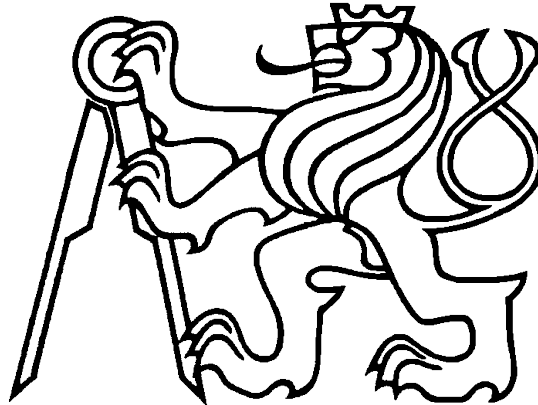


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Svařování hliníkových slitin metodou TIG

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou (bakalářskou) práci **vypracoval samostatně a použil** jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu. Výsledky této práce mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce, Ing. Karla Kovandy, Ph.D. jako jejího spoluautora.

Dne

Podpis

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Karlu Kovandovi, Ph.D. za vedení práce, cenné rady a připomínky. Dále děkuji Ing. Tomáši Kramárovi, Ph.D. za výpomoc v metalurgické laboratoři a Ing. Jiřímu Pakostovi za vytvoření svarových spojů a firmě Esab za poskytnuté certifikáty týkající se vlastností přídavných materiálů.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním rozdílů tvrdosti svarových spojů v závislosti na použitém přídavném materiálu. Pro náš experiment byly koutovým svarem spojeny dvě desky základního materiálu ze slitiny hliníku EN AW 7022 (AlZn₅Mg₃Cu). Práce primárně zkoumá tvrdost v oblasti koutového svaru a následně její změnu v závislosti na čase. Dále se zabývá mikrostrukturou v tepelně ovlivněné oblasti svaru.

Abstract

This thesis examines the differences in hardness of the welded joints, depending on the filler material. For our experiment, two plates of the base material of aluminium alloy EN AW 7022 (AlZn₅Mg₃Cu) were connected by fillet weld. The work examines primarily the hardness of a fillet weld, and consequently its change depending on time. It also deals with the microstructure in the heat-affected zone of the weld.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Hliník.....	2
2.1. Slitiny hliníku.....	2
2.1.1. Označování hliníku a jeho slitin	3
2.1.2. Slévárenské slitiny hliníku.....	4
2.1.3. Slitiny hliníku ke tváření.....	5
2.2. Vybraná hliníková slitina pro experimenty.....	7
2.2.1. Obecné informace slitiny EN AW 7022 (AlZn ₅ Mg ₃ Cu).....	7
2.3. Podmínky svařitelnosti slitin hliníku	8
3. SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU METODOU TIG.....	9
3.1. Svařovací elektrický oblouk TIG	9
3.2. Zapálení oblouku.....	10
3.3. Ruční svařování.....	11
3.4. Automatizované svařování.....	12
3.5. Ochranné atmosféry	13
3.6. Přídavný materiál	15
3.7. Wolframové elektrody	15
3.8. Svařovací hořák pro metodu TIG.....	19
3.9. Příprava na svařování	20
4. Experimentální část.....	21
4.1. Seznam použitých strojů a zařízení.....	21
4.2. Svařovací parametry a rozměry základního materiálu.....	21
4.3. Výroba metalurgických vzorků.....	24
4.3.1. Postup přípravy metalografických výbrusů	24
4.4. Mikrostruktura.....	28
4.4.1. Přídavný materiál 4043	28

4.4.2.	Přídavný materiál 5356	28
4.4.3.	Přídavný materiál 5087	29
4.5.	Měření tvrdosti	29
4.5.1.	Princip měření metodou dle Vickerse	29
4.6.	Vyhodnocení výsledků	31
5.	Závěr	33
6.	Použitá literatura	35
7.	Seznam příloh:	36

1. Úvod

V dnešní době miniaturizace a minimalizace se tyto jevy projevují také v naší oblasti strojírenské technologie, výjimkou tak nejsou ani svařované konstrukce větší rozměrů, či drobné svařence složitějších tvarů. Z těchto důvodů vyplívá vhodnost použití právě zmiňovaných lehkých hliníkových slitin. Ty díky tepelnému zpracování a vhodnému legování se přibližují parametrům ocelí při mnohem nižší hmotnosti výsledného výrobku. Pro představu poměr hmotnosti a pevnosti je u hliníku a železa téměř totožný. Měrná hmotnost u nízkouhlíkové oceli je $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a měrná hmotnost hliníku je $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pevnost železa je v rozmezí 300-400 MPa zatím co pevnost čistého hliníku je pouhých 70-100 MPa. Hliník se vyznačuje lepší vlastností absorpce deformační energie při nárazu než u ocelí a nedochází zde k prasknutí nebo porušení materiálu. Další výhodou od oceli je neměnná pevnost při ochlazování. Hliník díky své tepelné vodivosti, která je čtyřikrát větší než u oceli potřebuje mnohem větší tepelný příkon k realizaci daného svaru. Proto se často využívá předehřevu daných svařovaných hliníkových dílců.

Ze strany automobilového průmyslu, kde jsou slitiny hojně využívány, vzniká tlak na efektivitu výroby. Zde patří zejména problémy spojené s navýšením počtu motorových vozidel, růstem cen pohonných hmot a v neposlední řadě následný dopad na životní prostředí. I proto se výrobci automobilů čím dál více zaměřují na snížení vlivu emisí skleníkových plynů, tudíž spotřebu fosilních pohonných hmot, které se znečišťování ovzduší přímo souvisí. Jestliže opomeneme nepopíratelný vliv ropného průmyslu a kompletní dění v automobilové sféře, konkrétně u vozidel výrazně neklesající spotřebu paliva, jeví se cesta ke snížení emisí pomocí redukce hmotnosti vozidla jako správná varianta. Proto hliník a jeho slitiny nachází stále širší využití ve strojírenské výrobě. Díky velmi nízké hmotnosti oproti jiným materiálům se hliník využívá zejména u rozměrných svařenců, aby výsledné celky dosahovaly nízkých hmotností.

To by mělo za následek těžkopádnou manipulaci, zvýšení nákladů na pohonné jednotky, zvýšení znečištění ovzduší a také vyšší pořizovací náklady. Protože mechanické vlastnosti čistého hliníku pro strojírenský průmysl nejsou dostatečné, nenajdeme tak pro něj téměř žádné využití v této oblasti. Naopak využití najde v potravinářském průmyslu v podobě obalů nápojů a potravin. Vývoj hliníkových slitin v dnešní době kráčí mílovými kroky, zajišťuje velkou úsporu materiálu, a tudíž je důležité najít vhodné

způsoby svařování těchto obtížně svařitelných slitin. Jedna z klasických způsobů spojování je i metoda svařování.

2. Hliník

Hliník je nejrozšířenějším kovovým prvkem v zemské kůře. Podle posledních měření se ho nachází na Zemi zhruba mezi 7,5-8,3 %. V přírodě jej nelze nalézt v čisté formě, pouze ve sloučeninách s jinými prvky. Jednou ze sloučenin je například minerál bauxit, který je primární surovinou pro výrobu hliníku. Tato sloučenina obsahuje oxid hlinitý (Al_2O_3) a neurčitý obsah vázané vody (H_2O). Přírodní bauxit může dále obsahovat oxidy železa, křemíku a titanu. Vytěžená bauxitová ruda s hmotností 4-6 tun odpovídá jedné tuně hliníku. Mezi další neméně významné zdroje patří minerál nazývaný kryolit, chemickým názvem hexafluorohlinitan sodný (Na_3AlF_6). Hliník a jeho slitiny patří ve strojírenské výrobě k nejpoužívanějším neželezným kovům. Používá se téměř ve všech oborech strojírenství a pro mnoho technologií výroby. Široké využití má například v průmyslu automobilovém (profily pro výplně dveří, pouzdra tlumičů nebo části motorů), potravinářském (obalová technika), elektrotechnickém (kabely, dráty) a v neposlední řadě v kosmonautice a letectví [1].

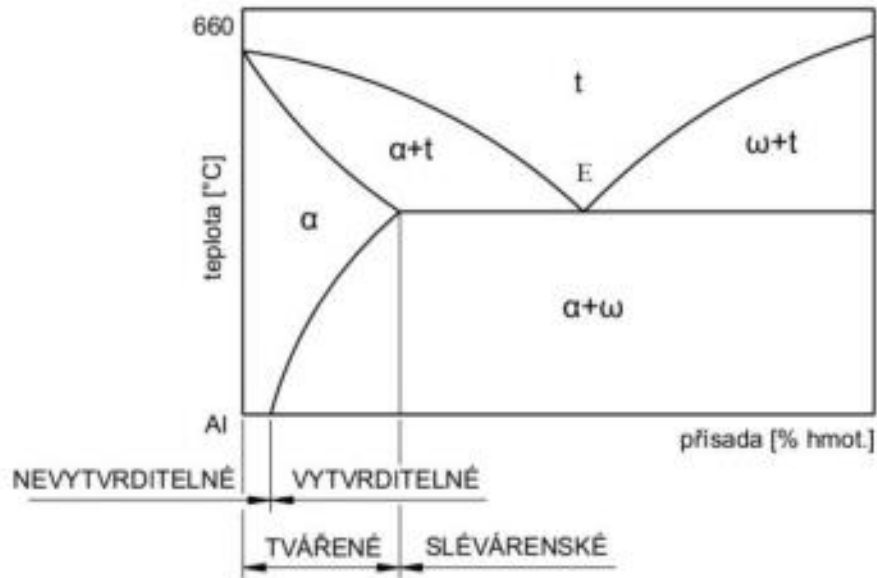
Tab. 1 – Vlastnosti chemicky čistého hliníku – [1]

Hliník		
Mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	20
Pevnost v tahu R_m	[MPa]	70
Tažnost A_{50}	[%]	20 – 30
Tvrdost HB		20
Modul pružnosti v tahu E	[MPa]	72 000
Hustota ρ	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2699
Teplota tání	[°C]	660,4
Tepelná vodivost	[$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	247

2.1. Slitiny hliníku

Mezi přednosti hliníku patří zejména nízká měrná hmotnost. Mechanické vlastnosti čistého hliníku se ovlivňují přidáváním různých prvků do čistého hliníku, čímž vznikají slitiny, které mají i poměrně dobrou pevnost. Slitiny hliníku lze rozdělit dle různých hledisek. Nejčastější je dělení podle zpracovávání na slitiny pro tváření a slitiny pro

