ČSN EN 485-2+Al (424081) Hliník a slitiny hliníku - Plechy, pásy a desky - Část 2: Mechanické vlastnosti [15]

Mn	Fe	Mg	Si	Cr	Cu	Mn+ Cr	Ostatní	ΣOstatní	Ti	Zn
≤0,5 %	≤0,4 %	2,6- 3,6 %	≤0,4 %	≤0,3 %	≤0,1 %	0,1-0,6 %	≤0,05 %	≤0,15 %	≤0,15 %	≤0,2 %

Tato slitina je dobře svařitelná metodami MIG a TIG, avšak v přechodovém pásmu dochází k poklesu pevnosti na úroveň stavu měkkého žíhání [10,11].

Tabulka 7 - Chemické složení slitiny EN AW – 5754

Tloušťka [mm]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	Tažnost A ₅₀ [50 %]	Tvrdość HBW (HBS)
5	220-270	130	9	63

Přídavný materiál

Přídavný materiál byl zvolen na základě použité svařovací metody MIG, a to z katalogu firmy ESAB. Přídavným materiálem byl zvolen OK Autrod 5356 o průměru 1,2 mm [26].

Tabulka 8 - Mechanické vlastnosti a doporučené svařovací parametry OK Autrod 5087 dle katalogu ESAB

Značení:	EN ISO 18273: S Al 5356 (AlMg5Cr(A))
Pevnost v tahu R_m	280 MPa
Mez kluzu $R_{p0,2}$	130 MPa
Svařovací proud	140-260 A
Svařovací napětí	20-29 V

Tabulka 9 - Chemické složení PM dle katalogu ESAB

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
0,12 %	0,01 %	0,13 %	4,90 %	0,13 %	0,05 %	0,01 %

3. Metody obloukového svařování hliníkových slitin

Nejběžněji používanými metodami pro svařování hliníku a jeho slitin jsou obloukové metody svařování (především s využitím inertních ochranných atmosfér, tedy metody MIG a TIG). Svařování obalovanou elektrodou není vhodné, ač je možné, jelikož ochrana svarové lázně před oxidací není dostatečná a kvalita svaru bude nízká. U MIG/TIG svařovacích zdrojů je potřeba použít takové, které mají dostatečný výkon, a to řádově kolem 400 A. Pokud bude naším záměrem svařovat malé tloušťky, jsou i zdroje například o výkonu 250 A dostatečné. Zvýšený výkon svařovacího zdroje oproti svařování Fe slitin je třeba, jelikož hliník, ač má poměrně nízkou teplotu tavení, velmi dobře rozvádí teplo, díky vysokému koeficientu tepelné vodivosti a zároveň díky velkému měrnému teplu. Pro zdroje s výkonem nad 200 A je vhodné použít hořáky s vodním chlazením místo hořáků chlazených plynem.

Metodou MIG DC+ svařujeme stejnosměrným proudem, elektroda je připojena na + pól svařovacího zdroje. Jedná se o tzv. nepřímou polaritu. Taktéž je vhodné použít tzv. pulzní svařovací zdroj. Metoda MIG se používá obvykle pro dílce o tloušťkách od 3 až do 50 mm. Tato metoda je použitelná i pro jiné tloušťky, ovšem to už nemusí

představovat výhodu. Rychlost svařování je přibližně dvakrát až třikrát větší než u metody TIG. Metoda TIG AC je používána u dílců o běžných tloušťkách od 0,5 do 6 mm (max 10 mm).

Obě tyto metody jsou dobře automatizovatelné. U metody MIG jde pouze o propojení standardního svařovacího zdroje s robotickým ramenem. U metody TIG je třeba svařovací hořák doplnit o podavač drátu. Tyto metody jsou blíže popsány v kapitolách 3.2 a 3.3 [5].

3.1 Čistící efekt elektrického oblouku

Čistící efekt nejlépe funguje u zapojení DC+, čili při stejnosměrném proudu s elektrodou připojenou na + pól svařovacího zdroje. Ale vzhledem k přehřívání elektrody je toho zapojení možné pouze u metody MIG, kde dochází k odtavování elektrody. U metody TIG je využíváno střídavého proudu. Ač není dosahováno tak značného čistícího efektu jako při zapojení DC+, je tento způsob výhodný díky tomu, že se wolframová neodtavující se elektroda tolik nepřehřívá a oproti stálému zapojení DC+ dochází k většímu průvaru ZM.

Fyzikální popis čistícího efektu je běžně popisován dvěma hypotézami, které spolupůsobí na materiál s oxidickou vrstvou, ale zatím nebyl dostatečně vysvětlen ani definován.

1. Teorie katodové skvrny
2. Teorie kladných iontů

3.1.1 Teorie katodové skvrny

Elektrický oblouk primárně hoří v těch místech, které mají minimální napětí. To způsobí vznik katodové skvrny, která se pohybuje právě po těchto místech. Vrstva oxidů má menší napětí než ZM. Z toho vyplývá, že katodová skvrna vyhledává právě oxidy, což má za následek hoření elektrického oblouku právě na oxidické vrstvě. Katodová skvrna má teplotu cca 2500-3000°C. Proto, když se přesune na vrstvu oxidů, tak vrstvu účinně vypaří. Oxid se opět vytvoří po okrajích svarů.

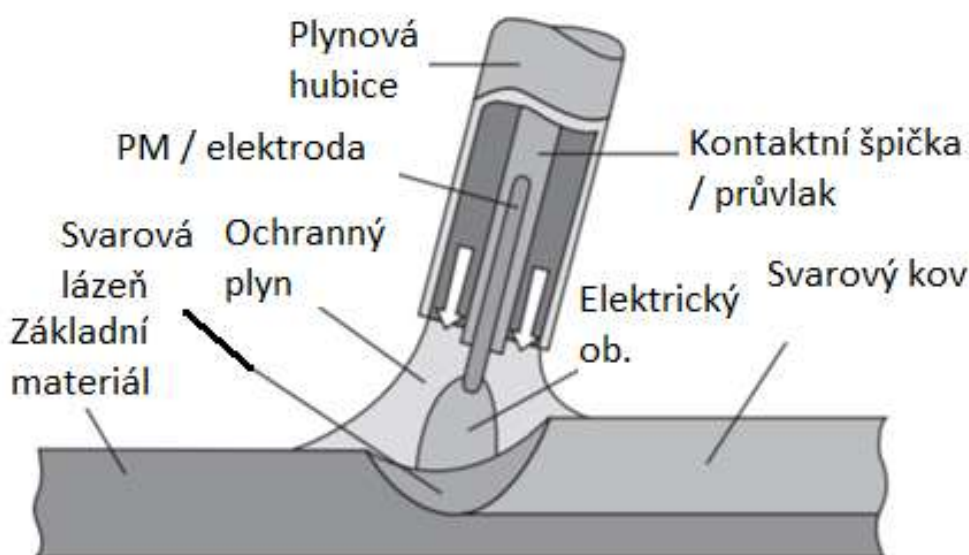
3.1.2 Teorie kladných iontů

Pokud využíváme stejnosměrný proud a nepřímou polaritu zapojení (elektroda zapojená na + pól), tak dochází k urychlení kladných iontů ke svarové lázni. Oxidy jsou následně kladnými ionty „otryskávány“, což má za následek jejich odsunutí na okraje

svarů. To je dáno díky mnohem větší hmotnosti kladných iontů, oproti iontům záporným, které míří zpět k elektrodě [5,6].

3.2 Metoda MIG

Metoda svařování MIG spočívá ve svařování elektrickým obloukem odtavující se elektrodou v inertní ochranné atmosféře. Tato metoda má dle ČSN EN ISO 4063 (050011) *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování označení 131* (případně podle EN zkratka MIG nebo americká zkratka GMAW). Přídavný materiál ve formě drátu slouží zároveň jako elektroda a je dodáván pomocí automatického kladkového podavače drátu, který může mít několik podob. Jedná se o nejrozšířenější metodu svařování, která našla své uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. Zároveň má tato metoda největší produktivitu práce z běžně používaných konvenčních metod. Princip metody je zobrazen na obrázku 4 [16].



Obrázek 4 - Schéma svařování metodou MIG

3.2.1 Svařování metodou MIG

Jak již bylo výše zmíněno, metoda MIG používá dnes standardně stejnosměrného proudu, kdy je hořák připojen na nepřímou polaritu, tedy je připojen na + pól svařovacího zdroje. Díky tomu je elektroda (drát) dobře odtavována do svarové lázně, jelikož se na anodě generuje více tepla než je tomu na katodě (cca o 500-600 °C). Nejnovější svařovací zdroje, ač jsou stále zastoupeny v minimálním množství, byly úspěšně modifikovány pro použití střídavého proudu.

Pokud je posuv drátu, respektive hodnota svařovacího proudu, nastaven nesprávně, dochází k výraznému rozstříku svarového kovu a malému vnesenému teplu, což může způsobit nedostatečné natavení ZM. Pokud je nastavena vysoká hodnota svařovacího proudu, mění se zkratový přenos kovu na sprchový, kdy je PM taven těsně za svařovacím průvlakem a je do svarové lázně přenášen ve formě jednotlivých kapiček roztaveného kovu o malém rozměru na poměrně velkou vzdálenost, a to díky dlouhému oblouku. Tím pádem nedochází ke zkratu. Jelikož je kov již roztaven, rozstřík je výrazně nižší a díky výrazně většímu tepelnému příkonu tohoto oblouku je průvar větší a svarová housenka širší. Vzhledem k velké tepelné vodivosti hliníku a značným svařovacím parametrům probíhá svařování hliníku převážně ve sprchovém přenosu. Pro svařování tenkých materiálů se v současné době používá pulzních módů svařovacích zdrojů, kdy během průměrných nízkých hodnot proudu dochází ke zvýšení proudu po dobu krátkého pulzu, proud se cyklicky mění mezi dvěma hladinami, a to mezi základní a pulzní. Tím dochází k lepší kontrole vneseného tepla, ale i k množství odtaveného kovu. Tento proces kombinuje vlastnosti zkratového a sprchového přenosu kovu do svarové lázně.

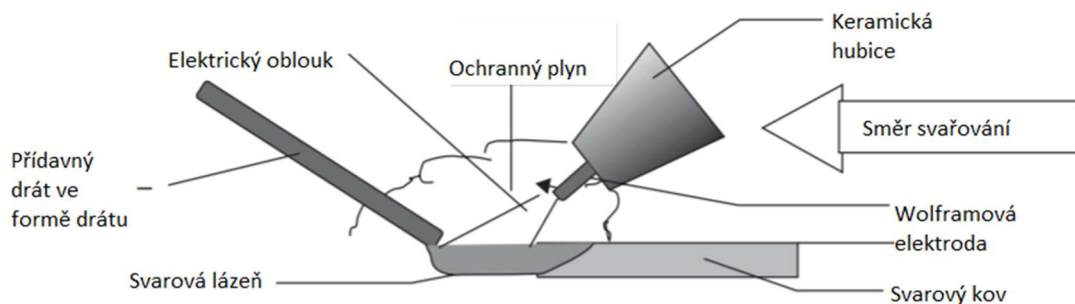
V krátkosti budou dále popsány jednotlivé druhy přenosů kovu při svařování hliníku a jeho slitin. Jako první je to přenos *zkratový*, při kterém dochází ke kontaktu elektrody se ZM a dochází ke zkratu. To je zapříčiněno tím, že rychlost tavení elektrody je pomalejší než rychlost podávání drátu. Z toho vyplývá, že konec elektrody je ponořen do svarové lázně. V ten moment oblouk zhasíná a dochází k odporovému ohřevu až do chvíle, kdy je dosažena teplota tavení PM. Díky působení tzv. pinch efektu, tj. příčné působení elektromagnetické síly, dojde k odtržení kapky tekutého kovu. Poté již nedochází ke zkratu a elektrický oblouk se opět zapálí. Tento proces se opakuje až po dokončení svařování. Dalším typem přenosu kovu je přenos *sprchový*. Ten je typický vysokými svařovacími parametry. Hodnoty proudu se pohybují přibližně mezi 200-500 A, hodnoty napětí přibližně mezi 27-40 V. Sprchový proud se vyznačuje klidným hořením oblouku a minimálním rozstříkem. Dosáhnout jsme ho schopni v ochranné atmosféře argonu nebo atmosférách na argon bohatých (alespoň 80 %). Tohoto přenosu nejsme schopni v ochranné atmosféře CO₂ kvůli jeho značnému povrchovému napětí. Tyto plyny je možné použít jen při svařování ocelí. Pro svařování hliníku je třeba použít inertní plyny. Třetím nejčastějším způsobem přenosu je přenos *pulzní*. Jde o přenos kovu, kdy nedochází ke zkratu a je řízen elektronickým svařovacím zdrojem. Vyznačuje se dvěma hladinami proudu, a to základním a impulzním. Hodnota základního proudu je

poměrně malá, přibližně 20-50 A. Tento druh proudu slouží k udržování elektrického oblouku. Druhým druhem proudu během tohoto procesu je proud impulzní. Na zdroji se nastavuje frekvence jednotlivých pulzů tohoto proudu a jeho proudová amplituda, na níž dojde k odtavení kapky svarového kovu. Během průběhu amplitudy oblouk stále hoří a udržuje vysokou teplotu svarové lázně a PM. Hodnoty pulzní frekvence se běžně pohybují v rozmezí 20-500 Hz. U moderních svařovacích zdrojů je také možnost nastavení frekvence dlouhých pulzů, jejichž hodnota se pohybuje od 0,5-10 Hz. Této možnosti se využívá právě při svařování hliníku, jelikož vzniká kvalitní svarová housenka. Největší uplatnění má impulzní přenos při svařování malých tloušťek, a to díky malému vnesenému teplu, kdy se razantně snižuje riziko protavení materiálu [6,7].

