

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav strojírenské technologie

Svařování hliníkových slitin metodou MIG AC

Welding of aluminium alloys by MIG AC method

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojírenského inženýrství

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

Autor: Adam Novotný

ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2019/20

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **475074**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

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:

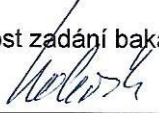
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**


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

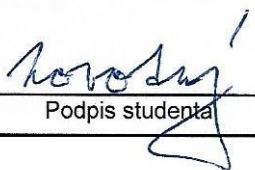

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

9.7.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení o autorství:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Svařování hliníkových slitin metodou MIG AC* vypracoval samostatně pouze s využitím podkladů a literatury uvedených v seznamu použité literatury.

Prohlášení o udělení souhlasu s užitím:

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat několika lidem, kteří umožnili vznik této práce. Největší díky patří vedoucímu mé bakalářské práce **doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D.** za cenné rady a věcné připomínky k teoretické části a za pomoc s přípravou a uskutečněním experimentu. Potom bych rád poděkoval **doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D.** za pomoc při uskutečňování a vyhodnocování experimentu a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během celého mého studia.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Název bakalářské práce:	Svařování hliníkových slitin metodou MIG AC
Autor:	Adam Novotný
Vedoucí:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, PhD.

Rozsah:	Počet stran:	74
	Počet obrázků:	35
	Počet tabulek:	5
	Počet příloh:	1

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá svařováním hliníkových slitin metodou MIG AC a porovnáním této metody s metodou MIG DC+. Teoretická část obecně popisuje problematiku svařování slitin hliníku, shrnuje normalizované značení těchto slitin, jejich rozdělení a mechanické i technologické vlastnosti. Dále popisuje vybrané metody svařování hliníkových slitin, vysvětluje jejich výhody a nevýhody a přibližuje možnosti destruktivních i nedestruktivních zkoušek svarových spojů. Experimentální část se zabývá srovnáním svařování metodou MIG AC a metodou MIG DC+ a ověřením teoretických rozdílů mezi těmito metodami. Závěrem je srovnání výsledků provedených zkoušek s teoretickými poznatky.

Klíčová slova: Svařování hliníku, slitiny hliníku, svařitelnost, MIG, TIG, ochranné plyny, metody svařování, zkoušky svarových spojů

Czech technical university in Prague
Faculty of mechanical engineering

Field of study: **Theoretical basis of mechanical engineering**
Bachelor thesis: **Welding of aluminium alloys by MIG AC method**
Author: **Adam Novotný**
Supervisor: **doc. Ing. Ladislav Kolařík, PhD.**

Extent of bachelor thesis:	Number of pages:	74
	Number of pictures:	35
	Number of tables:	5
	Number of attachments:	1

Abstract:

This bachelor thesis deals with MIG AC welding of aluminium alloys and its comparison with MIG DC+ welding. Theoretical part describes problematics of welding of aluminium alloys in general, summarizes standardized marking of aluminium alloys, its distribution, mechanical and technological properties. It also focuses on selected welding methods of aluminium alloys, explains their advantages and disadvantages and describes possibilities of destructive and non-destructive control of welded joints. Experimental part deals with comparison of MIG AC and MIG DC+ welding of aluminium alloys and verification of their theoretical differences. The conclusion is the comparison of the results of the tests performed with theoretical knowledge.

Key words: Aluminium welding, aluminium alloys, weldability, MIG, TIG, protection gasses, welding methods, tests of welded joints

Obsah:

TEORETICKÁ ČÁST	9
1. Úvod	9
2. Vlastnosti hliníku a jeho slitin	9
3. Svařitelnost hliníkových slitin	11
3.1. Faktory ovlivňující svařitelnost hliníkových slitin	13
3.1.1. Oxidická vrstva	13
3.1.2. Vznik trhlin	15
3.1.3. Pórovitost svarů	17
3.1.4. Zhoršení mechanických vlastností	18
3.1.5. Barevná stálost.....	19
4. Značení hliníkových slitin	19
5. Druhy hliníkových slitin a vliv legujících prvků na svařitelnost	20
5.1. Tvářené slitiny	21
5.1.1. Nevytvrditelné slitiny	21
5.1.2. Vytvrditelné slitiny	22
5.2. Slévárenské slitiny	24
6. Příprava svarových ploch	25
7. Metody svařování hliníkových slitin	26
7.1. Svařování elektrickým obloukem	27
7.1.1. Svařování v ochranných atmosférách	28
7.1.1.1. Ochranné plyny používané pro svařování hliníkových slitin	30
7.1.1.2. Svařování tavící se elektrodou (MIG)	32
7.1.1.3. Svařování netavící se elektrodou (TIG/WIG).....	38
7.1.2. Svařování obalenou elektrodou	41
7.1.3. Svařování pod tavidlem.....	41
7.2. Další metody svařování	42
7.2.1. Svařování plamenem.....	42
7.2.2. Svařování laserovým paprskem	43
7.2.3. Svařování elektronovým svazkem.....	45
7.2.4. Odporové svařování	46

8. Kontrola kvality svarových spojů	47
8.1. Nedestruktivní zkoušky	48
8.1.1. Vizuální zkouška	48
8.1.2. Kapilární zkouška.....	48
8.1.3. Ultrazvuková zkouška.....	49
8.1.4. Zkouška prozářením	49
8.2. Destruktivní zkoušky	50
8.2.1. Tahová zkouška	50
8.2.2. Zkouška rázem v ohybu.....	51
8.2.3. Zkouška tvrdosti	52
8.2.4. Další destruktivní zkoušky svarů	52
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	53
1. Popis experimentu	53
2. Vizuální kontrola	56
3. Kapilární zkouška.....	58
4. Metalografická kontrola makrostruktury.....	60
5. Zkouška tvrdosti	64
Závěr	66
Použité literární zdroje	68
Seznam použitých symbolů a zkratk	71
Seznam obrázků	72
Seznam tabulek	74

TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

Ke vzniku této práce vedlo rozšiřující se využívání slitin hliníku v průmyslové výrobě (hlavně pak v dopravním průmyslu) a s tím spojený rozvoj nových technologií jejich svařování. Jednou z těchto technologií je svařování metodou MIG při použití střídavého svařovacího proudu. Cílem bakalářské práce je obecně analyzovat problematiku svařování hliníku a jeho slitin, vysvětlit rozdíly mezi používáním střídavého (AC – alternating current) a stejnosměrného proudu (DC – direct current) a tyto rozdíly následně experimentálně ověřit.

Cíle vycházející ze zadání bakalářské práce a je možné je rozepsat do následujících bodů:

- 1) Představení problematiky svařování hliníku a jeho slitin
- 2) Srovnání metody MIG AC s dalšími možnými metodami svařování hliníku a jeho slitin
- 3) Návrh a realizace experimentu na srovnání metody MIG AC s jinými metodami svařování

Pozn.: Bakalářská práce byla řešena v době celosvětové koronavirové pandemie, zapříčiňující onemocnění COVID-19. Z tohoto důvodu byly omezené možnosti tvorby experimentální části práce v laboratořích FS, ČVUT v Praze (a bylo na tvorbu minimum času). Praktická část bakalářské práce je z tohoto důvodu minimalizována na základní ověřovací experiment.

2. Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník, latinsky Aluminium, patří do skupiny lehkých kovů (měrná hmotnost hliníku je $2\,700\text{ kg/m}^3$) s nízkou teplotou tání (teplota tání čistého hliníku je 660 °C). V dnešní době se nejčastěji získává z bauxitu (systematicky dihydrát oxidu hlinitého) elektrolýzou jeho taveniny. Čistý hliník nemá dobré mechanické vlastnosti, mez pevnosti v tahu čistého hliníku se pohybuje od 50 do 70 MPa v závislosti na čistotě a modul pružnosti je pouze 72 000 MPa. Naopak výhodami čistého hliníku jsou výborná tepelná

a elektrická vodivost, a proto se také dříve používal jako vodič elektrického proudu, než ho ve většině případů nahradila měď (na vodiče velkých rozměrů se používá stále díky své nízké hmotnosti). Dále jsou hliník i jeho slitiny nemagnetické, což způsobuje znemožnění použití magnetické práškové metody pro detekci povrchových a těsně pod povrchových vad svarů. [1] [3] [5] [7]

Vzhledem k nepříznivým mechanickým vlastnostem čistého hliníku se ve strojírenství používají především jeho slitiny s dalšími prvky. Mez pevnosti některých hliníkových slitin dosahuje až přes 400 MPa (u vysokopevných slitin i kolem 700 MPa), čímž se v kombinaci s nízkou hmotností stávají tyto slitiny velice vhodné pro použití ve strojírenství. Nevětší využití pak nalézají tyto materiály v dopravním průmyslu, kde je v dnešní době kladen velký důraz na snižování emisí skleníkových plynů a zároveň snižování spotřeby paliva, čehož lze dosáhnout snížením hmotnosti dopravních prostředků. [1] [10]

Většina slitin hliníku si ve svém základním, tepelně neupraveném, stavu zachovává jednu vlastnost společnou s čistým hliníkem a tou je, že jsou velice měkké. To může být v některých případech velkou výhodou, ale naopak někdy také značnou nevýhodou. Mezi výhody této vlastnosti v kombinaci s tím, že hliník krystalizuje v kubické plošně středěné mřížce, patří výborná tvářitelnost za studena i za tepla a vhodnost vyrábění dílů pomocí třískového obrábění s ohledem na opotřebení obráběcích nástrojů. Nevýhodou naopak je nevhodnost použití na součásti, které se vzájemně třou, nebo se o sebe opírají, z důvodu malé odolnosti proti opotřebení a nízké životnosti takových dílů způsobené vlivem otláčení, nebo jiného mechanického opotřebení. Tvrdost a pevnost, a s tím spojená odolnost proti mechanickému opotřebení, některých (tzv. vytvrzitelných) hliníkových slitin lze zvýšit tepelným zpracováním. Mechanismus vytvrzování hliníkových slitin je blíže popsán v kapitole 3.2.1.2.

Jako nejčastější legující prvky se ve slitinách hliníku používají: Měď (Cu), Hořčík (Mg), Křemík (Si), Zinek (Zn) a Mangan (Mn) a jejich kombinace. Rozdělení a vlastnosti slitin jsou popsány dále v textu – viz kapitola 5.

Hliník má velkou afinitu ke kyslíku a díky tomu se na jeho povrchu velice rychle tvoří vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3) a kvůli tomu je nutné zamezit kontaktu kyslíku s hliníkem, během svařování, v maximální možné míře. Při svařování se k tomu využívají

nejčastěji inertní ochranné atmosféry (jejich složení a vliv na svařovací proces jsou popsány v kapitole 7.1.1.1). Zmíněný oxid hlinitý má výrazně rozdílné vlastnosti oproti základnímu materiálu. Teplota tavení Al_2O_3 se pohybuje kolem $2050\text{ }^\circ\text{C}$, což je přibližně třikrát více, než je teplota tavení čistého hliníku a je elektricky nevodivý (což brání správnému nastavení svařovacích parametrů a zapálení el. oblouku). Vrstva Al_2O_3 tvořící se na povrchu hliníkových součástí má jednu velkou výhodu. Touto výhodou je ochrana materiálu před vnějšími vlivy. Za normálních povětrnostních podmínek má výborné antikorozi vlastnosti a tím chrání materiál před další oxidací. Oxid hlinitý je také výrazně tvrdší, než samotný hliník a je proto odolnější proti otlacení a otěru. Přirozeně vzniklý oxid je ovšem velice porézní a tloušťka vrstvy dosahuje obvykle několika setin μm . Pro zlepšení odolnosti součásti proti korozi a otěru (a často i z estetických důvodů) lze použít povrchovou úpravu anodickou oxidací (jinak také zvanou eloxování), kterou jsme schopni dosáhnout velice kvalitní a konzistentní vrstvy oxidu dosahující tloušťky až několika desítek μm . Tím lze výrazně zvýšit tvrdost povrchu součásti a zároveň ochránit materiál před vnějšími vlivy. Eloxování se často používá z estetických důvodů, protože porézní vrstvu vzniklou při eloxování lze napustit barvivy a dosáhnout tak různých barev povrchu součásti. Ovlivnění svařovacího procesu v souvislosti se vznikem oxidické vrstvy je blíže popsáno v kapitole 3.1.1. [4] [5] [7]

Jednou z velkých výhod hliníku je, že se jeho vrubová houževnatost skoro nemění s klesající teplotou, jak je tomu u ocelí (nevykazuje teda tzv. tranzitní chování), a díky tomu je možné hliníkové díly používat i při velmi nízkých teplotách. Zároveň se zvyšující se teplotou neklesá jeho pevnost. [1]

S neustálým vývojem materiálů na bázi hliníku a možnostmi jejich zpracování se rozšiřují možnosti jejich využití a s tím také vzniká čím dál tím větší potřeba svařovat hliníkové díly a konstrukce. Při svařování slitin hliníku ovšem narážíme na problémy, které se například při svařování slitin železa nevyskytují. Nejzákladnější problémy z hlediska svařitelnosti jsou popsány v následující kapitole.

3. Svařitelnost hliníkových slitin

Svařitelnost je charakteristika materiálu, která určuje za daných podmínek svařování jeho schopnost tvořit svarový spoj požadované kvality. Podle starších norem rozlišujeme několik tříd svařitelnosti a záleží na konkrétní slitině a obsahu legujících

prvků, do jaké třídy daný materiál spadá. Nejlepší svařitelnost mívají binární slitiny, ve kterých je hlavním legujícím prvkem křemík (Si), nebo hořčík (Mg), resp. Mangan (Mn – ale ty nejsou tak často používané). Slitiny Al-Si a Al-Mg se také na svařence používají nejčastěji. Obtížnější svařitelnost mají slitiny ternární, které jsou obvykle vytvrditelné např. slitiny Al-Mg-Si (po svařování výrazně ztrácí mechanické vlastnosti) nebo slitiny se zinkem (Zn) např. Al-Zn-Mg, které jsou samovytvrditelné (po určité době se jejich mechanické vlastnosti sami vrátí na hodnoty blízké hodnotám před svařováním). Na druhou stranu slitiny obsahující měď (Cu) se pro svařované konstrukce používají méně kvůli zvýšené náchylnosti ke vzniku trhlin. Obecně jsou ale všechny slitiny hliníku svařitelné s tím, že výrobce většinou uvádí technologický postup, při jehož dodržení bude docíleno maximální možné kvality svarů. [1] [8]

Vlastnosti svarového spoje nejsou určeny pouze svarem samotným, ale také tepelně ovlivněnou oblastí (TOO). Vzhledem k dobré tepelné vodivosti hliníku může být tato oblast poměrně velká, a proto může způsobovat jisté komplikace. Velikost TOO je dána mnoha faktory, přičemž mezi hlavní patří použitá metoda svařování, rozměry svaru a svařovaného materiálu, případný předehřev a způsob ochlazování (nastavení tepelného cyklu). Hranice TOO není pevně dána a závisí na svařovaném materiálu, u slitin hliníku se pohybuje mezi 150-200 °C, což je teplota, při které začíná u hliníkových slitin docházet k rekrystalizaci a rozpouštění vytvrzujících fází. Toto tepelné ovlivnění může výrazně zhoršit mechanické vlastnosti základního materiálu. Zejména u tvářených a tepelně zpracovaných slitin (tzv. vytvrditelných) se v místě TOO mohou mechanické vlastnosti zhoršit (snížit) až na úroveň netvářeného a tepelně nezpracovaného materiálu, což může následně vést k poškození svařované konstrukce. V takových případech je většinou po svařování nutné další tepelné zpracování, které opět zlepší mechanické vlastnosti (použitelné např. u slitiny typu Al-Cu-Mg). U některých slitin (zejména u slitin, které nejsou samovytvrditelné) při opětovném tepelném zpracování už ale nelze dosáhnout tak dobrých mechanických vlastností, jako po prvním tepelném zpracování, a proto je vhodné tepelné zpracování zařadit až po svařování (typicky u slitin Al-Cu-Mg). U některých slitin (zejména slitiny typu Al-Mg-Si) nemá následné tepelné zpracování dostatečný efekt, takže je nutné nastavit tepelný cyklus tak, aby docházelo k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění součásti (co nejkratší doba ohřátí součásti nad

200 °C). Naopak u slitin odlévaných může následkem zvýšení teploty dojít k vytvrzení materiálu a zlepšení mechanických vlastností. [2] [4]

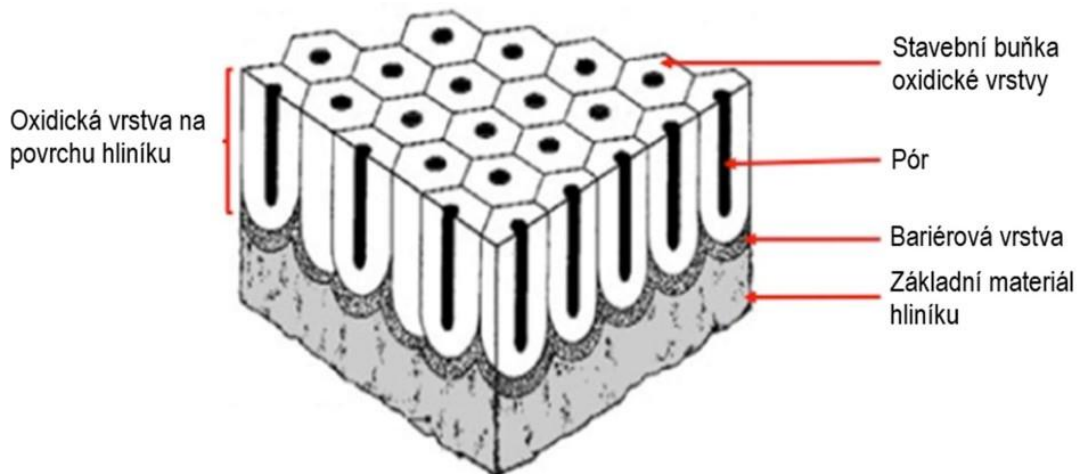
3.1. Faktory ovlivňující svařitelnost hliníkových slitin

Z faktorů ovlivňujících svařitelnost hliníkových slitin má asi nejdůležitější vliv oxidická vrstva, která zásadně ovlivňuje svařitelnost a zároveň má velmi rozdílné fyzikální a chemické vlastnosti. Při svařování jiných materiálů (ať už ocelí, nebo neželezných kovů) se sice vyskytují oxidické vrstvy daných kovů také, ale obvykle nemají takový vliv na jejich svařitelnost.

Svařitelnost hliníkových slitin je ale ovlivněna i dalšími faktory.

3.1.1. Oxidická vrstva

Výrazně rozdílné vlastnosti oxidu hlinitého (Al_2O_3), který na povrchu hliníku vzniká velice rychle z důvodu velké afinity hliníku ke kyslíku, negativně ovlivňují proces svařování. Kyslík je v hliníku nerozpustný, a proto při jejich vzájemné reakci okamžitě vzniká Al_2O_3 , což je jediný typ oxidu, který hliník vytváří.



Obrázek 1: Struktura oxidické vrstvy. [26]

První rozdílná vlastnost je velký rozdíl teplot tavení Al_2O_3 a základního materiálu. Tím vzniká problém, že při svařování bude svařovaný materiál již dávno natavený (díky velkému koeficientu tepelné vodivosti), zatímco bude „uzavřen tenkou vrstvou oxidu ve stále tuhém stavu“, to znamená, že se na povrchu součásti nevytvoří svarová lázeň. Oxid hlinitý má také vyšší měrnou hmotnost než samotný hliník, a navíc je v něm nerozpustný.

To zapříčiňuje, že se během svařování mohou nedokonale odstraněné zbytky oxidické vrstvy propadat do svarové lázně a tvořit v ní nežádoucí (oxidické) vměstky, které následně ovlivňují mechanické vlastnosti svarového spoje. Vznik této vrstvy může být také ovlivněn přehřevem použitím kyslíko-acetylenového plamene. V takovém případě je nutné použít mírně redukční plamen (tj. plamen s přebytkem acetylénu, který se používá i pro plamenové svařování hliníku). Ale nejlepší způsob je použití přehřevu pomocí propan-butanového plamene nebo pomocí jiných tepelných zdrojů. [1] [5]

Další problém spojený s touto vrstvou je, že Al_2O_3 je hygroskopický, což znamená, že snadno pohlcuje vzdušnou vlhkost. Kvůli tomu se pak při svařování dostává do svarového spoje velké množství vodíku, který způsobuje další problémy blíže popsané v kapitole 3.1.3.

Další z rozdílných vlastností mezi hliníkem a oxidem hlinitým je také elektrická vodivost. Zatímco hliník vede elektrický proud velice dobře, oxid hlinitý je elektricky nevodivý. To zhoršuje přenos proudu a hoření elektrického oblouku, kvůli prakticky nemožnému nastavení optimálních svařovacích parametrů.

Při svařování tedy oxid hlinitý způsobuje řadu (výše zmíněných) problémů, a proto je potřeba ho ze součásti před svařováním odstranit. Jeho odstranění může být vzhledem k jeho vlastnostem velice náročné. Používají se různé chemické a mechanické způsoby, kterými se oxid z povrchu součástí odstraňuje. Mezi chemické způsoby čištění součástí patří použití různých druhů mořidel a oplachovacích lázní, které oxid rozpustí před svařováním, případně se používají tavidla, která odstraňují oxid až v průběhu svařování. Mechanicky je možné tuto vrstvu odstranit pomocí ručního nebo strojního kartáče z korozi-vzdorné (nejlépe austenitické) oceli. [1] [2] [4]

Velká afinita hliníku ke kyslíku ovšem způsobuje, že se vrstva oxidu začne na vzdušné atmosféře opět tvořit již několik milisekund po jejím odstranění. Pro vytvoření dostatečně tlusté vrstvy, která by znemožňovala svařování je však potřeba minimálně několik desítek minut až jednotky hodin. Proto je nutné začít svařovat co nejdříve, po odstranění vrstvy, a to maximálně do 2 až 4 hodin. Po uplynutí této doby se již vytvoří vrstva natolik silná, že účinně brání svařování a odstranění oxidické vrstvy by se před svařováním mělo provést znovu.

Místa, na kterých je nutné oxidickou vrstvu odstranit, jsou především svarové plochy a plochy k nim přiléhajících oblastí, a to minimálně do vzdálenosti 20 mm od

svarových ploch (na horním i spodním povrchu součásti). Odstranění vrstvy Al_2O_3 je také nutné v místě připojení svorky zemního kabelu kvůli zlepšení vodivosti kontaktu.