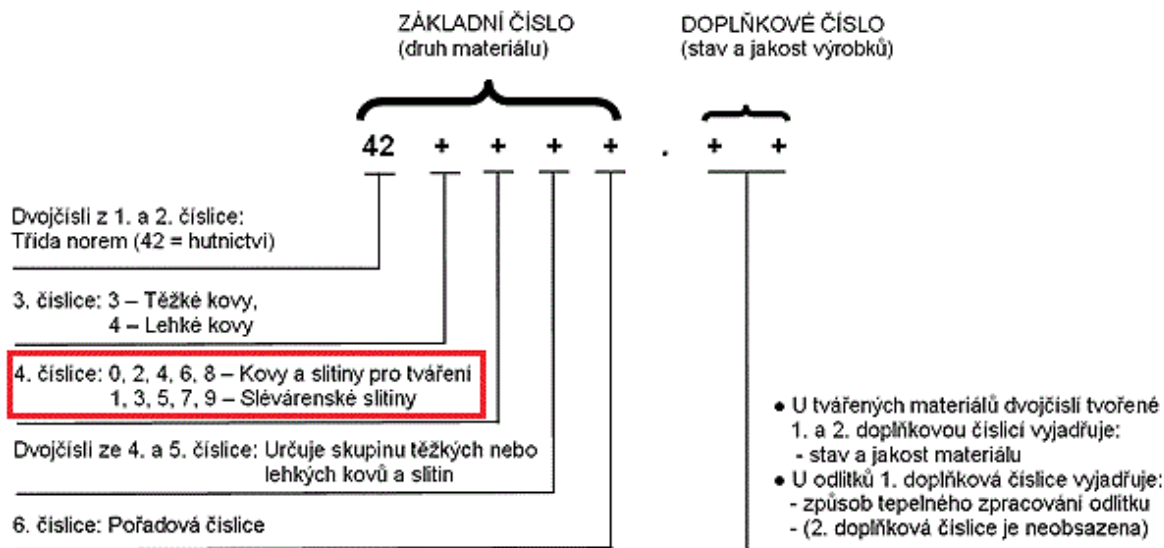
slévání. Z hlediska možnosti zvýšení pevnosti tepelným zpracováním (vytvrzováním) se dělí slitiny hliníku na vytvrditelné a nevytvrditelné. Tyto způsoby klasifikace ve vztahu k rovnovážnému diagramu jsou schematicky znázorněny na obrázku 1.



Obr. 1 – Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku – [1]

2.1.1. Označování hliníku a jeho slitin

Označování hliníku a jeho slitin se řídí Českými technickými normami (ČSN EN 573-1,2 a 3). V současné době je platné označování jak podle norem ČSN EN, tak podle norem ČSN, přičemž normy ČSN EN mají v technické praxi přednost. Při označování hliníku a jeho slitin podle ČSN EN doplňuje písemné značení čtyřmístná, resp. pětimístná číslce. U ČSN je pak písemné označení doplněno číslicí šestimístnou. Tyto číselná označení lze doplnit také chemickým označením, které udává čistotu hliníku nebo jmenovitý obsah příslušného prvku [zdroj 1].



Obr. 2 – Číselné označování a rozdělení těžkých a lehkých neželezných kovů podle ČSN 42 0055:1993 - Autor neuveden, www.vutbr.cz [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: http://www.ferona.cz/cze/katalog/nezelezne_kovy.php

2.1.2. Slévárenské slitiny hliníku

Slitiny vhodné pro slévání se v současnosti dle ASM (American Society for Metals) dělí podle obsahu legujících prvků do 6 základních skupin [zdroj 1]:

- a) **Slitiny Al-Cu:** Slitiny hliníku a mědi jsou nejstarším typem Al slitin, které se již v dnešní době příliš nepoužívají. Obsah mědi (Cu) se zde pohybuje v rozmezí 4 až 11 %. Tyto slitiny se vyznačují dobrými pevnostními vlastnostmi za vyšších teplot a odolností vůči otěru. Nevýhodou je horší slévatelnost a nízká korozní odolnost.
- b) **Slitiny Al-Cu-Si:** Oproti slitinám Al-Cu jsou tyto slitiny velmi používané. Díky legování křemíkem (Si) došlo ke zlepšení slévárenských vlastností. Slitiny Al-Cu-Si s obsahem křemíku nad 10 % se používají tam, kde je vyžadována nízká teplotní roztažnost. Vysokou odolnost vůči otěru vykazují slitiny s obsahem křemíku až 22 %.
- c) **Slitiny Al-Si:** Slitiny hliníku a křemíku se aplikují tam, kde je vyžadována dobrá slévatelnost a také odolnost vůči korozi. Obsah křemíku se zde pohybuje většinou v rozmezí 5 až 13 %. Dle obsahu křemíku se tyto slitiny rozdělují na podeutektické (méně než 12 % Si), eutektické (kolem 12 % Si) a nadeutektické (nad 12 % Si).

- d) **Slitiny Al-Mg:** Nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost ze všech slévárenských slitin hliníku mají slitiny s hořčíkem (Mg). Vykazují také velmi dobrou odolnost vůči korozi, jsou svařitelné a dobře obrobitelné. Nevýhodou slitin Al-Mg je špatná slévatelnost a náchylnost hořčíku k oxidaci během procesu tavení.
- e) **Slitiny Al-Zn-Mg:** Slitiny hliníku, zinku (Zn) a hořčíku mají obvykle lepší slévárenské vlastnosti než slitiny Al-Cu a Al-Mg. Vykazují také lepší odolnost proti korozi než slitiny Al-Cu. Vyšší sklon ke korozi se ale může projevovat pod elektrickým napětím. Výhodou těchto slitin je menší citlivost na změnu tloušťky stěn odlitků než u ostatních slévárenských slitin hliníku.
- f) **Slitiny Al-Sn:** Slitiny hliníku a cínu (Sn) jsou speciálně určené pro výrobu kluzných ložisek. Slitiny Al-Sn obsahují přibližně 6 % Sn spolu s malým množstvím Cu a Ni kvůli zvýšení pevnostních vlastností.

2.1.3. Slitiny hliníku ke tváření

- a) **1xxx (skupina 1000):** Představuje technický hliník. Druhá číslice vyjadřuje mezní obsah doprovodných nebo slitinových prvků. Pokud je druhá číslice 0, pak jde o nelegovaný hliník. Číslice 1 až 9 udávají zvláštní kontrolu obsahu jednoho nebo více doprovodných nebo slitinových prvků. Skupina 1000 se vyznačuje výbornou korozní odolností, vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí, špatnými mechanickými vlastnostmi a dobrou obrobitelností. Mírného zvýšení pevnosti se dosahuje mechanickým zpevněním. Mezi hlavní nečistoty patří Fe a Si.
- b) **2xxx (skupina 2000):** Slitiny skupiny 2000 vyžadují tepelné zpracování k dosažení optimálních vlastností, v závislosti na tepelném zpracování bývají mechanické vlastnosti podobné nízkouhlíkové oceli. V některých případech se používá precipitační zpevnění (stárnutí) ke zlepšení mechanických vlastností, především zvýšení meze kluzu se současným snížením tažnosti, zvýšení meze pevnosti již není tak velké. Slitiny skupiny 2000 nemají tak dobrou odolnost vůči korozi jako slitiny jiných skupin, v některých případech jsou napadány

interkrystalickou korozi. Slitiny řady 2000 jsou vhodné pro díly vyžadující dobrou pevnost do teplot 150 °C.

- c) **3xxx (skupina 3000):** Tyto slitiny hliníku obvykle nebývají tepelně zpracovány, avšak mají přibližně o 20% vyšší pevnost oproti skupině 1000. Mangan je používán jako hlavní legura pouze u několika málo slitin, protože jeho rozpustnost je v hliníku omezená (maximum kolem 1,5%).
- d) **4xxx (skupina 4000):** Hlavním legujícím prvkem je křemík, který se vyskytuje ve velkém množství (do 12%) a zajišťuje lepší tavitelnost. Z tohoto důvodu jsou slitiny Al-Si používány jako svařovací dráty a pájecí slitiny pro spojování hliníku, u nichž je nutná nižší tavitelnost přídavného než základního materiálu.
- e) **5xxx (skupina 5000):** Použitím hořčíku jako hlavního legujícího prvku, případně hořčíku s manganem, dosáhneme dobře obrobitelné, středně až vysokopevné hliníkové slitiny. Hořčík je podstatně efektivněji zpevňující prvek než mangan. Množství kolem 0,8% Mg je z hlediska zpevnění srovnatelné s 1,25% Mn, navíc lze do hliníkových slitin přidávat mnohem větší množství hořčíku než manganu. Slitiny této řady jsou dobře svařitelné a jsou odolné proti korozi.
- f) **6xxx (skupina 6000):** Slitiny skupiny 6000 obsahují křemík a hořčík v přibližně rovnovážném množství potřebném pro vytvoření křemičitanu hořečnatého (Mg_2Si), který umožňuje tepelné zpracování. Přestože nejsou tak pevné jako většina slitin řady 2000 a 7000, mají slitiny řady 6000 dobrou svařitelnost, obrobitelnost a korozivzdornost při středních hodnotách pevnosti.
- g) **7xxx (skupina 7000):** Zinek (množství od 1 do 8%) je hlavním legujícím prvkem hliníkových slitin řady 7000. Při spojení s malým množstvím hořčíku dává vysoce pevné tepelně zpracovatelné slitiny. Obvykle se v malém množství přidávají i další legující prvky jako měď a chrom. Slitiny 7000 jsou hojně používány v leteckém průmyslu (draky letadel), jako konstrukční prvky mobilních zařízení, vysoce namáhané díly a v poslední době často jako rámy špičkových horských kol. Vysokopevnostní slitiny vykazují snížení odolnosti proti koroznímu praskání, proto jsou používány za teplot zajišťujících lepší kombinaci pevnosti, korozní odolnosti a houževnatosti [zdroj 9,11].

2.2. Vybraná hliníková slitina pro experimenty

2.2.1. Obecné informace slitiny EN AW 7022 (AlZn₅Mg₃Cu)

Tato slitina se řadí mezi tzv. slitiny vytvrditelné, vyznačují se specifickým způsobem precipitace. Hlavními legujícími prvky jsou zinek a hořčík. Chemické složení a mechanické vlastnosti experimentální slitiny jsou uvedeny v tabulce 2. Proces vytvrzení v těchto slitinách je podmíněn přítomností intermetalických fází, jejichž vznik udává poměr zinku k hořčíku. Pokud je poměr Zn:Mg > 2 bude přítomna fáze Al₂Mg₃Zn₃. V případě, že je přítomno poměrně vysoké množství hořčíku může vznikat i komplexní fáze Mg₂₃AlZn₄₉.