Ač bylo pulzní svařování vyvinuto již v brzkých šedesátých letech 20. století, rozšířilo se a k opravdovému průmyslovému využití došlo až během let devadesátých. První svařovací zdroje s touto funkcí nebyly zrovna přátelské pro obsluhu, protože nastavení svařovacích parametrů bylo poměrně komplikované. Tento problém vyřešil až vývoj polovodičových komponent, které nastavení svařovacích parametrů velmi zjednodušily a umožnily také využití synergických obvodů. Synergie umožnila propojení všech parametrů pouze pod jeden, například nastavením svařovacího proudu. Svařovací zdroj podle daného programu nastavil napětí a rychlost posuvu drátu. Jednotlivé programy zavedené do paměti svařovacího zdroje umožnily velmi rychlé a snadné nastavení pro určité průměry drátu, druhy ochranného plynu, druhu a tloušťky ZM.

3.3. Metoda TIG

Metoda TIG spočívá ve svařování neodtavující se wolframovou elektrodou v inertní ochranné atmosféře, kde ochranný plyn nereaguje se svarovou lázní. Přídavný materiál je dodáván do svarové lázně externě ve formě drátu o přibližně stejném chemickém spojení jako má ZM. Tato metoda má vícero označení, a to dle normy ČSN EN ISO 4063 (050011) *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*: 141, WIG, TIG, GTAW. Touto metodou je možné svařovat všechny druhy materiálů. V závislosti na druhu základního materiálu lze využít jak proud stejnosměrný, tak i střídavý [16].



Obrázek 5 - Schéma svařování metody TIG

3.2.1. Svařování metodou TIG

Pro svařování většiny základních materiálů se používá přímé polarity zapojení stejnosměrného proudu. To znamená, že svařovací hořák je připojen na - pól svařovacího zdroje. Díky tomu je většina množství tepla generována v ZM, nikoliv v elektrodě, a to v poměru 2/3 v ZM a 1/3 v elektrodě. Při tomto zapojení však nedochází k čistícímu efektu elektrického oblouku, což ve svém důsledku znamená, že při tomto zapojení nelze svařovat slitiny Al, Mg. Proto je třeba obrátit polaritu, nicméně tím dochází k neúměrnému přehřívání elektrody a malému průvaru. Proto je pro metodu TIG toto zapojení prakticky nepoužitelné. Z toho důvodu se při svařování Al a Mg používá proud střídavý, kdy svařovací proud má sinusový průběh. Kladná polovina cyklu má charakteristiku nepřímého zapojení, má čistící účinek (popsaný v kapitole 3.1), rozrušuje oxid a elektroda se zahřívá. Druhá polovina cyklu je charakterizovaná jako přímé zapojení a jedná se o negativní polovinu sinusoidy, taktéž dochází k ochlazování elektrody, tavení a penetraci očištěného materiálu.

K zažehnutí a dohoření oblouku dochází 100x za sekundu, jelikož proud má frekvenci 50 Hz. Z toho důvodu prochází hodnota proudu 100x za sekundu nulovou hodnotou. Aby bylo zajištěno kontinuální znovuzapálení oblouku, používá se u střídavého proudu vysokofrekvenčních modulů (HF – high frequency), které jsou také využívány pro bezdotykové zapálení oblouku, a vysokého napětí (9 V-15 kV). Díky tomu dochází k průběžnému vybíjení v HF modulech, což zajišťuje stabilní svařovací oblouk. Hliník je ze své podstaty špatným emitorem elektronů, z toho důvodu je opětovné zažehnutí oblouku v kladné části sinusoidy obtížné. Pokud z nějakého důvodu dojde ke zpoždění zapálení oblouku, množství proudu během kladné části sinusoidy klesne na úkor množství proudu během záporné části. To může vést ke kompletnímu usměrnění, kdy během kladné části sinusoidy neprotéká žádný proud. To má za následek ztrátu čistícího

efektu kladné části proudu a nestabilitu oblouku. Kromě nestability oblouku může docházet k přehřívání transformátoru a generování kladné části proudu ve svařovacím zdroji. U moderních svařovacích zdrojů je tato komplikace řešena začleněním kondenzátorů blokujících stejnosměrný proud. Další „hardwarový“ problém může být způsoben samotným vysokofrekvenčním zápalen, kdy vysoká frekvence proudu velmi negativně ovlivňuje elektronické obvody svařovacího zdroje. Pokud nejsou HF moduly dostatečně stíněny, může dojít k rušení dalšího elektronického vybavení v okolí [9].

V současné době používá většina svařovacích zdrojů místo „sinusoidy“ (zpětná inverze proudu na střídavý není dokonalá a křivka má spíše lichoběžníkový tvar) proud čtvercového průběhu. U těchto zdrojů je možné nastavit poměr trvání kladné a záporné části proudu v intervalu 50–90 %, tato funkce je označována jako „balance“. Toto je například výhodné u svařování větších tlouštěk materiálů nebo u vyšších svařovacích rychlostí, kdy je ve větším poměru zastoupena záporná část, a proto dochází k větší penetraci materiálu, anebo naopak, pokud je významněji zastoupena kladná část, je možné díky malé penetraci svařovacího oblouku svařovat tenké plechy a dílce malých tlouštěk. Další výhodou moderních invertorových zdrojů a čtvercového průběhu proudu je rychlost, se kterou proud prochází nulovou hodnotou, a tím se redukuje i čas kontinuálního sepnutí HF modulu, což snižuje šanci poškození elektronických komponent [7].

Netavící se elektrody jsou normalizovány dle ČSN EN ISO 6848 (052411) *Obloukové svařování a řezání - Netavící se wolframové elektrody - Klasifikace*. Tato norma definuje chemické složení, rozměry a jejich úchyly a taktéž barevné označení jednotlivých druhů wolframových elektrod. Nejvíce používané průměry elektrod se pohybují v rozmezí od 1,6 do 3,2mm [17].

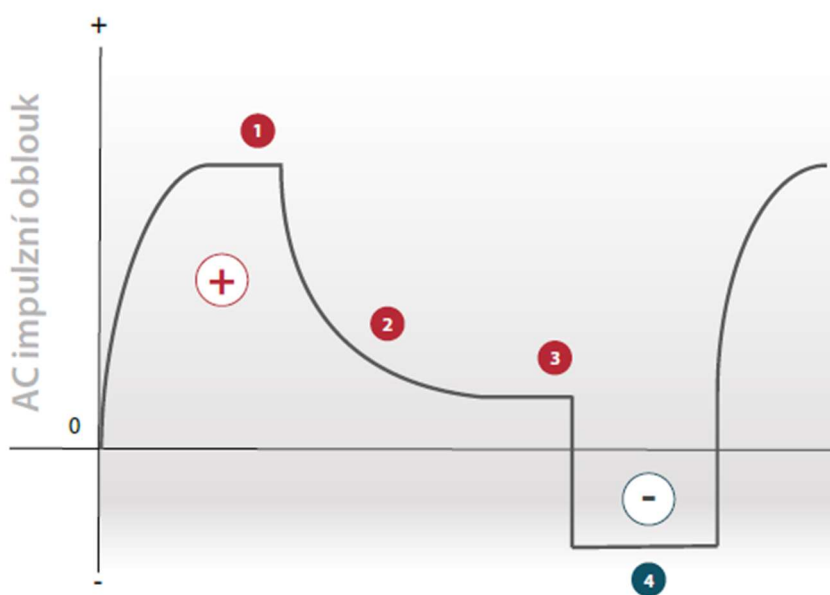
Tabulka 10 - Druhy wolframových elektrod

Označení elektrody	Barva	Použití	Proud	Legury
WP	Zelená	Hliník	~	Čistý wolfram 99,8 %
WT 10	Žlutá	Korozivzdorná ocel	=	Thorium 1 % ThO ₂
WT 20	Červená	Korozivzdorná ocel	=	Thorium 1 % ThO ₂
WT 30	Fialová	Korozivzdorná ocel	=	Thorium 1 % ThO ₂

WT 40	Oranžová	Korozivzdorná ocel	=	Thorium 1 % ThO ₂
WC 20	Šedá	Korozivzdorná ocel	= / ~	Cerium 2,0 % CeO ₂
WL 10	Černá	Univerzální	= / ~	Lanthan 1,0 % LaO ₂
WL 15	Zlatá	Univerzální	= / ~	Lanthan 1,0 % LaO ₂
WL 20	Modrá	Univerzální	= / ~	Lanthan 1,0 % LaO ₂
WZ 08	Bílá	Univerzální	~	Zirkon 0,8 % ZrO ₂

3.3 Metoda svařování MIG AC

Metoda MIG AC (tj. svařování MIG pomocí střídavého proudu) v sobě spojuje vlastnosti metod MIG DC+ (s využitím stejnoměrného proudu s nepřímou polaritou) a TIG AC, které byly popsány výše. Primární motivací pro použití této kombinované metody je využití poměrně velké rychlosti svařování metody MIG společně s použitím střídavého proudu, který je v současné praxi používán primárně u metody TIG. Na obrázku 6 je znázorněn průběh proudu v závislosti na čase u metody MIG AC.



Obrázek 6 - Průběh střídavého pulzního proudu - schéma firmy EWM

Jak můžeme na obrázku 6 vidět, průběh střídavého pulzního proudu má několik fází. I když křivka se může částečně lišit od reálných naměřených hodnot, můžeme průběh obecně rozdělit na následující fáze: v první fázi proud stoupá na maximální hodnotu pulzu, kdy dochází k tvorbě kapky svarového kovu (1). Následně hodnota proudu klesá,

kdy se kapka tekutého kovu odděluje a přechází do svarové lázně (2). Třetí fází je stabilizace proudu na základní hodnotě (3). Poslední fází je fáze záporného proudu (4), kdy dochází k čistícímu efektu a k samotnému čištění svarové lázně.

3.4 Ochranné plyny

Ochranné plyny při svařování hliníku metodou TIG i MIG musí být inertní, a to pro již zmíněnou reaktivnost hliníku s kyslíkem. Inertní plyny jsou zařazeny do skupiny I podle normy ČSN EN ISO 14175 *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Tato skupina se dělí ještě na tři podskupiny označované indexem 1-3. Podskupina I₁ je určena pro čistý argon, obdobně je to u podskupiny I₂, ovšem zde se jedná o čisté hélium. Poslední podskupina I₃ označuje směsné plyny hélia, které je zastoupeno v množství 0-95 %, a argonu, který vyplňuje zbylé množství. Dominantním inertním plynem v našich podmínkách je argon vzhledem k dostupnosti a ceně oproti héliu. Poskytuje stabilní, hladký oblouk, dobrou penetraci a zároveň se jedná o plyn s nejlepšími ionizačními vlastnostmi, kdy hodnota ionizační energie je rovna 15,8 eV. Zároveň má ale nejmenší tepelný výkon, jelikož má nejmenší tepelnou vodivost ze všech používaných ochranných plynů. To má za následek malý průvar a z toho vyplývající malou rychlost svařování, taktéž je díky tomu velmi charakteristický tvar průřezu svarového spoje. Na povrchu je závar široký a směrem do materiálu se výrazně zužuje. Tento problém se dá vyřešit použitím směsného plynu Ar + He, kdy helium sice zvyšuje napětí svařovacího oblouku až o 20 %, ale díky větší tepelné vodivosti hélia má mnohem vyšší teplotu oblouku, hloubku průvaru a šířku svarové housenky. Zároveň vyšší teplota svarové lázně chladne pomaleji. To umožňuje vodíku, který je přítomný ve svarové lázni, se vypařit, a tím klesá míra porozity svarového spoje. To je velmi důležité právě u svařování hliníku a jeho slitin. Oproti čistému argonu také vzrůstají až trojnásobně reálné svařovací rychlosti. Avšak o nic menší roli tu hraje ekonomická stránka věci, jelikož helium je až 7x dražší než argon. To platí u čistot 4.6 u ostatních variant se mohou ceny lišit – viz tabulka 11[12,18].