Vzhledem k tomu, že nová oxidická vrstva začne vznikat prakticky okamžitě po jejím odstranění, je vhodné jí odstraňovat i během svařovacího procesu. Při svařování elektrickým obloukem se využívá tzv. čistícího účinku svařovacího proudu. Nutností je použití argonu, jako ochranného plynu, a nepřímé polarity zapojení (tzn. připojení svařovací elektrody na kladný pól svařovacího zdroje). Tento jev je podrobněji popsán v kapitole 7.1.1. Při svařování obalenou elektrodou napomáhá k odstranění oxidické vrstvy obal elektrody obsahující složky, které tuto vrstvu rozpouštějí. Při jiných způsobech svařování (například při svařování plamenem) je nutné k odstranění vrstvy oxidu v průběhu svařování použít tavidla. [1] [2] [4] [5] [7]

3.1.2. Vznik trhlin

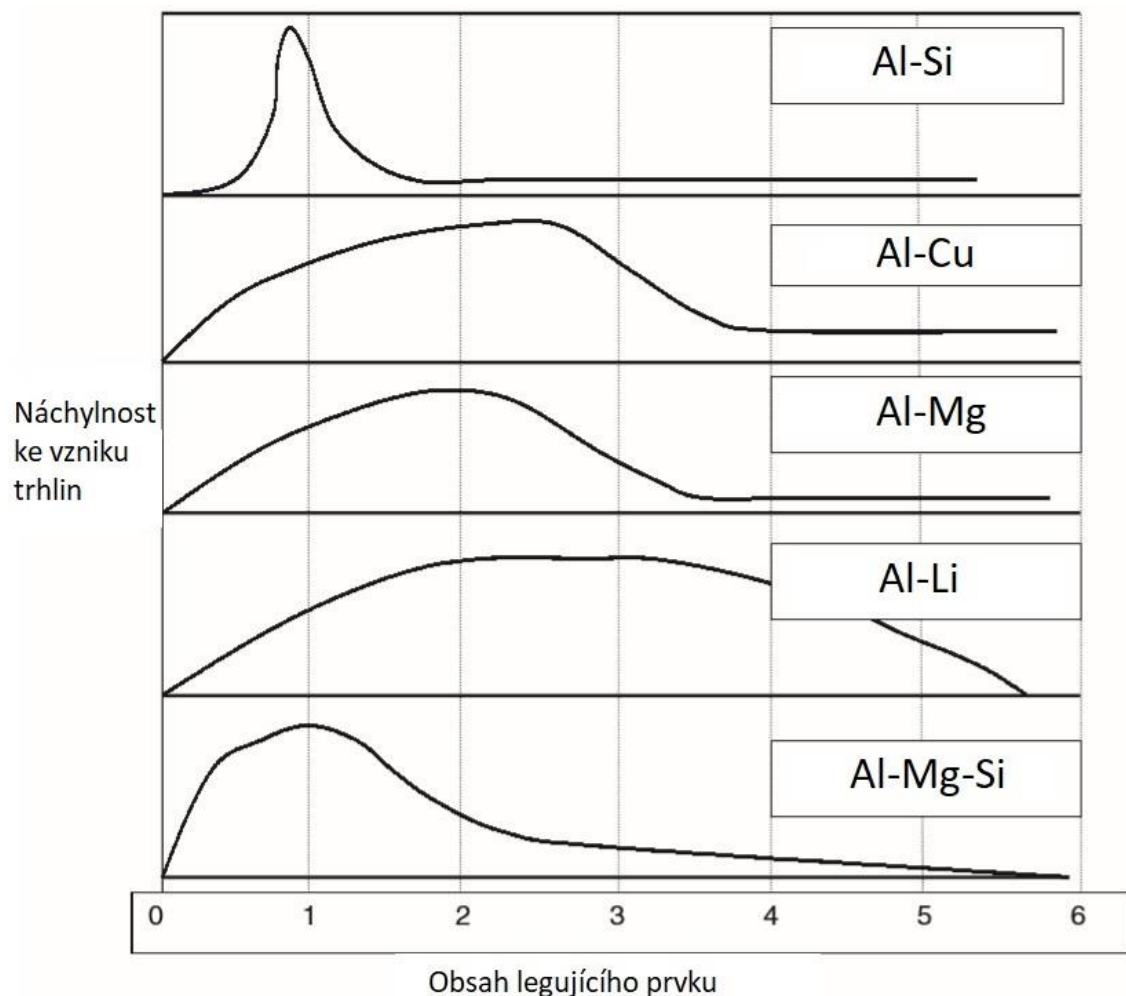
Jedním z největších problémů při svařování hliníkových slitin je velký koeficient teplotní roztažnosti hliníku, který způsobuje velká pnutí při chladnutí svařovaného materiálu a tím i velké deformace, případně při snaze o jejich potlačení, vznik trhlin. Takové vady svarových spojů jsou dle normy *ČSN EN ISO 10042 – Svařování – Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním – Určování stupňů jakosti pro všechny stupně kvality (B, C, D) nepřipustnou vadou svaru.*

Trhliny nevznikají přímo. Jak je uvedeno výše, při chladnutí svařovaného materiálu dochází k velkým deformacím, které jsou nežádoucí, protože většinou potřebujeme, aby svařovaná konstrukce měla určitý přesný tvar. Proto se svařované konstrukce upínají pomocí různých přípravků, které znemožňují nežádoucí vznik deformací. Tím ovšem při chladnutí vzniká velké napětí v materiálu a pokud toto napětí překročí mez pevnosti, dojde k porušení materiálu a vzniku trhlin. Vlastnost, která značně ovlivňuje vznik trhlin, je tepelná vodivost. Protože hliník má velkou tepelnou vodivost ($237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), tak tepelně ovlivněná oblast je široká a kvůli tomu vzniká větší pnutí. Celý tento problém vzniká při krystalizaci, kdy dochází k velkým objemovým změnám v materiálu, které jsou doprovázeny vznikem tahových napětí uvnitř materiálu. Pokud je pak interval krystalizace dostatečně velký, překročí napětí mez pevnosti materiálu a začnou vznikat trhliny. Další možnost vzniku trhlin je dána tím, že koeficient

objemové teplotní roztažnosti se na rozhraní tuhé a kapalné fáze rychle mění s klesající teplotou.

Při svařování hliníku mohou vznikat trhliny dvojího typu: tzv. trhliny za tepla a trhliny za studena. Trhliny vzniklé za studena se vytvářejí v tepelně ovlivněné oblasti při chladnutí svařovaného materiálu, nejsou ale příliš časté, tvoří se výjimečně, především u vysokolegovaných slitin typu Al-Cu-Mg v konstrukčních uzlech s malou možností deformace. Trhliny vzniklé za tepla jsou u Al slitin mnohem častější a tvoří se u slitin s velkým množstvím legujících prvků při krystalizaci, kdy se v materiálu vyskytuje jak tuhá, tak kapalná fáze.

Každá skupina slitin má stanoven kritický obsah legujících prvků, pro který je riziko vzniku trhlín za tepla největší (viz obrázek 2).



Obrázek 2: Náchylnost ke vzniku trhlín v závislosti na obsahu hlavních legujících prvků. [1]

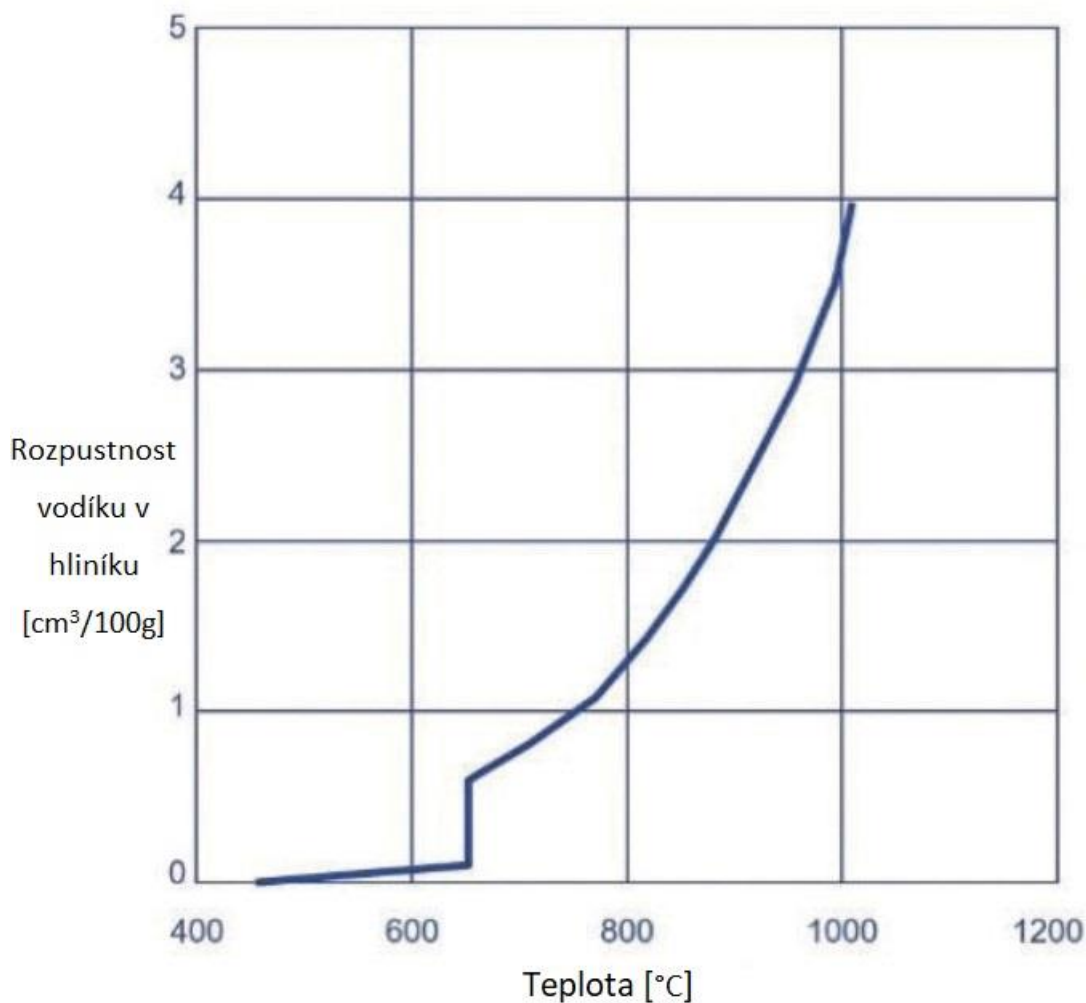
Riziko vzniku trhlin lze omezit použitím vhodného přídatného materiálu (zejména přídatných materiálů s vyšším obsahem Mg a Si), vhodné technologie svařování (ideální je vysoká rychlost svařování, díky které dochází k menšímu tepelnému ovlivnění svařovaného materiálu a možnost předehřevu) a takového upnutí materiálu, aby zbytečně nevznikalo napětí z důvodu neumožnění deformace při tuhnutí svarového spoje. Dále možnost vzniku trhlin snižuje omezení obsahu nečistot a vybraných prvků (Cu, Pb a Zn) ve svařovaném materiálu. [1] [2] [4]

3.1.3. Pórovitost svarů

Tento problém je způsoben velkou rozpustností plynů v hliníku, která navíc roste s rostoucí teplotou (viz obrázek 3). Největší vliv na tvorbu pórů má vodík, který může v některých případech vyvolávat i vznik trhlin za studena. Jeho rozpustnost při krystalizaci prudce klesá (skokově - viz obrázek 3) a v závislosti na rychlosti krystalizace zůstává určité množství vodíku uzavřené ve ztuhlém svarovém kovu v podobě pórů.

Vodík se do svarové lázně může dostat několika způsoby např.: ze vzdušné vlhkosti okolní atmosféry, z vlhkosti základního i přídatného materiálu, tavidla, nebo ochranných plynů. Dalším zdrojem vodíku ve svarové lázni může být také špatně odstraněná vrstva oxidu hlinitého na povrchu svarových ploch, která může vodík obsahovat.

Minimalizovat množství vodíku ve svaru můžeme předehřevem součástí, kdy se odstraní vodík, který je držen v povrchu základního materiálu fyzikální adsorpcí. Z důvodu tepelného ovlivnění a možného zhoršení mechanických vlastností nesmí být předehřev příliš vysoký. Správnou teplotu předehřevu udává norma *ČSN EN 1011-4 - Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku*. Pak je výhodné použít metody svařování, při které svarový kov chladne pomaleji a je tak umožněno lepší odplynění svarové lázně. Použití vhodného tavidla, nebo ochranného plynu (ideální jsou plyny s co největší tepelnou vodivostí, např. He) a zabránění přehřátí svarové lázně také výrazně snižuje možnost vzniku pórů. Místo největšího výskytu pórů bývá na rozhraní svaru a základního materiálu, kde dochází k největšímu odvodu tepla. [4]



Obrázek 3: Graf rozpustnosti vodíku v hliníku v závislosti na teplotě. [12]

3.1.4. Zhoršení mechanických vlastností

Tento problém nastává především u vytvrditelných, nebo výrazně mechanicky zpevněných slitin, kdy při svařování dochází k rozpuštění vytvrzující fáze a tím k výraznému poklesu mechanických vlastností a snížení odolnosti proti korozi v místě svaru a v TOO. Pokles mechanických vlastností závisí na době působení teploty nad 200 °C na materiál. U přirozeně stárnoucích samovytvrditelných slitin se materiál po určité době opět vrátí do stavu s původními mechanickými vlastnostmi (slitiny typu Al-Zn-Mg). U ostatních slitin je jediná možnost, jak materiálu navrátit mechanické vlastnosti, opětovné tepelné zpracování svařované součásti (slitiny typu Al-Cu-Mg). U některých vytvrzovaných slitin (např. typu Al-Mg-Si) už ovšem nelze znovu dosáhnout stejných mechanických vlastností, jako po prvním tepelném zpracování.

Problém nastává u nevytvrditelných slitin, u kterých je jediná možnost zlepšení mechanických vlastností pomocí tváření za studena. U takových slitin dochází při svařování v tepelně ovlivněné oblasti k rekrytalizaci a vzniku nových zrn materiálu a tím k poklesu mechanických vlastností. Důvodem poklesu mechanických vlastností je tzv. oddeformování. Při tváření za studena dochází k deformaci zrn a k hromadění dislokací na hranicích zrn, při rekrytalizaci se pak tyto dislokace uvolňují a dochází k poklesu pevnosti a tvrdosti. Pokles mechanických vlastností v TOO není u slitin tvářených za studena tak výrazný, jako u slitin vytvrditelných.

Na slitiny určené k odlévání může mít svařovací proces opačný vliv, než na výše zmíněné slitiny vytvrditelné a tvářené za studena. Během svařování může v TOO dojít k vytvrzení materiálu a tím pádem ke zlepšení mechanických vlastností. [1] [4]

3.1.5. Barevná stálost

Dalším problémem při svařování slitin hliníku je, že při zvyšující se teplotě nemění hliník svou barvu, jak je tomu například u slitin železa. Tím vzniká problém, že lze velice obtížně poznat, jakou má základní materiál teplotu a kdy dochází k jeho natavení. Při ručním svařování je pak také obtížné sledování tavné lázně. Proto jsou při ručním svařování hliníkových slitin důležité zkušenosti svářeče, který musí teplotu tavné lázně poznat podle jejího lesku a podle doby ohřevu. Proto je důležité mít kvalifikační zkoušku svářeče nejen pro danou metodu, ale i pro jednotlivé svařované materiály. Tuto kvalifikaci pro hliník a jeho slitiny určuje norma *ČSN EN ISO 9606-2 - Zkoušky svářečů - Tavné svařování - Část 2: Hliník a jeho slitiny*. [2]

4. Značení hliníkových slitin

Dříve se používalo značení podle normy *ČSN 42 0055 – Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů*. Značení obecně vypadá následujícím způsobem:

42 4XXX.XX

První dvě číslice označují třídu norem (42 - hutnictví). 3. číslice je rozdělení těžkých a lehkých kovů (4 – lehké kovy). 4. číslice určuje rozdělení na tvářené (2) a slévárenské (3) slitiny. 5. a 6. číslice určují danou slitinu. Poslední 2 číslice jsou tzv. doplňkové číslo, první z nich je informace o tepelném zpracování a druhá způsob odlévání odlitků.

Dnes se používá nová evropská norma ČSN EN 573 – *Hliník a slitiny hliníku. Chemické složení a druhy tvářených výrobků* - a ČSN EN 1706 – *Hliník a slitiny hliníku. Odlitky. Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Značení podle těchto norem vypadá následovně:

EN AX XXXX(X)

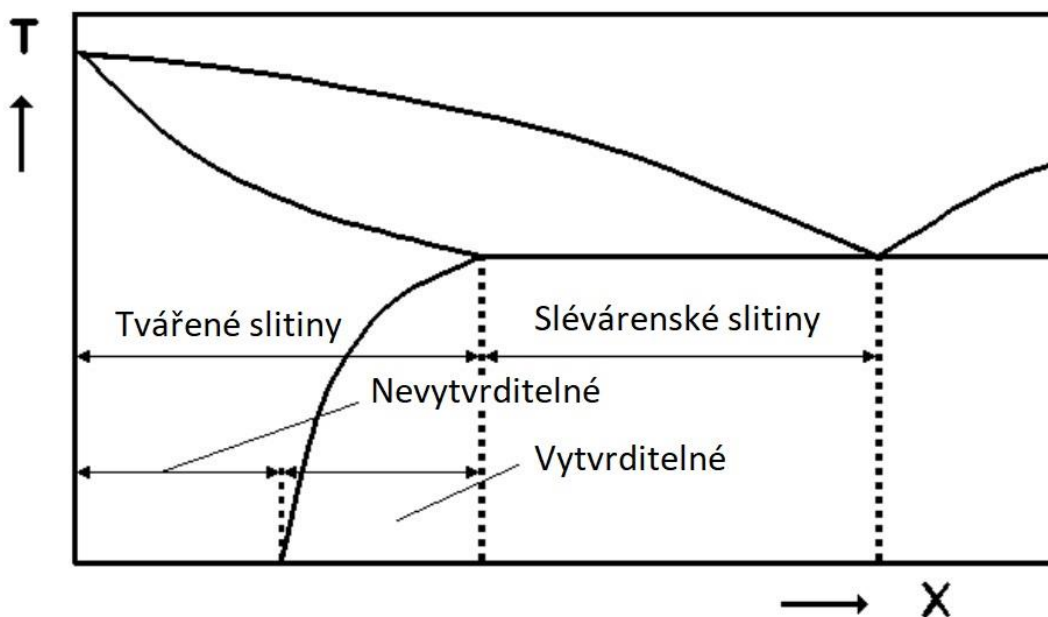
Kde EN je označení evropské normy. A je písmeno značící, že jde o slitinu hliníku. Další je písmeno označující, zda jde o slitinu tvářenou (W), nebo slévárenskou (C). Potom následuje čtyřčíslí, které označuje danou slitinu hliníku podle hlavního legujícího prvku (čistý Al – 1xxx, Cu – 2xxx, Mn – 3xxx, Si – 4xxx, Mg – 5xxx, Mg+Si – 6xxx, Zn – 7xxx, ostatní prvky – 8xxx a 9xxx je neobsazená řada) pro tvářené slitiny. U slévárenských slitin je 5 číslic, první opět rozděluje slitiny podle hlavních legujících prvků (stejným způsobem jako u slitin tvářených) a další 4 číslice charakterizují konkrétní slitinu.

Poslední možností značení je značení pomocí chemického složení. Toto značení je velice jednoduché a intuitivní. Uvádí se v něm střední obsah legujících prvků a v některých případech i mikrolegury. Například slitina AlSi8Cu3 je slitina hliníku s křemíkem a mědí, kde střední obsah křemíku je 8 % a mědi 3 %. Toto značení je velice oblíbené díky své jednoduchosti a srozumitelnosti i pro lidi, kteří se s jiným značením nikdy před tím nesetkali a tím pádem by při použití značení podle ČSN EN 573 a ČSN EN 1706 nevěděli, o jaký materiál se jedná. [1] [8] [28]

Kovové materiály se také rozdělují do skupin podle svařitelnosti. Pro toto rozdělení slouží směrnice *TNI CEN ISO/TR 15608 - Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. Tato směrnice zavádí sedm skupin pro vybrané materiály (1-oceli, 2-hliník, 3-měď, 4-nikl, 5-titan, 6-zirkon, 7-litiny). Skupina slitin hliníku se pak rozděluje podle hlavních legujících prvků a to tak, že 21 je čistý hliník, 22 nevytvrditelné slitiny hliníku, 23 vytvrditelné slitiny, 24 slitiny Al-Si-Cu s obsahem Cu <1%, 25 slitiny Al-Si-Cu s obsahem Si 5-14%, Cu 1-5% a Mg <0,8% a poslední skupina 26 jsou slitiny Al-Cu s obsahem Cu 2-5%. [28]

5. Druhy hliníkových slitin a vliv legujících prvků na svařitelnost

Slitiny hliníku se (podobně jako slitiny železa) rozdělují podle rovnovážného diagramu (viz obrázek 4) na několik skupin. V případě hliníkových slitin je rozdělení na tvářené a slévárenské a pak podle možnosti jejich tepelného zpracování.



Obrázek 4: Rovnovážný diagram obecné slitiny hliníku (s hlavním legujícím prvkem označeným písmenem X). [2]

5.1. Tvářené slitiny

Tvářené slitiny se rozdělují na vytvrditelné a nevytvrditelné podle toho, jestli lze jejich mechanické vlastnosti měnit tepelným zpracováním.

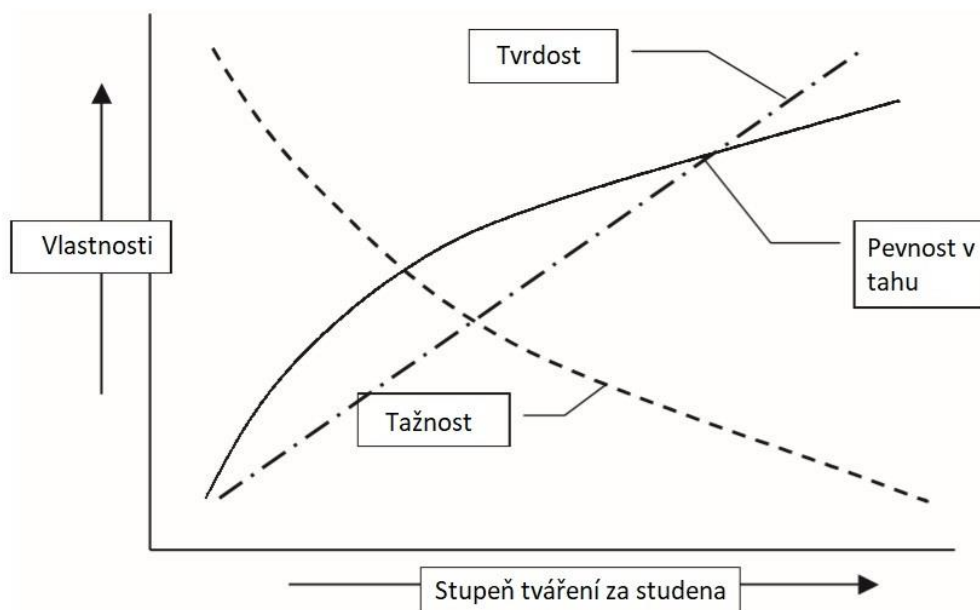
5.1.1. Nevytvrditelné slitiny

U tohoto typu slitin nelze tepelným zpracováním zlepšit mechanické vlastnosti. Způsoby, jakými lze u těchto slitin zlepšit mechanické vlastnosti, jsou tváření za studena (viz obrázek 5), zpevnění v tuhém roztoku a zpevnění sekundárním vylučováním intermetalických fází. [8]

Asi nejdůležitější slitiny hliníku jsou typu Al-Si, které mají velmi dobrou svařitelnost, ale horší mechanické vlastnosti, než slitiny Al-Mg. Tyto slitiny mají malý sklon ke vzniku trhlin, a proto jsou vhodné pro svařování. Jsou vhodné pro použití v agresivních prostředích díky jejich výborné odolnosti proti korozi. Nevýhodou je jejich špatná obrobiteľnosť, proto je při použití těchto slitin snaha minimalizovat potřebu obrábění. Nevytvrdzují se z důvodu, že při jejich ochlazení se nedosahuje dostatečného stupně přesycení a při následném stárnutí se jejich mechanické vlastnosti zlepšují jen málo.