Zpevňující složkou této slitiny je hořčík nacházející se v tuhém roztoku hliníku. Přesycený tuhý roztok je velmi stabilní, takže i při nízkých rychlostech ochlazování zůstává roztok přesycen. Poté následuje přirozené vytvrzování, díky kterému se zlepšují mechanické vlastnosti. Celý proces vytvrzování je možné urychlit tzv. umělým stárnutím. Slitiny se dodatečně legují mědí pro zvýšení odolnosti proti korozi pod napětím, která ovšem výrazně snižuje svařitelnost. Kvůli výhodnému poměru měrné hmotnosti a meze kluzu se hliníková slitina EN AW 7022 T651 - (T 651 stárnutý na maximální pevnost), používá ve výrobě rámu jízdních kol a motocyklů, lehkých přenosných konstrukcí pro pódiá, sportovních zařízení. Aby tyto materiály mohly být použity ve výše zmíněných aplikacích, je nutné hledat způsoby zabezpečující svaření s minimálním vlivem na zpevňující precipitáty, tj. bez poklesu mechanických vlastností. [2]

Tab. 2 – Chemické složení a mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 7022 T651 – [9]

EN AW 7022 T651 dle ČSN EN 573-3 (AlZn ₅ Mg ₃ Cu)							
Zn	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Cr	Ti+Zr
4,3 - 5,2%	2,6 - 3,7%	0,50%	< 0,5%	0,1 - 0,4%	0,5 - 1,0%	<0,3%	0,20%
Pevnost v tahu [MPa]		Mez kluzu [MPa]		Tažnost A50 [%]		Tvrdość	Modul pružnosti v tahu [MPa]
Zaručená	Typická	Zaručená	Typická	Zaručená	Typická	Typická	
450	550	370	490	8	10	165HB	71000

2.3. Podmínky svažitelnosti slitin hliníku

Svažitelnost hliníkových slitin se hodnotí především podle pevnosti v tahu svarových spojů a chemického složení materiálu. Dalším z ukazatelů svažitelnosti může být náchylnost svarových spojů na vznik defektů. Základní podmínky svařování hliníkových slitin jsou pro metodu TIG následující [2]:

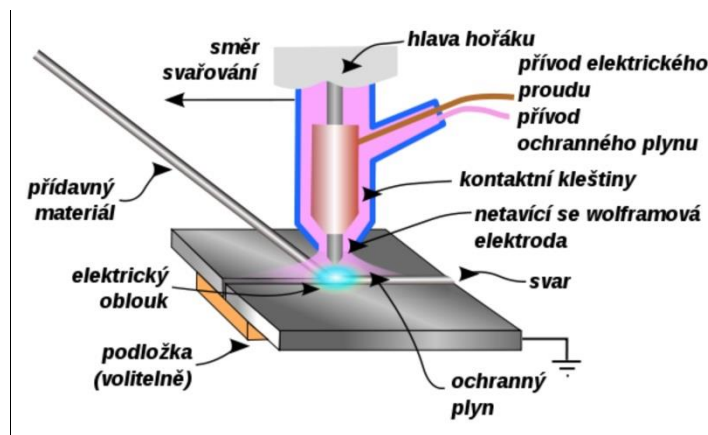
- Metodou TIG se doporučují svařovat tloušťky 1–10 mm
- Využití střídavého proudu s pulzací a ochrannými plyny Ar, Ar + He
- Vhodné svařovací parametry
- Volba vhodného přídavného materiálu (většinou podobného chemického složení jako základní materiál)

Technický hliník a jeho slitiny způsobují ve svařování určité problémy, které je nutné před svařováním eliminovat. Tyto problémy bezprostředně vyplývají z charakteristických vlastností hliníkových konstrukčních materiálů, které je možné shrnout do následujících bodů [2]:

- Hliník a hliníkové slitiny vytvářejí na svém povrchu vrstvu Al_2O_3 s vysokým bodem tání ($2\ 050\ ^\circ C$), což je zhruba trojnásobná hodnota bodu tání čistého hliníku.
- Povrchová vrstva Al_2O_3 je elektricky nevodivá
- Hliník a hliníkové slitiny mají velkou tepelnou vodivost, což stěžuje podmínky při místním natavování hliníku obloukem
- Nízký modul pružnosti oproti uhlíkovým ocelím může způsobit problémy s deformací svarů a svařovaných konstrukcí
- Některé vytvrditelné hliníkové slitiny ztrácejí při teplotě nad $200\ ^\circ C$ svou pevnost
- Hliník a hliníkové slitiny jsou schopny v tekutém stavu rozpouštět vodík ve velkém množství, čímž mohou vzniknout dutiny ve svarovém spoji
- Plechy malých tlouštěk jsou dodávány ve vytvrzeném stavu a v místě svaru a v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) jejich pevnost klesá

3. SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU METODOU TIG

Metoda TIG (Tungsten Inert Gas) je jedna z metod použitelných pro svařování hliníku a jeho slitin. Pomocí této metody je možné provést kvalitní svarový spoj na hliníku a jeho slitinách. Výhodou této metody je právě dosažitelná kvalita svarových spojů a také její operativnost při svařování v polohách. Technologie umožňuje jednoduchou obsluhu, přesnou regulaci parametrů svařování, kontrolu vneseného tepla do svaru a zajišťuje stabilitu oblouku. Princip metody TIG je zobrazen na obrázku 3.



Obr.3 – Svařování střídavým proudem metodou TIG – AUTOR NEUVEDEN, [www.svarecky-elektrody](http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/). [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: <http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-356/>

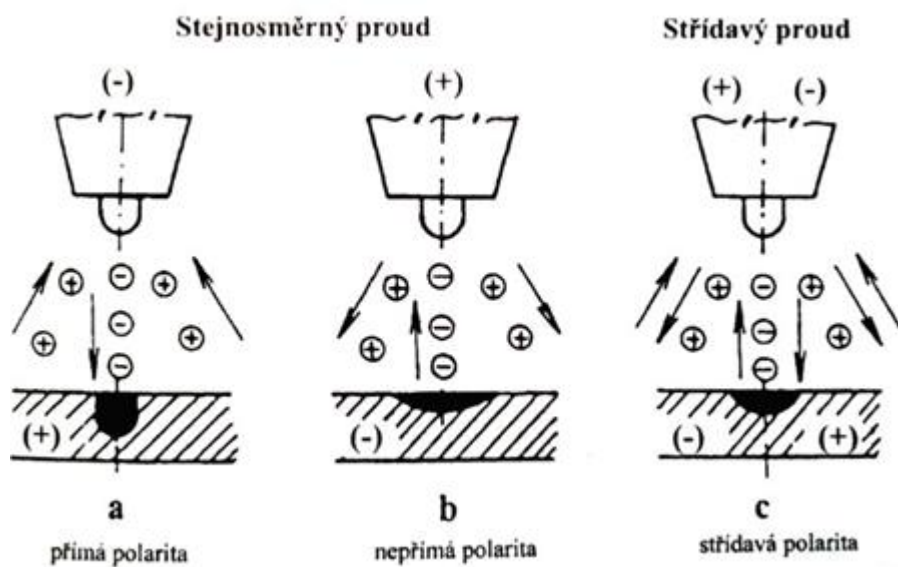
3.1. Svařovací elektrický oblouk TIG

Elektrický oblouk je trvalý elektrický výboj ve vodivém prostředí mezi katodou (záporný pól) a anodou (kladný pól). Podmínkou vzniku takového oblouku je proud vyšší než 0,3 A. Elektrický oblouk má typicky teplotu 6-10 tisíc °C a je charakteristický intenzivním tepelným a světelným zářením.

Elektrický oblouk se vyznačuje oblastí plazmy a rekombinační oblastí. Působením vysoké teploty plazmy dochází k narážení kladných iontů na elektrony a vzniká tak ionizace. Charakteristiky a teploty samotného oblouku při sváření metodou TIG jsou závislé na polaritě hořáku a základního materiálu. Rozlišujeme tzv. polaritu přímou nebo nepřímou. Zapojíme-li hořák s elektrodou na záporný pól zdroje, jedná se

o polaritu přímou. Pokud hořák zapojíme na kladný pól zdroje, mluvíme o polaritě nepřímé. Polarita nám ovlivňuje šířku svaru a hloubku průvaru. [3].

Specifickou vlastností metody TIG je jeho schopnost odstraňovat svým fyzikálním účinkem povrchové oxidy na svařovaném materiálu. Tento jev se nazývá čisticí účinek. Princip spočívá ve změně polarity mezi hořákem a základním materiálem díky střídavému proudu. Čisticí účinek probíhá tehdy, když netavící se elektroda má kladnou polaritu (anoda) a základní materiál má polaritu zápornou (katoda). Svařovací proces probíhá, když se obě polarity, díky střídavému proudu, zamění. Čisticí účinek má hlavní využití při svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin, protože tyto materiály vytvářejí na povrchu vrstvu obtížně tavitelných oxidů. [3]

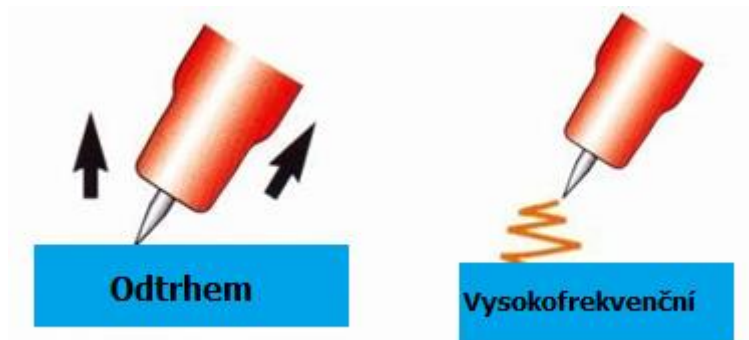


Obr. 4 – Vliv přímé a nepřímé polarity na svar – [3]

3.2. Zapálení oblouku

Elektrický oblouk u metody TIG se může zapalovat dotykově nebo bezdotykově. Dotykové, tzv. zkratové zapálení spočívá v dotyku elektrody s povrchem svařovaného materiálu a následného rychlého odtržení na malou vzdálenost. Bezdotykové zapalování (HF) probíhá při vysoké frekvenci a napětí při ionizaci plynu. Zdrojem zápalu je vysokofrekvenční ionizátor. U této metody nedojde oproti dotykové k žádnému styku elektrody s materiálem. Při zapalování oblouku nejvíce využíváme bezdotykového zapalování, které nám zaručuje nepoškození wolframové elektrody. U moderních

svářecích strojů je možno nastavit zda chceme dotykové či bezdotykové zapalování. Před 40 lety bylo využíváno především zkratového zapalování. [3]



Obr. 5 – Zapalování oblouku odrhem a vysokofrekvenčním zapalováním – AUTOR NEUVEDEN, www.svarbazar.cz [online]. [cit. 18. 6. 2015].
Dostupný na:
<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2012051402>

3.3. Ruční svařování

Metodou TIG lze svařovat ve všech polohách. Postup posouvání hořáku u svařování může být buď vpřed, nebo vzad. Výhoda svařování vpřed spočívá v předehřívání základního materiálu a lze lépe podávat přídatný materiál do svarové lázně. Při této metodě je velmi důležité udržovat dokonalou inertní ochranu svaru i elektrody příslušným inertním plynem a zajistit plynulý posuv hořáku.

Důležité je také udržet krátký oblouk a zamezit styku elektrody s lázní či přídatným materiálem. Wolframová elektroda by měla být nabroušena do špičky a vysunuta z hořáku o délku 1 až 1,5 násobku průměru elektrody. Po svaření by měl být svár celistvý a na povrchu čistý a lesklý. Základem pro dosažení kvalitního svarového spoje je příprava materiálu před svařením. Materiál by měl být důkladně očištěn, odmaštěn a měla by být odstraněna povrchová vrstva oxidů a to buď mechanicky, nebo chemicky. Očištění provádíme v co nejkratší době před samotným svařováním.