Tabulka 11 - Cenové porovnání ochranných plynů podle Linde-gas (červen 2021) [25]

Plyn	Argon 4.6 [10 l; 200 bar]	Helium 4.6 [10 l; 200 bar]
Čistota	≥ 99,996 %	≥ 99,996 %
Cena (bez DPH)	2 305,- Kč	16 090,- Kč

4. Kontrola kvality svarových spojů

Pro kontrolu kvality svarových spojů se využívá několik metod. Tyto metody se dělí na zkoušky nedestruktivní a zkoušky destruktivní. Skupina zkoušek nedestruktivních (dále jen NDT) se dále dělí na metody pro kontrolu povrchových vad a metody pro kontrolu vad vnitřních. Jelikož při experimentu realizován v rámci řešení bakalářské práce nebyly použity metody pro kontrolu vnitřních vad, jsou zde pouze zmíněny. Jde o metodu ultrazvukovou a metodu prozáření (a to jak rentgenové, tak i jiné záření).

Povrchové vady lze kontrolovat následujícími zkouškami:

- Vizualní zkouška
- Penetrační zkouška (kapilární)
- Magnetická prášková zkouška

Vzhledem k nemagnetičnosti hliníku je z těchto metod nepoužitelná zkouška magnetická. Z toho důvody byly zvoleny pro kontrolu kvality svarových spojů zkoušky vizualní a kapilární.

Pro správné provedení vizualní zkoušky je třeba svarový spoj řádně očistit od všech nečistot (mastnoty, strusky, rozstříku atd.). Taktéž je třeba zkoušku provádět v dostatečně osvětleném prostoru. Během této kontroly se běžně kontrolují vnější rozměry svaru a velikosti nalezených vad, například převýšení svaru. Vizualní zkouška podléhá normě *ČSN EN ISO 17637 (051180) Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizualní kontrola tavných svarů* [19].

Kapilární zkouška je jednou z nedestruktivních zkoušek používaných při kontrole svarových spojů, odlitků atd. Tato zkouška využívá ve svém principu působení kapilárních sil. Ty umožňují průnik indikačních kapalin do povrchových vad materiálu. Ty vystoupí na povrch po aplikaci vývojky. Konkrétní provedení je popsáno v kapitole 5.4 Provedení kapilární zkoušky. Kapilární zkouška se provádí dle normy *ČSN EN ISO 3452-1 (015018) Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*. A následné vyhodnocení se provádí dle normy *ČSN EN ISO 23277 (051176) Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti* [20,21].

Následují metody destruktivní. Do těchto metod patří příčná zkouška tahem, zkouška ohybová, zkouška rázem v ohybu, zkouška rozlomením, zkouška tvrdosti a zkouška mikro a makro struktury.

Pro experiment byly vybrány jako vhodné zkouška tvrdosti a zkouška mikro a makro struktury, které jsou více popsány v kapitolách 5.5 a 5.6.

5. Praktická část

Motivací praktické části je ověření výhod při použití střídavého proudu oproti proudu stejnosměrnému u metody MIG při svařování hliníkových slitin.

5.1 Vybavení pro praktickou část

5.1.1 Svařovací zdroj

Testovaným svařovacím zdrojem je zařízení od firmy Elmatech GmbH VARIO MIG 4003 AC/DC DV 36. Jedná se o nový typ svařovacího zdroje umožňující během MIG/MAG procesu využít střídavý proud. Standardně jsou MIG/MAG svařovací zdroje vyráběny pro použití se zapojením DC+.



Obrázek 7 - Svařovací zdroj Elmatech GmbH VARIO MIG 4003 AC/DC DV 36



Obrázek 8 - Čelní ovládací panel svařovacího zdroje

Technická charakteristika svařovacího zdroje:

- Základní svařovací proud: (10-400) A
- Maximální pulzní proud: 800 A
- Svařovací napětí: (10-34) V
- Chlazení: vodní
- Svařovací procesy: pulzní MIG/MAG AC/DC
Dvojité pulz MIG/MAG AC/DC
Lift TIG

Hned v úvodu popisu by bylo vhodné zmínit určité komplikace s tímto zařízením, které provázeli realizaci experimentální části BP, a to komplikace spojené s technickým řešením svařovacího zdroje, a taktéž komplikace ergonomického charakteru. Technickými komplikacemi je myšlen samotný operační systém, který je primárně používán pro ostatní svařovací zdroje této firmy např. pro odporové svařování. U tohoto zdroje použila firma stejný operační systém pro řízení procesu střídavého proudu, který vykazuje nepřesnosti, a to převážně při nastavení synergických režimů. Toto se prokazuje převážně u doporučených svařovacích parametrů pro dané tloušťky materiálů. Systém taktéž není kompletně lokalizován. Dalším problémem je, že svařovací zdroj při spuštění velmi často přetíží proudový jistič. Jelikož byl experiment prováděn na svařovně, která

má elektrickou síť dimenzovanou primárně pro využití svařovacími zdroji, jde pravděpodobně o špatné elektronické řešení zdroje, jelikož ostatní zdroje tento problém běžně nevykazují.

Během experimentu nastal i softwarový problém, kdy operační systém svařovacího zdroje zobrazil chybovou zprávu a zdroj byl vyřazen z provozu. Tento problém byl odstraněn po konzultaci se servisním technikem odstraněním SD karty z řídicí desky svařovacího zdroje apod. Což značí zatím asi menší průmyslové nasazení a určité nedostatky, které bývají odstraněny až při dlouhodobějším průmyslovém provozu.

Co se týče ergonomických problémů, jedná se především o výšku a orientaci uložení podavače PM (viz obrázek 8 a 9), toto řešení podavače bylo dříve používáno běžně, ale dnes se od něj u většiny výrobců upustilo. Co se týče výšky, jedná se o poměrně vysoký svařovací zdroj a při běžné výšce postavy 175-180 cm, kterou je možné brát jako průměrnou, je poměrně komplikovaná manipulace ve vnitřních prostorech podavače. Toto je částečně způsobeno i tím, že výrobce používá pro všechny své zdroje stejné šasi, a to bez ohledu na rozdílné výkony.

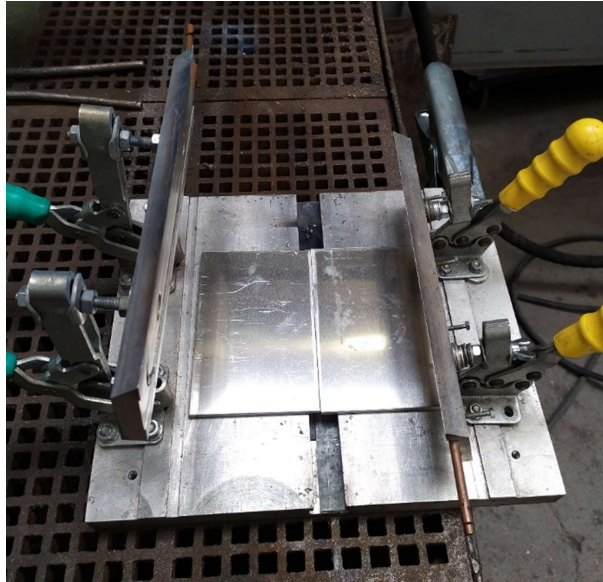


Obrázek 9 - Náhled čtyř kladkového podavače (pohled shora)

5.1.2 Přípravek pro upnutí vzorku

Pro upnutí jednotlivých vzorků svarových spojů byl použit jednoduchý upínací přípravek viz obrázek 10. O použití přípravku bylo rozhodnuto na základě velké tepelné

vodivosti hliníku a velkých deformací materiálu, pokud by ke svaření došlo bez upnutí. Velikost vzorků byla vzhledem k velikosti přípravku zvolena 150x90 mm a tloušťka 5 mm.



Obrázek 10 - Upínací svařovací přípravek

5.1.3 Monitorování svařovacích parametrů

Pro měření reálných svařovacích parametrů byl využit senzorický systém Weldmonitor 4.5, kdy vlastní snímač elektrického proudu byl zařazený jako další prvek mezi zemnicí svorkou a svařovací zdroj. Napětí bylo monitorováno svorkou z Weldmonitoru připojenou na mosaznou část podavače drátu. Detail tohoto zapojení je zobrazen na obrázku 11. Vyhodnocení probíhalo na připojeném počítači s řídicím SW. Tento systém sloužil pro nezávislé ověření hodnot hlavních svařovacích parametrů (proud a napětí) použitých pro svařovací proces a parametry byly monitorovány v celém průběhu výroby vzorků.



Obrázek 11 - Zapojení monitorovacího systému Weldmonitor 4.5

5.2 Technické komplikace při svařování hliníku

Z technického hlediska je nutné přizpůsobit příslušenství svařovacího zdroje pro účely svařování hliníku.

Prvním z problémů je opět velká tepelná vodivost hliníku. Díky tomu může docházet k zadrhávání drátu při průchodu svařovacím průvlakem. Jelikož hliník expanduje díky přenosu tepla proti směru podávání drátu, standardní průvlaky na ocel o jmenovitém průměru stejném, jako je průměr svařovacího drátu, nemusí fungovat správně. Proto je nutné použít buď průvlaky určené přímo pro svařování hliníku (které mají zvětšený otvor pro vedení svařovacího drátu cca o 0,1 mm) nebo je třeba použít standardní průvlaky o větším průměru (obvykle se používá nejbližší vyšší rozměr, obvykle určený pro svařování ocelových materiálů). Protože byl pro experiment použit svařovací drát o průměru 1,2 mm, tak v našem případě se jednalo o průvlaky průměru 1,2 mm určených na hliník, anebo o klasické průvlaky na ocel o průměru 1,4 mm. Druhá varianta je běžně dostupnější.

Další změnou je výměna bowdenu (vnitřního vedení svařovacího hořáku), kdy pro svařování oceli se běžně používají bowdeny ocelové (viz obrázek 12. Avšak při svařování

hliníku by docházelo k zadržávání měkkého hliníkového drátu v ocelovém bowdenu, proto se používají bowdeny z uhlíkových vláken anebo bowdeny teflonové (viz obrázek č. 13). Taktéž by docházelo k nadměrnému tření a otěru drátu ve vedení, což by mělo za následek postupné ucpání vedení.