Dalšími nevytvrditelnými slitinami je typ Al-Mg, které sice vytvrzovat jdou, ale zvýšení pevnosti je minimální a je doprovázeno výrazným snížením tažnosti, a proto se tyto slitiny nevytvřují. Používají se slitiny s maximálním obsahem Mg do 8 %, protože se zvyšujícím se obsahem hořčíku roste v materiálu podíl fáze α (Al_3Mg_2), která zhoršuje tvářitelnost a snižuje odolnost proti korozi. Při vyšším obsahu Mg může při svařování docházet k jeho spalování a tím zhoršení stability oblouku. Jako přídavné materiály se používají slitiny Al-Mg mikrolegované dalšími prvky jako jsou Cr nebo Zr.

Další jsou slitiny typu Al-Mn. Nevytvřují se z důvodu malé rozpustnosti manganu ve fázi α . Obsah manganu v těchto slitinách bývá do 1,5 %. Při vyšším obsahu Mn (nad 2 %) vznikají krystaly fáze Al_6Mn , která zhoršuje mechanické vlastnosti a zároveň velice negativně ovlivňuje svařitelnost. Do obsahu 2 % Mn jsou tyto slitiny velmi dobře svařitelné. Jejich použití je mnohem méně časté než u předchozí skupiny slitin. Jako přídavný materiál se většinou používá čistý hliník mikrolegovaný titanem, nebo materiál se stejným chemickým složením jako ZM. Při tváření za studena se výrazně snižuje jejich tažnost až na 3 %. [1] [8] [11] [13]



Obrázek 5: Závislost mechanických vlastností na stupni tváření za studena. [1]

5.1.2. Vytvrditelné slitiny

U těchto slitin lze tepelným zpracováním výrazně zlepšit mechanické vlastnosti. Nejčastější způsob tepelného zpracování Al slitin je tzv. vytvrzování. Vytvrzování je

komplexní proces TZ, který má 2 fáze: rozpouštěcí žíhání, po kterém následuje prudké ochlazení a následné stárnutí. Stárnutí může být buď přirozené (samovytvrditelné slitiny), které probíhá při teplotě okolí a trvá mnohem déle než umělé stárnutí (slitiny vytvrzované za tepla), které probíhá za zvýšené teploty většinou v pecích. Při prudkém ochlazení materiálu se zamezí precipitaci rovnovážných fází a tuhý roztok zůstává přesycený (metastabilní). Během stárnutí se potom vylučují vytvrzující, nerovnovážné fáze, díky kterým materiál získává výrazně lepší mechanické vlastnosti. Pevnost takových slitin se pohybuje v rozmezí 300-700 MPa. Většinou jde o slitiny hliníku se 2 a více legujícími prvky (tzv. ternární slitiny). [8]

Jedny z nejpoužívanějších slitin jsou duraly, slitiny Al-Cu-Mg s menšími přísadami jiných prvků jako Si, Ni atd. Jejich pevnost po tepelném zpracování se běžně pohybuje okolo 400 MPa. Slitiny tohoto typu mají zhoršenou svařitelnost způsobenou změnami struktury při chladnutí v tepelně ovlivněné oblasti. Tyto změny způsobují zvýšenou náchylnost těchto slitin k praskání za tepla a u pevných konstrukcí i možnost vzniku trhlin za studena. Jako přídatné materiály se používají slitiny Al-Mg s menšími přísadami vzácných kovů (Cr a Zr), nebo slitiny typu Al-Mg-Mn.

Slitiny typu Al-Mg-Si, které se nazývají aviály, dosahují pevnosti kolem 350 MPa, ale oproti jiným slitinám hliníku mají velice dobrou elektrickou vodivost a odolnost proti korozi. Jejich svařitelnost je ovšem zhoršená. Jako přídatný materiál se většinou využívají slitiny typu Al-Mg s mikrolegurami Cr nebo Zr. Lze použít i slitinu Al-Si, ale svarový kov pak bude dosahovat horších mechanických vlastností.

Slitiny typu Al-Zn-Mg jsou samovytvrditelné. Některé slitiny tohoto typu se vyznačují vysokou pevností pohybující se okolo 700 MPa. Slitiny s menší pevností dosahují vysoké tažnosti až kolem 20 %. Vysokopevné slitiny jsou špatně svařitelné. Díky samovytvrditelnosti je možné zhotovit svary s pevností až 95 % pevnosti základního materiálu, doba přirozeného stárnutí se ovšem pohybuje kolem 3 měsíců. Jako přídatný materiál se opět používá zejména slitina Al-Mg s menším obsahem Cr a Zr, nebo slitiny typu Al-Mg-Mn.

Vzácné kovy např. Zr se do přídatných materiálů přidávají z důvodu zjemnění struktury svarového kovu, protože už od velmi malých koncentrací výrazně ovlivňují zrnitost materiálu. Jemnozrnné struktury se snažíme dosáhnout z důvodu zlepšení mechanických vlastností. [1] [2] [8] [11] [14]

5.2. Slévárenské slitiny

Chemickým složením a legujícími prvky se podobají slitinám tvářeným, ale mívají vyšší obsahy legujících prvků (často nad 10 %). Tyto slitiny nelze deformačně zpevňovat a obecně dosahují nižších mechanických vlastností než slitiny tvářené. Hlavní slévárenské slitiny jsou typu Al-Si (nazývané silumíny), Al-Cu, Al-Mg a Al-Zn většinou s menšími přísadami dalších legujících prvků. U slitin Al-Si se používá přídatný materiál s vyšším obsahem Si, než má základní materiál, a díky tomu se snižuje riziko praskání svarů. [2] [6] [11] [14]

Tabulka 1: Druhy hliníkových slitin a jejich vlastnosti. [2] [6] [8] [11]

Druh slitiny	Slitina	Stav	Pevnost [MPa]	Tažnost [%]	Tvr-dost HB	Vlastnosti a použití	Svařitelnost
Nevytvrditelné	EN AW 5019 (AlMg5)	Tvářeno za studena	320±10	3	77±8	Výborná odolnost proti korozi	Dobrá
	EN AW 3103 (AlMn1)	Tvářeno za studena	210±20	3	48±7	Potravinářský a chemický průmysl	Velmi dobrá
Tvářené	EN AW 2024 (AlCu4Mg1)	Přírozně stárnuto	400±20	12	105±1 5	Dopravní průmysl	Zhoršená
	EN AW 6082 (AlMg1Si1)	Uměle stárnuto	300±15	10	90±5	Dobrá odolnost proti korozi a tvařitelnost	Dobrá
Vytvrditelné	EN AW 7178 (AlZn7MgCu1)	Uměle stárnuto	580±25	4	145±5	Dopravní průmysl	Zhoršená

Tvářené	Vytvrditelné	EN AW 7005 (AlZn4,5Mg1,5)	Přirozeně stárnuto	300±20	10	85±10	Letadlová technika, tlakové nádoby	Dobrá
Slévárenské		EN AC 51100 (AlMg3)	Odlito	150±10	5	50±5	Výborná odolnost proti korozi	Výborná
		EN AC 42100 (AlSi7Mg)	Uměle stárnuto	240±20	1	85±8	Výborná zabíha- vost	Výborná
		EN AC 44200 (AlSi12)	Odlito	180±10	3	60±5	Výborná zabíha- vost, odolnost proti trhlinám za tepla	Výborná

Doporučení pro volbu vhodných přídatných materiálů je opět uvedeno v normě *ČSN EN 1011-4 - Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku.*

6. Příprava svarových ploch

Před samotným svařováním je nezbytné svarové plochy a plochy k nim přilehlé upravit tak, aby se minimalizovalo riziko vzniku vad svaru a aby docházelo ke správnému provaření základního materiálu (dále jen ZM) zejména u tupých svarů. Tvary svarových ploch se řídí doporučením normy *ČSN EN ISO 9692-3 Svařování a příbuzné procesy – Příprava svarových ploch, 3 díl: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin tavící se elektrodou v inertním plynu a wolframovou elektrodou v inertním plynu.*

U Y a V svarů je potřeba dodržet předepsané úkosy. Pro V svary je úhel rozevření svarových ploch 70° (v některých případech až 90°), pro ½ V svary 60°. Pro Y svary je úhel rozevření 60-70° a pro ½ Y svary je tento úhel 55°. U všech typů svarů je pak důležité dodržet předepsanou velikost kořenové mezery, která je závislá na tloušťce svařovaných součástí. U malých tloušťek se pak svařuje bez mezery (na rozdíl od ocelí). Pak je také vhodné srazit hrany ze spodní strany svarových ploch, aby se zamezilo vzniku oxidické rýhy uprostřed kořenové housenky. V některých případech je možné použít podložku, zejména když je velká kořenová mezera nebo je nutné podepření svařovaných součástí. Podložky musí mít drážku pro odvod zplodin a vhodné formování kořene, jinak mohou v oblasti kořene vznikat oxidické rýhy a studené spoje. U protlačovaných profilů bývají často podložky součástí profilu. [1] [2] [10]

Svarové plochy se nejčastěji připravují třískovým obráběním pomocí speciálních fréz, případně speciálními pilníky na hliník nebo ručními elektrickými hoblíky. Možné je také použití úhlových brusek se speciálními kotouči na hliník s tím, že všechny zbytky je nutné po broušení odstranit a odmastit povrch součástí. Broušení svarových ploch kotoučovými bruskami je nevhodné a použití brusných pláten je nepřípustné. Po jakémkoli obrábění je nutné srazit hrany svarových ploch, aby mohl svarový kov správně zatékat.

Po obrobení do požadovaného tvaru a rozměru je nutné svarové plochy před svařováním očistit a odmastit. Hlavním důvodem čištění je odstranění vrstvy oxidu hlinitého z povrchu svarových ploch. Nejlepším způsobem, jak oxid odstranit, je moření, ale mechanické očištění je také možné (viz kapitola 3.1.1). Jediný problém vzniká při použití mořidel s chlórem, kdy při svařování vzniká jedovatý plyn fosgen, a proto je použití takových mořidel zakázáno. K odmaštění povrchu svařovaných součástí se používají běžné čisticí prostředky jako aceton, nebo průmyslový alkohol. Po očištění součásti se musí počkat, než se odpaří zbytky mořidel a čisticích prostředků. [1] [2] [10]

7. Metody svařování hliníkových slitin

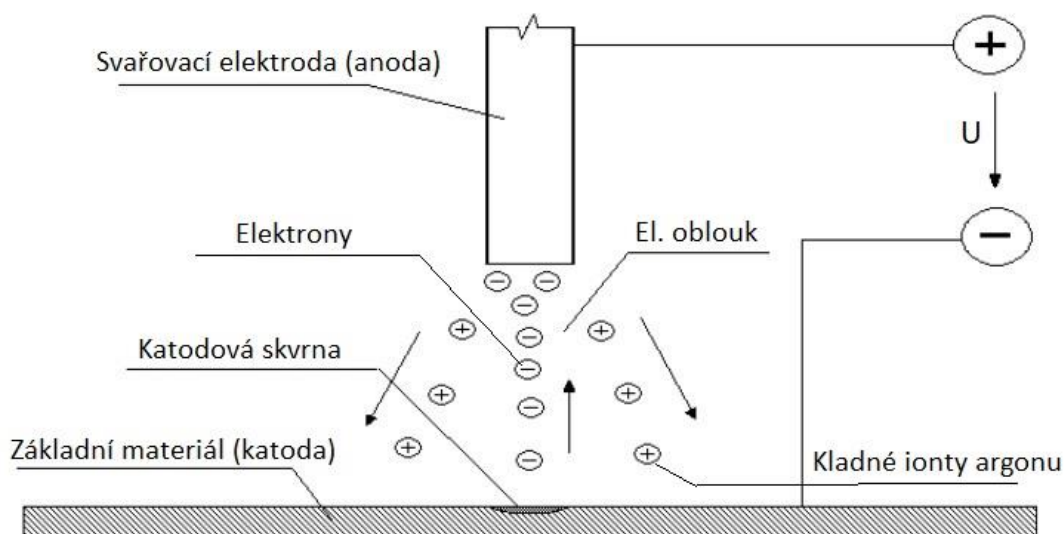
V dnešní době jsou nejpoužívanější metody svařování elektrickým obloukem. Tyto metody jsou velice univerzální a lze s nimi svařovat většinu součástí. Jiné metody, které využívají jiné zdroje tepla než el. oblouk, jsou méně univerzální a většinou je nelze

využívat na všechny typy svarů. Z metod obloukového svařování jsou pak nejpoužívanější metody svařování v ochranných atmosférách (viz kapitola 7.1.1).

7.1. Svařování elektrickým obloukem

Při svařování elektrickým obloukem se k natavení základního materiálu využívá elektrického výboje. Elektrický oblouk vzniká mezi dvěma elektrodami v plynném prostředí s tím, že na jeden pól zdroje je připojen základní materiál (slouží jako jedna elektroda ve svařovacím elektrickém obvodu) a druhý pól zdroje tvoří buď tavící se elektroda (svařovací), která pak slouží zároveň jako přídavný materiál, nebo netavící se elektroda, při jejímž použití pak musí být přídavný materiál přidáván do svarové lázně externě (obdobným způsobem, jako při svařování plamenem).

Plynným prostředím, ve kterém hoří elektrický oblouk, může být vzduch, který ovšem negativně ovlivňuje vlastnosti svarového spoje. Pak může docházet k naplyňování svarového kovu, vzniku pórů, nebo k reakci se základním materiálem a vzniku nežádoucích sloučenin. Proto se používají různé způsoby ochrany svarového kovu, které zamezují jeho interakci s okolním prostředím. Nejpoužívanější jsou v dnešní době ochranné plyny. Pro svařování hliníku a jeho slitin je potřeba použít plyny nereagující se základním materiálem, které zároveň zamezují přístupu vzduchu ke svarové lázni, ale používá se také struskotvorná ochrana, nebo vakuum. Ochranné plyny, které nereagují se základním materiálem se nazývají inertní. Existují také aktivní ochranné plyny, které výrazněji ovlivňují teplotu svarového kovu, čehož se využívá například při svařování ocelí, protože základní materiál musí být méně reaktivní, aby opět nedocházelo ke vzniku nežádoucích sloučenin. Ochranné plyny se ke svarové lázni mohou dostávat dvěma způsoby. Při svařování v ochranných atmosférách se využívají speciální hubice hořáků, kterými proudí ochranný plyn ke svaru. Při svařování obalenou elektrodou vzniká určité množství ochranného plynu přímo v místě svaru při svařování, kdy dochází k tavení obalu obalené elektrody (tzv. plynotvorné obaly). Při svařování obalenou elektrodou se k ochraně svarového kovu před vnější atmosférou v současnosti ale spíše využívá strusky, která vzniká při tavení obalu elektrody (tzv. struskotvorné obaly). [1] [10] [11] [14]



Obrázek 6: Schéma elektrického oblouku při zapojení zdroje s nepřímou polaritou stejnosměrného proudu. [2]

7.1.1. Svařování v ochranných atmosférách

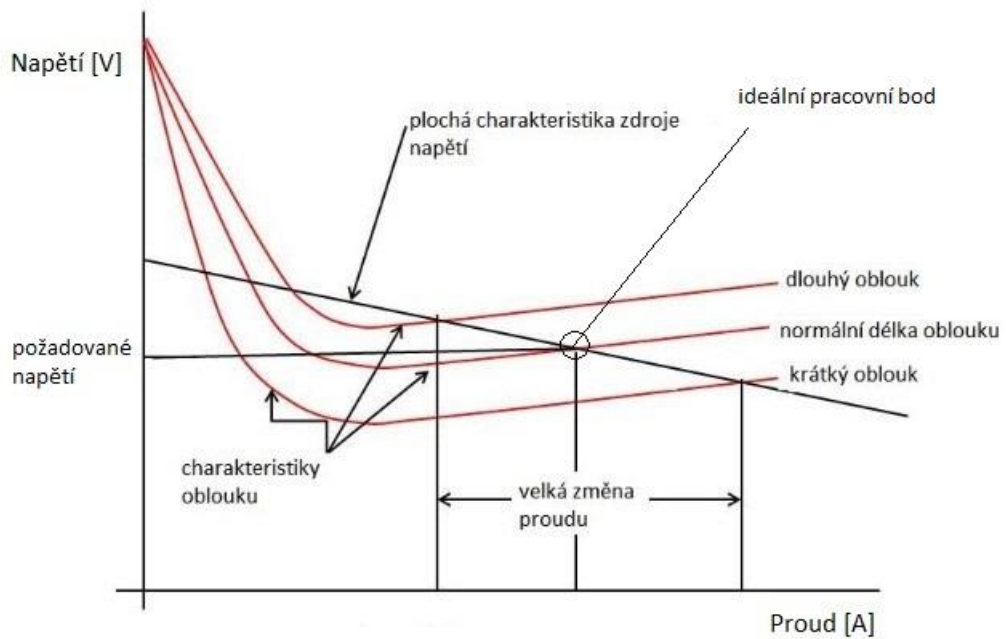
Tento způsob je v dnešní době nejpoužívanější metodou svařování nejen hliníku a jeho slitin, ale všech kovů. Je velice efektivní a poskytuje výbornou ochranu svarové lázně, takže je dosahováno velice kvalitních svarových spojů. Široké možnosti nastavení svařovacích parametrů umožňují svařovat malé i velké tloušťky materiálu.

Při svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách se využívá jeho tzv. čistícího účinku. Nutností je použití tzv. nepřímé polarity svařovacího zdroje, to znamená, že základní materiál je připojen na záporný pól zdroje (katoda) a svářecí elektroda na kladný (anoda - viz obrázek 6). Elektrický proud je způsoben tokem elektronů od katody k anodě. Na katodě se vytváří tzv. katodová skvrna, což je místo, odkud jsou elektrony vyzařovány nejvíce. Tato skvrna se tvoří v místě s největším elektrickým potenciálem (tj. místo s největším elektrickým odporem), které je, důsledkem špatné elektrické vodivosti oxidu hlinitého, právě vrstva oxidu na povrchu materiálu. Katodová skvrna dosahuje teploty kolem 2600 °C, díky tomu, že je místem, kterým prochází největší množství elektronů a tím pádem i nejvíce energie. Díky vysoké teplotě se vrstva oxidu v místě katodové skvrny odpařuje. Odstranění oxidické vrstvy pomáhá také ochranná atmosféra argonu. Při obrácené polaritě se kladné ionty argonu pohybují od svařovací elektrody k základnímu materiálu a díky jejich výrazně větší

hmotnosti a velikosti oproti opačně se pohybujícím elektronům vrstvu oxidu na povrchu materiálu rozrušují. [1] [2] [7] [10] [14] [16]

Použití obrácené polarity ovšem způsobuje, že anoda je výrazně tepelně zatížena (což je velký problém zejména u svařování netavící se elektrodou u metody TIG). Na anodě totiž vzniká tzv. anodová skvrna, což je místo, kam dopadají elektrony vyzářené ze základního materiálu. Elektrony získávají velkou kinetickou energii díky výborné elektrické vodivosti ionizovaného prostředí elektrického oblouku v kombinaci s jejich velmi nízkou hmotností. Tato energie se následně při dopadu mění na teplo. Z tohoto důvodu dosahuje anodová skvrna teploty až kolem 3500 °C a tím pádem je anoda výrazně tepelně zatížena. Naopak na katodě potom nevzniká dostatečně vysoká teplota, aby byl dosažen kvalitní svarový spoj (vzniká pak mělký závar a neprůvary).

Mezi katodou a anodou vzniká elektrický oblouk, což je ionizovaný plyn v podobě plazmy, kterým prochází elektrický proud. Pro zapálení oblouku musí dojít k dostatečné ionizaci prostředí, které je při svařování v ochranných atmosférách tvořeno ochranným plynem s tím, že argon se ionizuje nejlépe. Teplota elektrického oblouku dosahuje až 10000 °C. Elektrický oblouk nejlépe popisuje voltampérová (statická) charakteristika, která určuje závislost proudu na napětí při konstantní délce oblouku. Na její tvar má největší vliv materiál a tvar elektrody a složení plazmy oblouku. Ideální pracovní bod je pak průsečík charakteristiky oblouku s charakteristikou zdroje, přičemž zdroje používané pro svařování metodou MIG mají plochou charakteristiku (viz obrázek 7). [1] [7] [9] [10] [11] [14] [16]



Obrázek 7: Statická (voltampérová) charakteristika elektrického oblouku a svařovacího zdroje.

[16]

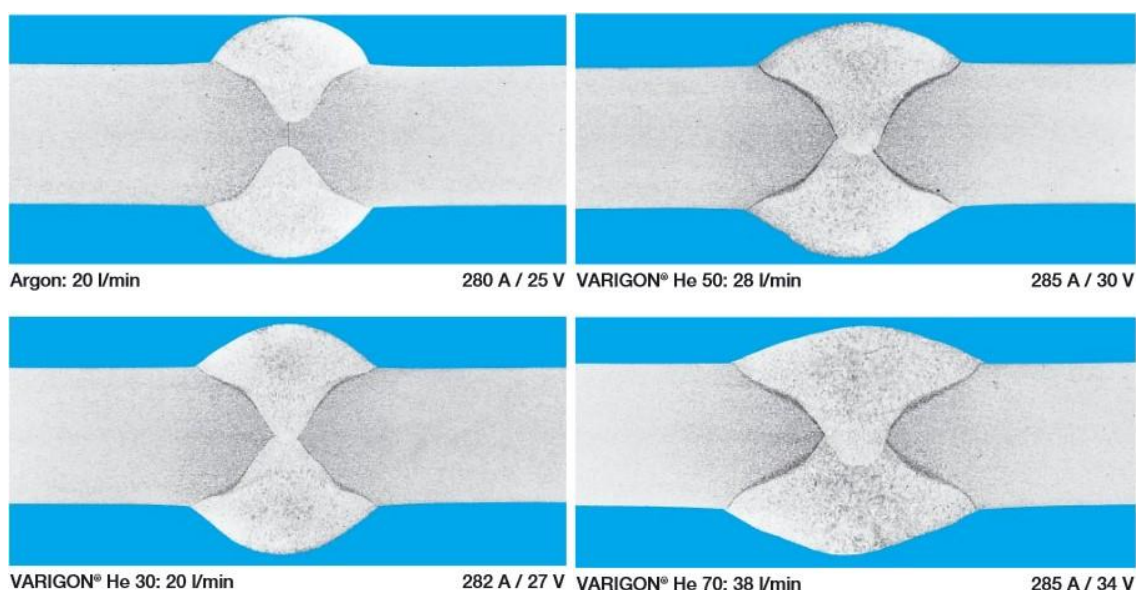
7.1.1.1. Ochranné plyny používané pro svařování hliníkových slitin

Ochranné inertní plyny nereagují se základním materiálem ani s el. obloukem (jsou chemicky netečné), jejich použití je nutné kvůli vysoké rozpustnosti plynů v hliníku a kvůli ochraně před kyslíkem, což by při použití aktivních plynů způsobovalo intenzivní oxidaci, pórovitost a jiné vady svarů. Ideální plyn pro svařování hliníku je argon, protože nejlépe napomáhá k odstraňování oxidické vrstvy (napomáhá čistícímu účinku) a výborně ionizuje. Při použití čistého argonu ovšem může docházet k nedostatečnému prohřátí základního materiálu, proto se používají směsi argonu a helia s různými poměry obou složek. Helium má velice dobrou tepelnou vodivost a tím napomáhá k lepšímu prohřívání základního materiálu (viz obrázek 8). Další výhodou použití ochranných plynů obsahujících helium je menší pórovitost svarů. Složení ochranné atmosféry má vliv také na stabilitu el. oblouku, tekutost svarové lázně, rychlost svařování, rozstřík, tvar svarové housenky a tepelný výkon a s ním spojený průvar. Proto je důležité zvolit vhodný ochranný plyn pro konkrétní aplikaci a podmínky svařování. [12] [14] [15]

Helium je výrazně dražší než argon, a proto se v čisté formě používá jen málo. Kromě vysoké ceny se čisté He nepoužívá i kvůli jeho horším ionizačním vlastnostem,

kteře způsobují obtížnější zapalování oblouku a nestabilní hoření. Jeho vyšší cena je způsobena pouze velice malým výskytem na Zemi, nejvíc je ho ve vyšších vrstvách atmosféry kvůli jeho velmi nízké měrné hmotnosti. Pro průmyslové účely se nejčastěji získává ze zemního plynu jeho frakční destilací. Argon oproti tomu se v zemské atmosféře vyskytuje poměrně hojně, a proto je výrazně levnější. Vyrábí se frakční destilací zkapalněného vzduchu.