Výhodou ručního svařování je jeho mobilita, univerzálnost a minimální časové nároky na nastavení stroje. Nevýhodou může být při delších svarech nerovnoměrnost přidávání svařovacího drátu a vzhled svaru. [4]

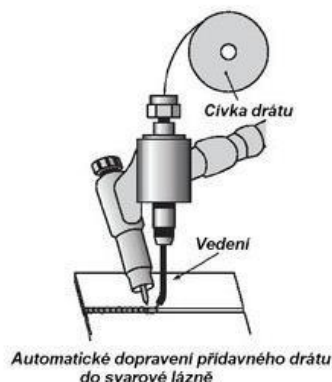
3.4. Automatizované svařování

Svařování za pomoci automatizovaných strojů může být buď plně automatické, nebo poloautomatické. Automatické svařovací roboty pracují zcela samostatně a jsou řízeny CNC řídicím systémem, který řídí stroj dle naprogramování obsluhou. Obsluha nastaví do řídicího počítače požadované parametry a ten pak automaticky řídí velikost proudu, rychlost přidávání svařovacího drátu, směr posuvu svařovacího hořáku a rychlost posuvu. Tyto svařovací automaty jsou vhodné především pro sériovou výrobu.

Poloautomaty pracují s pomocným podáváním drátu, které je automatické a obsluha pak jen řídí dráhu a rychlost posuvu svařovacího hořáku. Výhodami svařování automatem jsou rovnoměrné svary, dobrý vzhled svaru a vyšší rychlost svařování. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena, menší mobilita a delší čas potřebný pro seřízení stroje.



Obr.6 – Svařovací automat – AUTOR NEUVEDEN, www.kskct.cz [online]. [cit. 18.6.2015].
Dostupný na: <http://www.kskct.cz/web/podstranka.php?jazyk=cz&odkaz=sa>



Obr.7 – Poloautomatické svařování – AUTOR NEUVEDEN, www.automig.cz [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig>

3.5. Ochranné atmosféry

Ochranný plyn při svařování metodou TIG zabezpečuje ochranu wolframové elektrody, svarové lázně a základního materiálu před účinky okolní atmosféry. Má také vliv na zapálení a stabilitu oblouku během svařovacího procesu. Největší využití při svařování v ochranné atmosféře mají argon a helium nebo jejich směsi. Ceny těchto plynů jsou vysoké, proto je zapotřebí zvážit jaký plyn použijeme a v jakém množství. Ochranné plyny jsou uchovávány a přepravovány v tlakových lahvích různých velikostí. Tyto lahve jsou barevně označeny dle plynu, který obsahují [4].



Obr. 8 – Barevné značení tlakových lahví– AUTOR NEUVEDEN, www.pozary.cz [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: <http://www.pozary.cz/clanek/53394-pomucka-pro-velitele-jednotky-po-tlakove-lahve/>

Argon

Argon je inertní plyn, který nereaguje s jinými chemickými prvky. Tento plyn nemá barvu, chuť ani zápach a je těžší než vzduch. Jeho malá tepelná vodivost a nízká ionizační energie usnadňuje zapalování a stabilizaci oblouku. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu, proto se v něm vyskytují nečistoty jako: dusík, kyslík, vlhkost a vodík. Tyto nečistoty mají nepříznivý vliv na kvalitu svarového spoje. Pro vytvoření co nejkvalitnějšího spoje se používá argon o vysoké čistotě od 99,7% až do 99,999%. Podle čistoty plynu se odvozuje jeho označení. Např. Argon o čistotě 99,9 má označení 2N7 a argon o čistotě 99,996 má značku Ar 4. 6. [3]

Helium

Helium stejně jako argon patří mezi inertní plyny. Tento inertní plyn je lehčí než vzduch a nemá chuť, barvu ani zápach. Vyrábí se štěpením zemního plynu nebo destilací vzduchu. Helium má nízkou ionizační schopnost, ale vyžaduje dvakrát vyšší napětí svařovacího proudu než při využití argonu. Poskytuje vysoký tepelný výkon a díky tomu i vyšší rychlost svařování avšak oblouk se hůře zapaluje a obtížněji hoří. Čistota helia pro svařování se ohybuje od 99,996% do 99,999%. Podobně jako se označuje argon, označujeme i helium. Helium o čistotě 99,996% má značku He 4.6 a helium o čistotě 99,999% má označení He 5. 0. [3]

Směsi argon + helium

Směs plynů argonu a helia se používá pro využití různých vlastností obou těchto plynů zároveň. Množství obsahu helia v argonu se pohybuje od 1 do 95%. Se zvětšujícím obsahem helia se zvyšuje napětí na oblouku a také tepelný výkon což zvyšuje produktivitu práce. Vlastnosti směsí těchto plynů se využívají především při svařování materiálů s velkou tepelnou vodivostí a při větších tloušťkách svařovaného materiálu. Směs těchto plynů se nejčastěji využívá v poměru Ar+He: (70%Ar+30%He), (50%Ar+50%He), (95%Ar+5%He), (80%Ar+20%He). Směsi plynů mají dobré svařovací vlastnosti a využívají se především v automatizovaném svařování. [6]

Tab. 3 – Složení ochranných plynů pro svařování hliníku – Ing. Jan Kašpar, www.mmspektrum.com [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ochranne-plyny-s-obsahem-dusiku-pro-svarovani-hliniku.html>

Ochranný plyn	Skupina podle ISO 14175	Ar [% obj.]	He [% obj.]	N ₂ [% obj.]
Argon 4.6	I1	100	–	–
Aluline He30	I3	70	30	–
Aluline He50	I3	50	50	–
Aluline He70	I3	30	70	–
Helium 4.6	I2	–	100	–
Aluline N	Z	zbytek	–	0,015
Aluline He15N	Z	zbytek	15	0,015
Aluline He30N	Z	zbytek	30	0,015
Aluline He50N	Z	zbytek	50	0,015

3.6. Přídavný materiál

Při svařování v ochranné atmosféře volíme přídavný materiál podle druhu základního materiálu, jeho mechanických vlastností a typu svarového spoje. Při výběru přídavného materiálu se vychází z požadavku, aby byl svařovaný spoj stejně kvalitní nebo ještě o třídu kvalitnější než základní materiál. U dynamicky namáhaných konstrukcí je nutné volit takový přídavný materiál, který vytvoří o třídu pevnější svarový kov než je materiál základní. Přídavný materiál u svařování netavící se wolframovou elektrodou nazýváme svařovací drát. Účelem přidání svařovacího drátu do svaru je legovat svarový kov a snížit tak riziko vzniku trhlin a dutin, zlepšit formování svaru a dosáhnout požadovaného tvaru spoje. Svařovací dráty jsou kruhového průřezu a jsou dodávány podle potřebné délky, průměru a požadované jakosti. Nejčastěji jsou vyráběny o délce 1 metr a průměrech: 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0 mm. Rozměry přídavných materiálů stanovuje norma ČSN EN ISO544. Označování drátu pro svařování netavící se elektrodou probíhá dle výrobce nebo podle uvedené normy. [3]



Obr. 9 – Svařovací drát - cívka – AUTOR NEUVEDEN, www.esab.com [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na:
<http://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.productsbycategory&catId=55>

3.7. Wolframové elektrody

Wolframové elektrody jsou tyčky kruhového průřezu, které mají za úkol přivést elektrický proud do svaru a koncentrovat elektrický oblouk do místa svařování. Netavící se elektrody jsou vyráběny z čistého wolframu nebo wolframu s přísadami prvků ZrO_2 , CeO_2 , ThO_2 , LaO_2 . Na výrobu elektrod se využívá wolfram z důvodu jeho vysoké teploty tavení $3410\text{ }^{\circ}\text{C}$. S využitím legur se blíží teplota tavení až k $4200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Výroba elektrod je normována dle ČSN EN ISO 6848 a jsou vyráběny v průměrech: 0,5; 1; 1,6; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10 mm a v délkách 50; 75; 150; 175 mm. Průměr elektrody pro svařování odvodíme z velikosti a druhu použitého proudu, polarity, složení ochranného plynu a druhu základního materiálu. Nelegované elektrody jsou nejvíce využívány při svařování hliníkových a hořčíkových slitin. Konce hrotu wolframových elektrod jsou broušeny do určitého tvaru, nejčastěji do špičky. Touto úpravou zabráníme proudovému přetížení hrotu a jeho odtavení. Wolframové elektrody pro TIG svařování lze rozdělit podle příměsí [6].

Pro snadné odlišení jednotlivých typů se používá barevného značení vždy jednoho konce elektrody. Přiřazení barev jednotlivým typům najdeme v tab. 4.

Tab. 4 – Barevné značení wolframových elektrod – Autor neuveden, www.svarbazar.cz [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na:

<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>

Označení elektrody	Barva	Legování
WP	zelená	čistý wolfram 99,8%
WT 10	žlutá	thorium 1% ThO ₂
WT 20	červená	thorium 2% ThO ₂
WT 30	fialová	thorium 3% ThO ₂
WT 40	oranžová	thorium 4% ThO ₂
WC 20	šedá	cerium 2,0% CeO ₂
WL 10	černá	lanthan 1,0% LaO ₂
WL 15	zlatá	lanthan 1,5 % LaO ₂
WL 20	modrá	lanthan 2,0% LaO ₂
WZ 08	bílá	zirkon 0,8% ZrO ₂

WP - čistý wolfram. Elektroda je vhodná pro svařování slitin hliníku střídavým proudem. Zde vyniká dobrou stabilitou oblouku. Naopak nevhodná je pro svařování stejnosměrným proudem. Jako jediná se WP elektroda nebrousí do špičky.

WT - obsah thoria způsobuje snížení výstupní práce a zvýšení emise elektronů. Se stoupajícím obsahem thoria se zlepšuje:

- zapalovací vlastnosti
- trvanlivost
- proudová zatížitelnost

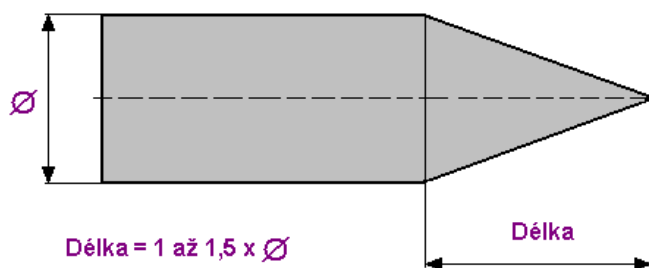
Hlavní použití těchto elektrod je při svařování vysoce legovaných a nerezových ocelí stejnosměrným proudem, kde vyznačují výborné vlastnosti. Thorium je radioaktivní prvek. Se stoupajícím obsahem Thoria roste radioaktivita těchto elektrod. Nebezpečí thoriových elektrod není v záření gama (zanedbatelné) ale v záření alfa. Radioaktivní částice se usazují v plicích a v nejhorším případě mohou způsobit rakovinu. Pokud jsou přesto použity, je nutné důkladné odsávání při broušení i při svařování. Práce s těmito elektrodami bez těchto opatření je nezodpovědná a vede ke komplikacím z hlediska bezpečnosti práce. V dohledné době lze očekávat přechod od WT elektrod k elektrodám WC a WL. V zemích EU jsou již elektrody WT zakázány.