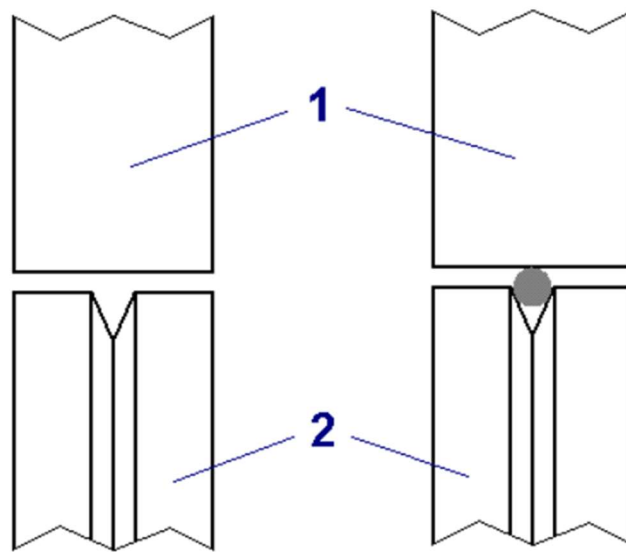
Obrázek 12 - Ukázka ocelového bowdenu



Obrázek 13 - Ukázka teflonového bowdenu

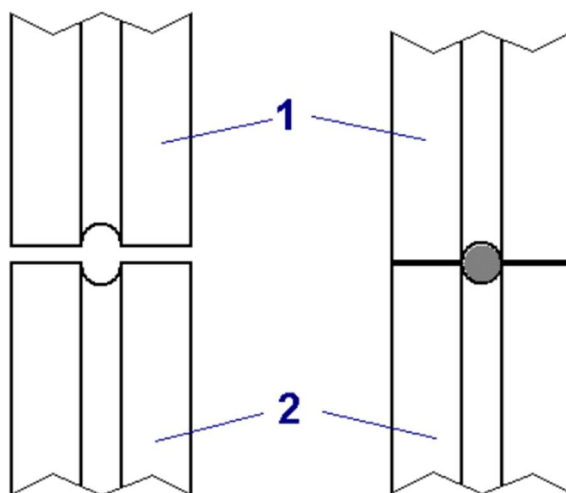
Pokud postupujeme dále proti směru podávání drátu, dostáváme se do samotného podavače. Jeho nejdůležitějším úkolem je zabezpečit plynulé podávání svařovacího drátu a také je potřeba zajistit plynulost napojení jednotlivých dílů. Zprv je třeba říci, že je

nutné využít čtyřkladkový podavač, jelikož dvoukladkový nezajistí dostatečně spolehlivé podávání PM. To, co je potřeba v podávači dále uzpůsobit, jsou podávací kladky. Kladky pro podávání oceli jsou charakteristické tím, že dvě proti sobě tlačící kladky nemají obvykle stejný tvar. Hnaná kladka obsahuje drážku lichoběžníkového tvaru a přítlačná kladka je hladká, případně mohou být obě drážky lichoběžníkové. Pokud je jedna kladka hladká, pak je dostatečný přítlak zajištěn zvýšením přítlaku, což je použitelné pouze u oceli (resp. u PM vyšší tvrdosti).



Obrázek 14 - Schéma podávacích kladek na ocel 1 = přítlačná kladka, 2 = hnaná kladka

Nicméně u kladek podávajících hliníkový drát je tomu jinak. Opět je tato úprava následkem nízké tvrdosti hliníku. Pokud by byly použity běžné kladky pro podávání oceli, docházelo by ke značné plastické deformaci PM, což by mohlo způsobit zasekávání PM buď v bowdenu, průvlaku anebo by mohlo docházet k prokluzu drátu v podávacích kladkách. Z toho důvodu je potřeba využít kladky s půlkruhovou drážkou (viz obrázek 15), a to jak v případě kladky hnané, tak i případě kladky přítlačné.



Obrázek 15 - Schéma podávacích kladek na hliník

Obecně lze konstatovat, že samotné podávání PM je u hliníku relativně komplikované oproti podávání ocelových drátů. Z toho důvody jsou v praxi využívány kratší kabelové vedení hořáků (max. 3,5 m), pokud to daný druh svařence umožňuje. Pokud je nutné využít hořáky delší, pak lze využít celek zahrnující více podavačů, anebo kombinaci klasického tlačného podavače a hořáku push-pull, kdy je druhý spolupůsobící malý podavač (vykonávající tažný pohyb drátu) zabudovaný přímo do rukojeti hořáku. Další variantou je použití hořáku spoolgun, kde je malý zásobník PM umístěný přímo na hořáku společně s malým podavačem, který ovšem podává PM na velmi krátkou vzdálenost. Nicméně tato varianta je málo používaná, a převážně pro jiné aplikace, než je svařování hliníku.



Obrázek 16 - ukázka hořáků spoolgun (vlevo), push-pull (vpravo)

5.3 Svařování zkušebních vzorků

Motivací a záměrem této bakalářské práce je porovnání standardního pulzního procesu MIG DC+ s pulzním režimem MIG AC a vyhodnocení výhod či nevýhod vyplývajících z použití střídavého proudu.

5.3.1 Vzorky svařené stejnosměrným proudem

V první fázi experimentu bylo provedeno svaření prvních pěti vzorků stejnosměrným proudem v pulzním režimu (označeny jako vzorky KU_1 až KU_5), kdy vzorky 2 a 5 byly vyhodnoceny jako „zmetky“ a nebyly dále zařazeny do vyhodnocování. Vzorek číslo 2 byl znehodnocen následkem zaseknutí drátu v podavači, což vedlo k zatažení kontaktního průvlaku. Tento problém se projevil ještě dvakrát na tom samém vzorku. Z toho důvodu nebylo možné použít pro vyhodnocení ani část vzorku. U vzorku číslo 5 šlo o znehodnocení způsobené technickými komplikacemi při upevnění vzorku do přípravku v kombinaci s vedením hořáku a zaseknutím PM v podavači.

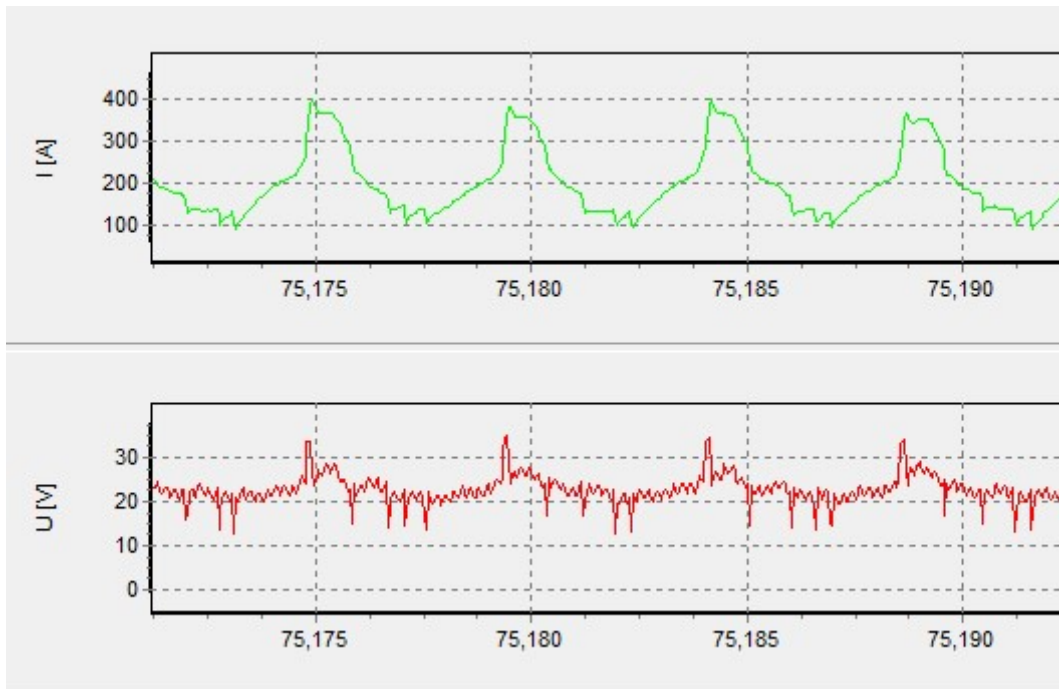
Svařovací parametry byly voleny podle synergické předvolby svařovacího zdroje a pro jejich optimalizaci a ověření opakovatelnosti byly vzorky svařeny pětkrát, a všechny průběhy byly monitorovány. Jelikož se jedná o poloautomatický proces, bylo zároveň optimalizováno vedení hořáku / celkový čas svařování. Z toho důvodu byl jako nejlepší zvolen vzorek KU_4 s parametry svařování uvedenými v tabulce 12.

Tabulka 12 - Parametry svařování vzorků (DC+)

Označení vzorku	Svařovací napětí	Svařovací proud	Rychlost podávání PM	Doba svařování	Vyhodnocení
KU_1	23,5 V	184 A	11,1 m·min ⁻¹	16,25 s	✓
KU_2	23,5 V	184 A	11,1 m·min ⁻¹	17,15 s	✗
KU_3	23,5 V	184 A	11,1 m·min ⁻¹	17,32 s	✓
KU_4	23,5 V	184 A	11,1 m·min ⁻¹	21,2 s	✓
KU_5	23,5 V	184 A	11,1 m·min ⁻¹	17,5 s	✗

Hodnoty proudu uvedené v tabulce 12 jsou průměrné hodnoty, nicméně v grafech průběhů proudů a napětí (vytvořené monitorovacím systémem Weldmonitor 4.5) můžeme vidět, že maximální hodnota proudu pulzu je přibližně 380 – 400 A a hodnota základního

proudu se pohybuje přibližně kolem hodnoty 100 A (viz obrázek 17). Téměř identické hodnoty můžeme vidět i v grafech z obrázků 20 a 22.



Obrázek 17 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_1



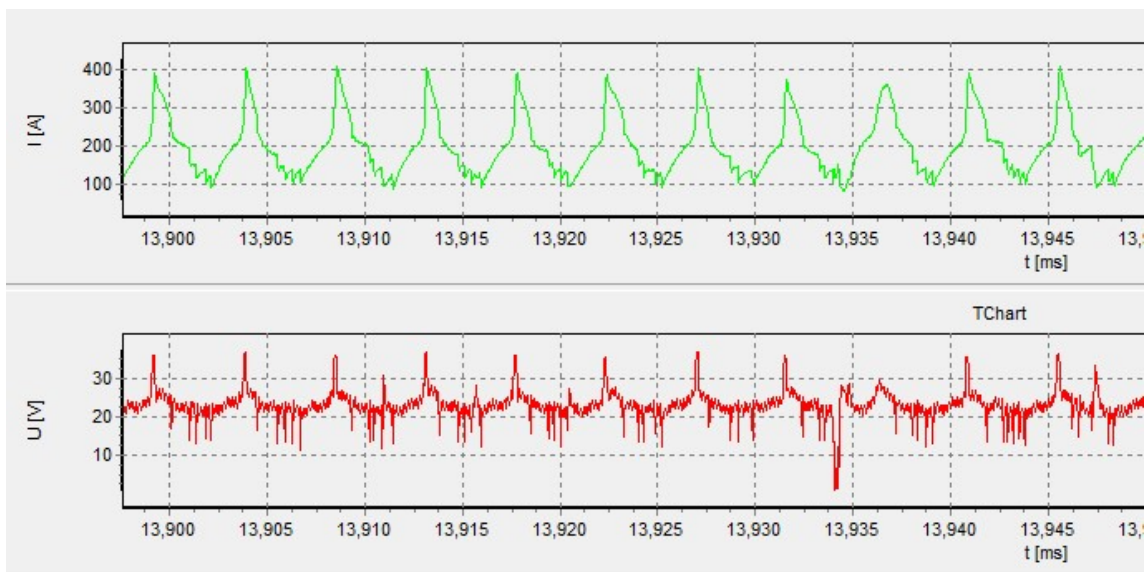
Obrázek 18 - Vzorek KU_1

Z časových důvodů nebylo řešeno odladování začátků a konců svarů, kde vznikají na začátku studené spoje a na konci krátery se zárodky trhlin. V praxi se tyto vady řeší

použitím náběhových a výběhových desek, kdy neprohřátí a propal na začátcích a koncích svarů vznikají mimo vlastní svařenec (viz příklad na obrázku 19).



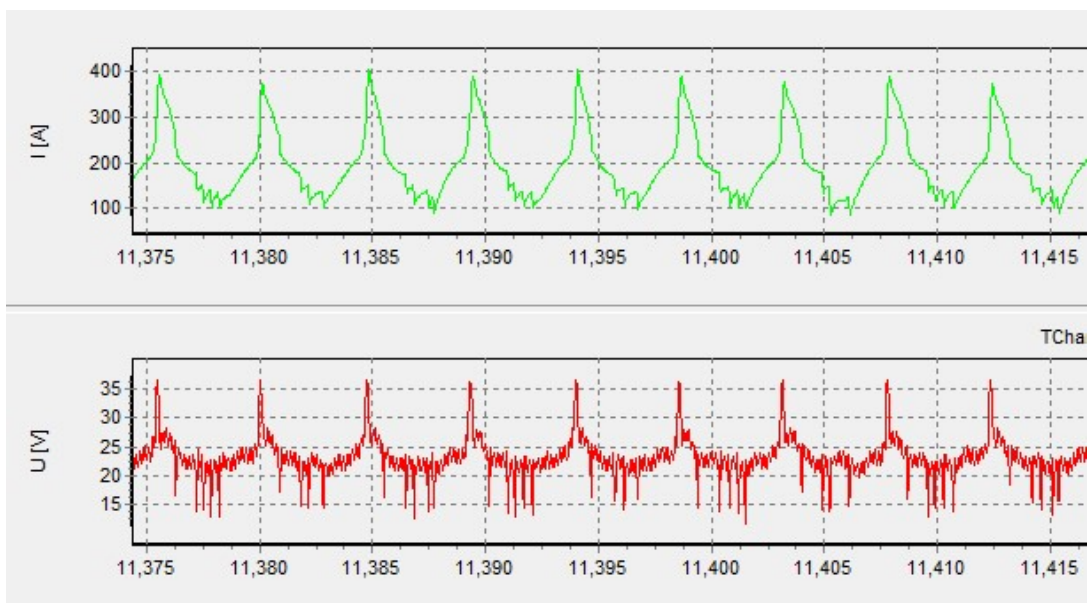
Obrázek 19 - Ukázka použití náběhových a výběhových desek



Obrázek 20 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_3



Obrázek 21 - Vzorek KU_3



Obrázek 22 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_4



Obrázek 23 - Vzorek KU_4

Vzorky KU_1 a KU_3 byly z dalších zkoušek vyřazeny po vizuální kontrole vzorků a z důvodu minimálního provaření kořene. Vzorek KU_4 byl vybrán pro další vyhodnocení a porovnání se vzorky vyrobené střídavým proudem. Vytvořené vzorky svarových spojů byly zkontrolovány vizuálně a zároveň byly naměřeny základní geometrické charakteristiky svarových housenek (ve třech místech svarové housenky) – viz tabulka 13.