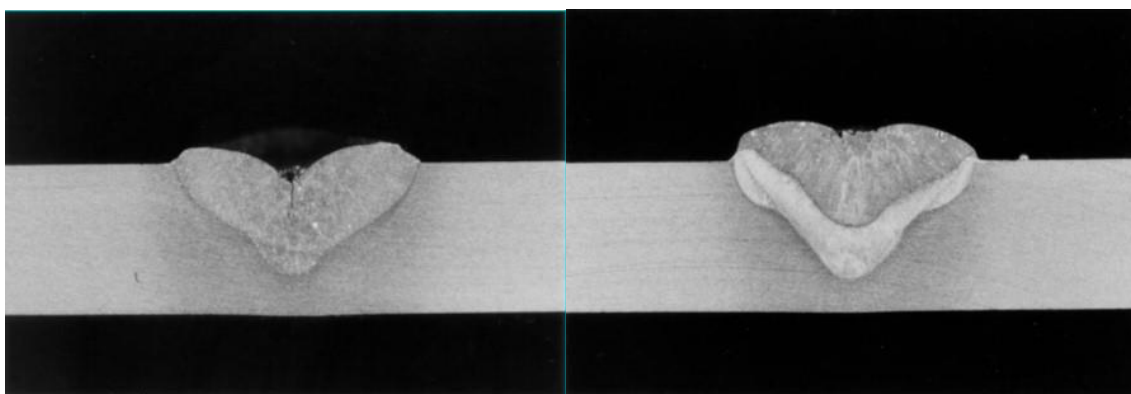
Nejčastěji využívaným ochranným plynem je čistý argon. Z ochranných plynných směsí jsou nejpoužívanější směsi s obsahem 70 % Ar a 30 % He (např. MISON[®] He 30 od firmy Linde). Takové plyny jsou vhodné pro menší tloušťky svařovaných materiálů, umožňují vysoké svařovací rychlosti a zajišťují stabilní hoření el. oblouku. Pro svařování materiálů větších tloušťek se používají plyny se zvýšeným obsahem He na 50 až 70 % (např. VARIGON[®] He 50 od firmy Linde). V některých případech lze použít i plyny s obsahem 90 % He, nebo čisté He. Se zvyšujícím se obsahem helia se zvyšuje teplota oblouku a s ní také průvar (jak je patrné z obrázku 8). Nevýhodou ochranných plynů se zvýšeným obsahem helia je vyšší cena, méně stabilní oblouk a obtížnější zapalování oblouku. Zatímco argon velice dobře ionizuje a tím usnadňuje zapalování oblouku, helium ionizuje podstatně hůř. Zhoršené zapalování oblouku může být problém hlavně u starších svařovacích zdrojů, kde je pak nutné zapalovat oblouk s použitím čistého argonu. [12] [14] [15]



Obrázek 8: Vliv obsahu helia v ochranném plynu na průvar. [15]

7.1.1.2. Svařování tavící se elektrodou (MIG)

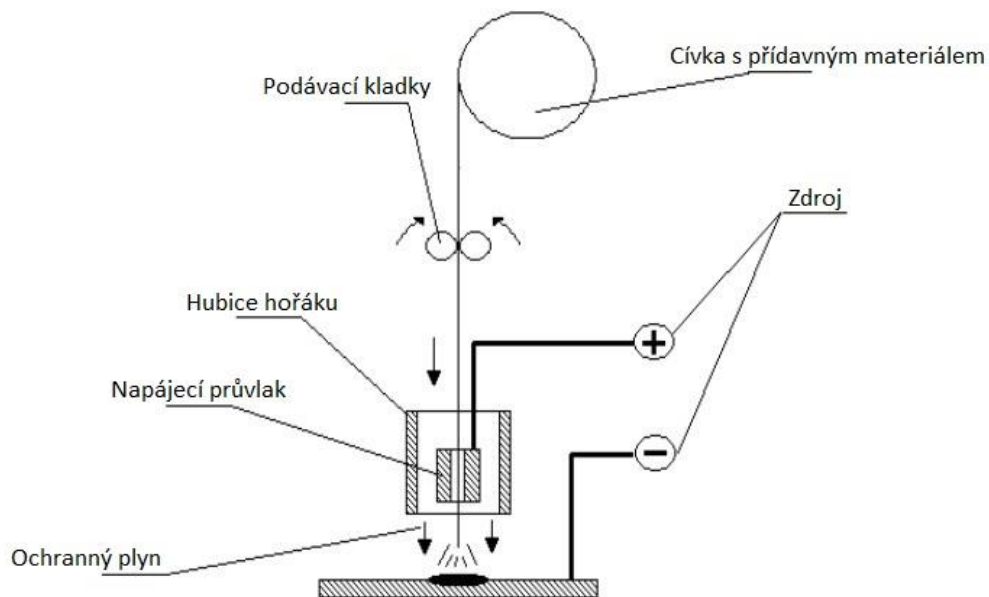
Zkratka MIG je z anglického názvu Metal Inert Gas a značí použití kovové odtavující se elektrody a inertního ochranného plynu. Podle normy ČSN EN ISO 4063 - Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování je metoda MIG značena ISO 4063 – 131. Tato metoda je v průmyslu nejpoužívanější metodou svařování hliníkových konstrukcí a pokud budeme uvažovat i použití aktivního plynu (tedy metodu MAG), tak je nejpoužívanější metodou svařování vůbec. Její největší výhodou je vysoká produktivita, možnost mechanizace a automatizace svařování, široké možnosti nastavení svařovacích parametrů a výborné odstraňování oxidické vrstvy z povrchu svarových ploch díky maximálnímu využití čistícího účinku el. oblouku (standardně se u této metody využívá zapojení DC+ = stejnosměrný proud s nepřímou polaritou). Díky velké intenzitě svařovacího zdroje a velké rychlosti svařování dochází k malému tepelnému ovlivnění základního materiálu a tím i k menším deformacím a nižší náchylnosti ke vzniku trhlin. Nevýhodou je problematický začátek svařování, kdy často dochází ke vzniku studeného spoje, nutnost vyplnit koncový kráter (pokud není koncový kráter vyplněn, je zvýšené riziko vzniku trhlin - viz obrázek 9) a skutečnost, že tvorba kořene je výrazně ovlivněna délkou oblouku.



Obrázek 9: Nevyplněný (vlevo) a vyplněný (vpravo) koncový kráter. [9]

Přídavný materiál v podobě svařovacích drátů různých průměrů (0,6 – 2,6 mm podle tloušťky svařovaného materiálu – pro svařování Al slitin je nejčastější průměr 1,2 mm) je do svarové lázně podáván automatickým kladkovým podavačem. Vzhledem k tomu, že hliníkové přídavné materiály jsou měkké v porovnání s ocelovými, je nutné použít speciální vybavení podavače PM. Vedení svařovacího drátu musí být realizováno teflonovými bowdeny, nebo bowdeny na bázi uhlíkových vláken, aby nedocházelo

k otěru materiálu a případnému zaseknutí ve vedení. Oproti ocelovým drátům je nutné použít jiné podávací kladky (výhodné jsou čtyř kladkové podavače – s kladkami s půlkruhovou drážkou, kvůli snížení tlaku na procházející drát) a pro delší vedení (více jak 3 m) je nutné použít mezipodavač, nebo tzv. systém push–pull, kde je v hořáku zabudován další podavač, který tahá za přídavný materiál. Dále je nutné použít speciální koncovky průvlaků s větším otvorem kvůli velké teplotní roztažnosti hliníku.



Obrázek 10: Schéma svařování metodou MIG-DC+. [2]

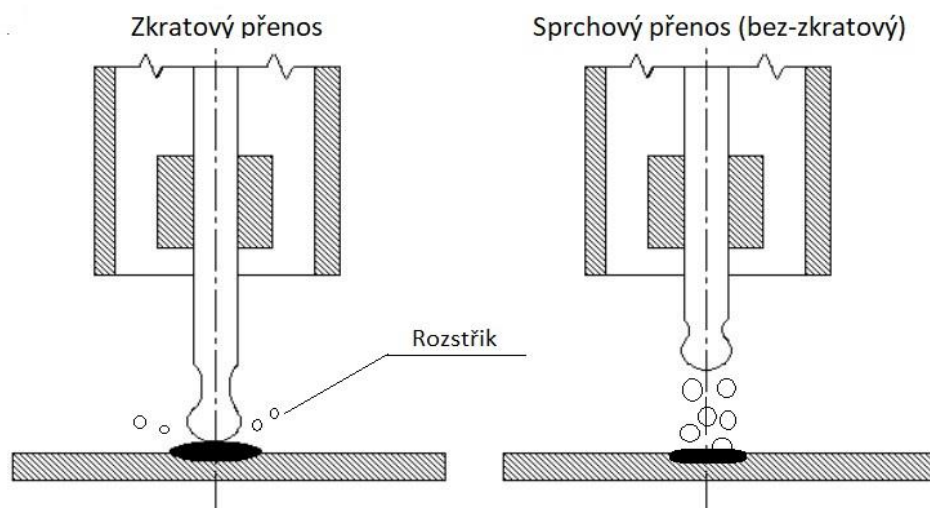
Druhy přenosu kovu obloukem:

Při samotném svařování metodou MIG rozlišujeme několik způsobů přenosu přídavného materiálu ze svařovacího drátu (elektrody) do svarové lázně podle nastavených svařovacích parametrů.

První možností je zkratový přenos (viz obrázek 11). Při zkratovém přenosu je použit nízký svařovací proud (do 200 A) a napětí do 25 V. Svařovací výkon je nízký a z toho důvodu se přídavný materiál pomalu natavuje a dříve, než se nataví dostatečně velký objem, aby se oddělil od zbytku drátu, dojde ke kontaktu se základním materiálem. V tu chvíli dojde ke zkratu, poklesu napětí a nárůstu proudu oblouku, zvýšený proud pak urychlí odtavování přídavného materiálu. Po oddělení kapky napětí opět stoupne a proud klesne. Kapky odtaveného přídavného materiálu jsou poměrně velké a při jejich dopadu do svarové lázně může docházet k rozstříku svarového kovu. Rozstříknuté kapky

pak ztuhnou na svařované součásti a kazí její vzhled a v některých případech i funkčnost dané součásti (v takovém případě musí být odstraněny). Oblouk je při tomto typu přenosu materiálu krátký. Zkratového přenosu se využívá hlavně při svařování materiálů menších tloušťek.

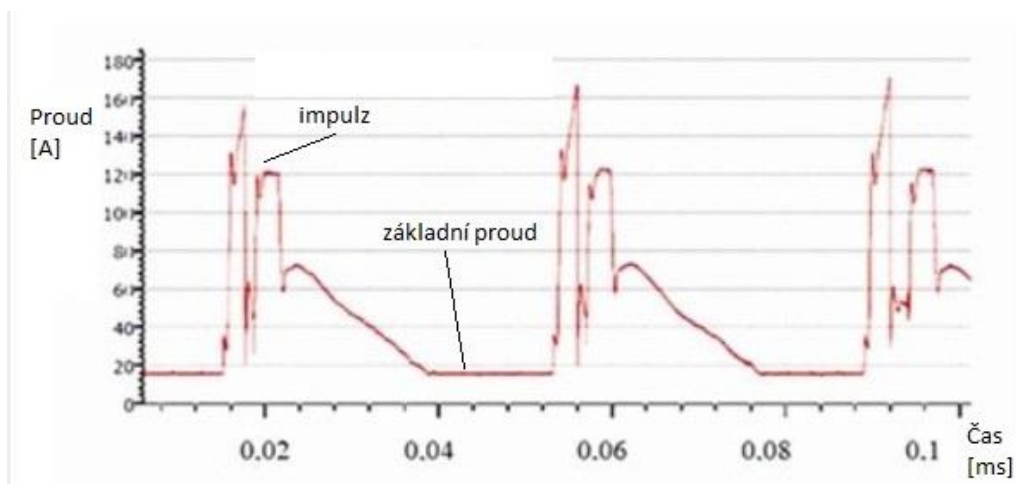
Další možností je sprchový přenos (viz obrázek 11). Oblouk je při tomto typu přenosu delší než při zkratovém přenosu. Svařovací proud se nastavuje na hodnotu přes 200 A a napětí přes 25 V. Zvýšením proudu dochází k rychlejšímu odtavování přídavného drátu a vzniku menších kapek (průměr kapek je menší než vzdálenost mezi elektrodou a základním materiálem), které po uvolnění z přídavného drátu prochází obloukem ke svarové lázni. Sprchový přenos je tedy bezzkratový. Kapky odtaveného přídavného materiálu jsou výrazně menší než u zkratového přenosu, ale je jich větší množství. Díky tomu nevyvolávají při dopadu do svarové lázně rozstřík svarového kovu. Tohoto způsobu se využívá při svařování součástí větších tloušťek. Na přechodu mezi zkratovým a sprchovým obloukem je oblast nastavení, při kterém můžeme dosáhnout přechodového přenosu, který je ale pro svařování hliníkových slitin nevhodný, protože se realizuje kapkovým přenosem, ale kapky přídavného materiálu mají nepravidelnou velikost (méně stabilní proces). [1] [2] [9] [10] [11] [12] [14]



Obrázek 11: Druhy přenosu kovu obloukem. [2]

Dalším způsobem přenosu je impulzní přenos. Svařovací proud se skládá ze základního nízkého proudu o velikosti okolo 40 A, který udržuje stabilní oblouk, a z impulzního proudu, který dosahuje hodnot až 700 A. Skutečný průběh proudu je ale složitější a pulzy nemusí být vždy stejné kvůli různým vnějším vlivům, kterým řídící

system přizpůsobuje průběh proudu (viz obrázek 12). Zatímco nízký základní proud nenatavuje přídavný materiál, ale pouze udržuje ionizovaný plyn oblouku, tak impulzní proud částečně simuluje zkrat a při každém pulzu se odtaví kapka přídavného materiálu. Díky tomu je možné využívat bezzkratový přenos i při svařování tenkých plechů s použitím parametrů sprchového režimu. Největší vliv na svařování má frekvence pulzů. Pomocí frekvence lze regulovat množství odtaveného materiálu a také teplo vnesené do ZM. Při nižších frekvencích (do 100 Hz) je oblouk nestabilní má nepravidelný chod a zhasíná. Při vyšších frekvencích (okolo 150 Hz) je oblouk těsně nad hranicí zkratového přenosu, je krátký a vnáší do základního materiálu minimum tepla a tím pádem je tepelné ovlivněná oblast úzká. Díky těmto vlastnostem je tato frekvence ideální pro svařování hliníku. Při vysokých frekvencích (přes 500 Hz) je oblouk dlouhý a nestabilní a vnáší do svařence velké množství tepla, pro metodu MIG je takto vysoká frekvence nepřijatelná. Vzhledem k úzké TOO při zachování dobrého průvaru je tento způsob pro svařování hliníku ideální a svary zhotovené touto metodou jsou velice kvalitní. [1] [2] [9] [10] [12] [19]



Obrázek 12: Skutečný průběh impulzního svařovacího proudu. [19]

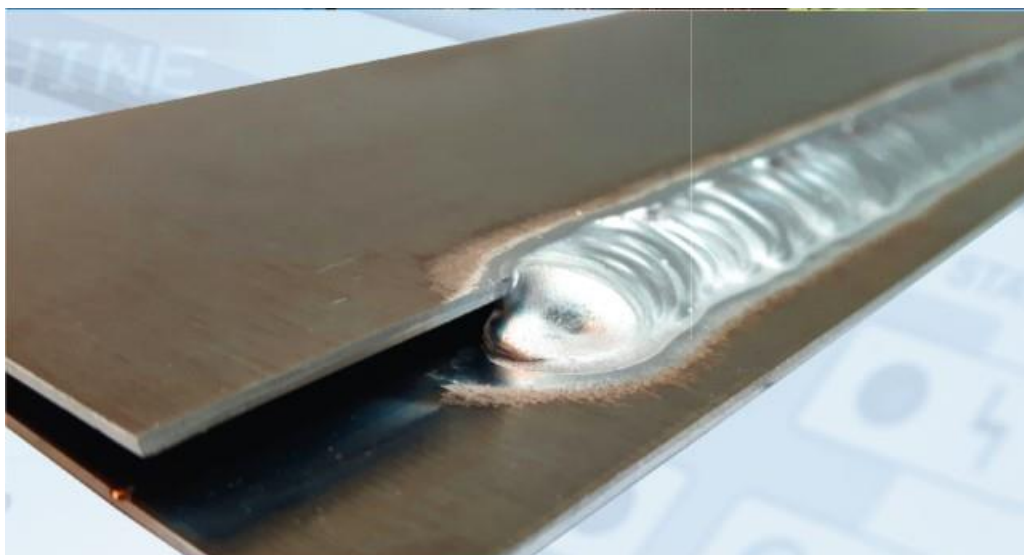
Použití stejnosměrného svařovacího proudu nepřímé polarity:

V případě využití stejnosměrného proudu se u metody MIG (MAG) využívá nepřímé polarity (DC+), kvůli dosažení čistícího účinku el. oblouku. Větší tepelné zatížení elektrody způsobuje její rychlejší natavování a tím i možnost použití nižšího svařovacího proudu a napětí k dosažení sprchového přenosu kovu. Nižší tepelné zatížení základního materiálu ale způsobuje jeho horší natavování a menší průvar, proto je nutné používat

naopak spíše vyšší svařovací proud, aby bylo dosaženo optimálního průvaru. Nastavení vyššího svařovacího proudu ale způsobuje rychlejší odtavování elektrody a větší tepelné zatížení hořáku. Je potom potřeba použít větší rychlost podávání svařovacího drátu a vyšší rychlosti svařování. Z těchto důvodů je pak obtížnější najít optimální nastavení zdroje pro dosažení co nejlepší kvality svarů. Menší tepelné zatížení základního materiálu v kombinaci s velkou tepelnou vodivostí hliníku také způsobuje rychlé chladnutí svarové lázně a TOO a tím zvýšené riziko vzniku větších deformací. V krajních případech, u tužších konstrukcí se sníženou možností deformace, mohou vznikat i trhliny. Tento způsob zapojení svařovacího zdroje lze použít pouze u svařování metodou MIG. Použití u metody TIG znemožňují výše uvedené skutečnosti. [1] [2] [10] [14]

Použití střídavého svařovacího proudu:

Standardní využití střídavého svařovacího proudu (AC) je popsáno v kapitole 7.1.1.3 a používá se při svařování metodou TIG. Ve snaze dosáhnout co nejvyšší kvality svarů a zároveň co nejvyšší svařovací rychlosti začaly některé firmy vyrábět svařovací zdroje pro MIG svařování, které využívají střídavého svařovacího proudu. Využití střídavého svařovacího proudu má několik výhod oproti zapojení DC+. Největší výhodou je možnost nastavení zdroje tak, aby docházelo k ideálnímu rozložení tepla v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu. Je to způsobeno velkými možnostmi nastavení různých parametrů svařovacího zdroje (proud přímé i nepřímé polarity, doba v oblasti nepřímé polarity, přesně definovaný průběh proudu). Díky tomu pak dochází k dostatečnému průvaru a zároveň TOO není příliš velká (tj. minimalizuje se teplo vnesené do svařence). Zároveň se tím minimalizuje tepelné zatížení hořáku oproti metodě MIG DC+. Dalšími výhodami jsou možnost svařovat materiály malých tlouštěk, schopnost překonávat poměrně velké mezery materiálu (viz obrázek 13), snížení rozstříku svarového kovu, snížení emisí svařovacího kouře a s tím spojené čistší svary, možnost zvýšení svařovací rychlosti a stabilní hoření oblouku. Svary zhotovené metodou MIG AC dosahují kvality jako u metody TIG a zároveň je zachována vysoká svařovací rychlost, kterou umožňuje metoda MIG.