WC - cerované elektrody jsou univerzální pro téměř všechna použití. Lze je použít pro svařování stejnosměrným i střídavým proudem. Cerované elektrody jsou vhodné pro svařování nelegovaných i legovaných ocelí, slitin hliníku, slitin titanu, niklu, mědi a hořčíku. WC elektrody mají svářecí vlastnosti podobné jako WT elektrody: velmi dobré zapalovací vlastnosti - i při teplé elektrodě, dobrá trvanlivost a proudová zatížitelnost. Podstatně méně však zatěžují životní prostředí a zdraví svářeče.

WL - lanthanované elektrody jsou stejně jako WC elektrody univerzální pro téměř všechna použití při svařování střídavým i stejnosměrným proudem. Lathanované elektrody předstihují cerované zejména v oblasti nízkých proudů. Jsou tak vhodné i pro svařování plasmou a mikroplasmou. Vyšší podíl lathanu usnadňuje zapalování, zejména při automatizovaném svařování (orbitální, robotické, polohovací stoly atd.)

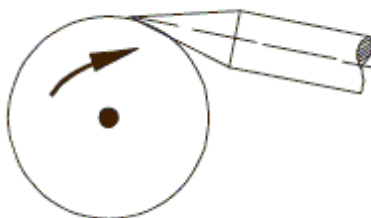
WZ - obsah zirkonu minimalizuje tvorbu wolframových vměstků ve svarovém kovu. Použití je hlavně pro střídavý proud a tedy pro svařování hliníkových materiálů jako náhrada WP elektrod. Pro stejnosměrný proud je lze použít jen podmíněně. Dále pak tvar konce elektrody ovlivňuje podstatným způsobem průběh svařování a kvalitu svaru.

Elektrody se brousí do špičky. Délka špičky má být asi 1 - 1,5 násobek průměru (pro př. 2,4 mm = délka špičky 2,4 - 3,6 mm), viz obr. 10



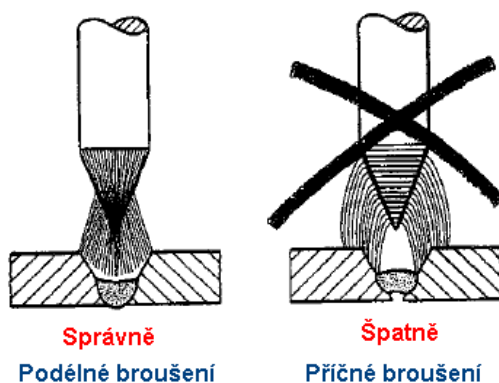
Obr. 10 – Geometrie tvaru konce elektrody – MUHLMEIER GMBH, www.svarbazar.cz, [online]. [cit. 18.6.2015]. Dostupný na: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>

Směr broušení podélně tak, aby vrypy po broušení byly rovnoběžně s podélnou osou elektrody.



Obr. 11 – Broušení konce elektrody – MUHLMEIER GMBH, www.svarbazar.cz, [online]. [cit. 18.6.2015]. Dostupný na: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>

Při příčném broušení způsobují rýhy nestabilní oblouk a vylamování částíček wolframu, které se potom mohou dostat do lázně. Nehledě na to, že při příčném broušení bychom elektrodu snadno zlomili. Elektrodu je při broušení nutné otáčet velmi pomalu. [7]



Obr. 12 – Geometrie tvaru konce elektrody – MUHLMEIER GMBH, www.svarbazar.cz, [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>

3.8. Svařovací hořák pro metodu TIG

Svařovací hořák slouží k přívodu elektrického proudu na elektrodu a také přívodu inertního plynu do prostoru svaru. Velikost hořáků pro svařování metodou TIG a jejich konstrukce vychází ze zatížení svařovacím proudem. Svařovací hořáky mohou být chlazené vzduchem nebo pro hodnoty proudu nad 90 A kapalinou.

U vzduchem chlazených hořáků se využívá plynová keramická tryska. Tvar této trysky ovlivňuje kvalitu ochranné plynové atmosféry a volí se podle charakteru konkrétního svaru (tvaru, materiálu, polohy atp.). Tyto trysky jsou elektricky nevodivé, mají dobré tepelně izolační vlastnosti. Jejich nevýhodou je relativně malá životnost. Důležitou součástí hořáku je kleština, která fixuje polohu wolframové elektrody v hořáku a zabezpečuje přívod svařovacího proudu.

Další část hořáku tvoří plynová čočka, která usměrňuje tok inertního plynu a tím vytváří kvalitnější krytí svarové lázně. Čočky jsou vyráběny v různých tloušťkách a průměrech. Jejich velikost se volí v závislosti na velikosti svařovacího proudu. Svařovací hořáky by měly splňovat tyto požadavky: dokonalé chlazení hořáku, okamžité nastartování elektrického oblouku, snadnou výměnu wolframové elektrody a dokonalou těsnost všech spojů. [7]



Obr. 13 – Svařovací hubice a plynová čočka – AUTOR NEUVEDEN, www.techpark.sk [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: <http://www.techpark.sk/technika-9102014/air-liquide-welding-reseni-pro-automatizaci-ve-svarovani.html>

3.9. Příprava na svařování

Pro tenké plechy se příprava svarových ploch provádí stříháním, pro tlusté plechy se využívá třískového obrábění nebo broušení. Konkrétní případy úprav svarových ploch pro různé typy svarových spojů jsou uvedeny na obrázku 14. Očištění povrchu se realizuje buď mechanicky (broušením) nebo chemickým způsobem (mořením 15–20 % NaOH). Tato fáze je zvláště důležitá kvůli odstranění oxidické vrstvy Al_2O_3 . [2]

Tloušťka materiálu	Značka svaru	Řez	Úhel α, β	Mezera b	Doporučená metoda svařování
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	△		70° až 100°	≤ 2	311 111 131 135 141
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$			—	≤ 2	
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$			60° až 120	≤ 2	
2 až 4	▷		—	≤ 2	
$t_1 > 4$ $t_2 > 4$			—	—	

Obr. 14 – Příprava svarových ploch dle ČSN EN 29692 – AUTOR NEUVEDEN, [www.http://eluc.cz](http://eluc.cz) [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: <http://http://eluc.cz/verejne/lekce/1804>

4. Experimentální část

4.1. Seznam použitých strojů a zařízení

Pro vykonání experimentální části této bakalářské práce byly použity tyto přístroje a zařízení:

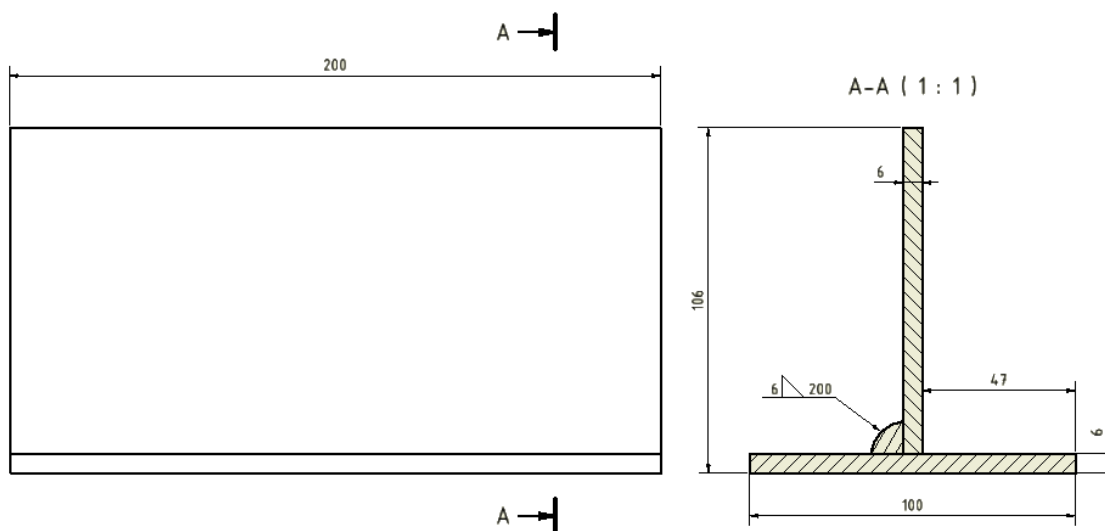
- Pásová pila Optimus Opti S 100 G
- Svařovací zdroj Migatronik PI 320
- Metalografické silikonové formy
- Broušící a leštící stroj Buehler Beta - Vector power head
- Mikrotvrdoměr Mikrotvrdomer Buehler Met 1105 D
- Mikroskop Zeiss Observer D1m



Obr. 15 – Pracoviště využité pro experiment

4.2. Svařovací parametry a rozměry základního materiálu

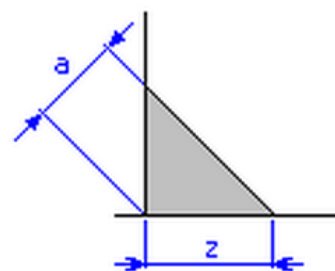
Pro tento experiment, byly svařeny koutovým svarem dvě desky z hliníkové slitiny EN AW 7022 T651 ($\text{AlZn}_5\text{Mg}_3\text{Cu}$). Rozměry uvedeny na obr. 16.



Obr. 16 – Rozměry základních materiálů

Kontrola rozměrů koutového svaru:

- pro tloušťku materiálu 6 mm by dle vzorce $a = 0,7 \cdot t$ [10] vyšla hodnota svaru $a = 4,2$ mm
- dle zkušeností byl zvolen svar s velikostí $a=6$ mm



Naměřené hodnoty dle přídatných materiálů:

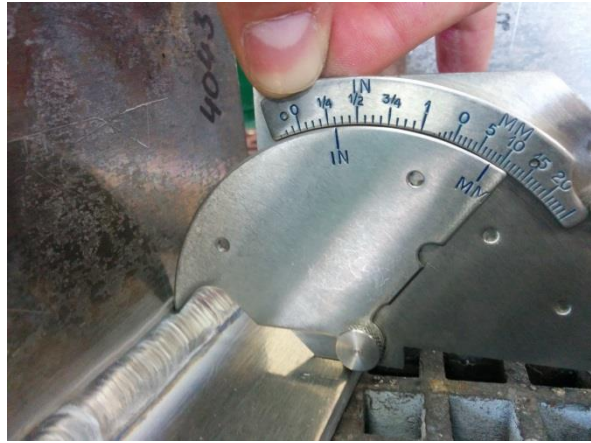
Tab. 5 – Naměřené rozměry a , z

Přídavný materiál			
	4043	5356	5087
rozměr a [mm]	5,8 - 5,9	6,6 - 6,7	6 – 6,1
rozměr Z [mm]	8	9,5	9,2

- kontrolní měření s malými odchylkami odpovídaly nám předem stanoveným rozměrům



Obr. 17 Měření rozměru *a*



Obr. 18 Měření rozměru *z*



Obr. 19 Měření rozměru *a*



Obr. 20 Měření rozměru *z*



Obr. 21 Měření rozměru *a*



Obr. 22 Měření rozměru *z*

Svařovací parametry:

- Průměr wolframové elektrody 4 mm
- Střídavý svařovací proud
- Svařovací proud 220 A
- Spotřeba ochranného plynu 10 l/min
- Průměr drátu 3,2 mm
- Frekvence 70 Hz
- Předfuk 0,4 s
- Doba náběhu 1 s
- Doběh 25 %
- Dofuk 10 s

4.3. Výroba metalurgických vzorků

Metalografický vzorek, nebo též vzorek pro optickou metalografii, je vzorek připravený za účelem studia struktury materiálu. Metalografický vzorek, jehož jedna plocha je připravena k metalografické analýze, se nazývá výbrus. Tyto typy vzorků, určené pro optickou nebo skenovací elektronovou mikroskopii, se v metalografii používají nejčastěji. Již před započítím samotné přípravy vzorku musí být definováno, k jakému účelu má být vzorek určen. Na základě materiálu vzorku, toho, co chceme analyzovat a s ohledem na použitou mikroskopickou metodu je nutné zvolit odpovídající postup jeho přípravy.