Tabulka 13 - Rozměry svarových povrchů a kořenů (DC)

KU_1 Povrch svaru	Šířka	Výška	KU_1 Kořen	Šířka	Výška
1. bod	13 mm	1 mm	1. bod	6 mm	1,5 mm
2. bod	12 mm	2 mm	2. bod	7 mm	2 mm
3. bod	12 mm	1,5 mm	3. bod	9 mm	2,5 mm
KU_3 Povrch svaru	Šířka	Výška	KU_3 Kořen	Šířka	Výška
1. bod	14 mm	2 mm	1. bod	5 mm	1 mm

2. bod	12 mm	3 mm	2. bod	4 mm	1 mm
3. bod	13 mm	4 mm	3. bod	3 mm	1 mm
KU_4 Povrch svaru	Šířka	Výška	KU_4 Kořen	Šířka	Výška
1. bod	12 mm	0,5 mm	1. bod	12 mm	3 mm
2. bod	11 mm	0,5 mm	2. bod	11 mm	3 mm
3. bod	13 mm	0,5 mm	3. bod	13 mm	2,5 mm

5.3.1.1 Výpočet vneseného tepla při svařování vzorků (DC)

Jednotlivé vzorky byly připraveny tak, aby svarová housenka byla dlouhá 150 mm (tento rozměr je totožný pro všechny vzorky). Tepelný příkon (vnesené teplo) svařování lze spočítat u obloukových metod svařování pomocí standardního vzorce uvedeného v normě ČSN EN 1011-2 (052210) Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí (viz výpočtový vztah 1) [22]:

$$Q = \frac{\mu \cdot U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (1)$$

kde:

Q = vnesené teplo [kJ · mm⁻¹]

μ = koeficient účinnosti [-], pro metodu MIG/MAG je roven 0,8

U = svařovací napětí [V]

I = svařovací proud [A]

v_s = svařovací rychlost [mm · s⁻¹] tuto hodnotu určíme z jednotlivých časů svařování

t_s = čas svařování [s]

$$v_s = \frac{s}{t_s} \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2) \quad \text{př.: } v_{sKU_1} = \frac{150}{16,25} = 9,23 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tabulka 14 - Výpočet svařovacích rychlostí vzorků (DC)

	KU_1	KU_3	KU_4
v _s [mm · s ⁻¹]	9,23	8,66	7,08

$$\text{Př.: } Q_{KU_1} = \frac{0,8 \cdot 23,5 \cdot 184}{10^3 \cdot 9,23} = 0,3326 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Tabulka 15 - Výpočet vneseného tepla do jednotlivých vzorků (DC)

	KU_1	KU_3	KU_4
Q [kJ·mm ⁻¹]	0,3748	0,3994	0,4887

Tento výpočet potvrdil volbu vzorku KU_4 - vzorek s největším vneseným teplem, čemuž odpovídá největší dosažený průvar.

5.3.2 Vzorky svařené střídavým proudem

Druhou částí experimentu bylo svaření vzorků svarových spojů střídavým proudem. Byly použity stejné typy vzorků, tedy opět délka 150 mm a tloušťka 5 mm. Délka svaru byla zvolena poměrně krátká, a to z důvodu použitého přípravku a zároveň kvůli tepelné vodivosti hliníku. Pokud by byla délka svaru zvolena podstatně delší, tak by bylo nutné během svařování měnit parametry. Zde však bylo potřeba nastavené svařovací parametry odzkoušet a určitým způsobem optimalizovat. Ač je zdroj i pro střídavý proud vybaven synergickým módem, jedná se spíše o odhad systému, než o skutečné parametry odpovídající vstupním datům jako je tloušťka ZM. Z toho důvodu byl experiment započat na stejných svařovacích parametrech, jako tomu bylo u stejnosměrného proudu, a postupně byly parametry procesu optimalizovány na základě kvality výsledného svaru.

Tabulka 16 - Parametry svařování vzorků (AC)

Označení vzorku	Svařovací napětí	Svařovací proud	Rychlost podávání PM	Doba svařování
KU_AC_1	21,5 V	184 A	10,4 m·min ⁻¹	31,8 s
KU_AC_2	23,1 V	220 A	12,0 m·min ⁻¹	20,3 s
KU_AC_3	22,2 V	200 A	11,2 m·min ⁻¹	25,5 s
KU_AC_4	22,7 V	210 A	11,6 m·min ⁻¹	24,3 s

Tabulka 17 - Rozměry svarových povrchů a kořenů (AC)

KU_AC_1 Povrch svaru	Šířka	Výška	KU_AC_1 Kořen	Šířka	Výška
1. bod	12 mm	4 mm	1. bod	✘	
2. bod	13 mm	3 mm	2. bod		
3. bod	12 mm	4 mm	3. bod		
KU_AC_2 Povrch svaru	Šířka	Výška	KU_AC_2 Kořen	Šířka	Výška
1. bod	12 mm	1 mm	1. bod	7 mm	5 mm
2. bod	12 mm	1 mm	2. bod	7 mm	4 mm
3. bod	11 mm	1 mm	3. bod	9 mm	4 mm
KU_AC_3 Povrch svaru	Šířka	Výška	KU_AC_3 Kořen	Šířka	Výška
1. bod	13 mm	3 mm	1. bod	✘	
2. bod	13 mm	3 mm	2. bod		
3. bod	12 mm	3 mm	3. bod		
KU_AC_4 Povrch svaru	Šířka	Výška	KU_AC_4 Kořen	Šířka	Výška
1. bod	11 mm	1 mm	1. bod	8 mm	4 mm
2. bod	11 mm	1 mm	2. bod	9 mm	4 mm
3. bod	10 mm	2 mm	3. bod	8 mm	5 mm

✘ - neprovařeno

Jak je vidět v grafu průběhu proudu z obrázku 24, křivka relativně odpovídá vzoru, který je uveden v teoretické části v bodu 3.3 Metoda svařování MIG AC obrázek 6.



Obrázek 24 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_1



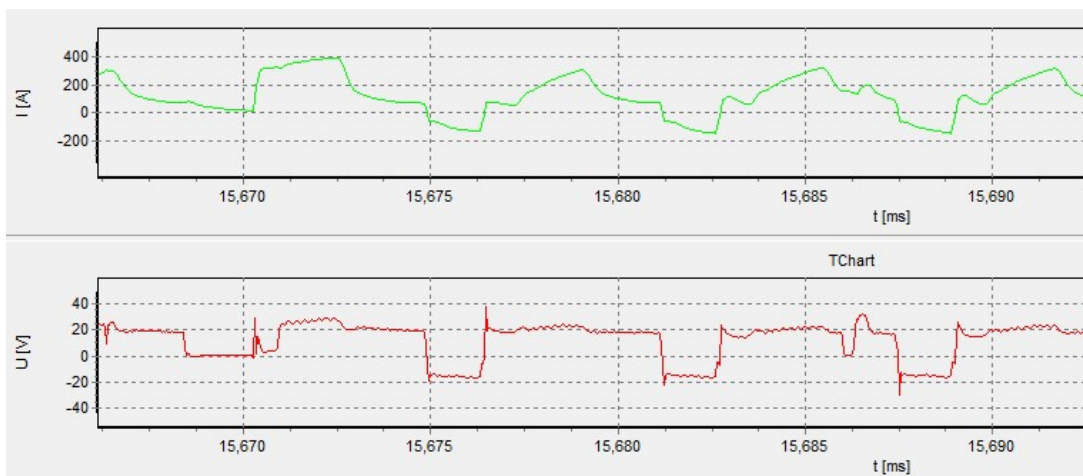
Obrázek 25 - Vzorek KU_AC_1



Obrázek 26 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_2



Obrázek 27 - Vzorek KU_AC_2



Obrázek 28 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_3



Obrázek 29 - Vzorek KU_AC_3



Obrázek 30 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_4



Obrázek 31 - Vzorek KU_AC_4

Z průběhů proudů je patrné, že řídicí systém v některých případech vykazuje anomálie v nastavení, jako je tomu u vzorku KU_AC_2. Z grafu je vidět, že svařovací zdroj vůbec nepřešel, u tohoto konkrétního vzorku, do režimu AC, a svár byl proveden v kladných hodnotách svařovacího proudu. To je následkem systémové nestability, která způsobuje příležitostné chyby.

Zároveň je z grafů patrné, že již výše zmíněná nestabilita řízení se projevuje tím, že jednotlivé průběhy se vzájemně poměrně značně liší.

Z těchto vzorků byl vybrán opět nejlépe provedený vzorek pro další vyhodnocení. Vzhledem k optimalizaci parametrů byl vybrán vzorek KU_AC_4. Tento vzorek má dobrý průvar a na rozdíl od vzorku KU_AC_2 nedošlo k propadnutí nebo propálení materiálu.

5.3.2.1 Výpočet vneseného tepla do jednotlivých vzorků (AC)

Vzorci jsou totožné jako u vzorků výše.

$$v_s = \frac{s}{t_s} [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2) \quad \text{př.: } v_{sKU_AC_1} = \frac{150}{31,8} = 4,72 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tabulka 18 - Výpočet svařovacích rychlostí vzorků (AC)

	KU_AC_1	KU_AC_2	KU_AC_3	KU_AC_4
$v_s [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$	4,72	7,39	5,88	6,17

$$\text{Př.: } Q_{KU_AC_1} = \frac{0,8 \cdot 21,5 \cdot 184}{10^3 \cdot 4,72} = 0,5951 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Tabulka 19 - Výpočet vneseného tepla do jednotlivých vzorků (AC)

	KU_AC_1	KU_AC_2	KU_AC_3	KU_AC_4
$Q [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$	0,6711	0,5501	0,6041	0,6181

5.4 Provedení kapilární zkoušky

Po svaření vzorku je třeba vzorek, jako první úkon, okartáčovat. Opět je možné použít kartáč z korozivzdorné oceli, který ovšem měl by být používán pouze pro kartáčování hliníku, a to z důvodu zabránění kontaminace nečistotami z jiných materiálů.

Následně bylo provedeno očištění technickým lihem, následně čističem CLEANER značky Sopras ze sady pro kapilární zkoušku.

Po vyčištění vzorku byl nanesen penetrant, v našem případě červené barvy opět od značky Sopras, a nechal se působit 10-30 minut, aby zatekl i do velmi malých vad. Poté je nutné přebytečný penetrant z povrchu vzorku důkladně odstranit. Zde přichází na řadu ošetnost provedení této zkoušky. Pokud je penetrant odstraněn příliš silně, může dojít i k jeho odstranění z povrchových vad, které nejsou následně viditelné. To samé platí i opačně. Pokud není odstraněn dostatek penetrantu může dojít k falešným indikacím vad i v místech, kde se nevyskytují.

Po správném odstranění penetrantu je aplikována bílá vývojka, taktéž značky Sopras, která reaguje s penetrantem a dojde k vyvzlínání penetrantu v místech vad a kontrastnímu zabarvení na bílém podkladu vývojky.