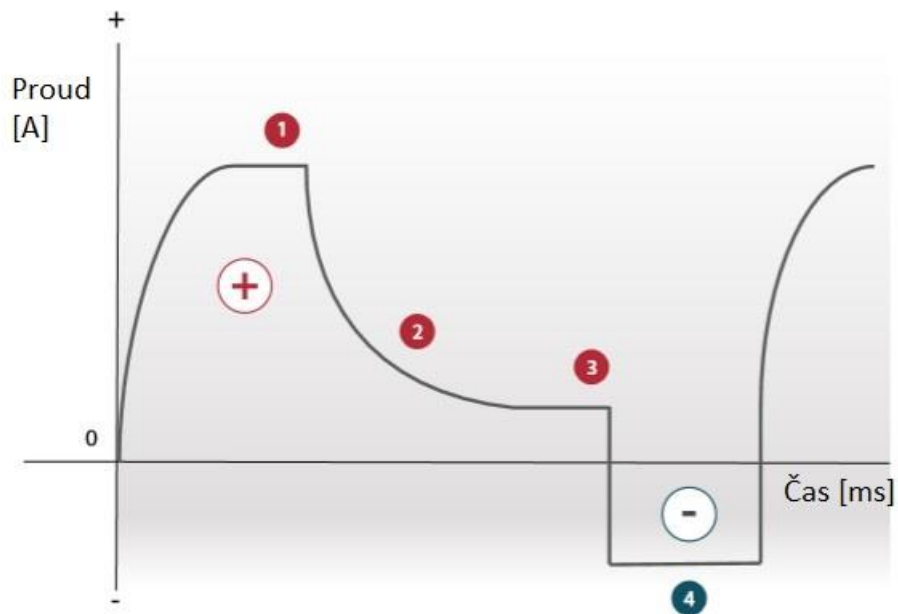


Obrázek 13: Překonání mezery mezi svařovanými plechy (tloušťka plechů 1,2 mm, velikost mezery 4 mm). [18]

Nejnovější svařovací zdroje fungují na principu pulsního řízení svařovacího proudu. Svařovací proud pak nemá klasický sinusový průběh. Při fázi odpovídající nepřímé polaritě zdroje (část označena + na obrázku 14) probíhá čistící efekt, zahřívá se PM, zatímco teplo vnesené do ZM je nízké. Pro natavení PM není potřeba vysokého proudu vzhledem k jeho průměru a pro dosažení čistícího efektu také není potřeba vysokého proudu. Proto je proud v této fázi poměrně nízký (řádově desítky A). Po přepnutí zdroje do fáze odpovídající přímé polaritě (impulz) dochází k natavování ZM. Proud v této fázi může dosahovat až několik set A v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu. Vysoký proud „přímé polarity“ rychle nataví ZM, a proto je TOO úzká. Pak zdroj opět „přepne polaritu“ a celý proces se opakuje. [17] [18]

Výše popsaný průběh má 4 základní fáze (viz obrázek 14). V oblasti „přímé polarity“ zdroje to jsou fáze impulsu (na obrázku 14 označeno číslicí „1“), při kterém dochází ke vzniku kapek PM, uvolňování kapek (2) a fáze základního proudu (3). V oblasti „přímé polarity“ také dochází k prohřívání ZM. V oblasti „nepřímé polarity“ zdroje je pak už jen jedna fáze (4) při níž probíhá čistící efekt a dochází k přehřívání drátu PM. Celý proces se dá snadno uzpůsobovat pro různé tloušťky svařovaných materiálů pomocí doby, kdy je zdroj v zapojení nepřímé polarity, protože v té fázi se do ZM vnáší minimum tepla. Proto se při svařování materiálů malých tloušťek tato doba prodlužuje, čímž se zmenšuje průvar. Naopak u materiálů větších tloušťek se tato doba zkracuje, aby se

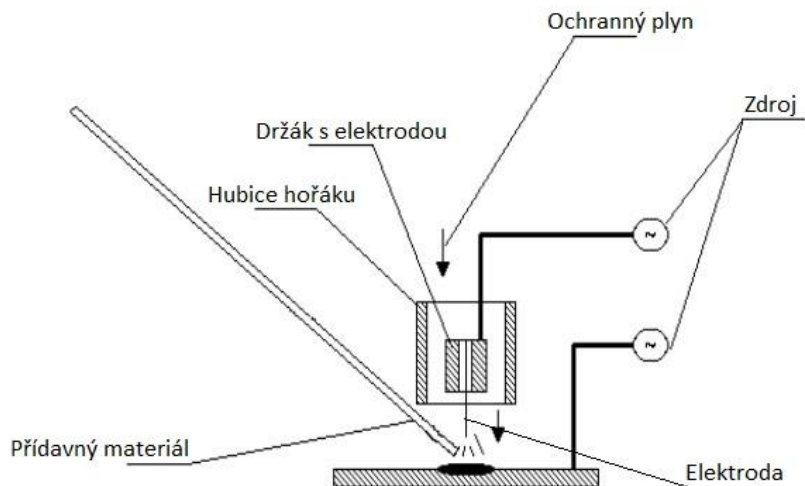
průvar zvětšil. Doba, kdy je zdroj v zapojení nepřímé polarity ale nesmí být moc krátká, protože by nedošlo k dostatečnému odstranění oxidické vrstvy a svarový spoj by ztrácel kvalitu. Díky možnosti ideálního nastavení vneseného tepla se při svařování materiálů malých tloušťek pak nestává, že by se svařovaný materiál propadal, nebo jinak deformoval. [17] [18]



Obrázek 14: Průběh svařovacího proudu v čase u metody MIG AC. [17]

7.1.1.3. Svařování netavící se elektrodou (TIG/WIG)

Zkratka metody TIG vychází z anglického Tungsten Inert Gas (případně se používá zkratka WIG z německého Wolfram Inert Gas) a značí svařování el. obloukem za použití wolframové netavící se elektrody v inertním ochranném plynu. Podle evropské normy EN ISO 4063 je tato metoda značena ISO 4063 – 141. Pomocí této metody svařování lze dosáhnout nejvyšší kvality svarů. Lze svařovat bez přídavného materiálu (142), nebo s přídavným materiálem (141) dodávaným do tavné lázně z vnějšku svářečem v podobě drátů, nebo v případě automatizovaného procesu pomocí automatického podavače. I přes možnost použití automatického podavače je ovšem tato metoda méně efektivní resp. produktivní než metoda MIG. Další výhodou, kromě kvality, je vzhled a pravidelný tvar svarů, proto se metoda TIG využívá při svařování výrobků resp. konstrukcí, u kterých je kladen důraz i na estetičnost.

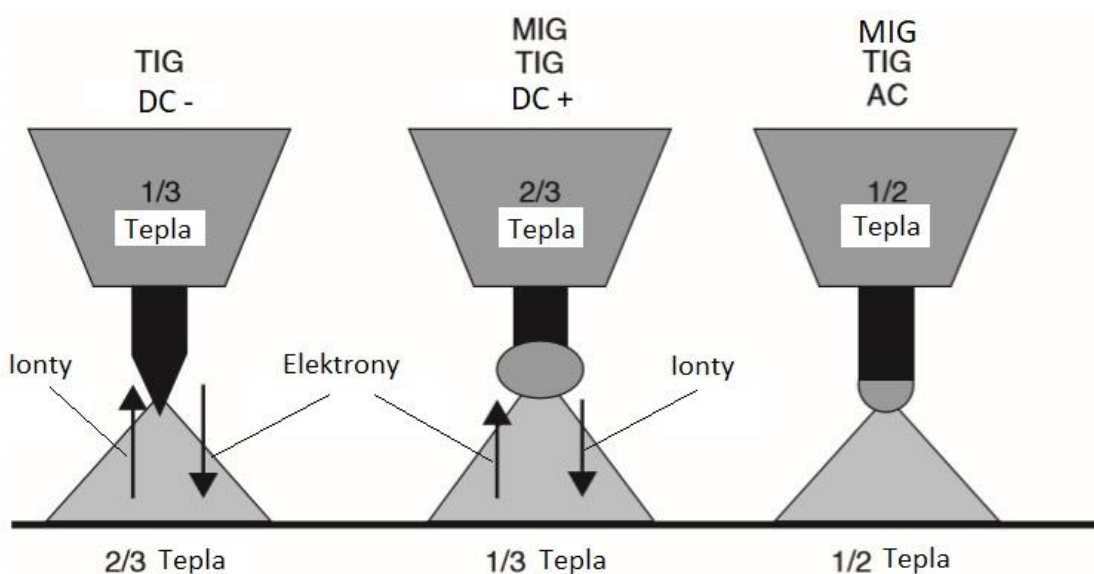


Obrázek 15: Schéma svařování metodou TIG. [2]

Ochranné plyny se používají podobně jako u metody MIG - inertní, a to argon, helium, nebo směs argonu s příměsí helia. Na netavící se elektrody se používá wolfram z důvodu jeho vysoké teploty tavení (3422 °C) a vysoké emisivity. Často se používá také wolfram legovaný malými obsahy oxidu zirkonu, nebo jiných prvků (např. lanthanu, céru, nebo dříve thoria apod.). Příměsí těchto prvků zlepšují zapalování el. oblouku, stabilizují oblouk a zvyšují živostnost elektrod. Průměry elektrod se pohybují od 1 do 6,4 mm v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu (nejčastěji ale 2-4 mm). Dráty přídavného materiálu mívají stejný (v případě použití automatického podavače) nebo větší (v případě ručního podávání) průměr než svařovací dráty pro metodu MIG. [1] [2] [14]

Při svařování Al a jeho slitin metodou TIG se standardně využívá střídavého svařovacího proudu (AC) na rozdíl od metody MIG, kde se využívá stejnosměrného proudu s nepřímou polaritou (DC+). U TIG svařování by při zapojení netavící se elektrody na kladný pól zdroje sice docházelo k ideálnímu čistícímu účinku, ale elektroda by byla příliš tepelně zatížena a docházelo by k jejímu natavování a také k nedostatečnému průvaru do ZM. Natavování elektrody by pak způsobovalo možnost vzniku nežádoucích vměstků ve svarovém kovu a nestabilní hoření oblouku. Na druhou stranu ideální zapojení z pohledu tepelného zatížení elektrody a zahřívání základního materiálu je využití přímé polarity stejnosměrného proudu, která ovšem neumožňuje využití čistícího efektu el. oblouku (využívá se pro svařování jiných materiálů např. ocelí, niku, mědi, titanu atd.), nelze tedy na Al a jeho slitiny použít. Proto se využívá střídavého proudu,

který přináší kompromis mezi odstraňováním oxidické vrstvy z povrchu svarových ploch a tepelným zatížením elektrody a teplem vneseným do ZM. I přes použití střídavého proudu je ale elektroda výrazně tepelně zatížena a dochází k natavování její špičky (viz obrázek 16), proto na rozdíl od svařování ocelí není tak důležité přesně nabrousit špičku elektrody (na jejím konci vzniká tzv. kalota). Ideální délka špičky elektrody by ale měla být dodržena vždy, a to přibližně dvojnásobek průměru elektrody. Natavení špičky elektrody také zvyšuje obtížnost svařování, protože svářeč musí dávat pozor, aby se nedotkl elektrodou tavné lázně, což by mohlo zapříčinit vnesení nežádoucích příměsí (wolframových vměstků z elektrody) do svarového kovu.



Obrázek 16: Rozložení teploty při různých způsobech zapojení - svařování elektrickým obloukem. [1]

Moderní svařovací zdroje pro metodu TIG pracují na principu přepínání polarity. Tento princip se využívá kvůli minimalizaci tepelného zatížení elektrody. Na počátku svařování je elektroda zapojena na kladný pól zdroje, probíhá čistící efekt, ale elektroda je výrazně tepelně zatížena. Při odstraňování oxidické vrstvy z povrchu svarových ploch dochází ke snižování odporu základního materiálu a tím k poklesu napětí oblouku. Pokud napětí klesne pod nastavenou mez, zdroj přepne polaritu. Elektroda je v této části procesu méně tepelně zatížena a dochází k lepšímu natavování základního materiálu. Nedochází ovšem k odstraňování oxidické vrstvy a tím roste napětí oblouku. Ve chvíli, kdy napětí překročí nastavenou mez, zdroj opět přepne polaritu a celý proces se opakuje. Díky tomu je možno dosáhnout maximální efektivity odstraňování oxidické

vrstvy a zároveň natavování základního materiálu a tím i zmenšení tepelně ovlivněné oblasti. Celý proces probíhá na frekvencích podobných jako střídavý proud, tedy přibližně 50 Hz. [1] [2] [9] [13]

7.1.2. Svařování obalenou elektrodou

Označení této metody podle normy je ISO 4063 – 111. Dnes se tato metoda ve výrobě konstrukcí z hliníkových slitin už používá velmi málo a využívá se především na menší opravy a údržbové práce. Výhodou je velikost svařovacího zdroje a pořizovací cena. Velkou výhodou této metody je, že bez jakýchkoli modifikací (kromě výměny obalené elektrody) lze svařovat skoro všechny svařitelné materiály. Nevýhodami jsou nízká efektivita a rychlost svařování a horší ochrana svarové lázně a s tím spojená horší kvalita svarů. TOO je při použití této metody větší, kvůli menší intenzitě svařovacího zdroje.

Obal elektrody plní několik funkcí. Při jeho tavení se uvolňují sloučeniny, které rozpouští oxidickou vrstvu na povrchu základního materiálu a zároveň vytváří strusku na povrchu svaru, která chrání svarový kov před působením okolní atmosféry. Struska musí být po vychladnutí z povrchu svaru odstraněna, protože by následně mohla negativně ovlivňovat korozní odolnost svaru. Problém nastává se skladováním elektrod. Je nutné je uchovávat na suchých místech s minimálním přístupem vzduchu, aby nenavlhaly, protože pak by se přes ně dostávaly do svarového kovu nežádoucí prvky (hlavně vodík). Vhodné je před svařováním elektrody vysušit v peci při teplotě, která bývá předepsána jejich výrobcem. Kvůli využití čistícího účinku svářecího proudu se elektroda zapojuje na kladný pól svářecího zdroje. Průměr elektrod se volí podle tloušťky základního materiálu, nejčastěji jsou o průměrech 2,5, 3,5 a 4 mm. [2] [9]

7.1.3. Svařování pod tavidlem

Tato metoda se označuje zkratkou SAW, která pochází z anglického Submerged Arc Welding (případně podle normy ISO 4063 – 12X, kde X značí číslici, která označuje použitou elektrodu) a el. oblouk při ní hoří pod vrstvou tavidla v podobě sypkého zrnitého materiálu. Díky tomu je svar po celou dobu svařování a chladnutí oddělený od okolního prostředí, takže je velmi dobře chráněn před naplyňováním a vniknutím jiných nežádoucích vměstků. Při tavení tavidla vzniká struska podobně jako u svařování

obalenou elektrodou. Tavidlo při svařování slitin hliníku také napomáhá odstraňování vrstvy oxidu z povrchu svarových ploch a vhodnou volbou tavidla lze také řídit chladnutí svarové lázně a tím ovlivňovat výslednou kvalitu svarů. Dalšími výhodami svařování pod tavidlem jsou velký výkon a ekologičnost, protože se do okolí neuvolňují žádné plyny. Přídavný materiál je do svarové lázně dodáván, podobně jako u metody MIG, automatickým podavačem v podobě svařovacích drátů případně plněných elektrod, nebo pásků v případě navařování. [1] [13]

Při svařování pod tavidlem nelze kontrolovat hoření oblouku ani svarovou lázeň v průběhu svařování, a proto je ruční svařování touto metodou prakticky nemožné. Využívá se proto svařovacích automatů (plně automatizovaný proces), které při správně nastavených parametrech zhotovují svary nejvyšší kvality, ale jejich cena je mnohonásobně vyšší, než u svařovacích zdrojů pro svařování metodami MIG a TIG. Zároveň vzhledem k vlastnostem tavidla (sytký zrnitý materiál) lze svařovat pouze ve vodorovné nebo v mírně nakloněné poloze, takže je metoda SAW vhodná pro svařování velkých tlouštěk a dlouhých, tvarově jednoduchých součástí. Svařování tvarově složitějších součástí je touto metodou prakticky nemožné a svařovat lze pouze v základních polohách. [13]

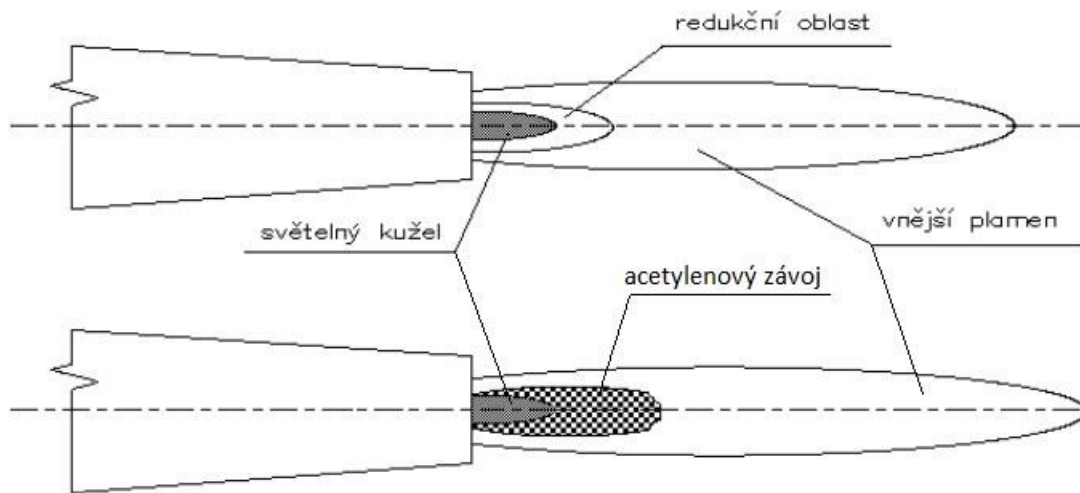
7.2. Další metody svařování

U těchto metod svařování jsou využívány jiné zdroje tepla, než je elektrický oblouk.

7.2.1. Svařování plamenem

Tato metoda se dnes již v průmyslové výrobě nepožívá, protože má malou efektivitu a kvalita zhotovených svarů je horší v porovnání s jinými metodami. Její normalizované označení je ISO 4063 – 311. Při svařování plamenem je zdroj tepla málo intenzivní a vzhledem k velké tepelné vodivosti hliníku může docházet k nedostatečnému natavení svarových ploch. Dalším problémem je použití kyslíko-acetylénového plamene, jehož použití je nutné kvůli vysoké teplotě (cca 3200 °C), ale způsobuje rychlejší oxidaci svařovaných ploch, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.1. Proto se používá mírně redukční plamen (viz obrázek 17), který má přebytek acetylénu.

Z těchto důvodů se hliník svařuje plamenem pouze v malých dílnách při opravách, kde použití jiné metody není možné kvůli finanční náročnosti.



Obrázek 17: Neutrální plamen (nahore) vhodný pro svařování ocelí a redukční plamen (dole).

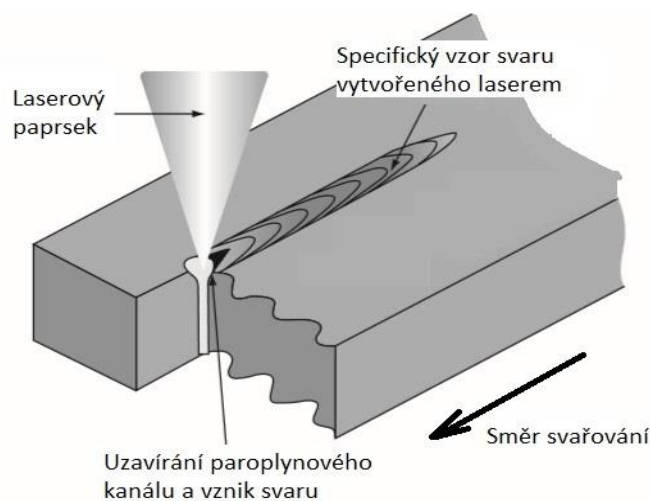
[2]

Svařuje se většinou s použitím přídavného materiálu, bez přídavného materiálu lze svařovat tupé a lemové spoje plechů malých tlouštěk. Přídavný materiál v podobě drátů je do svarové lázně podáván ručně. K odstraňování oxidu hlinitého v průběhu svařování je nutné použít vhodné tavidlo. Tavidlo musí dokonale smáčet povrch součásti a zároveň se nesmí při jeho odpařování tvořit velké množství zdraví škodlivých látek. Zbytky tavidla musí být po svařování dokonale odstraněny, jinak hrozí zkorodování součásti v oblasti svaru. [2] [3]

7.2.2. Svařování laserovým paprskem

Normalizované značení této metody je ISO 4063 – 52X, kde X je číslice, která upřesňuje druh laseru. Při svařování laserem se využívá velmi malé stopy dopadu laserového paprsku. Laserový paprsek má velkou hustotu energie (viz obrázek 19), takže při průchodu skrz svařované součásti, které jsou umístěny velice blízko u sebe, se svařovaný materiál prakticky okamžitě začne odpařovat. Vytvoří se paroplynový kanál s taveninou vyskytující se pouze na okraji tohoto kanálu. Pokud se paprsek pohybuje dostatečně rychle ve směru svařování, tak v kombinaci s malou šířkou kanálu a za působení sil povrchového napětí dojde k uzavření kanálu a vzniku svaru (viz obrázek 18).

Tento proces se nazývá „keyholing“ a lze ho využívat pouze do určité tloušťky svařovaného materiálu. Při svařování hliníku a jeho slitin ovšem nastává řada problémů spojených s vlastnostmi hliníku, jako jsou nízká teplota varu (která ale napomáhá stabilizovat proces keyholing), vysoká tepelná vodivost a špatná reakce laserového paprsku se základním materiálem (vysoká odrazivost hliníku). Tyto problémy jsou v dnešní době již vyřešeny a svařování hliníkových slitin laserovým paprskem se využívá v mnoha odvětvích průmyslu. [1]



Obrázek 18: Princip svařování laserem. [1]

Laserový paprsek je proud fotonů a podle způsobu jejich vzniku rozeznáváme několik typů laserů. Mezi ty nejpoužívanější patří plynový CO₂ laser a pevnolátkové lasery (tzv. solid state laser). CO₂ laser funguje na principu vzniku laserového záření v trubici naplněné směsí plynů (CO₂, N₂, H₂ atd.), který je vybuzený el. výbojem, aktivní prostředí je tedy u těchto laserů plynné. U pevnolátkových laserů dochází k emisi záření z pevné, nebo amorfni látky (např. rubín, nebo speciální sklo a keramika). Příkladem často používaného pevnolátkového laseru je Nd-YAG laser, kdy je aktivní prostředí tvořeno krystalem z ytrito-hlinitého granátu (YAG). [1]

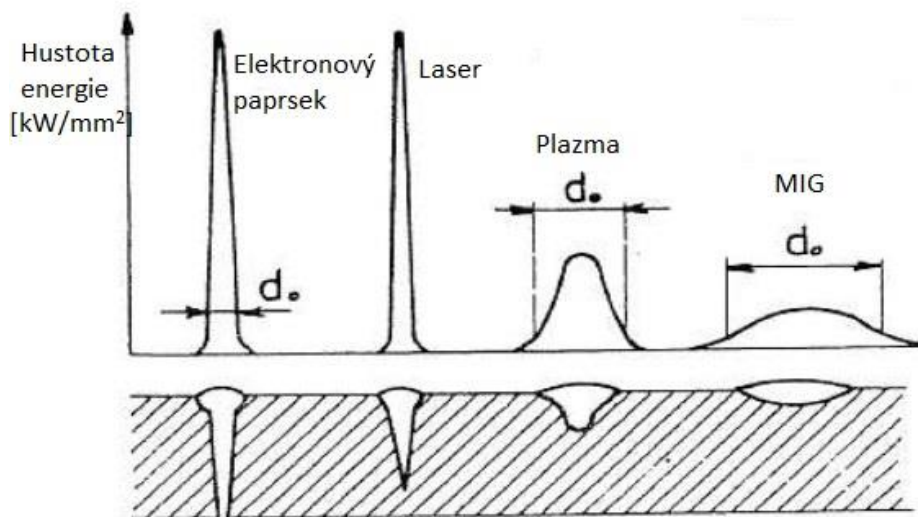
Vzhledem k vyšší intenzitě tepla nelze laser využívat pro svařování větších tlouštěk, protože by docházelo k odpařování většího množství základního materiálu. Oproti tomu je ale jeho využití ideální pro svařování tenkých plechů, čehož se využívá hlavně v dopravním průmyslu. Při svařování tenkých plechů se odpařuje malé množství

materiálu ze svarových ploch a vytváří se tak ideální tloušťka mezery mezi svařovanými plechy. Díky vysoké intenzitě laseru lze dosáhnout vysokých rychlostí svařování (až 6 m/min v závislosti na výkonu laseru). Kromě svařování se laser využívá také k řezání materiálů různých tloušťek s tím, že u hliníku je tloušťka řezaného materiálu opět značně omezena jeho vlastnostmi. Lasery s menším výkonem se pak používají například při popisování, nebo mikroobrábění. [1]

7.2.3. Svařování elektronovým svazkem

Normalizované značení této metody je ISO 4063 – 51X, kde X je číslice upřesňující prostředí, ve kterém svařovací proces probíhá. Tato metoda využívá přeměnu kinetické energie urychlených elektronů (až na rychlosti 0,3 - 0,7 rychlosti světla) na teplo. Svazek elektronů je velmi tenký, a proto je energie soustředěna na velmi malou plochu a dosahuje se tak velmi vysoké hustoty energie. To má za následek okamžité tavení materiálu v místě, kam elektrony dopadají. Elektrony jsou urychlovány v elektronovém děle, které se skládá z emitoru elektronů (rozžhavené vlákno z wolframu nebo tantalu) a optiky, která elektrony soustřeďuje do velmi úzkého paprsku. Elektrony jsou urychlovány pomocí napětí mezi katodou a anodou v prostředí vakua, kde jako katoda slouží vlákno emitující elektrony. V jiném prostředí než ve vakuu elektrony urychlovat nelze, protože by kolidovali s částicemi okolního prostředí. Proto lze touto metodou svařovat pouze součásti s omezenými rozměry, v závislosti na velikosti vakuové komory.