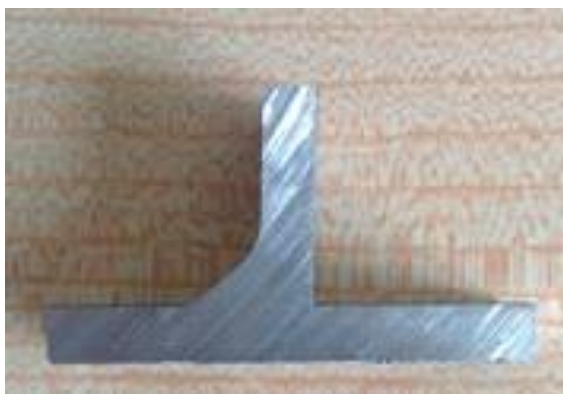
4.3.1. Postup přípravy metalografických výbrusů

Jednotlivé kroky, jako je volba vhodného místa odběru vzorku, jeho preparace, broušení, leštění a případné leptání, jsou podrobně popsány v následujících podkapitolách.

Odběr vzorku:

Vzorky z měkkých a snadno obrobitelných materiálů jsou obvykle odebrány za použití řezání či odfrézování. Při odběru vzorku nesmí dojít k mechanickému ani tepelnému

ovlivnění jeho struktury. Vzorek proto nesmí být plasticky deformován a jeho teplota nesmí dosáhnout teploty případných fázových transformací. Pro odběr vzorků je proto naprosto nevhodné řezání kyslíko-acetylenovým plamenem nebo obloukem. Velikost vzorku volíme podle možností mikroskopu, pomocí něhož jej budeme následně pozorovat, a zohledňujeme i plánovaný postup přípravy vzorku. Místo, ze kterého bude vzorek odebrán, musí být zvoleno tak, aby vzorek vystihl charakter zkoumané struktury součástí. V našem případě jsme odebíraly vzorky tři z každého svařence. Hrubé řezání bylo provedeno na pásové pile, následně v metalografické laboratoři byly vzorky zařezány na požadované rozměry k měření.



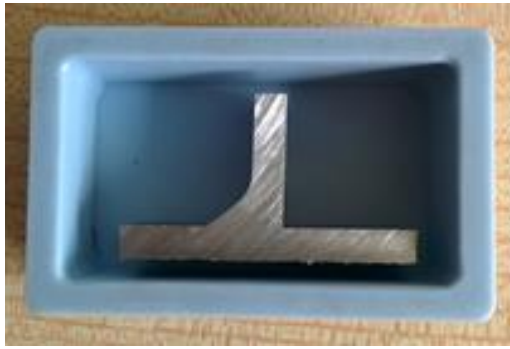
Obr. 23 Odřezaný vzorek



Obr. 24 Řezací zařízení Struers Labotom 3

Preparace vzorku:

Při zalévání za studena se čistý vzorek umístí do formy tak, aby plocha určená k další úpravě a analýze byla v kontaktu se dnem formy (Obr. 24). Vzorek se zalije připravenou zalévací hmotou, která se nechá ve formě vytvrdit. Jako zalévací hmoty se používají tekuté epoxidové nebo práškové akrylátové nebo polyesterové pryskyřice důkladně promíchané s příslušným tvrdidlem v předepsaném poměru. Pro náš případ jsme použili zalévací hmotu VariDur 200 s tvrdidlem VariDur. Doba polymerace závisí na složení zalévací hmoty i jejím objemu. V současné době je na trhu dostupná široká nabídka zalévacích hmot s dobou polymerace od několika minut až po desítky hodin. V našem případě to bylo kolem 8-10 minut.



Obr. 25 Vzorek připravený pro zalití



Obr. 26 Vzorky po zalití

Broušení a leštění vzorku:

Broušení vzorků má za cíl minimalizovat povrchové nerovnosti vzorku. Lze jej provádět ručně nebo mechanizovaně. Při ručním broušení pomocí brusného papíru pohybujeme vzorkem stále jedním směrem. Při přechodu na brusný papír s menší drsností vzorek opláchneme vodou a brousíme jej ve směru kolmém k předcházejícímu směru. Důkladné oplachování vzorku je nezbytné, aby nedošlo k znehodnocení jemnějšího papíru uvolněnými zrny hrubšího brusiva z předchozího papíru. Brousíme tak dlouho, dokud zcela nezmizí drážky reprezentující předchozí směr broušení. Poté opět opláchneme, přejdeme na jemnější papír, tj. papír s vyšší zrnitostí a proces opakujeme, dokud nevyčerpáme nejjemnější brusivo. K broušení se obvykle používají SiC nebo Al₂O₃ brusné papíry s dostupnou zrnitostí 60 až 2400 dle normy FEPA. Pro broušení našich vzorků byly použity brusné papíry se zrnitostí, 600, 1000, 1200, 2400. Kromě broušení pomocí vázaného brusiva, tedy běžných brusných papírů nebo speciálních podložek, se pro dokončovací operace používá také volné brusivo v kombinaci s vhodnou podložkou (lapování). Brusivo se volí podle materiálu připravovaného vzorku. Obvykle se používá SiC, Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄, B₄C nebo C (diamant).

Leštění je dalším krokem při přípravě kvalitního výbrusu. Na rozdíl od broušení materiál z povrchu vzorku neubývá, ale dochází pouze k deformaci vrcholů povrchové drsnosti, příp. jen minimálním úbytkům. Princip mechanického leštění je obdobný jako při broušení. Provádí se přitlakem vzorku na rotující leštící kotouč za pomoci leštícího média. Potahovým materiálem leštícího kotouče může být samet, satén, flanel, kord nebo jiná textilie. V současné době jsou na trhu speciální leštící podložky určené pro

konkrétní typ a velikost brusiva. Brusivo může mít podobu prášku, pasty nebo suspenze, která již obsahuje další pomocné látky jako je smáčidlo či chladicí médium. K leštění se obvykle používají Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO nebo C (diamant).



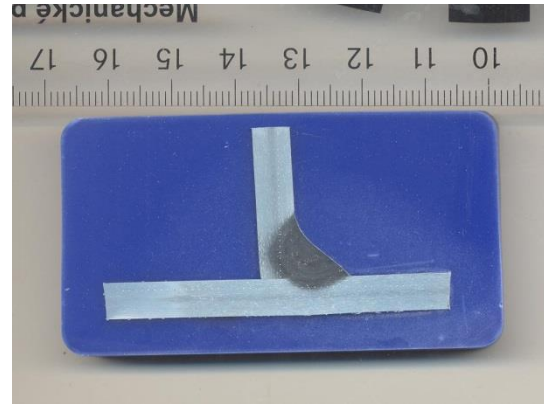
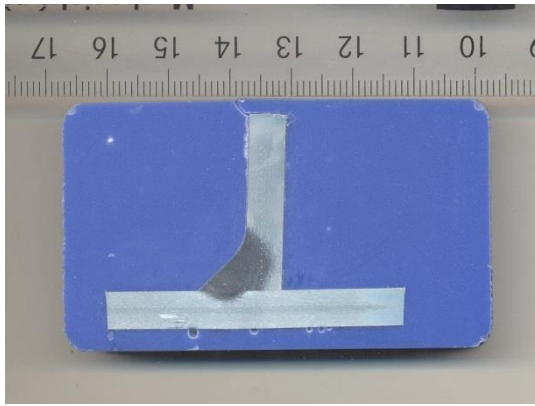
Obr. 27 Bruska a leštička Buehler Obr. 28 Vzorek po vyleštění

Leptání vzorku:

Leptání vzorků slouží k vyvolání jejich mikrostruktury. V závislosti na materiálu výbrusu a konkrétních požadavcích pro následné pozorování je možné aplikovat různé metody leptání vzorků jako například chemické, na hranice zrn, plošné, selektivní, elektrolytické nebo tepelné. [8]

Pro vzorky byl použit roztok se složením:

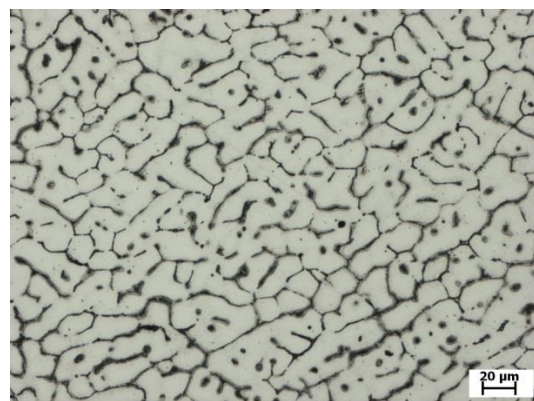
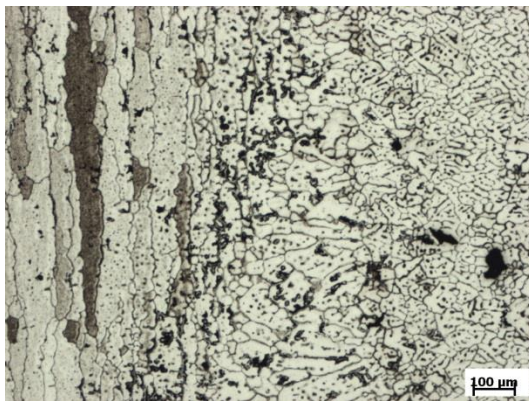
- 10 ml kyselina fluorovodíková
- 15 ml kyselina chlorovodíková
- 90 ml destilovaná voda