Obrázek 32 - Výsledek kapilární zkoušky vzorku KU_4

Výsledek kapilární zkoušky vzorku KU_4 ukazuje (viz obrázek 32), že svarový spoj obsahuje relativně nemalé množství drobných pórů. To může být způsobeno nedostatečně vysušeným PM při dlouhodobém uskladnění PM. Ukazuje se, že uložení drátu do igelitového obalu společně se silikagelem není po dlouhou dobu skladování efektivní. Nicméně i přes nemalé množství pórů se nejedná o póry velkých průměrů, ani jeden nepřesahuje průměr 1 mm a nemají zásadní vliv na průběh experimentu. Tyto drobné vady by bylo možné odstranit předeřháním materiálu. Velké indikace na začátku a konci svaru jsou způsobeny nevyužitím náběhových desek. Z toho důvodu se tyto oblasti (prvních a posledních 20 mm svaru) dále nevyhodnocují. Indikace podél svarové housenky jsou opět místa, kde se penetrant špatně odstraňuje. Celkově lze říct, že zkouška byla vyhovující, jelikož nebyly nalezeny žádné zásadní vady jako například trhliny.



Obrázek 33 - Výsledek kapilární zkoušky vzorku KU_AC_4

Jak je možné už na základě vizuální zkoušky vidět, začátek housenky je neprovařený a konec už je propadlý, to je opět následek velké tepelné vodivosti hliníku. Nicméně u střídavého proudu můžeme vidět znatelně menší pórovitost, než tomu bylo u proudu stejnosměrného. I když můžeme vidět několik pórů, mají opět malý průměr a jsou rozmístěny mnohem dál od sebe. Taktéž můžeme vidět falešné indikace kolem hran

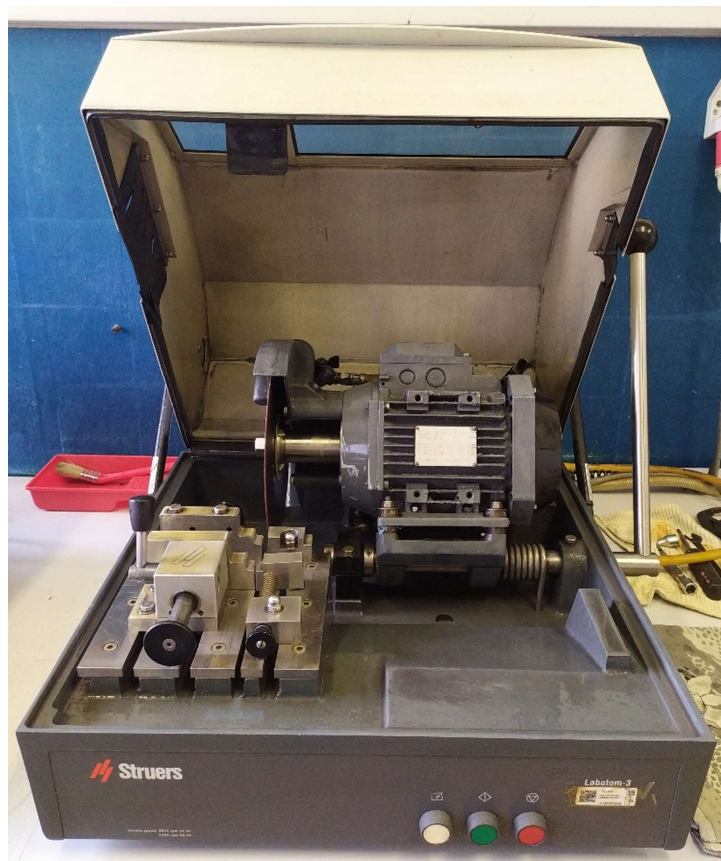
housenky. To je opět následkem špatného přístupu během odstraňování přebytečného penetrantu.

5.5 Metalografické zkoušky

Poté co byla provedena kapilární zkouška, byly vzorky vyhodnoceny v rámci metalografických výbrusů.

5.5.1 Příprava vzorků

Prvním krokem bylo vyříznutí reprezentativního úseku svaru pomocí příčného řezu. Následně byly vzorky zmenšeny na přesné pile Labotom 3 od firmy Struers tak, aby bylo možné oba vzorky svarových spojů zalisovat do jednoho výbrusu.



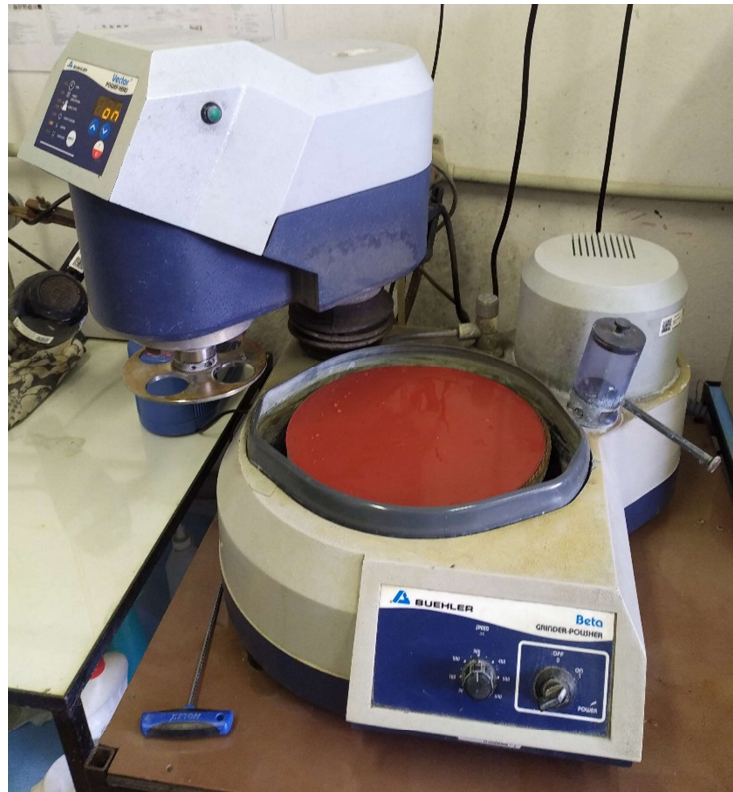
Obrázek 34 - Přesná pila Labotom - 3

Následně byly tyto výřezy umístěny do metalografického lisu CitoPress-1 opět od firmy Struers. Po přidání černé pryskyřice byly vzorky za působení vysoké teploty a tlaku, konkrétně 180 °C a 250 barů, zalisovány do vzorku o průměru 40 mm.



Obrázek 35 - Metalografický lis CitoPress - 1

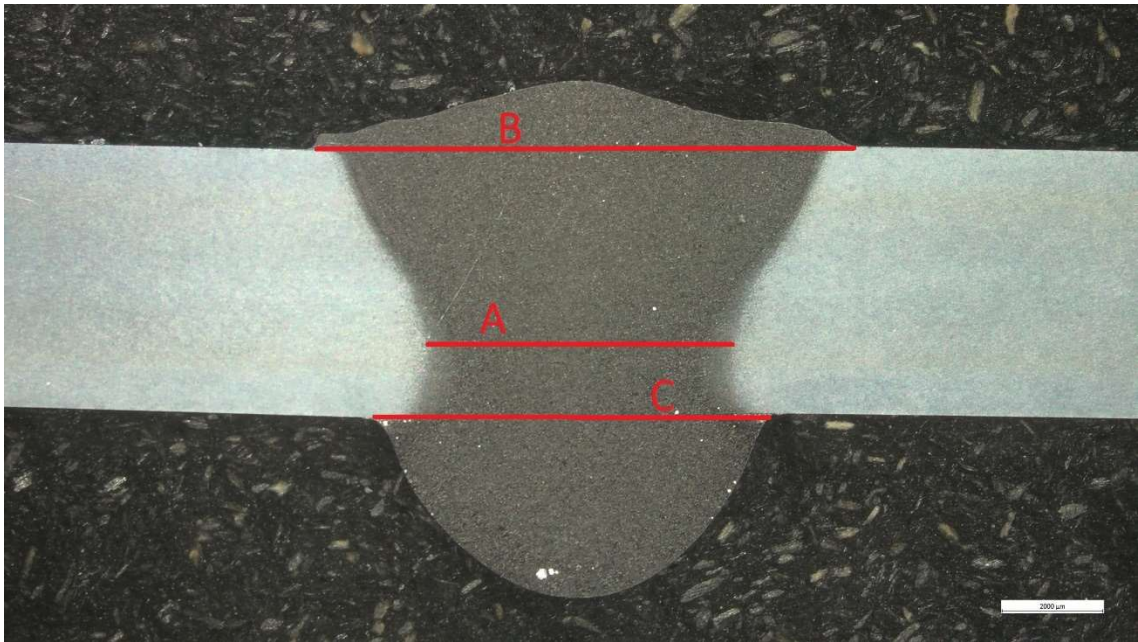
Ten byl umístěn do kombinované brusky / leštičky Beta s automatickou hlavou Vector od firmy Buehler. Broušení bylo prováděno postupně na brusných SiC papírech o hrubosti 120, 1200, 2500 a 4000. Pro upnutí brusných papírů byl použit unašeč GEKO fungující na principu velkého tření ve smyku, kdy je papír volně odnímatelný, pokud se s ním manipuluje ve směru kolmém na unašeč. Nicméně je pevně uchycen při pohybu vodorovném vzhledem k unašeči. Byl zvolen přítlak vzorku o velikosti 30 N, směr otáčení vzorku byl zvolen protiběžný proti brusnému papíru. Chlazení vzorku bylo zajištěno přívodem vody. Otáčky brusky byly totožné pro všechny hrubosti brusiva, a to 300 otáček za minutu. Parametr, který se měnil, byla doba broušení. Při hrubostech 120 a 1200 byla doba broušení 40 s. Pro další hrubosti to už bylo 90 s. Po dokončení broušení se pokračovalo leštěním, a to diamantovou pastou, která má velikost částic 1 μm , a pastou s velikostí částic 0,05 μm . Během leštění už nebylo použito chlazení vodou. Po dokončení leštění byly vzorky leptány jako finální úprava před snímkováním. Použité leptadlo má složení 0,5 ml HF; 1,5 ml HNO₃ a 2,5 ml HCl.



Obrázek 36 - Kombinovaná bruska s leštičkou firmy Buehler

5.5.2 Zkouška makrostruktury

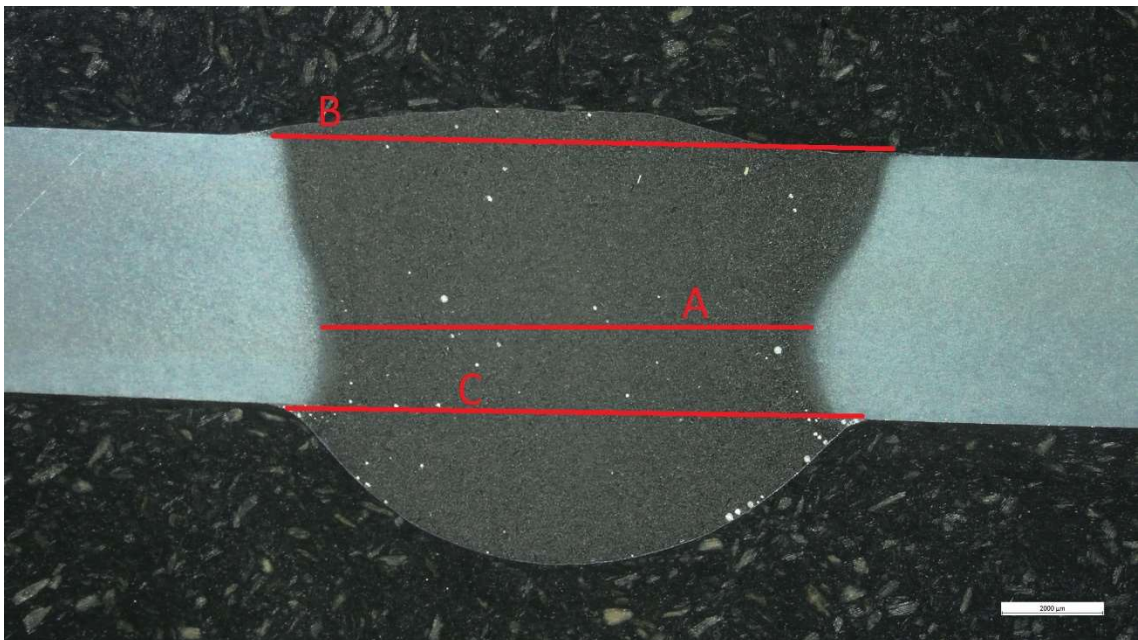
Jako první byly zpracovány makro snímky. Z těchto snímků (viz obrázky 36-37) je dobře vidět rozdíl mezi použitím stejnosměrného a střídavého proudu. Taktéž můžeme vidět výhody vyplývající z použití střídavého proudu, a to úzký závar společně s malou TOO. Jak ze zakótovaných obrázků vyplývá, nejužší místo svarového spoje je při použití střídavého proudu téměř poloviční než při použití proudu stejnosměrného.