Využití elektronového svazku je, podobné jako u laseru. Pro svařování slitin hliníku je omezeno vlastnostmi těchto slitin. Ideální je opět pro svařování plechů menších tloušťek. Výhoda oproti laseru je, že není problém s interakcí svazku elektronů se základním materiálem. Pořizovací cena zařízení pro svařování elektronovým svazkem je ale výrazně vyšší právě z důvodu nutnosti svařování ve vakuu. [1] [20]

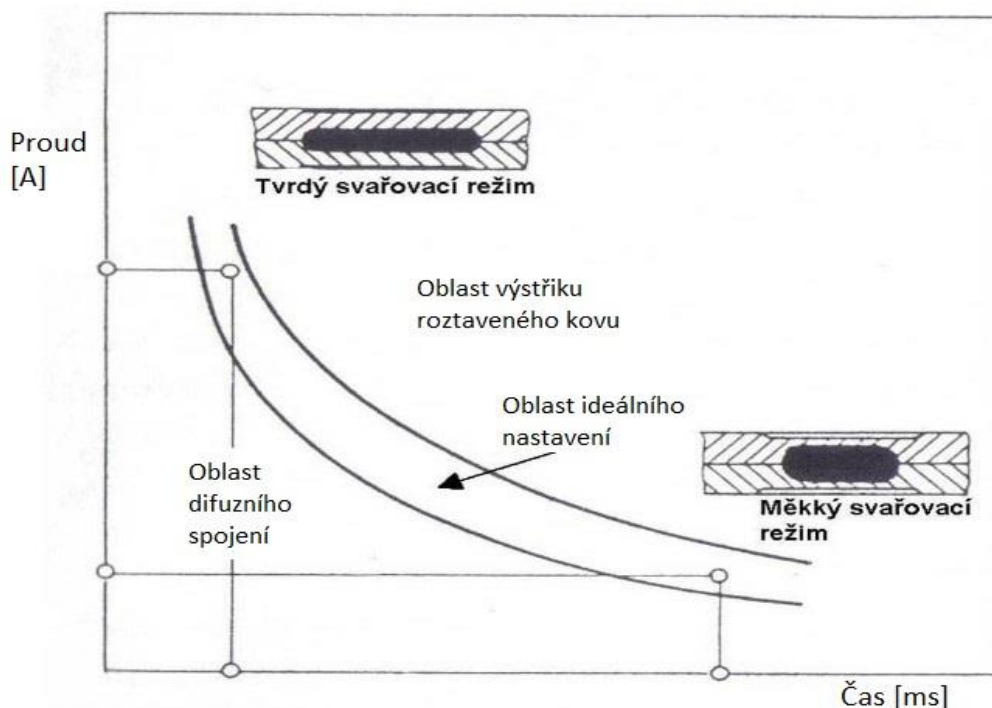


Obrázek 19: Srovnání hustoty energie vybraných metod svařování. [20]

7.2.4. Odporové svařování

Tato metoda svařování se využívá ke spojování tenkých plechů nejčastěji v automobilovém a obecně dopravním průmyslu. Odporové svařování lze rozdělit na několik druhů. Nejčastější jsou svary bodové a švové s tím, že princip svařování je u všech druhů stejný. Odporové svařování je založeno na přeměně elektrické energie na teplo, průchodem el. proudu přes materiál, které následně v místě spoje natavuje svařovaný materiál. Svařovací zdroj je připojen na 2 elektrody (u bodového svařování mají tvar komolých kuželů a u švového svařování tvar kotoučů), mezi elektrody je umístěn svařovaný materiál většinou v podobě přeplátovaných plechů, který je následně elektrodami stlačen k sobě. Při průchodu proudu elektrodami vzniká v jednotlivých dílech teplo. Největší teplota je dosažena v místě s největším elektrickým odporem, což je právě přechod mezi dvěma svařovanými plechy, kde dojde ke svaření spojovaných dílů. [21] [22]

U odporového svařování se rozlišují 2 režimy svařování (z hlediska nastavení svařovacích parametrů): tvrdý a měkký. Tvrdý režim využívá velké přitlačné síly a vysoké hodnoty el. proudu a kratší čas, zatímco měkký režim je charakterizován nižší přitlačnou silou a svařovacím proudem, ale delší dobou svařování (viz obrázek 20). Pro svařování hliníku se využívá pouze tvrdého režimu, protože při využití měkkého režimu by nenastal dostatečný průvar a TOO by byla široká, kvůli velké tepelné vodivosti hliníku.



Obrázek 20: Svařovací režimy při odporovém svařování. [22]

Odporové svařování se používá ke svařování plechů s tím, že bodové svary většinou nebývají nosné, ale plní pouze funkci určení polohy dílů vůči sobě. V automobilovém průmyslu, při svařování karoserií, tomu tak ale není a bodové svary tam plní i nosnou funkci. Pro elektrody jsou vhodné materiály s dobrou elektrickou vodivostí, které jsou zároveň dostatečně tvrdé a pevné, a proto se využívají převážně slitiny mědi. Metodu lze mechanizovat, nebo robotizovat pro zrychlení a zpřesnění výroby, a proto se často využívá v automobilovém průmyslu. [21] [22]

8. Kontrola kvality svarových spojů

Z důvodu bezpečnosti a ověření požadované kvality svarového spoje je nutné svary kontrolovat. Zkoušky svarových spojů se rozdělují na destruktivní, při nichž dochází k rozlomení, rozříznutí, nebo jinému mechanickému poškození svaru za účelem zjištění určitých mechanických vlastností (pevnost, houževnatost, tvrdost atd) a nedestruktivní, při kterých nedochází k poškození svarů, takže je možné dané součásti nebo vzorky po zkoušce normálně využívat k jejich původnímu účelu. Nedestruktivními zkouškami se zjišťují tzv. charakteristiky necelistvosti svaru, většinou se jedná o povrchové a mírně podpovrchové vady jako jsou trhliny, nehomogenity a bubliny plynů (póry) nebo o vady

vnitřní. Pro zjištění nehomogenit svarů, nebo vnitřních vad je možno provést metalografické zkoušky, které se řadí mezi zkoušky destruktivní.

8.1. Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky se využívají ke zjištění různých vad svarů, povrchových i vnitřních. Většinou nedávají informace o mechanických vlastnostech svarového spoje, alespoň ne přímo. Výhodou těchto zkoušek je, že svarový spoj se při jejich průběhu nijak nepoškodí a svařovaná součást se po provedení zkoušky může normálně využívat, pokud jsou výsledky zkoušky dostatečně dobré a splňují předepsanou normu.

Nedestruktivní zkoušky lze rozdělit na zkoušky, kterými lze odhalit povrchové vady a pak na takové, kterými lze zjistit vady vnitřní.

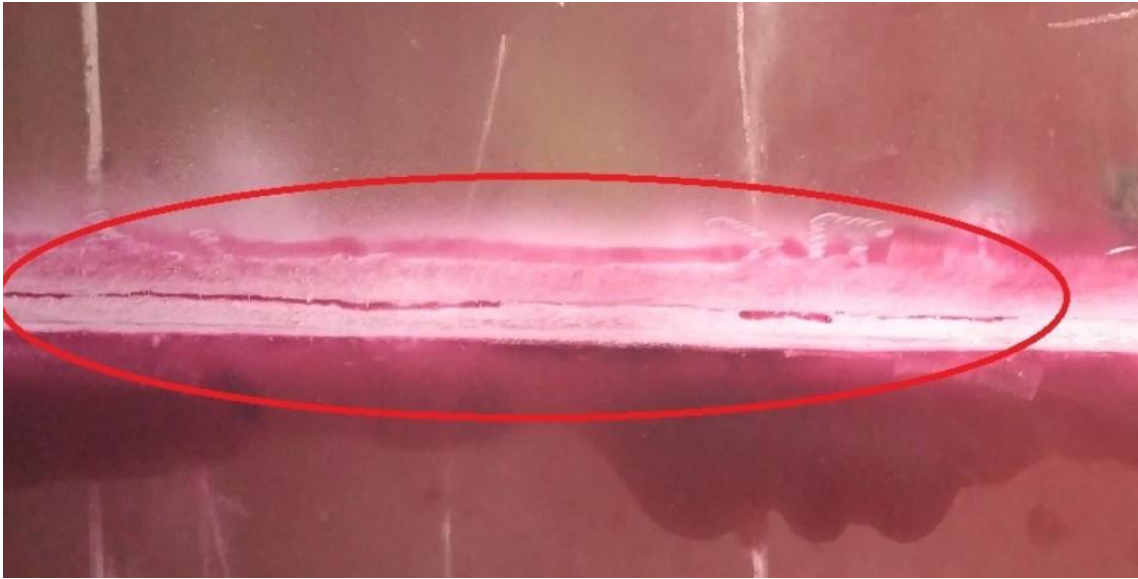
8.1.1. Vizualní zkouška

Pro zjištění velkých povrchových vad, které jsou nepřijatelné, se provádí vizualní kontrola. Jde o prohlédnutí svaru (většinou svářečem), přičemž k vizualní zkoušce lze zařadit i kontrola rozměrů svarů, která se provádí buď posuvným měřítkem, nebo pomocí speciálních měrek. Tato kontrola se zařazuje vždy kvůli její nízké náročnosti a ceně, pro lepší kontrolu se pak zařazují další zkoušky, kterými lze případně indikovat vady s větší citlivostí nebo i vady vnitřní.

8.1.2. Kapilární zkouška

Přesnější zkouška, kterou lze zjistit i menší velikosti povrchových vad je kapilární zkouška. Touto zkouškou lze indikovat mikroskopické trhliny a jiné vady na povrchu svaru. Její princip spočívá v nanesení speciální detekční látky (penetrantu) na povrch svaru, ten zateče do povrchových vad a zbytek (=přebytečné množství) se z povrchu součásti odstraní. Poté se na povrch svaru nanese látka, která indikuje ložiska penetrantu zateklého ve vadách (tzv. vývojka). Penetrant se používá v různých barvách a vývojka je většinou bílá, aby kontrastovala s barevným penetrantem. Vývojka s penetrantem chemicky reaguje, vyvolává kapilární efekt a díky tomu pak penetrant vyzlíná na povrch svaru. Barevný penetrant je v bílé vývojce dobře viditelný a díky tomu lze určit, v jakých místech jsou případné vady (viz obrázek 21). Další metoda pro zjišťování povrchových (a také mírně podpovrchových) vad je magnetické prášková

metoda, ale ta funguje pouze na feromagnetické materiály, takže pro zkoušení hliníku a jeho slitin ji nelze použít. [25] [27]



Obrázek 21: Trhliny odhalené pomocí kapilární zkoušky. [27]

8.1.3. Ultrazvuková zkouška

Jednou z nejpoužívanějších metod pro zjišťování vnitřních vad je ultrazvuková zkouška. Ultrazvuk jsou v podstatě mechanické kmity částic prostředí, jejichž frekvence jsou vyšší než 20 kHz (hranice vnímání lidského ucha). UT zkouška funguje na principu průchodu ultrazvukového signálu zkoušeným materiálem (svarovým kovem). Ultrazvukový signál se odráží od rozhraní dvou různých prostředí, v tomto případě svarového kovu a vnitřní vady (póry, praskliny atd.), vrací se zpět a je zaznamenáván jako rušení signálu kvůli různé době průchodu odraženého signálu. Podle rušení signálu se vyhodnocuje četnost vnitřních vad. Ultrazvukem lze indikovat pouze vady, které jsou větší, než je vlnová délka použitého ultrazvukového vlnění. [25]

8.1.4. Zkouška prozářením

Další velmi často používanou zkouškou pro detekci vnitřních vad je zkouška prozářením. Její princip je od ultrazvukové metody odlišný tím, že se používá ionizační záření a nezaznamenává se odraz záření, ale po průchodu záření zkoušenou součástí se zaznamenává jeho absorbování zkoušeným materiálem. Ionizačního záření je absorbováno zkoušeným materiálem a v místech vnitřních vad je záření absorbováno méně (v případě nehomogenit může být absorbováno i více). Absorbování záření

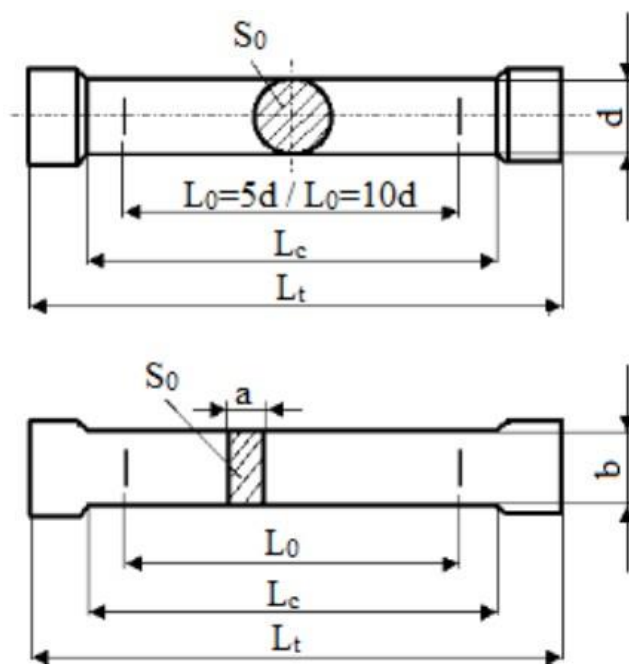
materiálem lze zaznamenat vhodným detektorem. Místa výskytu vad se pak zobrazují na obrazovce rozdílným zbarvením – např. tmavší barvou, která značí větší energii prošlého záření, protože ho bylo méně absorbováno díky vnitřní vadě. Jako zdroje záření se většinou používají rentgenové lampy, případně lineární urychlovače a detekci pak zajišťuje radiografický film, na který záření prošlé svarem dopadá. Případně lze také využít záření radioizotopů (např. iridium, selen) a ke snímání také speciální detektory, které záznam přímo zdigitalizují. [25]

8.2. Destruktivní zkoušky

Hlavním účelem destruktivních zkoušek je zjištění mechanických vlastností svarového spoje. Některé zkoušky se pak využívají ke zjištění strukturních vlastností svarového kovu (metalografické zkoušky). V takovém případě se svarem provede příčný řez, svarový kov se vybrousí a vyleští a následně lze jeho strukturu zkoumat pod mikroskopem. Tímto způsobem lze také kontrolovat mikrotrhliny a nežádoucí vměstky ve svarovém kovu nebo posuzovat geometrii svarového spoje a jeho tepelné ovlivnění.

8.2.1. Tahová zkouška

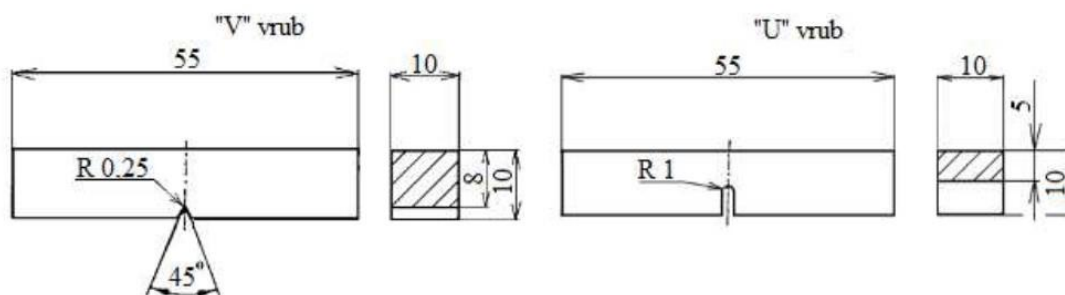
Nejčastější destruktivní zkouškou svarů je zkouška tahová, která je zkouškou statickou a zjišťuje pevnostní vlastnosti a vlastnosti plasticity. Provádí se podle normy ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Příčná zkouška tahem.* na trhacím stroji a jejím výstupem je diagram závislosti prodloužení zkušební tyče na působícím napětí (síle). Z tohoto diagramu následně odečítáme hodnoty meze kluzu (R_e), meze pevnosti (R_m), tažnosti (A), kontrakce (Z) a případně pak smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$). Normalizované zkušební tyče jsou buď kruhového, nebo obdélníkového průřezu (viz obrázek 22). Rozlišujeme příčnou zkoušku tahem, kdy je zkušební tyč vytvořena ze vzorku tak, aby osa svaru byla kolmá na osu zkušební tyče a ležela v jejím středu. Další možností je podélná zkouška tahem, kdy je osa svaru totožná s osou zkušební tyče, takže celá zkušební tyč je pouze ze svarového kovu. [23] [24]



Obrázek 22: Kontrolní vzorky pro zkoušku tahem. [ČSN EN ISO 4136]

8.2.2. Zkouška rázem v ohybu

Další často používanou zkouškou je zkouška rázem v ohybu, při níž získáme informace o vrubové houževnatosti svarů. Zkouška podléhá normě ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška rázem v ohybu – umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení.* Jedná se o dynamickou zkoušku. Provádí se na stroji zvaném Charpyho kladivo a je závislá na teplotě vzorku a na rychlosti deformace. Při zkoušce dojde ke zlomení vzorku, který má přesně definovanou geometrii (viz obrázek 23), přičemž měříme nárazovou práci, ze které následně počítáme vrubovou houževnatost. Vzorky lze vytvářet z různých částí svaru (střed, okraje, TOO) podle toho, v jakém místě vrubovou houževnatost zkoumáme. U slitin hliníku se tato zkouška ale nepoužívá, protože tyto slitiny nevykazují tranzitní chování (viz. kapitola 2). [23]



Obrázek 23: Zkušební vzorky pro zkoušku rázem v ohybu. [ČSN EN ISO 9016]

8.2.3. Zkouška tvrdosti

Další destruktivní zkoušky svarových spojů jsou například zkouška tvrdosti. Existuje několik různých typů zkoušek měření tvrdosti: vnikací, vrypové, odrazové a kyvadlové. Pro zkoušení svarových spojů jsou nejčastěji používány zkoušky vnikací, které lze provádět různými způsoby (podle Rockwella, Vickerse – nepoužívanější pro zkoušení svarových spojů, Brinella). Jejich základní princip je podobný a to, že se zkušební těleso (indentor) zatlačuje předepsanou silou do vzorku a následně se měří různé parametry vtisku podle způsobu zkoušení. Další rozdíl mezi jednotlivými zkouškami je ve tvaru zkušebního tělesa (Rockwell-kužel, nebo kulička, Vickers-čtyřboký jehlan, Brinell-kulička). Zkoušky se provádí podle doporučení normy ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním a měří se průběh tvrdosti v celém průřezu svarového spoje.* [23]

8.2.4. Další destruktivní zkoušky svarů

Dále lze svary zkoušet zkouškou ohybem (dříve nazývanou zkouška lámavosti), což je statická zkouška, při které se zkouší plastické vlastnosti svarů a je často používaná a předepisovaná právě pro svary z hliníku a jeho slitin. Jednou z posledních možností je zkouška rozlomením. Je to nejjednodušší zkouška pro zjištění rozmístění vnitřních vad jako jsou trhliny, dutiny, neprůvary, vměstky, studené spoje, atd a využívá se převážně pro kontrolování svářečů. Princip zkoušky spočívá v rozlomení dílu ve svarovém kovu. Z plochy lomu lze následně zjistit vnitřní vady. [23]

Svary se zkouší podle podmínek, při kterých jsou následně svařované součásti využívány. Není nutné dělat pro všechny díly všechny zkoušky, u některých méně namáhaných součástí, nebo u součástí, na které nejsou kladeny velké nároky na jakost svarových spojů, je možné zařadit pouze zkoušku tahovou, která dává dostatek dat pro zjištění, zda je svarový spoj vyhovující pro danou aplikaci.

Pro kvalifikaci postupu svařování se využívá normy ČSN EN ISO 15614-2-*Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 2: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin*, která předepisuje potřebné typy zkoušek a jejich rozsah. [23]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. Popis experimentu

Experiment se skládal z několika částí: nalezení ideálních svařovacích parametrů, svaření vzorků, nedestruktivní zkoušení svarů (vizuální kontrola a kapilární zkouška) a destruktivní zkoušení svarů (metalografická zkouška a zkouška tvrdosti).

Základem experimentu bylo svaření vzorků metodami MIG DC+ a MIG AC a jejich následné srovnání. Na zkušební vzorky byla vybrána slitina typu Al-Mg, konkrétně nevytvrditelná slitina EN AW 5754 (chemické složení a mechanické vlastnosti viz tabulka 2). Tento materiál byl vybrán z důvodu jeho dobré svařitelnosti, takže výsledky zkoušek budou tímto faktorem ovlivněny pouze minimálně. Rozměry plechů ZM byly 150x100x2 mm s tím, že plechy byly k sobě přivařovány delšími stranami (tj. 150 mm) tupým I svarem. Svarové plochy byly připraveny stříháním a následným ohrotováním. Před svařováním byly vzorky kartáčovány kartáčem z korozi vzdorné oceli a odmaštěny lihem. Přídavný materiál v podobě drátu o průměru 1,2 mm byl zvolen z doporučených přídavných materiálů pro vybraný ZM (chemické složení a mechanické vlastnosti viz tabulka 2) a měl označení OK Autrod 5087. Počáteční vysunutí drátu PM z hořáku bylo 12 mm.

Tabulka 2: Chemické složení a mechanické vlastnosti ZM a PM. [28-29]

	Materiál	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]	Tvrдость [HBW]
ZM	AlMg3	190-240	80	16-17	50
PM	AlMg5Cr	280	130	-	-

Použitý svařovací zdroj byl od firmy Elmatech, konkrétně typ MIDI MIG 300 (viz obrázek 24). Jeho technické parametry jsou uvedeny v tabulce 3. Pro zajištění stálého sklonu hořáku, jeho vzdálenosti od ZM a neměnné rychlosti svařování byl použit svařovací vozík Weldycar NV (viz obrázek 24) s rozpětím pojezdové rychlosti 5-70 cm/min. Pro vlastní svařování byl použit upínací přípravek pro tupé svary (viz obrázek 24 vpravo).

Tabulka 3: Technické parametry svařovacího zdroje Elmatech MIDI MIG 300. [18]

Možnosti svařování	Max. svařovací proud [A]	Max. svařovací napětí [V]	Max. rozměry [mm]	Max. hmotnost [kg]
AC/DC	300	29	935x325x700	78

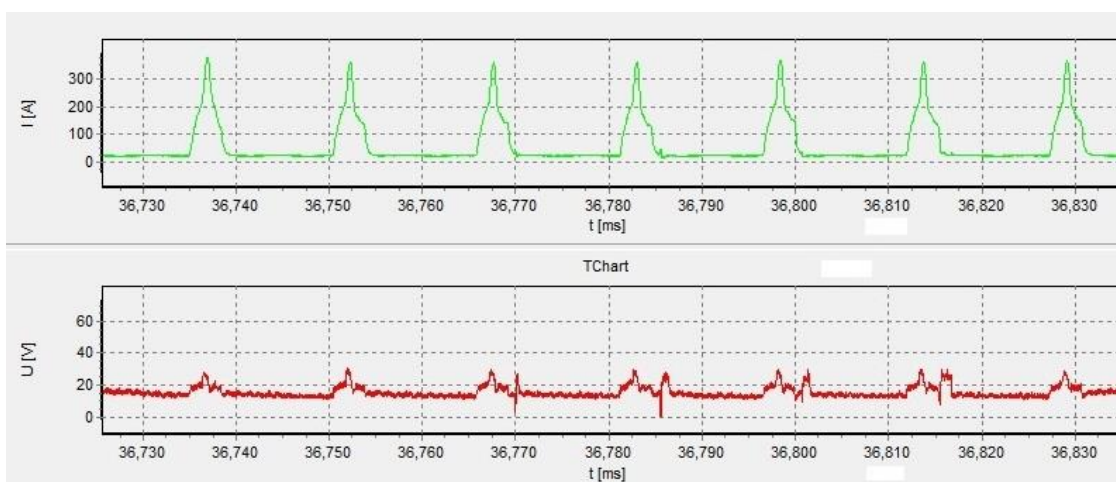


Obrázek 24: Svařovací zdroj Elmatech MIDI MIG (vlevo) a manipulátor Weldycar NV (vpravo).