Obr. 29 Naleptané vzorky 5356 a 5087

4.4. Mikrostruktura

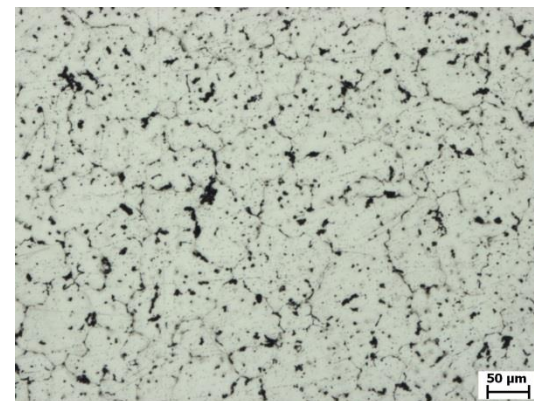
4.4.1. Přídavný materiál 4043



Obr. 30 Přechod ze ZM do svarového kovu –
hrana natavení

Obr. 31 Svarový kov

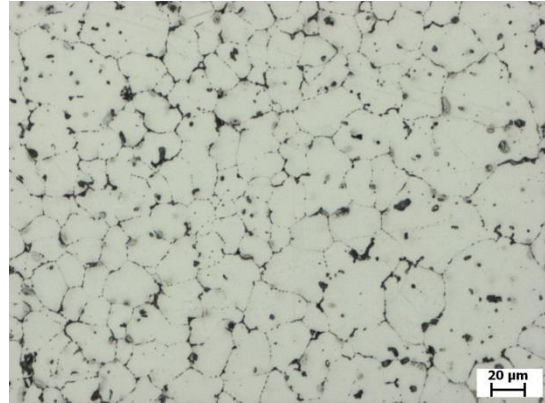
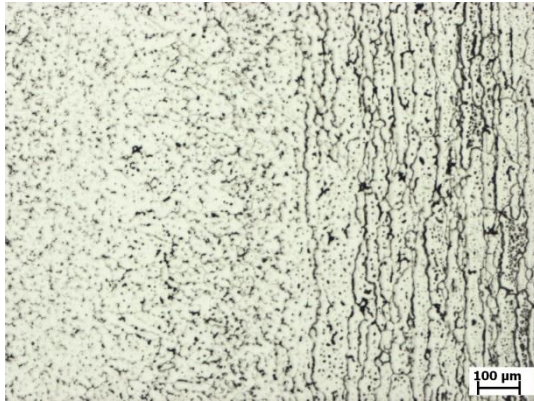
4.4.2. Přídavný materiál 5356



Obr. 32 Přechod ze ZM do svarového kovu –
hrana natavení

Obr. 33 Svarový kov

4.4.3. Přídavný materiál 5087



Obr 34. Přejchod ze ZM do svarového kovu – hrana natavení

Obr. 35 Svarový kov

4.5. Měření tvrdosti

4.5.1. Princip měření metodou dle Vickerse

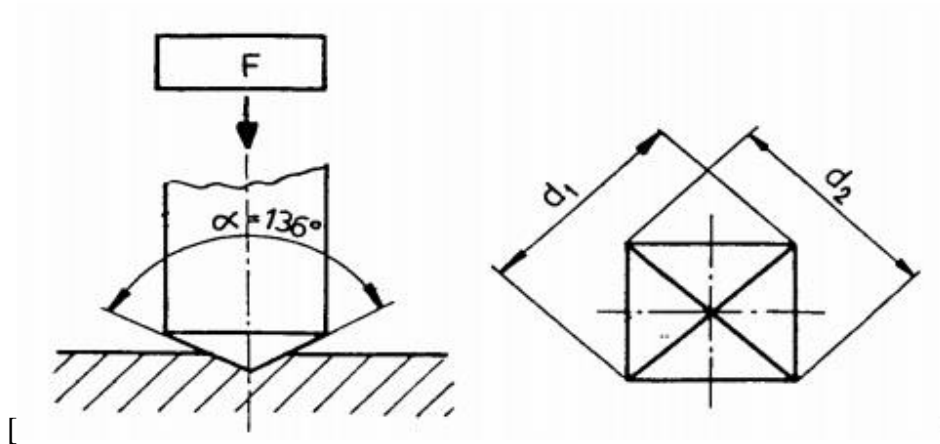
Existují tři typy zkoušek podle Vickerse, které se liší rozsahem použitého zkušebního zatížení podle:

- Část 1: HV 5 až HV 100 - ČSN EN ISO 6507-1
- Část 2: HV 0,2 až HV méně než 5 - ČSN EN ISO 6507-2
- Část 3: Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse (HV méně než 0,2) - ČSN EN ISO 6507-3

Podstata zkoušky je vlačování diamantového tělesa ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami $\alpha = 136^\circ$ (Obr. 37) do povrchu zkušebního tělesa vlivem zkušebního zatížení F působícího kolmo ke zkoušenému povrchu po stanovenou dobu a změření úhlopříček vtisku, který zůstane na povrchu zkoušeného materiálu po odlehčení zkušebního zatížení.

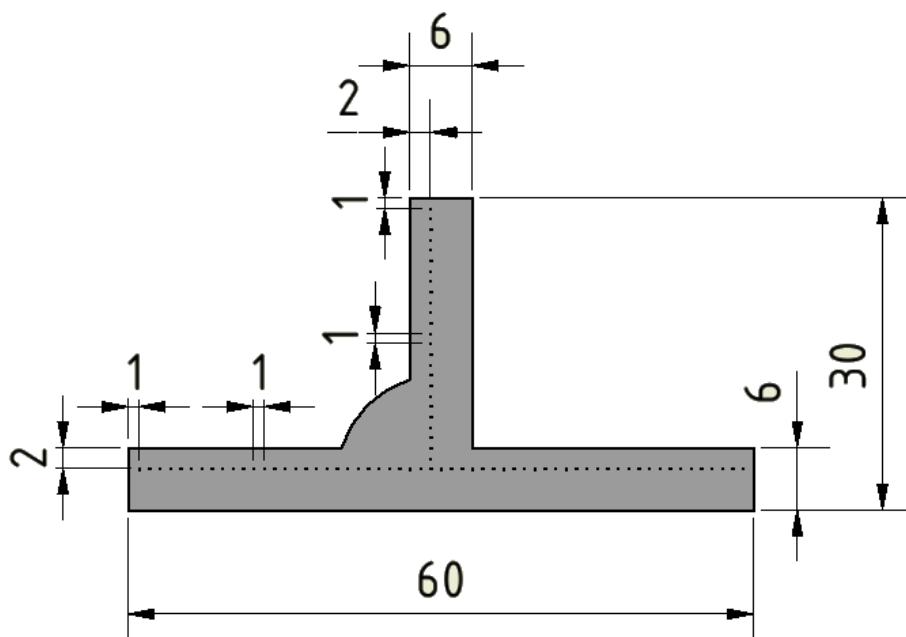
- tvrdost se určuje jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku (má tedy povahu napětí)
- zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujné vrstvy, cizích tělísek a mazadel

- tloušťka zkoušeného tělesa nebo vrstvy musí být alespoň $1,5 \times d$ (d je aritmetický průměr dvou úhlopříček vtisku)
- na protilehlé straně zkušebního tělesa nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace [9]



Obr.36 – Geometrie vlačovacího jehlanu – Martin Staněk, www.martin-stanek.cz [online]. [cit. 18. 6. 2015]. Dostupný na: http://www.stanekmartin.euweb.cz/downloads/vut/2_semestr/bum/03_Tvrдост.pdf

Naše vzorky byly změřeny Mikrotvrdoměr Buehler Met 1105 D, který již automaticky vyhodnotí konečnou tvrdost v měřené oblasti vzorku. Na obr. 37 můžeme vidět geometrii měřených vpichů.

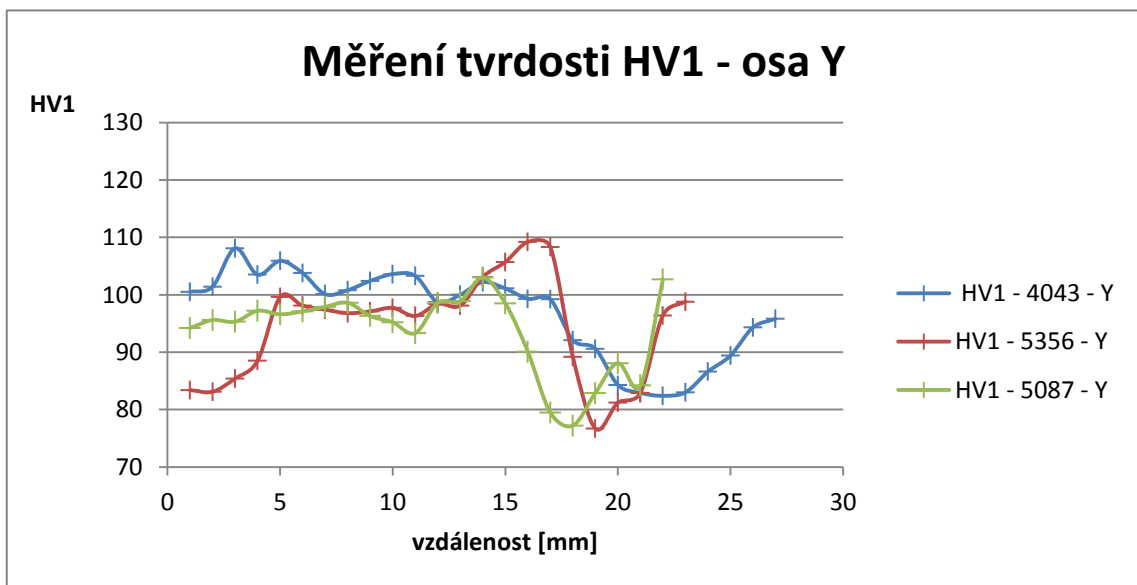


Obr. 37 Geometrie vpichů

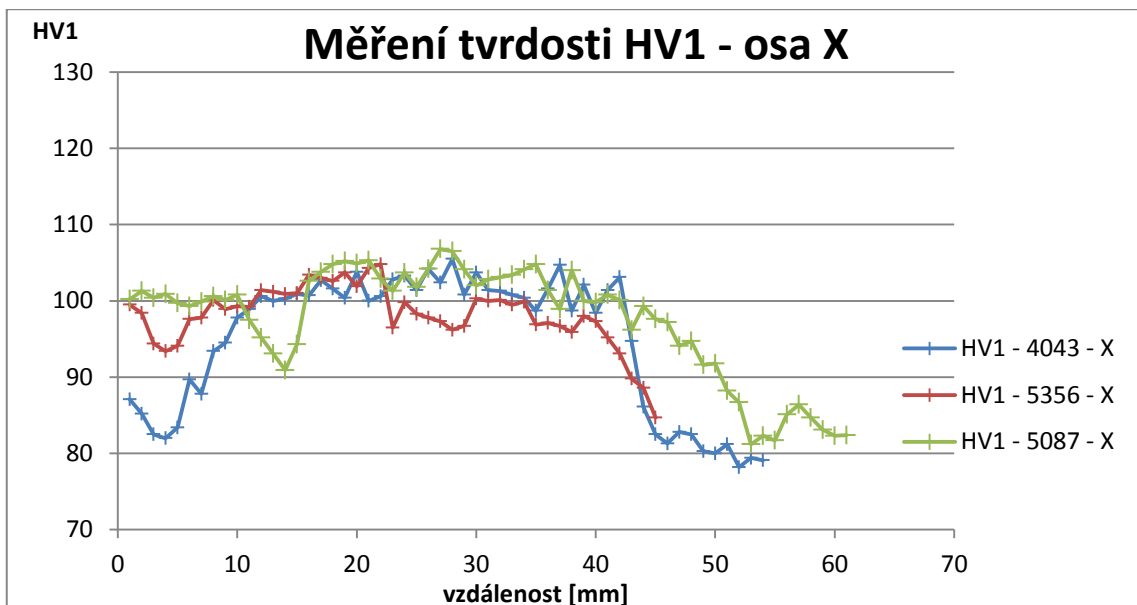
4.6. Vyhodnocení výsledků

Vzorky dle přídavného materiálu byly změřeny ve dvou časových úsecích tak, abychom mohli pozorovat změnu tvrdosti v závislosti na čase. V grafech s osou Y můžeme vidět hodnoty měřené ve svislém směru vzorku. Grafy s osou X nám pak zobrazují hodnoty ve vodorovném směru.