Obrázek 37 - Metalografický výbrus KU_AC_4 Makro ve zvětšení 25x

Rozměry jednotlivých kót:

- A = 6075 μm
- B = 10820 μm
- C = 8164 μm



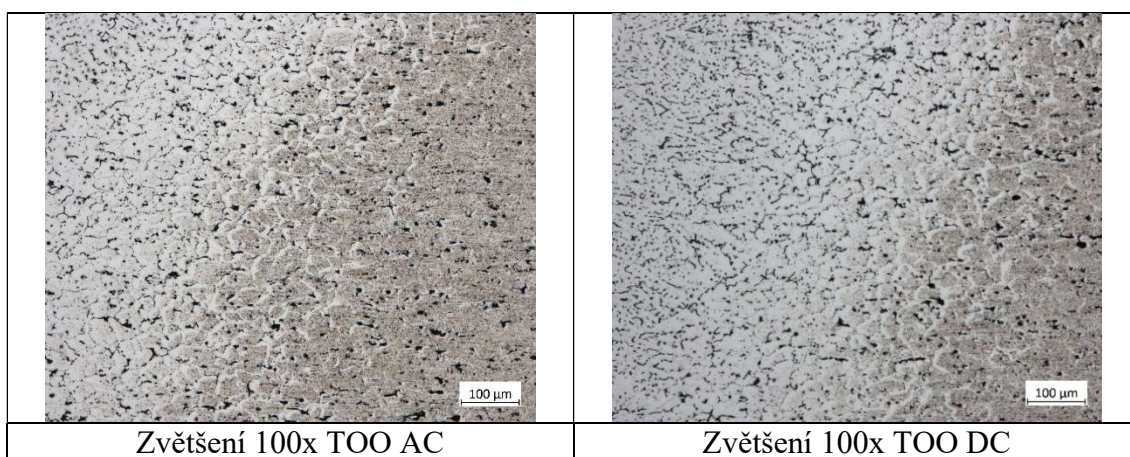
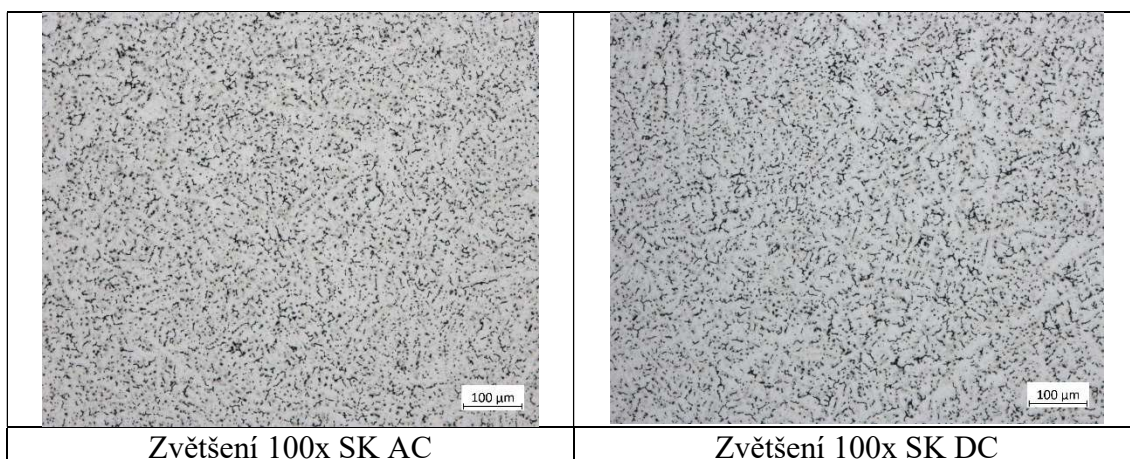
Obrázek 38 - Metalografický výbrus KU_DC_4 Makro ve zvětšení 25x

Rozměry jednotlivých kót:

- A = 9710 μm
- B = 12850 μm
- C = 11820 μm

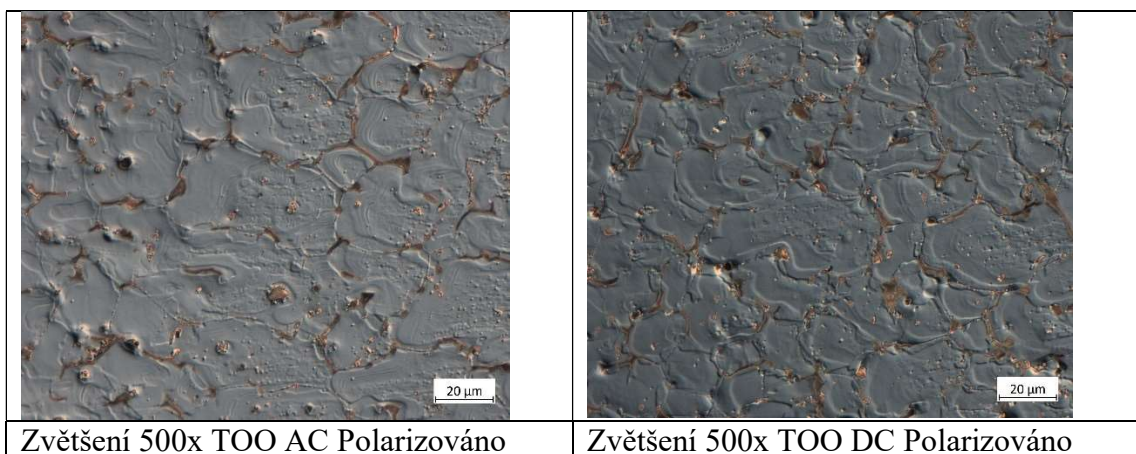
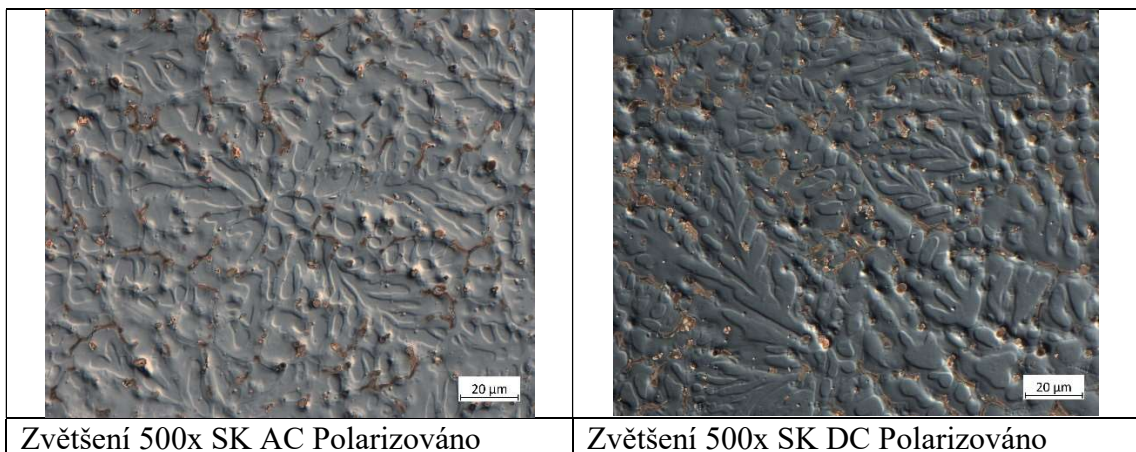
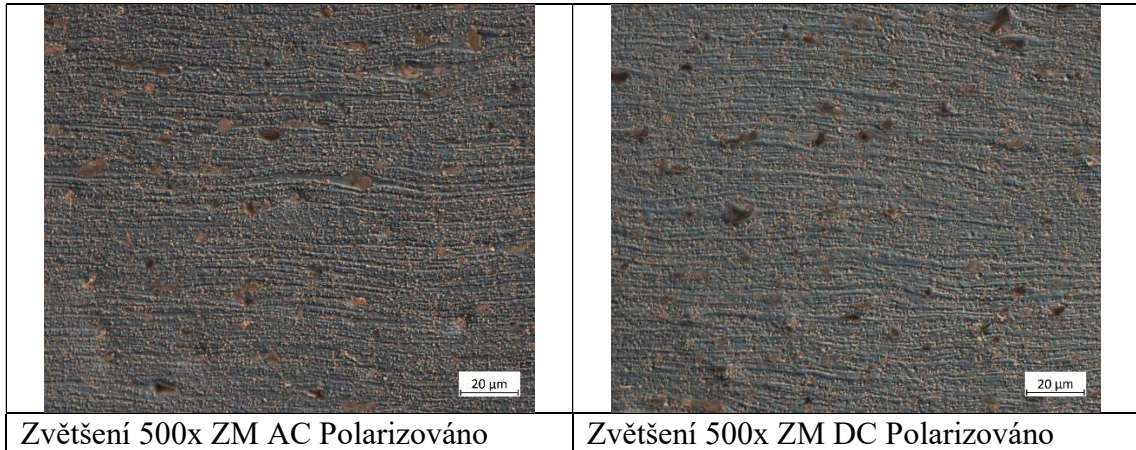
5.5.3 Zkouška mikrostruktury

Jako předposlední zkouška byla provedena zkouška mikrostruktury svarového spoje. Můžeme vidět, že jednotlivé snímky jsou prakticky totožné pro obě metody, z toho důvodu můžeme usoudit, že použití střídavého a stejnosměrného proudu nezpůsobuje výrazné odlišnosti ve struktuře.



Jak můžeme vidět oblasti ZM a SK jsou prakticky totožné, jediná oblast, která se drobně liší je oblast TOO, nicméně odlišnosti nejsou nijak významné. Z toho můžeme vyvodit, že svařovací metoda nemá nijak významný vliv na strukturu svarového spoje.

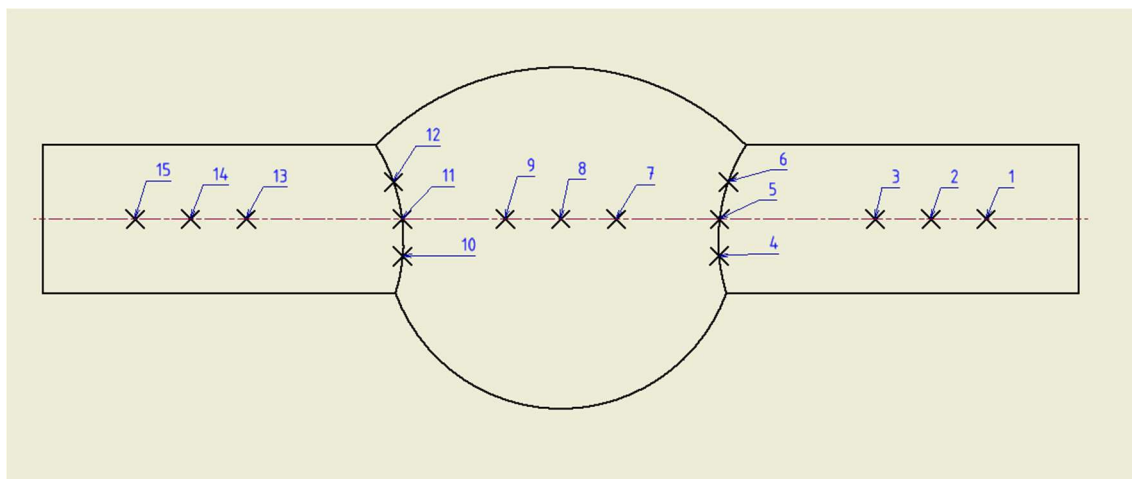
Za nejzajímavější snímky považuji detailní záběry se zvětšením 500x ve dvojité polarizovaném světle, které jsou zobrazeny níže.



Díky polarizaci světla je povrch vzorku zobrazen plasticky. To by při použití běžného nepolarizovaného světla nebylo možné.

5.6 Zkouška mikrotvrdomosti

Mikrotvrdomost byla vyhodnocena pomocí (mikro) tvrdoměru - měřena dle Vickerse a jednotka je značena HV. Celkem bylo na každém vzorku provedeno 30 vtisků, 3 vtisky do každé oblasti, a to dle následujícího schématu viz obrázek 39. Zatížení každého vtisku bylo 1 kg s výdrží na vtisku 12 s. Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 6507-1 (420374) *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda* a zároveň v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-2 *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdomosti svarových spojů*. Bylo provedeno 6 vtisků v ZM, po třech na každé straně, 6 vtisků v TOO, taktéž po třech na každé straně a 3 vtisky v oblasti svarového kovu (viz obrázek č. 39) [23,24].