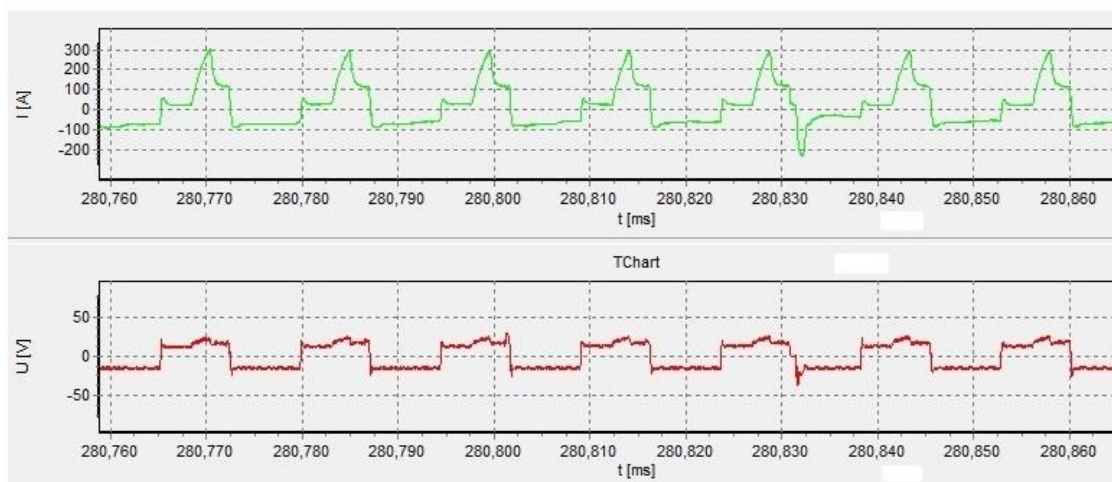
Před samotným zkoušením a vyhodnocováním vzorků bylo nutné nalézt ideální svařovací parametry pro obě metody. Po svaření několika vzorků byly vybrány ty, které byly podle vizuální kontroly nejkvalitnější a na těchto vzorcích byly následně prováděny další zkoušky. Nalezené svařovací parametry pro obě metody jsou uvedeny v tabulce 4. Hodnoty uvedené v tabulce jsou hodnoty zobrazované na displeji synergického svařovacího zdroje a vzhledem k systému řízení se jedná o hodnotu XXX. Proto byly během svařování monitorovány a zaznamenávány průběhy proudu a napětí (viz obrázky 25 a 26) pomocí systému Weldmonitor 4.5, které přesnou lepší představu o průběhu svařovacích parametrů.

Tabulka 4: Nalezené svařovací parametry.

Metoda	Proud [A]	Napětí [V]	Posuv PM [mm/s]	Svařovací rychlost [cm/min]
MIG DC+	40	16	3,6	40
MIG AC	73	18	3,8	50



Obrázek 25: Průběhy proudu a napětí při svařování metodou MIG DC+.



Obrázek 26: Průběhy proudu a napětí při svařování metodou MIG AC.

Na obrázku 26 jsou dobře vidět jednotlivé fáze svařovacího proudu. Fáze „nepřímé polarity“ (dosahující hodnoty -90 A a trvající 0,008 ms), fáze základního proudu (dosahující hodnot okolo 30 A a trvající 0,0025 ms), potom fáze impulzu, při které je dosaženo maximální hodnoty proudu 300 A, a poslední fáze uvolňování kapek přídavného materiálu (tato fáze trvá přibližně 0,002 ms a proud během této doby klesá a poté přechází do oblasti „nepřímé polarity“).

2. Vizuální kontrola

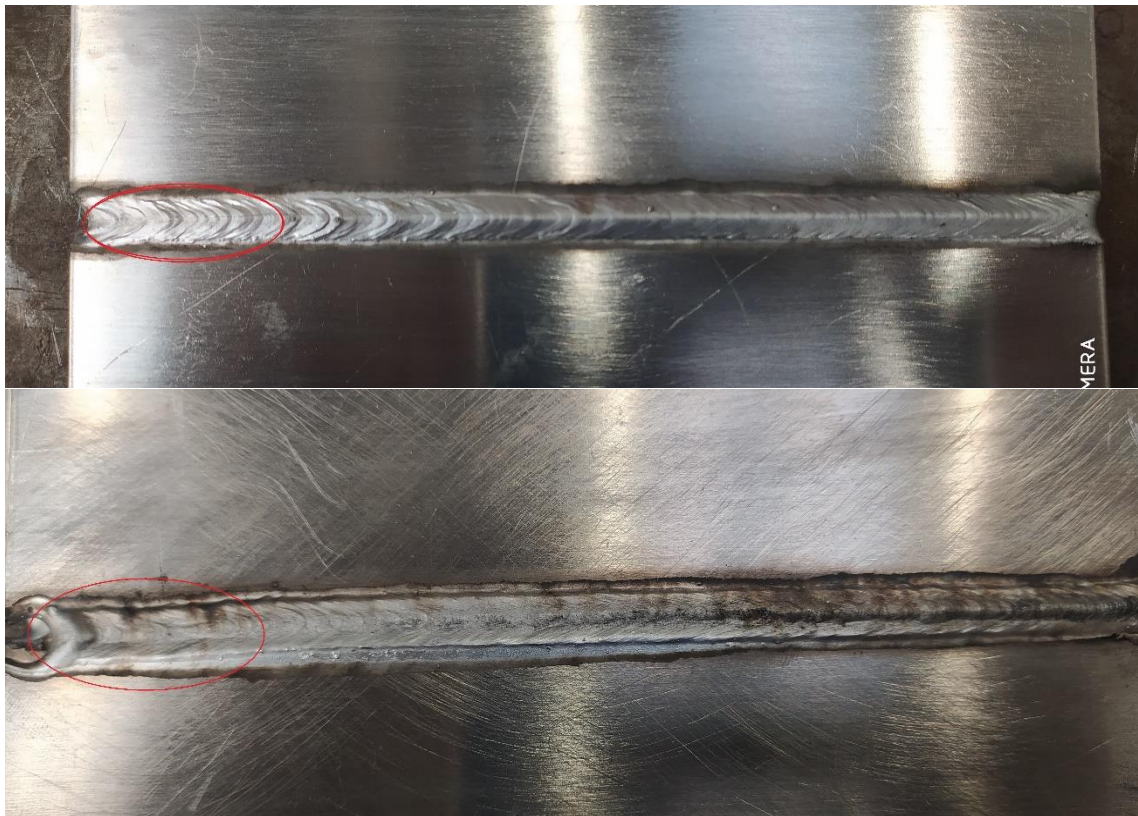
První zkouškou, pro srovnání obou výše uvedených metod, byla vizuální kontrola. Vzhledem k velmi dobré svařitelnosti vybraného materiálu a podmínkám, při kterých experiment probíhal (délka svarových ploch 15 cm, bez použití předehřevu a s použitím upínacích prostředků snižujících velikost vzniklých deformací – viz obrázek 24), se vizuální kontrolou vyhodnocoval především vzhled povrchové kresby svarové housenky, její pravidelnost, výskyt případných povrchových vad, a hlavně provaření materiálu a s ním spojené teplo vnesené do svarového spoje. Začátky a konce svarů nebyly vyhodnocovány při žádné z provedených zkoušek, protože vzorky byly vytvářeny bez náběhových a výběhových desek, a proto je obzvláště při malé tloušťce ZM (2 mm v našem případě) značně obtížné zhotovit stejně kvalitně, jako zbytek svaru. Proto se v praxi používá náběhových a výběhových desek, takže začátek a konec svarů nejsou na svařované součásti.

První rozdíl mezi porovnávanými metodami byl vidět ihned po svaření vzorků. Tímto rozdílem je menší zčernání v okolí svarové housenky při použití metody MIG AC, jak lze vidět z obrázku 27. Toto zčernání je snadno odstranitelné očištěním.



Obrázek 27: Svařené vzorky těsně po svaření, MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole).

Dalším značným rozdílem bylo, jak je již zmíněno výše, množství tepla vneseného do svarového spoje. Už výsledky vizuální kontroly potvrdily předpoklad, že při svařování metodou MIG AC je tepelné zatížení svařované součásti menší. Na začátku svaru není rozdíl skoro patrný, ale na konci (přestože svar měl délku pouze 15 cm) je u svaru zhotoveného metodou MIG DC+ patrné propadání svarového kovu způsobené vyšším tepelným zatížením (viz obrázek 28). Další známkou většího množství vneseného tepla je šířka kořene, která byla u vzorku svařeného metodou MIG DC+ výrazně větší (3 mm u metoda MIG AC a 4 mm u metody MIG DC+ - viz obrázek 29). Tento rozdíl je částečně ovlivněn rozdílnou rychlostí svařování, vyšší rychlost svařování u metody MIG DC+ ale nedávala dobré výsledky svarového spoje.



Obrázek 28: Označený konec svaru svařeného metodou MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole).

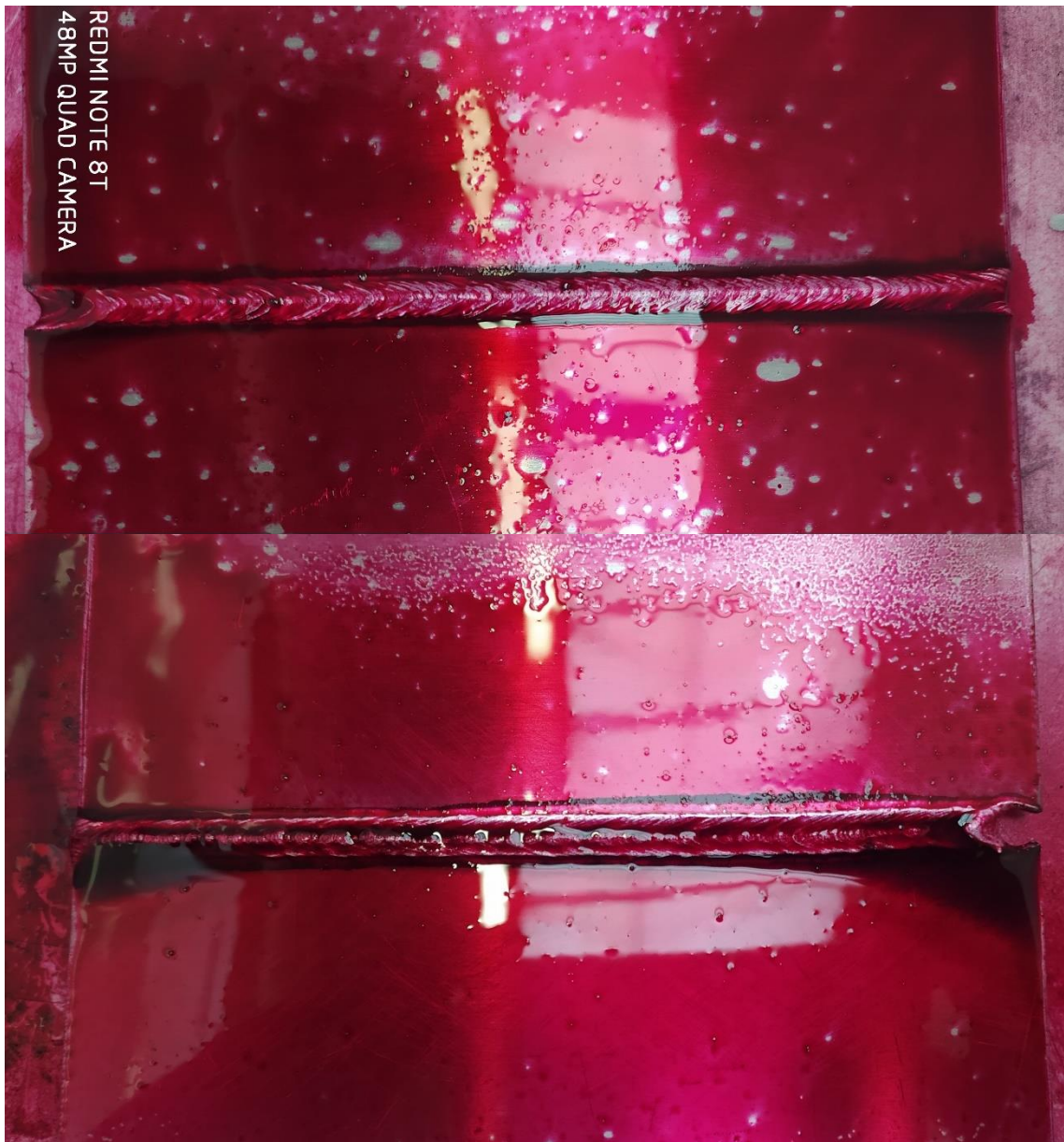
Další rozdíl, zjištěný během vizuální kontroly, je kvalita kořenové oblasti svaru. U svaru zhotoveného metodou MIG AC je povrch kořene hladký a bez větších nerovností (viz obrázek 29). Povrch kořene svaru zhotoveného metodou MIG DC+ je hrubý, se značným množstvím rýh a nerovností (viz obrázek 29). Tento rozdíl by bylo možné výrazně zmenšit použitím ochrany kořene v podobě ochranného plynu.



Obrázek 29: Kořen svaru zhotoveného metodou MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole).

3. Kapilární zkouška

Cílem kapilární zkoušky bylo především zjistit rozdíl možný výskyt povrchových vad, zejména rozdíl v pórovitosti zhotovených svarů. Vzhledem k rozměrům svarů a tloušťce svařovaného materiálu jsme neočekávali, že by kapilární zkouška ukázala nějaké větší vady (např. trhliny) a tento předpoklad se také potvrdil. Kořeny svarů nebyly kapilárně zkoušeny, protože u metody MIG DC+ by byly výsledky zkoušky značně zkresleny hrubým povrchem kořene a rýhami na jeho povrchu (viz obrázek 29).

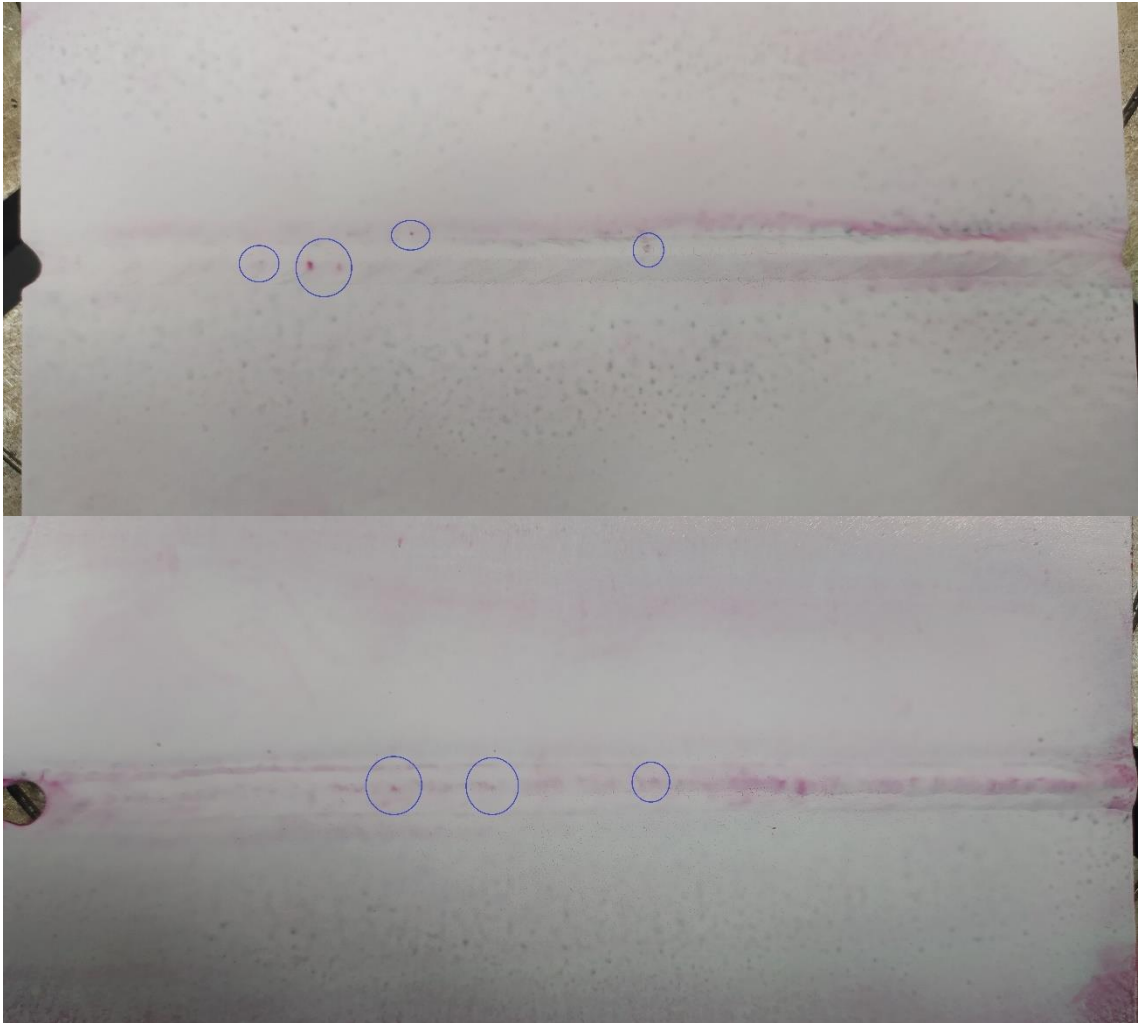


Obrázek 30: Průběh kapilární zkoušky, nanesení penetrantu na vzorky.

Výsledky zkoušky neukázaly žádný významný rozdíl mezi zkoumanými svary a potvrdily vyhovující kvalitu vytvořených svarových spojů.

Zkouška odhalila pouze několik malých pórů na obou zkoušených vzorcích (viz obrázek 31). Ostatní indikace jsou pouze nerovnosti na povrchu a v okolí svarů, ze kterých nebylo možné dostatečně odstranit penetrant. Největší vada (pór) byla indikována na vzorku svařeném metodou MIG AC, ale max. rozměr póru je pod kritickou hranicí této vady podle ČSN EN ISO 10042. Tato skutečnost je ale spíše náhodou a vzhledem k velmi malé četnosti pórů na obou vzorcích není příliš vypovídající. Větší přínos této zkoušky je v tom, že ukazuje vysokou kvalitu svarů (alespoň co se týká

pórovitosti a případného výskytu povrchových trhlin) zhotovených metodou MIG bez ohledu na polaritu svařovacího proudu.



Obrázek 31: Výsledky kapilární zkoušky s označenými indikovanými póry. MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole).

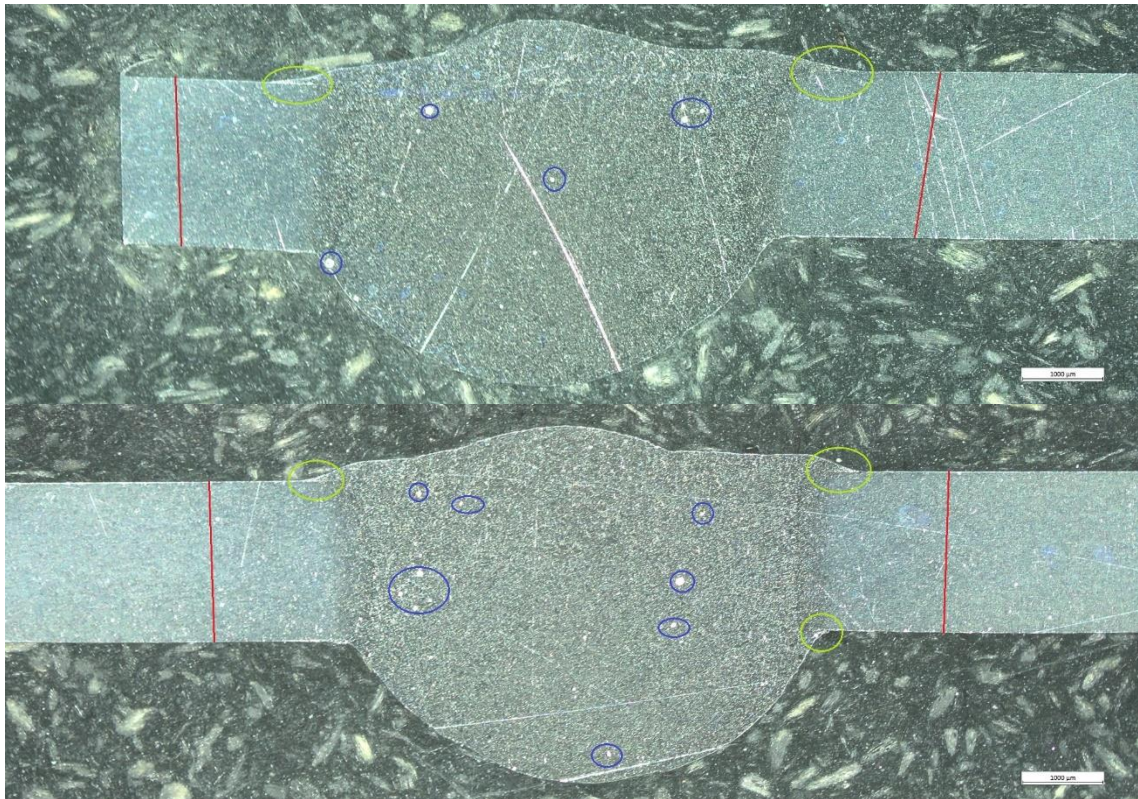
4. Metalografická kontrola makrostruktury

Na zkoušku makrostruktury svarového spoje bylo nutné připravit metalografické výbrusy (viz obrázek 32), ty byly odebrány přibližně z poloviny délky svaru (tj. z reprezentativní oblasti), aby výsledky nebyly ovlivněny obtížnějším začátkem a ukončením svaru.



Obrázek 32: Metalografické výbrusy vzorků.

Řezání vzorků proběhlo na přesné metalografické pile s použitím speciálního kotouče na řezání hliníkových slitin (označení 20A25). Následně byly vzorky zasypány termosetovým granulátem a lisovány za tepla (teplota 180 °C, tlak 250 bar). Takto připravený vzorek byl následně broušen a leštěn na speciální brusce Buehler Beta. Poslední přípravnou operací bylo leptání, aby se zvýraznila struktura na vzorcích. Vyhodnocování vzorků probíhalo na mikroskopu Zeiss Stemi 508.