15 dní po svaření:

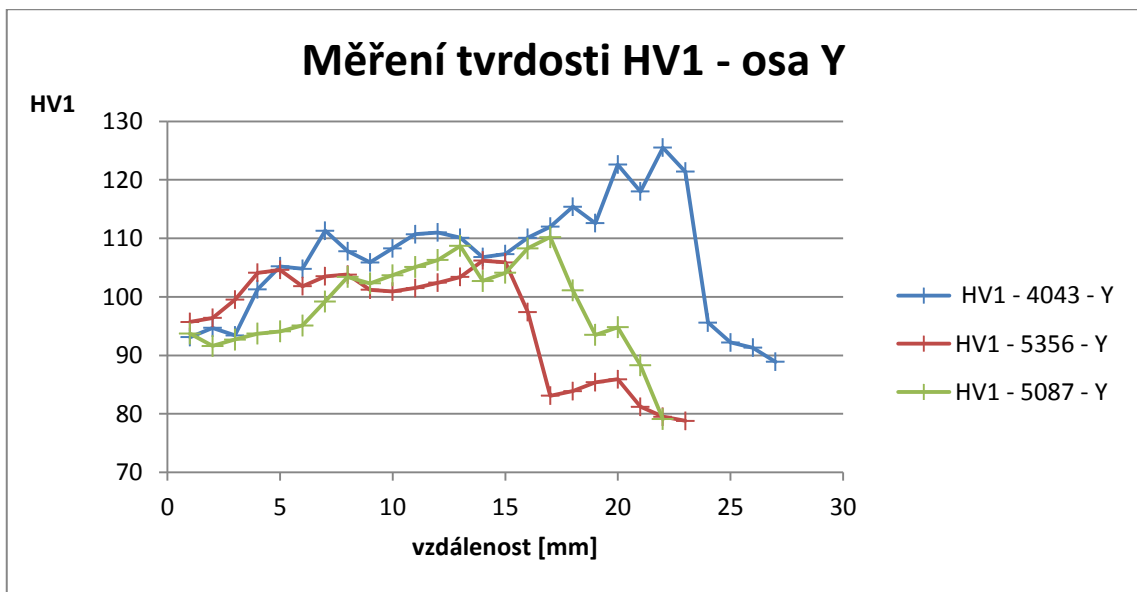


Graf 1 - osa Y

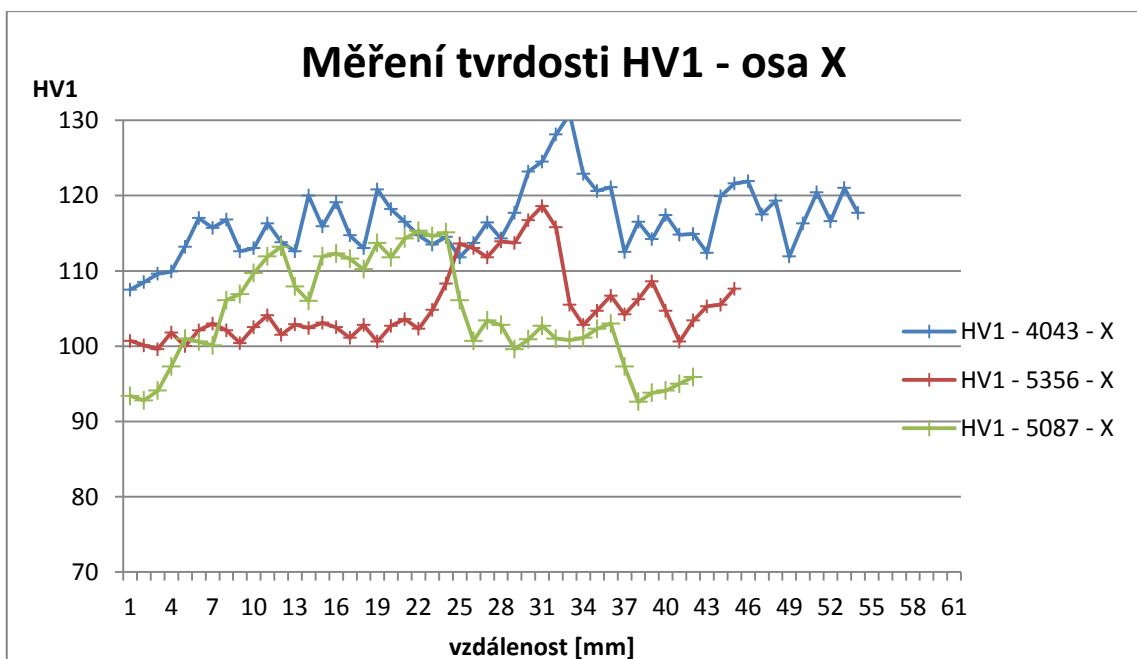


Graf 2 - osa X

30 dní po svaření:



Graf 3 - osa Y



Graf 4- osa X

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit vzorky svarových spojů pomocí metody TIG (Tungsten Inert Gas). Z praxe jeden z nejpoužívanějších materiálů EN AW 7022 ($\text{AlZn}_5\text{Mg}_3\text{Cu}$), byl svařen třemi přídatnými materiály s odlišným chemickým složením. Dále jsem se pak zabýval metalografickým zpracováním vzorků, jakož to doplňkovou činností k této práci.

V teoretické části práce jsem stručně popsal všeobecné informace o hliníku a jeho slitinách, které tvoří základní materiál. Následně pak danou problematiku ke svařovací metodě TIG. Zde jsem začal popisem elektrického oblouku a vhodnou volbou polaritu pro daný případ svaru. V této podkapitole jsem také popsal důležitý jev, který vzniká u metody svařování netavící se elektrodou a to tzv. čistící účinek elektrického oblouku, ke kterému dochází při zapojení na střídavou polaritu. Dalším bodem je typ zapálení oblouku, k němuž může dojít buď bezdotykově díky vysoké frekvenci a napětí při ionizaci plynu, nebo dotykově (tzv. zkratově) dotykem elektrody se základním materiálem. Další neméně důležitou kapitolou je volba ochranných plynů, které nám při svařování zajišťují ochranu wolframové elektrody, svarové lázně a základního materiálu před nežádoucími účinky z okolní atmosféry. V následujícím odstavci je pak rozbor správné volby přídatného materiálu. Ten by se měl volit ze stejně kvalitního nebo kvalitnějšího materiálu, než je materiál základní. Účel přídatného materiálu spočívá v legování svarového kovu a tím snížit riziko vzniku trhlin, dutin a zlepšit formování svaru. Dále jsem se zabýval informacemi k wolframovým elektrodám, jako jsou vhodné průměry pro dané svařovací parametry a přídatné prvky wolframových elektrod. Předposlední kapitola teoretické části je téma svařovacího hořáku. Zde jsou dva největší rozdíly v konstrukci a to chlazení vzduchem nebo případné chlazení kapalinou. Závěr pak patří přípravě svarových ploch.

V úvodu experimentální části jsem vypsál seznam použitých strojů a zařízení. Následně pak znázornil rozměry svařovaných desek základního materiálu. Po svaření jsem provedl informativní rozměrovou kontrolu svarů, zda odpovídají tabulkovým hodnotám. Tyto polotovary se později pomocí pásové pily nařezaly na požadované rozměry. Díky silikonovým formám a formovací hmotě se metodou za studena odlily vzorky pro metalografii. Broušením, leštěním a následným leptáním se dokončily výbrusy, ze kterých byly pořízeny fotografie mikrostruktury a také zde stěžejní bod práce v podobě

měření mikrotvrdości HV1 v závislosti na čase. Výsledné hodnoty měření jsem vynesl do grafů v závěru práce.

Z grafů s výsledky na ose Y můžeme vypořovat mírný nárůst tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti. Následuje výraznější pokles k hranici 75 HV1 v oblasti svarového kovu, kdy při první měření následoval opakovaný nárůst k hodnotě 100 HV1. U pozdějšího měření hodnoty měření nevzrůstají a končí okolo 80 HV1.

Hodnoty na ose X začínají při prvním měření přibližně na 90-100 HV1, což u druhého měření je podobné, stejně jako průběh přes tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov. Zde probíhá mírný nárůst hodnot u měření po 15 dnech k 100 HV1 a u měření po 30 dnech již k hodnotám 115-130 HV1. Dále od svaru a tepelně ovlivněné oblasti hodnoty klesají.

Vyhodnocené měření potvrdily nárůst tvrdosti (mechanických vlastností) po svařování, jak uvádí literatura. Proto je výhodné svařovat tyto slitiny po výsledném tepelném zpracování a konstrukce z nich vytvořené by se neměly zatěžovat ihned po svařování.

6. Použitá literatura

[zdroj 1] SVAŘOVÁNÍ KONSTRUKCE Z HLINÍKOVÉ SLITINY- Bc. Vladimír VEJTASA, dokument dostupný 18. 6. 2015 z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56829

[zdroj 2] Technologie svařování hliníku a jeho slitin - Ing. Jiří Hajdík, Ing. Michal Heinrich, dokument dostupný 18. 6. 2015 z:

http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Svar_hlinik1_2007.pdf

[zdroj 3] BALEJ Z., KUDĚLKA V., OPLETAL J. Základní kurz svařování metodou 141 se souborem testových otázek. 2. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2009. 160 s. ISBN 80-866698-12-2, 2009

[zdroj 4] Hartman Tomáš., Svařování hliníkových slitin wolframovou elektrodou, 2014,

<http://www.is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?zalozka=13;id=10936;studium>

[zdroj 5] MALINA Z., NĚMA M. Základní kurz svařování ZK 141 W 21. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2004. 93 s. ISBN 80-86698-02-5

[zdroj 6] MINAŘÍK V., MINAŘÍK V. Obloukové svařování. 3. vyd. Praha: Scientia, 2007. 240 s. ISBN 978- 80-86960-28-9

[Zdroj 7] MUHLMEIER GMBH., Druhy wolframových elektrod, 2013,

<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006111201>

[Zdroj 8] Hana Šebestová, Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii, 2013,

<http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>

[Zdroj 9] Ing. Jiří Martinec, Evropský systém značení hliníku a jeho slitin, 2014,

http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Znacen%C3%ADAl_2005.pdf

[Zdroj 10] doc. Ing. Jan Bečka, CSc, Přednáška design KON I, 2012,

www1.fs.cvut.cz/cz/u12113/PERSONS/.../predn_design_KON_I_5.ppt

[Zdroj 11] KOUTNÝ, Jiří. Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování [online].

2006 [vid. 2014-04-1]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>.

7. Seznam příloh:

[příloha 1] Inspekční certifikát (3.1) – Chemické složení OK TIGROD 5356

[příloha 2] Inspekční certifikát (3.1) – Chemické složení OK TIGROD 4043

[příloha 3] Inspekční certifikát (3.1) – Chemické složení OK TIGROD 5087