Obrázek 39 - Schéma vtisků ve vzorcích

Tabulka 20 - Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti na vzorku KU_DC_4

Bod	1	2	3	4	5	6	7
HV1	59,8	59,2	59,2	64,9	64,2	51,3	62,1
ØHV1	ZM1 = 59,4			TOO1 = 60,1			

8	9	10	11	12	13	14	15
60,7	61,6	63,7	64,1	62,1	59,9	59,3	58,1
SK = 61,5		TOO2 = 63,3			ZM2 = 59,1		

Tabulka 21 - Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti na vzorku KU_AC_4

Bod	1	2	3	4	5	6	7
HV1	63,0	62,6	61,5	65,5	63,1	57,9	62,1
ØHV1	ZM1 = 62,4			TOO1 = 62,2			

8	9	10	11	12	13	14	15
62,5	63,5	60,1	61,7	63,2	57,7	57,9	57,5
SK = 62,7		TOO2 = 61,7			ZM2 = 57,7		

Z naměřených hodnot tvrdostí a z jejich průměrů pro jednotlivé oblasti můžeme říci, že oblasti s nejnižší tvrdostí se nachází v oblastech ZM, ale rozdíl těchto hodnot od nejvyšších hodnot v oblasti SK není nijak výrazný. Největší rozdíl mezi ZM a SK je u vzorku KU_DC_4 roven 6,8 jednotek tvrdosti. Hodnotu v bodě 6 neuvažujeme, jelikož jde zjevně o chybu měření vzhledem k hodnotám v bodech 4 a 5. Největší rozdíl tvrdosti u vzorku KU_AC_4 je roven 8 jednotkám tvrdost. Nejvyšších hodnot bylo u obou vzorků dosaženo v TOO. Vzhledem k nevýrazným rozdílům v tvrdosti můžeme zkonstatovat, že zkouška je vyhovující a svařování nijak zásadně neovlivnilo průběh tvrdosti.

Taktéž můžeme říci, že se neprojevil podstatný rozdíl mezi jednotlivými vzorky, čili rozdíl mezi použitím střídavého a stejnosměrného proudu není z hlediska změny mechanických vlastností (reprezentováno zkouškou tvrdosti) nijak významný.

6. Závěr

Lze konstatovat, že byly vytvořeny kvalitativně vyhovující vzorky oběma zkoumanými způsoby (kvalita byla ověřena NDT i destruktivními zkouškami). Z výsledků jednotlivých zkoušek můžeme konstatovat, že kvalita svarových spojů provedených metodou MIG DC+ a metodou MIG AC se od sebe nijak výrazně neliší. Vizuální kontrola neodhalila výrazné vady svarového spoje, což potvrdila i kapilární zkouška. U svařovaných vzorků nedošlo k trhlinám ani nebyly odhaleny další nepřípustné vady.

Následnými destruktivními zkouškami byla zmapována makro a mikrostruktura vybraných vzorků. Bylo zjištěno, že se liší zejména tvar průřezu svarových spojů a rozměry jednotlivých oblastí svarových spojů, jak je patrné na makrosnímcích (viz obrázky č. 37 a 38). Šířka závaru střídavým proudem je značně užší. To stejné platí i o poměru velikostí TOO svarových spojů u jednotlivých vzorků. Svarový spoj provedený metodou MIG AC je mnohem užší a vykazuje hlubší průvar, což je výhodnější z hlediska tepelného ovlivnění materiálu a bylo by zřejmě možné použít vyšší rychlosti svařování.

Výsledky zkoušky tvrdosti v jednotlivých oblastech se nijak výrazně neliší v závislosti na metodě a odpovídají svými hodnotami dané oblasti svarového spoje. Jinak řečeno, hodnota tvrdosti v TOO je nejvyšší, ale zároveň se výrazně neliší od tvrdosti v ZM a SK.

Z časových důvodů nebylo možno experiment rozšířit, avšak by bylo zajímavé a žádoucí ve výzkumu pokračovat a ověřit i pevnostní vlastnosti svarových spojů. Výhody režimu MIG AC by se pravděpodobně projeví u vzorků menších tloušťek, což by bylo vhodné dál ověřit při dalším výzkumu. Jak už bylo řečeno, z časových důvodů a vzhledem k problémům s odladěním výroby vzorků toto nebylo možné realizovat, a proto byly zvoleny vzorky tloušťky 5 mm.

Seznam použitých literárních zdrojů:

- [1] Hliník. Prvky [online]. 2013 [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>
- [2] Hliník. Proal [online]. [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/>
- [3] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 9788001055502.
- [4] KOLAŘÍK, Ladislav a Karel KOVANDA. Svařitelnost hliníkových slitin. MM Průmyslové spektrum. 2011, 15(4), 18-19. ISSN 1212-2572
- [5] KOLAŘÍK, Ladislav. *Konstrukce a navrhování svarových spojů: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017. ISBN 978-80-01-06315-6.
- [6] *Svařování - Čistící efekt elektrického oblouku* [online]. , 1 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.elektrody.cz/svarovani-cistici-efekt-elektrickeho-oblouku>
- [7] DOHNAL, Ivo. *VLIV SLOŽENÍ OCHRANNÉ ATMOSFÉRY NA PŘENOS KOVU PŘI MIG/MAG SVAŘOVÁNÍ OCELI*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní.
- [8] POP, Vojtěch. *Hodnocení plochy svaru MAG metodou*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní.
- [9] MATHERS, Gene. *The welding of aluminium and its alloys*. 1. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002. ISBN 978-1-85573-567-5.
- [10] Popis stavu. Alumeco [online]. [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/technické-informace/údaje-o-hliníku/popis-stavu>
- [11] EN AW 5754. Alunet [online]. [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-5754>
- [12] ČSN EN 573-(1-3) – Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – (Část 1: Číselné označování; Část 2: Označování chemickými značkami; Část 3: Chemické složení). 2020.
- [13] ČSN EN 1706 – Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti. 2020.

- [14] ČSN EN 515 – Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů. 2017.
- [15] ČSN EN 485-2+A1 (424081) Hliník a slitiny hliníku – Plechy, pásy a desky – Část 2: Mechanické vlastnosti. 2019.
- [16] ČSN EN ISO 4063 (050011) Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování. 2011.
- [17] ČSN EN ISO 6848 (052411) Obloukové svařování a řezání – Netavící se wolframové elektrody – Klasifikace. 2016.
- [18] ČSN EN ISO 14175 Svařovací materiály – Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy. 2009.
- [19] ČSN EN ISO 17637 (051180) Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů. 2018.
- [20] ČSN EN ISO 3452-1 (015018) Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady. 2015.
- [21] ČSN EN ISO 23277 (051176) Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení kapilární metodou – Stupně přípustnosti. 2016.
- [22] ČSN EN 1011-2 (052210) Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí. 2002.
- [23] ČSN EN ISO 6507-1 (420374) Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda. 2018.
- [24] ČSN EN ISO 9015-2 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů. 2018.
- [25] Helium 4.6, tlaková lahev. Linde-gas [online]. 2020 [cit. 2021-8-16]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a-z/helium-balonplyn/helium-46-tlaková-lahev-330-1>
- [26] OK AUTROD 5356. ESAB [online]. [cit. 2021-8-16]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/aluminium-wires/ok-autrod-5356.cfm>

Seznam tabulek:

Tabulka 1 - fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku [1].....	11
Tabulka 2 - značení tvářených slitin dle ČSN EN 573-1	14
Tabulka 3 - značení slévárenských slitin dle ČSN EN 1706	15
Tabulka 4 - Značení stavů TZ dle ČSN EN 515 – Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů [14]	16
Tabulka 5 - Podskupiny tepelného zpracování slitin hliníku dle ČSN EN 515 – Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů [14].....	16
Tabulka 6 - Tabulka 6 – Mechanické vlastnosti EN AW – 5754 dle ČSN EN 485-2+A1 (424081) Hliník a slitiny hliníku - Plechy, pásy a desky - Část 2: Mechanické vlastnosti [15].....	20
Tabulka 7 - Chemické složení slitiny EN AW – 5754	20
Tabulka 8 - Mechanické vlastnosti a doporučené svařovací parametry OK Autrod 5087 dle katalogu ESAB.....	21
Tabulka 9 - Chemické složení PM dle katalogu ESAB.....	21
Tabulka 10 - Druhy wolframových elektrod	27
Tabulka 11 - Cenové porovnání ochranných plynů podle Linde-gas (červen 2021) [25]	29
Tabulka 12 - Parametry svařování vzorků (DC+)	39
Tabulka 13 - Rozměry svarových povrchů a kořenů (DC).....	42
Tabulka 14 - Výpočet svařovacích rychlostí vzorků (DC)	43
Tabulka 15 - Výpočet vneseného tepla do jednotlivých vzorků (DC)	44
Tabulka 16 - Parametry svařování vzorků (AC).....	44
Tabulka 17 - Rozměry svarových povrchů a kořenů (AC).....	45
Tabulka 18 - Výpočet svařovacích rychlostí vzorků (AC)	48
Tabulka 19 - Výpočet vneseného tepla do jednotlivých vzorků (AC)	48
Tabulka 20 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti na vzorku KU_DC_4	56
Tabulka 21 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti na vzorku KU_AC_4	57

Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Pokles pevnosti v závislosti na teplotě ohřevu	17
Obrázek 2 - Minimální pokles meze pevnosti (vlevo) a meze kluzu (vpravo) u tupého svaru nevytvrzené slitiny (AlMg4,5Mn)	18
Obrázek 3-Výrazný pokles meze pevnosti (vlevo) a meze kluzu (vpravo) u tupého svaru vytvrzené slitiny (AlMgSi1)[5]	18
Obrázek 4 - Schéma svařování metodou MIG.....	23
Obrázek 5 - Schéma svařování metody TIG.....	26
Obrázek 6 - Průběh střídavého pulzního proudu - schéma firmy EWM	28
Obrázek 7 - Svařovací zdroj Elmatech GmbH VARIO MIG 4003 AC/DC DV 36.....	31
Obrázek 8 - Čelní ovládací panel svařovacího zdroje	32
Obrázek 9 - Náhled čtyř kladkového podavače (pohled shora).....	33
Obrázek 10 - Upínací svařovací přípravek	34
Obrázek 11 - Zapojení monitorovacího systému Weldmonitor 4.5.....	35
Obrázek 12 - Ukázka ocelového bowdenu	36
Obrázek 13 - Ukázka teflonového bowdenu.....	36

Obrázek 14 - Schéma podávacích kladek na ocel 1 = přitlačná kladka, 2 = hnaná kladka	37
Obrázek 15 - Schéma podávacích kladek na hliník.....	38
Obrázek 16 - ukázka hořáků spoolgun (vlevo), push-pull (vpravo).....	38
Obrázek 17 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_1.....	40
Obrázek 18 - Vzorek KU_1	40
Obrázek 19 - Ukázka použití náběhových a výběhových desek	41
Obrázek 20 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_3.....	41
Obrázek 21 - Vzorek KU_3	41
Obrázek 22 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_4.....	42
Obrázek 23 - Vzorek KU_4	42
Obrázek 24 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_1	45
Obrázek 25 - Vzorek KU_AC_1	46
Obrázek 26 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_2	46
Obrázek 27 - Vzorek KU_AC_2	46
Obrázek 28 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_3	46
Obrázek 29 - Vzorek KU_AC_3	47
Obrázek 30 - Průběh proudu a napětí v závislosti na čase u vzorku KU_AC_4	47
Obrázek 31 - Vzorek KU_AC_4	47
Obrázek 32 - Výsledek kapilární zkoušky vzorku KU_4.....	49
Obrázek 33 - Výsledek kapilární zkoušky vzorku KU_AC_4	49
Obrázek 34 - Přesná pila Labotom - 3	50
Obrázek 35 - Metalografický lis CitoPress - 1	51
Obrázek 36 - Kombinovaná bruska s leštičkou firmy Buehler.....	52
Obrázek 37 - Metalografický výbrus KU_AC_4 Makro ve zvětšení 25x	53
Obrázek 38 - Metalografický výbrus KU_DC_4 Makro ve zvětšení 25x	53
Obrázek 39 - Schéma vtisků ve vzorcích.....	56