Obrázek 33: Metalografické výbrusy vzorků svařených metodou MIG DC+ (modře označené vnitřní póry, zeleně studené spoje a červeně hranice TOO)

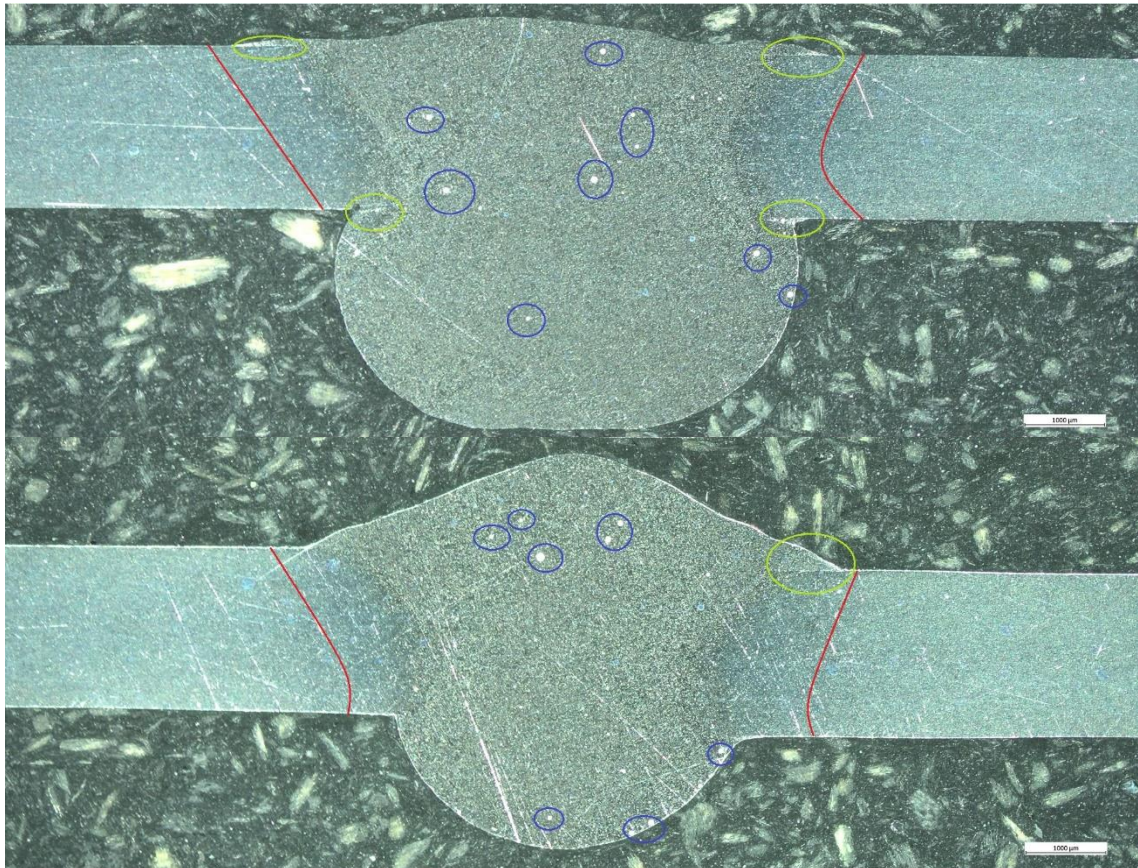
Některé vady byly odhalené až metalografickou zkouškou (např. studené spoje – viz obrázky 33 a 34). Výskyt těchto vad je způsoben nedokonalým vyladěním svařovacích parametrů (z důvodu nedostatku času však experiment nebyl opakován a parametry tedy nebyly dokonale doladěny).

Výsledky metalografické zkoušky potvrzují předpoklad menšího tepelného zatížení ZM při použití metody MIG AC. Z obrázků 33 a 34 je vidět menší svarová lázeň a užší TOO u vzorků svařených metodou MIG AC. TOO u vzorků svařených metodou MIG DC+ má šířku přibližně 1,2 mm a u vzorků svařených metodou MIG AC pouze přibližně 0,8 mm. V kombinaci s menším závarem mají svary zhotovené metodou MIG AC šířku přibližně 4-5 mm, zatímco svary zhotovené metodou MIG DC+ dosahují šířky přes 6 mm. První vzorek svařený metodou MIG AC (viz obrázek 34 nahoře) má větší kořen i TOO z důvodu použití nižší svařovací rychlosti (40 cm/min). Při vyšší rychlosti (vyhodnocené jako ideální) je závar i kořen menší a TOO užší (viz obrázek 35 dole).

Větší množství vneseného tepla při použití metody MIG DC+ také potvrzuje rozdíl v převýšení svarů (viz obrázek 33 a 34 dole) a tvar svarového kovu, který má u svarů

zhotovených metodou MIG AC zužující se tendenci směrem ke kořenu. Zatímco šířka svarového kovu u svarů zhotovených metodou MIG DC+ má po celé tloušťce ZM prakticky neměnnou šířku.

Srovnání vzorků na obrázcích 33 a 34 také potvrzuje výše uvedený rozdíl mezi oběma zkoumanými metodami a tím je šířka kořene, která je (alespoň v případě ideálních svařovacích parametrů) u vzorku svařeného metodou MIG AC, menší.



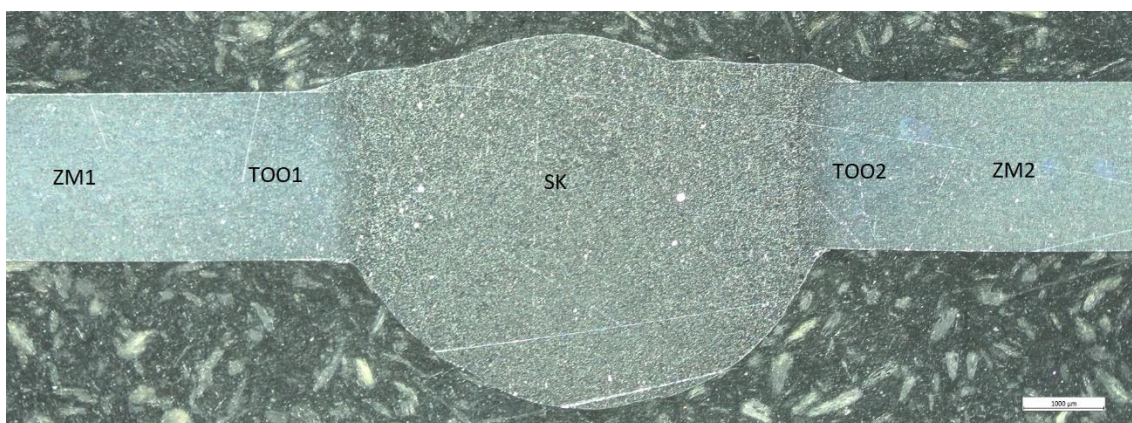
Obrázek 34: Metalografické výbrusy vzorků svařených metodou MIG AC (modře označené vnitřní póry, zeleně studené spoje a červeně hranice TOO). Svařovací rychlost 40 cm/min nahoře a 50 cm/min dole.

Dále jsou na metalografických výbrusech vidět vnitřní póry (viz obrázky 33 a 34). Výskyt vnitřních pórů je čistě náhodný a jejich četnost je u všech zkoumaných vzorků natolik malá, že lze tvrdit, že rozdílné použité metody svařování nijak neovlivňují pórovitost svarových spojů. Četnost pórů mohla být ovlivněna přídavným materiálem, který byl dlouhodobě skladován a před použitím nebyl speciálně ošetřen.

5. Zkouška tvrdosti

Tvrdość svařených vzorků byla vyhodnocována podle Vickerse, konkrétně HV1 (zatěžovací síla 1 kp = 9,806 N). Indentorem při této metodě měření je čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° a vyhodnocuje se délka úhlopříček vpichu. Doba zatížení byla nastavena 12 s, při kratších časech se projevují více plastické deformace a výsledky zkoušky by pak byly zkreslené.

Měření probíhalo na stejných metalografických výbrusech, jako zkouška makrostruktury svarových spojů (viz obrázek 32). Vzhledem k tloušťce svařovaného plechu byla linie vpichů vedena uprostřed tloušťky vzorků.



Obrázek 35: Metalurgický výbrus svarového spoje s vyznačenými oblastmi měření tvrdosti.

Na každém vzorku byla měřena tvrdost v oblastech svarového kovu (SK), tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a základního materiálu (ZM - viz obrázek 35). V každé oblasti byly naměřeny 3 hodnoty tvrdosti na každém vzorku. Tyto hodnoty byly následně zprůměrovány, abychom získali přehled o průběhu tvrdosti svarovým spojem (viz tabulka 5). Vzorek v tabulce označený jako AC2 byl svařen parametry označenými jako ideální nalezené svařovacími parametry pro metodu MIG AC (viz tabulka 4), vzorek označený AC1 byl svařen stejnými svařovacími parametry, jen rychlost svařování byla nižší (40 cm/min). Vzorky v tabulce označené jako DC1 a DC2 byly svařeny stejnými svařovacími parametry (viz tabulka 4).

Tabulka 5: Zprůměrované hodnoty tvrdosti HV1 v jednotlivých oblastech svarových spojů.

	ZM1	TOO1	SK	TOO2	ZM2
DC1	63,53	63,70	71,00	65,57	62,10
DC2	61,50	63,03	69,60	63,70	65,70
AC1	64,27	62,27	70,43	62,83	64,27
AC2	65,03	64,43	73,57	65,30	65,30

Z tabulky 5 je zřejmé, že nejvyšší tvrdosti dosahují svarové spoje právě v oblasti svarového kovu. To je způsobeno použitím PM s vyšším obsahem legujících prvků, než má ZM. Tvrdost vzorků v TOO a oblasti ZM se příliš neliší (řádově desetiny až jednotky HV1). U některých naměřených hodnot, hlavně v TOO, jsou větší rozdíly (viz příloha 1). Tyto rozdíly jsou způsobené obtížným nalezením hranice TOO a SK na výbrusu, takže některá měření v TOO mohla být více ovlivněna tvrdostí SK. Kromě několika krajních hodnot je rozdíl v tvrdosti ZM a TOO minimální, a to je způsobeno použitím ZM z nevytvrditelné slitiny, takže změna mechanických vlastností v TOO je minimální.

Rozdíl v tvrdosti svarových spojů mezi porovnávanými metodami svařování je natolik malý, že je ho možné připsat na úkor nejistoty použité měřicí metody. Lze tedy konstatovat, že tvrdost zkoumaných svarových spojů nezávisí na použité metodě svařování.

Podobně jako u pórovitosti by se mohl projevit rozdíl u větších svařenců a větších tloušťek ZM, kde by byl výrazně větší rozdíl v šířce TOO mezi metodou MIG AC a MIG DC+.

Závěr

Teoretická část bakalářské práce se zabývá problematikou svařitelnosti hliníkových slitin. Dále je zde naznačeno rozdělení slitin hliníku, možnosti jejich značení a popis jednotlivých metod svařování včetně jejich úprav s ohledem na specifické vlastnosti hliníku. Na konec je zmíněna problematika zkoušek svarových spojů (destruktivních i nedestruktivních).

V experimentální části práce jsem se zabýval srovnáním dvou konkrétních metod svařování hliníkových slitin, a to metody MIG AC a MIG DC+. Metoda MIG DC+ je momentálně v průmyslu nejpoužívanější metodou svařování slitin hliníku, má ale jisté nedostatky. Podle teoretických předpokladů metoda MIG AC mnohé z těchto nedostatků eliminuje a potvrzením některých těchto předpokladů jsem se zabýval při experimentu.

První částí experimentu bylo nalezení ideálních svařovacích parametrů pro obě zkoumané metody a následné svaření kontrolních vzorků, na kterých byly poté prováděny zkoušky. Použitý svařovací zdroj (Elmatech MIDI MIG 300) má přednastavené svařovací parametry pro zadaný ZM, PM a tloušťku PM. Při přednastavených parametrech ale svařování neprobíhalo dobře, a proto byly nutné menší úpravy.

První provedenou zkouškou byla vizuální kontrola, která hned potvrdila několik teoretických rozdílů mezi oběma metodami.

Hlavním rozdílem mezi oběma metodami je teplo vnesené do svařence, které by teoreticky mělo být při použití metody MIG AC nižší. Tento předpoklad se potvrdil při vizuální kontrole (užší svarová lázeň a kořen a menší propadání svarového kovu u konce svaru) a také při metalografické kontrole makrostruktury (užší TOO).

Dalším rozdílem zjištěným při vizuální kontrole byla kvalita kořene, která byla u metody MIG AC výrazně vyšší i bez použití prostředků na ochranu kořene.

Další provedenou zkouškou byla zkouška kapilární, která ovšem neukázala žádný rozdíl mezi zkoumanými metodami. Tento výsledek je pravděpodobně ovlivněn malým rozměrem zkušebních vzorků (15x10x2 mm). Při svařování větších a tužších konstrukcí by kapilární zkouška mohla ukázat rozdíly v porozitě a případně četnosti povrchových trhlin.

Další provedenou zkouškou, tentokrát už destruktivní, byla metalografická zkouška makrostruktury, která, jak již bylo výše zmíněno, potvrdila menší tepelné zatížení svařence při použití metody MIG AC. Dále ukázala nedokonalé nastavení svařovacích parametrů, které zapříčinilo vznik studených spojů u všech svařených vzorků. Co se týká četnosti vnitřních pórů tak zde platí stejný předpoklad, jako u povrchových pórů indikovaných kapilární zkouškou.

Poslední provedenou zkouškou bylo měření tvrdosti v jednotlivých oblastech svarového spoje (ZM, TOO a SK). Tvrdost byla měřena podle Vickerse (konkrétně HV1) a nebyl zjištěn žádný značný rozdíl mezi zkoumanými metodami, respektive rozdíly v naměřených hodnotách jsou natolik malé, že je lze připsat na úkor nejistoty měření. Obecně ve SK byla naměřena vyšší tvrdost a v TOO a oblasti ZM jsou hodnoty srovnatelné a mírně nižší, než u SK. Při použití vytvrditelné slitiny by bylo vidět výrazné snížení tvrdosti v TOO, námi použitá slitina byla ale nevytvrditelná slitina typu Al-Mg (konkrétně EN AW 5754 - AlMg3).

Použité literární zdroje

- [1] MATHERS, Gene. *The welding of aluminium and its alloys*. Boca Raton, FL: CRC Press/Woodhead Pub., 2005. ISBN 08-493-1551-4.
- [2] KOUTNÝ, Jiří. *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování* [online]. 1998 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>
- [3] HÁJEK, Jaroslav. *Svařování hliníku v ochranných plynech* [online]. 08.10.2008 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-plynech.html>
- [4] VÁLOVÁ, Marie a Ladislav KOLARÍK. *Svařitelnost hliníkových slitin* [online]. Technická 4, Praha 6, 2011 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/ivo.bukovsky/Research_and_Applications/projects/SGS11049OHK21T12/Herbertov11.pdf#page=99. ČVUT v Praze.
- [5] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [6] LAŠTOVICA, Petr. *Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30292679.pdf>. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Markéta Říhová.
- [7] NOVOTNÝ, Jiljí, Jan ŠANOVEC, Bohumír BEDNÁŘ a Viktor KREIBICH. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [8] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [9] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [10] MANDAL, Nisith Ranjan. *Aluminium welding*. Pangbourne, Alpha Science International Ltd., 2002. ISBN 1-84265-095-5.
- [11] WEMAN, Klas a Gunnar LINDÉN. *MIG welding guide*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-9112-1.

- [12] KAŠPAR, Jan. Vliv čistoty ochranného plynu na jakost svarových spojů. *Strojárstvo* [online]. Žilina, 2010 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/zvaranie/7986-vliv-cistoty-ochranneho-plynu-na-jakost-svarovych-spoju>
- [13] POP, Vojtěch. *Změna mechanických vlastností svaru válcového běhounu v závislosti na svařovacích parametrech*. Ostrava, 2019. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Lucie Krejčí Ph.D.
- [14] LANGER, Tomáš. *Svařování přenosných konstrukcí z hliníkových slitin*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Kovanda Ph.D.
- [15] Shielding Gases.Linde [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://docplayer.net/21279504-Shielding-gases-innovation-consultation-application.html>
- [16] MATHERS, G. Power source characteristics [online]. 2012 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/power-source-characteristics-121>
- [17] Firemní materiály firmy EWM
- [18] Firemní materiály firmy ELMA Tech
- [19] PANTŮČEK, Marek. Produktivní svařovací procesy. *MM Spektrum* [online]. 2013, 10.04.2013, 2013(4), 58 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/produktivni-svarovaci-procesy.html>
- [20] JIRÁK, David. *Elektronové svařování součástí ze slitiny Al*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [21] JANOTA, Martin. *Odporové svařování: Základní technologické informace*. Svět svaru: Časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů. 2008
- [22] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: SNTL, 1975. 265 s
- [23] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno – SMS, s.r.o., 2005. ISBN 80-903386-4-X.
- [24] Učební texty vysokých škol. Zkouška tahem: studijní opora předmětu Nauka o materiálu vyučovaného v kombinovaném bakalářském studiu [online]. 2002 [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/Tahovka.pdf>
- [25] BARTÁK, Jiří. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava: ZEROSS, 2002. 418 s. ISBN 80-85771-97-7.

- [26] Gleich. Anodizing eloxal guidelines [online]. Graz: Gleich Aluminiumwerk, 2015 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://gleich.de/>
- [27] Dye Penetrant Test (DPT, LPI, PT) – Non Destructive Test. *Welding and NDT* [online]. WordPress, 2017, 04.08.2017 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.weldingandndt.com/dye-penetrant-test-dpt-lpi-pt-non-destructive-test/>
- [28] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [29] Firemní materiály firmy Gleich
- [30] Firemní materiály firmy Esab

+ Normy uvedené v textu

Seznam použitých symbolů a zkratek

MIG	Metal Inert Gas
TIG/WIG	Tungsten Inert Gas/Wolfram Inert Gas
AC	Střídavý proud
DC+	Stejnoseměrný proud nepřímé polarity
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
PM	Přídavný materiál
ZM	Základní materiál
SK	Svarový kov
TZ	Tepelné zpracování
Al₂O₃	Oxid hlinitý
Al	Hliník
Mg	Hořčík
Mn	Mangan
Cu	Měď
Zn	Zinek
Si	Křemík
Ni	Nikl
Cr	Chrom
Zr	Zirkon
Pb	Olovo
He	Helium
H	Vodík
Ar	Argon
R_e	Mez kluzu
R_m	Mez pevnosti
A	Tažnost
Z	Kontrakce

Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura oxidické vrstvy. [26].....	13
Obrázek 2: Náchylnost ke vzniku trhlin v závislosti na obsahu hlavních legujících prvků. [1].....	16
Obrázek 3: Graf rozpustnosti vodíku v hliníku v závislosti na teplotě. [12]	18
Obrázek 4: Rovnovážný diagram obecné slitiny hliníku (s hlavním legujícím prvkem označeným písmenem X). [2]	21
Obrázek 5: Závislost mechanických vlastností na stupni tváření za studena. [1]	22
Obrázek 6: Schéma elektrického oblouku při zapojení zdroje s nepřímou polaritou stejnosměrného proudu. [2].....	28
Obrázek 7: Statická (voltampérová) charakteristika elektrického oblouku a svařovacího zdroje. [16].....	30
Obrázek 8: Vliv obsahu helia v ochranném plynu na průvar. [15]	31
Obrázek 9: Nevyplněný (vlevo) a vyplněný (vpravo) koncový kráter. [9].....	32
Obrázek 10: Schéma svařování metodou MIG-DC+. [2].....	33
Obrázek 11: Druhy přenosu kovu obloukem. [2].....	34
Obrázek 12: Skutečný průběh impulzního svařovacího proudu. [19]	35
Obrázek 13: Překonání mezery mezi svařovanými plechy (tloušťka plechů 1,2 mm, velikost mezery 4 mm). [18]	37
Obrázek 14: Průběh svařovacího proudu v čase u metody MIG AC. [17]	38
Obrázek 15: Schéma svařování metodou TIG. [2]	39
Obrázek 16: Rozložení teploty při různých způsobech zapojení - svařování elektrickým obloukem. [1].....	40
Obrázek 17: Neutrální plamen (nahore) vhodný pro svařování ocelí a redukční plamen (dole). [2]	43
Obrázek 18: Princip svařování laserem. [1]	44
Obrázek 19: Srovnání hustoty energie vybraných metod svařování. [20]	46
Obrázek 20: Svařovací režimy při odporovém svařování. [22].....	47
Obrázek 21: Trhliny odhalené pomocí kapilární zkoušky. [27].....	49
Obrázek 22: Kontrolní vzorky pro zkoušku tahem. [ČSN EN ISO 4136]	51
Obrázek 23: Zkušební vzorky pro zkoušku rázem v ohybu.....	51

Obrázek 24: Svařovací zdroj Elmatech MIDI MIG (vlevo) a manipulátor Weldycar NV (vpravo).....	54
Obrázek 25: Průběhy proudu a napětí při svařování metodou MIG DC+.....	55
Obrázek 26: Průběhy proudu a napětí při svařování metodou MIG AC.....	55
Obrázek 27: Svařené vzorky těsně po svaření, MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole).	56
Obrázek 28: Označený konec svaru svařeného metodou MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole).....	57
Obrázek 29: Kořen svaru zhotoveného metodou MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole)..	58
Obrázek 30: Průběh kapilární zkoušky, nanesení penetrantu na vzorky.	59
Obrázek 31: Výsledky kapilární zkoušky s označenými indikovanými póry. MIG AC (nahore) a MIG DC+ (dole).....	60
Obrázek 32: Metalografické výbrusy vzorků.	61
Obrázek 33: Metalografické výbrusy vzorků svařených metodou MIG DC+ (modře označené vnitřní póry, zeleně studené spoje a červeně hranice TOO).....	62
Obrázek 34: Metalografické výbrusy vzorků svařených metodou MIG AC (modře označené vnitřní póry, zeleně studené spoje a červeně hranice TOO). Svařovací rychlost 40 cm/min nahore a 50 cm/min dole.	63
Obrázek 35: Metalurgický výbrus svarového spoje s vyznačenými oblastmi měření tvrdosti.....	64

Seznam tabulek

Tabulka 1: Druhy hliníkových slitin a jejich vlastnosti. [2] [6] [8] [11].....	24
Tabulka 2: Chemické složení a mechanické vlastnosti ZM a PM. [28-29]	53
Tabulka 3: Technické parametry svařovacího zdroje Elmatech MIDI MIG 300. [18]	54
Tabulka 4: Nalezené svařovací parametry.....	55
Tabulka 5: Zprůměrované hodnoty tvrdosti HV1 v jednotlivých oblastech svarových spojů.....	65

Příloha 1: Výsledky měření tvrdosti svarových spojů

Oblast	ZM1			TOO1		
Č. měření	1	2	3	4	5	6
DC1	60,6	63,4	66,6	65,1	65,5	60,5
DC2	61,1	60,4	63	67,9	61,4	59,8
AC1	65,1	64,8	62,9	61,9	62,4	62,5
AC2	67,1	66,4	61,6	69,2	62,7	61,4
Oblast	SK			TOO2		
Č. měření	7	8	9	10	11	12
DC1	70,6	72,1	70,3	65,1	65,1	66,5
DC2	68,8	69,6	70,4	67,3	64,9	58,9
AC1	69,8	70	71,5	63,7	62,8	62
AC2	73,6	74,6	72,5	67,8	65,8	62,3
Oblast	ZM2					
Č. měření	13	14	15			
DC1	60,7	61,5	64,1			
DC2	65,8	66	65,3			
AC1	62,6	64,8	65,4			
AC2	63,9	66,1	65,9			

Hodnoty uváděné v tabulce jsou v jednotkách HV1.